Grenzkosten bei forcierten Energie-Effizienzmassnahmen in Wohngebäuden

Ausgearbeitet durch

M. Jakob, E. Jochem, Centre for Energy Policy and Economics (CEPE) und

K. Christen, Architektur und Baurealisation, ETH Zürich

Im Auftrag des

Bundesamtes für Energie

September 2002

BFE
OFEN
UFE
SFOE

Auftraggeber:

Forschungsprogramm Energiewirtschaftliche Grundlagen des Bundesamtes für Energie; www.ewg-bfe.ch

Auftragnehmer:

PSI, Paul Scherrer Institut, Allgemeine Energieforschung, 5232 Villigen
CEPE, Centre for Energy Policy and Economics, ETH Zürich, 8092 Zürich
HBT, Architektur und Baurealisation, Prof. P. Meyer-Meierling, ETH Zürich, 8093 Zürich

In Zusammenarbeit mit:

Hochschule Technik + Architektur Luzern
Schweiz. Verband für Dach und Wand (SVDW)
Schweiz. Fachverband für Hinterlüftete Fassaden (SFHF)
Schweiz. Gesellschaft für Bauökonomie (AEC)

Autoren:

Martin Jakob, CEPE
Eberhard Jochem, CEPE
Kurt Christen, HBT

Begleitgruppe:

R. Meier, Programmleiter Energiewirtschaftliche Grundlagen
M. Beck, Bundesamt für Energie
H.P. Bürgi, Bürgi&Raaflaub, Bern
T. Fisch, Amt für Umwelt und Energie Basel-Stadt
J. Fournier, Energiefachstelle Wallis
P. Hofer, Prognos, Basel
R. Humm, Energiefachstelle Aargau
E. Jakob, Wasser- und Energiewirtschaftsamt, Kt. Bern
F. Jehle, Amt für Umweltschutz und Energie Basel-Land
H. Jeker, Jeker Blanckarts Architekten, Basel
B. Nietlisbach, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Kt. Zürich
A. Paoli, Energiefachstelle Thurgau
M. Steiner, Energiefachstellenkonferenz
V. Steiner, Bundesamt für Wohnungswesen
M. Stettler, Bundesamt für Energie
R. Vogel, SRT Architekten, Zürich
P. Wittwer, WMI, Bern

2002

Diese Studie wurde im Rahmen des Forschungsprogrammes „Energiewirtschaftliche Grundlagen“ des Bundesamtes für Energie erarbeitet. Für den Inhalt ist alleine der/die Studiennehmer/in verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE
Worblentalstrasse 32, CH-3063 Ittigen • Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. 031 322 56 11, Fax 031 323 25 00 • office@bfe.admin.ch • www.admin.ch/bfe

Vertrieb: BBL, Vertrieb Publikationen, 3003 Bern, www.bbl.admin.ch/bundespublikationen

BBL, Vertrieb Publikationen, Bestellnummer: 805.054 d

cepe
Centre for Energy Policy and Economics
Swiss Federal Institutes of Technology

ARCHITEKTUR UND
BAUREALISATION
PROF. PAUL MEYER-MEIERLING
ETHZ

PAUL SCHERRER INSTITUT
PSI

Grenzkosten bei forcierten Energie-Effizienzmassnahmen in Wohngebäuden

Coûts marginaux des mesures d'efficacité énergétique supplémentaires aux bâtiments d'habitation

Forschungsprojekt in Zusammenarbeit und im Auftrag des

Bundesamts für Energie (BFE)

Forschungsprogramm Energiewirtschaftliche Grundlagen (EWG)

Schlussbericht

In Zusammenarbeit mit der HTA Luzern

Martin Jakob, CEPE
Eberhard Jochem, CEPE
Kurt Christen, HBT

Auftraggeber

Bundesamt für Energie (BFE), Programm Energiewirtschaftliche Grundlagen (EWG)

Zusammenarbeit

HTA Luzern, H. Huber

Schweizerischer Verband für Dach und Wand (SVDW), A. Müggler

Schweizerischer Fachverband für Hinterlüftete Fassaden (SFHF), Ch. Weder

Schweizerische Gesellschaft für Bauökonomie (AEC), St. Häberli

Begleitgruppe

R. Meier (EWG), M. Beck (BFE), M. Stettler (BFE), R. Vogel (SRT Architekten, Zürich), H.P. Bürgi (Bürgi&Raaflaub, Bern), P. Hofer (Prognos, Basel), H. Jeker (Jeker Blanckarts Architekten, Basel), P. Wittwer (WMI, Bern, Energie 2000), J. Fournier (Energiefachstelle VS). Ab November 2001 zusätzlich M. Steiner (Energiefachstellenkonferenz), V. Steiner (BWO), R. Humm (Energiefachstelle AG), A. Nietlisbach (AWEL ZH), F. Jehle (AUE BL), Th. Fisch (AUE BS), E. Jakob (WEA BE), A. Paoli (Energiefachstelle TG)

Projektorganisation

Hauptauftragnehmer	Paul Scherrer Institut PSI
Projektleitung	E. Jochem, CEPE M. Jakob, CEPE
Wissenschaftliche bzw. inhaltliche Sachbearbeitung	E. Jochem, CEPE M. Jakob, CEPE K. Christen, HBT P. Stocker, HBT A. Müller, CEPE
Unterauftrag	H. Huber, HTA Luzern
Sachbearbeitung, Erhebungen	Oliver Streiff, CEPE Alex Primas, CEPE Dominic Abt, CEPE Heike Gerling-Moraschetti, CEPE

Vorwort

In den energiewirtschaftlichen Debatten wird einerseits immer wieder auf das enorm hohe Energieeffizienzpotential der Raumwärme bei Gebäuden hingewiesen, die in der Schweiz etwa 3 % des Endenergiebedarfs erfordert. Hier werden auch etwa 30 % der energiebedingten CO_2-Emissionen freigesetzt, die über viele Jahrzehnte auf einen Bruchteil reduziert werden könnten. Allerdings sind die Erneuerungszeiten bzw. Re-Investitionszeiten von Gebäuden sehr lang. Andererseits wird bei der Frage, wie dieses grosse, aber nur langfristig erschliessbare Potential realisiert werden könne, immer wieder der Eindruck erweckt, dass dies nur mit gewaltigen Zusatzkosten erreicht werden könne und der Staat gar nicht so viele Mittel habe, um hier die nötigen finanziellen Anreize den potentiellen Investoren geben zu können.

Diese Arbeit macht den Versuch, diese nie genauer analysierte Kostenbarriere kritisch zu überprüfen. Denn möglicherweise wurden und werden ungeprüfte ökonomische Bewertungen tradiert, die einen selbst verursachten Attentismus perpetuieren. Wenn Mitte der 1970er Jahre in Europa und in der Schweiz die Neubaustandards für den Raumwärmebedarf von Wohngebäuden bei 500 bis 800 MJ/m² und Jahr lagen und heute bei 200 bis 300 MJ/m² und Jahr liegen, obwohl die Brennstoffpreise Ende der 1990er Jahre real wieder beim Niveau von 1972, d.h. bei jenem vor der ersten Erdölpreiskrise angelangt sind, dann müssen gewaltige technische Fortschritte und Kostendegressionen stattgefunden haben, die man sich für die vergangenen drei Jahrzehnte kaum bewusst macht und die man für die Zukunft als undenkbar zu halten scheint. Vielleicht, so könnte man vermuten, sind diese Zeithorizonte von Jahrzehnten im Zeitalter der vierteljährlichen Share Holder Value Kassenstürze einfach ausserhalb heutiger ökonomischer Bewertungspraxis angesiedelt.

Diese Vermutung wird inzwischen von ersten Unternehmen der Wohnungswirtschaft selbst widerlegt. Erste selbst finanzierte Siedlungserneuerungen mit Wärmebedarfswerten zwischen 110 und 250 MJ/m2 und Jahr, wie z. B. in Ludwigshafen in 2001/2002 realisiert, machen deutlich, dass nicht nur der technische Fortschritt bei Wärmedämmung, Lüftungsverlusten und Komfortlüftung nicht stille steht und die Kosten nach unten tendieren, sondern auch der Nutzen der Erneuerungen vielfältig ist, bei eingesparten Energiekosten beginnt und bei Wertsteigerungen und langfristig vermindertem Leerstandsrisiko des Gebäudes und verbesserter Bonität mit geringeren Zinslasten für Fremdkapital endet. Diese gesamthafte ökonomische Bewertung von Erneuerung und nachhaltig erstellten Neubauten, die in diesem Bericht in ersten Ansätzen versucht wurde, dürfte ein wichtiger Schlüssel sein, sich von dem selbst verursachten Attentismus zu befreien und die langfristig grossen Ressourceneinsparpotentiale auch zu realisieren.

Danke

Dieses Projekt konnte mit der Fülle der gewonnenen Informationen nur durchgeführt werden dank den Beiträgen zahlreicher Unternehmen mit Preisangaben, Kostendaten und technischen Informationen. Allen diesen Unternehmen sei an dieser Stelle unsere grosse Wertschätzung für ihre Beiträge gesagt und herzlich gedankt. Eine Liste dieser Unternehmen ist im Anhang zu finden.

Zu grossem Dank verpflichtet sind wir auch den oben aufgeführten Verbänden, welche die Erhebungen fachlich unterstützt, die Mitgliedfirmen mit Begleitbriefen motiviert und Adressmaterial zur Verfügung gestellt haben, namentlich Herrn Weder (SFHF), Herrn Müggler (SVDW) und Herrn Häberli (AEC). Danken möchten wir auch der HTA Luzern für die Zusammenarbeit, speziell H. Huber für seine Beiträge im Bereich der Wohnungslüftungen.

Expliziten und verbindlichen Dank geht schliesslich an die zahlreichen Unternehmen, welche zu diesem Projekt mit Daten, namentlich Kostendaten beigetragen haben. Das grosszügige Mitwirken dieser Unternehmen und der von ihnen geleisteten Aufwand sowie ihr Sachverstand und ihre Erfahrung bilden die unabdingbare Grundlage der Ergebnisse dieses Projekts. Entsprechend gross ist der Dank, den wir allen diesen Unternehmen aussprechen möchten. Die Liste der Unternehmen befindet sich im Anhang D.

Dem Bundesamt für Energie (BFE) sowie dessen Forschungsprogramm Energiewirtschaftliche Grundlagen (EWG) sowie speziell ihren Vertretern M. Beck, M. Stettler, P. Previdoli und R. Meier danken für ihre Unterstützung, die Flexibilität, die Begleitung und das entgegen gebrachte Vertrauen. Danke auch an das Sekretariat des Programms EWG, H. Lehmann, sowie an OKA, S. Aepli.

Den Mitgliedern der Begleitgruppe ein grosses Danke für die Feedbacks, Kommentare und Anregungen an den Sitzungen und zu den Berichtsentwürfen.

Zum Projekterfolg beigetragen haben ebenfalls die Eigenmittel des Centre for Energy Policy and Economics (CEPE) und des Instituts für Hochbautechnik (HBT, Professur Meyer-Meierling) der ETH Zürich sowie des Paul Scherrer Instituts (PSI). Diesen Institutionen gebührt ebenfalls ein grosses Dankeschön. Danken möchten wir dem PSI und im Speziellen Herrn Wokaun, Herrn Hirschberg und Herrn Kypreos, für ihre Grosszügigkeit, das am PSI begonnene Projekt am CEPE weiterzuführen.

Ausserdem sei den zahlreichen Fachpersonen gedankt, die zu einem der vielfältigen Aspekte des energie-effizienten Bauens mit Auskünften und Fachgesprächen beigetragen haben. Nebst weiteren, hier nicht namentlich genannten, aber durchaus mitgemeinten Personen sind dies B. Gamper, SKS Ingenieure, W. Baumgartner (Ernst Schweizer AG), St. Häberli (AEC), K. Hubschmid (Nebatherm AG), E. Hitz (BWT Bau AG), Th. Frank, Th. Nussbaumer, H. Bertschinger, Herr Simmler (alle EMPA), A. Jochem (FHSO), R. Vogel (SRT Architekten), H. Jeker (Jeker Blanckarts Architekten), H.P. Bürgi (Minergie-Agentur Bau), Ch. Weder (SFHF), A. Müggler (SVDW), A. Nietlisbach (AWEL), R. Gmür (AWEL), Th. Fisch (AUE BS), E. Jakob (WEA BE), P. Wittwer (WMI, Energie 2000), J. Fournier (Energiefachstelle VS), W. Ott (Econcept); A. Huber (Huber Energietechnik), W. Meier (Renggli AG), H. Blattmann (Bürgi & Raaflaub), H. Pignolet (Schweizerische Zentralstelle für Baurationalisierung, CRB), M. Baumann (Marmoran AG), H. Winteler (Flumroc AG (K. Frei (Flumroc AG), R. Oswald und M. Bühlmann (Peikert Contract AG), J. Anderegg (KPMG Fides), K. Viridén (Viridén + Partner U. Moor (Glas Trösch Holding AG), B. Aellig (Sto AG), I. Bachmann, Kurt Kriesi, Thomas Walther, Herr Arnold (alle 4B Bachmann AG), Norbert Buschor, Paul Hutter, A. Gross, Herr Rhyner und Herr Eugster (alle EgoKiefer AG), R. Hunkeler

(Hunkeler AG), D. Lehmann (Lehmann Arnegg AG), Fredy Kaufmann (Aerni Fenster), Herr Widmer (Kicon), Herr Klarer und Herr R. Gredig (Klarer Fenster AG), L. Müller (Häring Fenster + Fassaden AG), A. Baumgartner (Amstein + Walthert), Wenger (Wenger AG Wimmis), Herr Gadola, Herr Jörke (Gadola Fassaden), Herr Schön (Marmoran), Herr Plangger (Greutol), Herr Hautle, Herr Scharpf (Röfix), Herr Spitznagel (ZZ Wancor), Th. Nordmann (TNC), G. Schriber (BFE), W. Kubik (WEA BE), W. Breitenmoser (Alcopor Management AG), A. Binz (FHBB), M. Zimmermann (EMPA), C.U. Brunner (CUB).

En outre nous tenons à remercier beaucoup le service de traduction de l'OFEN, en particulier B. Salis, de la traduction efficace et exacte.

Das Projektteam dankt des weiteren den Mitarbeitern bei diesem Projekt, namentlich Herrn P. Stocker (HBT) und den weiteren Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Instituts für Hochbautechnik der Architekturabteilung der ETH Zürich. Den MitarbeiterInnen und KollegInnen am CEPE und am ISI sei herzlich gedankt für die geleistete Sachbearbeitung, die Mitarbeit bei den Erhebungen, das Lektorat und das Layouten. Namentlich sind dies Susanne Münch, Adrian Müller, Oliver Streiff, Alex Primas, Dominic Abt, Heike Gerling-Moraschetti, Rebekka Köppel, Fabrizio Grossole, Marc Cavigelli, Daniel Hennessy, Christiane Schmid und besonders Renate Schmitz vom ISI, die Übersicht bewahrt und die Fäden, die e-mails und die Faxe in der Hand behalten hat. Den „Beiträgern" von wertvollen und stimulierenden Diskussion, namentlich Bernard Aebischer, Reinhard Madlener, Gürkan Kumbaroglu, Jörg Wild, Cornelia Luchsinger, Michael Kuenzle, Lukas Weber und Silvia Banfi, gebührt ebenfalls ein herzliches Danke. Speziell verdanken möchten wir auch die prompten und speditiven Einsätze der Reprozentrale der ETH Zürich.

Und last but not least ein herzliches Dankeschön auch den Freunden, Familien und Partnerinnen der am Projekt Mitwirkenden für Ihre Unterstützung und ihr Verständnis für die in Anspruch genommene Zeit, die sie missen mussten, namentlich an Barbara und Angelika.

Eberhard Jochem Martin Jakob K. Christen

Inhaltsverzeichnis

Résumé ..... **x**

Problématique, objectifs et méthode ..... **x**
Situation initiale x
Objectifs du présent rapport xi
Aperçu méthodologique xi

Situation initiale des bâtiments: économie et technique ..... **xiii**

Nouveaux bâtiments et rénovations: activités passées et présentes ..... **xiii**

Méthodologie des coûts et avantages des investissements visant à améliorer l'efficacité énergétique (analyse technique partielle) ..... **xv**
Méthodologie de la détermination des coûts et des calculs de rentabilité des coûts directs et des améliorations énergétiques xv

Eléments d'une évaluation économique compréhensive ..... **xviii**
Interprétation économique des coûts relevés xviii
Progrès techniques et dynamique des coûts xviii
Evolution future du prix des énergies xix
Evolution des conditions-cadres – Evaluation du rendement, diminution et vieillissement de la population résidente xix
Avantages supplémentaires pour le particulier et pour la collectivité xx
Coûts externes xxi

Relevés et calculs de coûts et bénéfices ..... **xxi**
Eléments de construction: murs, toit et fenêtres xxii
Isolation des façades et du toit xxii
Fenêtres et cadres de fenêtre xxv
Le bâtiment dans son ensemble xxvi

Avantages supplémentaires des investissements consacrés à l'isolation thermique (co-bénéfices) ..... **xxx**
Coûts et avantages futurs des investissements consacrés à l'efficacité énergétique xxxii

Courbes des coûts concernant l'ensemble de la Suisse ..... **xxxiv**

Conclusions et bilan ..... **xxxvi**
Autre domaine de recherches: approfondir les avantages complémentaires xxxviii

Zusammenfassung ..... **xxxix**

Problemstellung, Zielsetzungen und methodisches Vorgehen ..... **xxxix**
Ausgangslage xxxix
Zielsetzungen des vorliegenden Berichts xxxix
Methodisches Vorgehen im Überblick xl

Die gebäudewirtschaftliche und -technische Ausgangssituation ..... **xli**

Die vergangene und heutige Neubau- und Erneuerungstätigkeit xlii

Methodik der Kosten und Nutzen von Energieeffizienz-Investitionen (einzelwirtschaftliche Partialanalyse) xliii

Elemente einer ganzheitlichen ökonomischen Bewertung xlv
Ökonomische Interpretation der erhobenen Kosten xlv
Technischer Fortschritt und Kostendynamik xlv
Künftige Entwicklung der Energiepreise xlvi
Veränderte Rahmenbedingungen - Bonitätsbewertung, rückläufige und alternde Wohnbevölkerung xlvi
Private und öffentliche Zusatznutzen xlvii
Vermiedene externe Kosten xlviii

Ergebnisse zu einzelwirtschaftlichen Kosten und energetischen Nutzen xlviii
Wärmedämmung von Fassade und Dach xlix
Fenster und Fensterrahmen li
Das Gebäude als Ganzes liii

Begleitende Nutzen (Co-Benefits) von Wärmeschutzinvestitionen lvi
Künftige Kosten und Nutzen der Energieeffizienz-Investitionen lviii

Gesamtschweizerische Kostenkurven lx

Schlussfolgerungen und Fazits lxii

1 Problemstellung, Zielsetzungen und methodisches Vorgehen 1
1.1 Problemstellung und Ausgangslage 1
1.2 Zielsetzungen des vorliegenden Berichts 2
1.3 Methodisches Vorgehen im Überblick 3

2 Die gebäudewirtschaftliche und –technische Ausgangssituation und die Erneuerungstätigkeit im Gebäudebestand 5
2.1 Wohnungswirtschaftliche Ausgangslage und Abgrenzung des Projekts 5
2.2 Besitzer- und Nutzerverhältnis und andere Hemmnisse der Energieeffizienz in Wohngebäuden 6
2.3 Architektonische Gliederung des Gebäudebestandes 7
2.3.1 Gebäudeformen, Flächen- und Längenverhältnisse 7
2.3.2 Ästhetische und denkmalpflegerische Aspekte 11
2.4 Gliederung des Gebäudebestandes nach wärmetechnischen Gesichtspunkten sowie die Bauweise in Abhängigkeit der Bauperioden 12
2.5 Die vergangene und heutige Erneuerungstätigkeit unter energiewirtschaftlichem und energietechnischem Blickwinkel 17
2.5.1 Datenlage, Ausgangslage und Überblick 17
2.5.2 Fassadenerneuerungen 20
2.5.3 Fenstererneuerungen 24
2.5.4 Dacherneuerungen 28
2.5.5 Kellerdecke 33
2.5.6 Art der Erneuerungen, Massnahmenkombinationen 34
2.6 Marktvolumen und -anteile der opaken Bauteile, Wärmedämmstoffe und Fenster 35
2.7 Fazit 38

3 Die Charakterisierung der heutigen Neubautätigkeit 39
3.1 Neubau und Ersatzneubau 39
3.1.1 Energetische und bautechnische Charakterisierung auf Gebäudeebene 39
3.1.2 Bauteile und bauliche Varianten 44

4 Kosten und Nutzen von Energieeffizienzinvestitionen im Wohngebäudebereich .. 49
4.1 Methodisches Vorgehen zur Kostenermittlung und zu den Wirtschaftlichkeitsrechnungen 49
4.1.1 Annahmen zur Kostenermittlung und zu energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen 49
4.1.2 Kosten- und Wirtschaftlichkeitsrechnungen sowie Grenzkostenbetrachtungen aus Sicht der Hauseigentümer, der Immobilienwirtschaft und der Gesamtwirtschaft 52
4.1.3 Grenzen und Sensitivitäten der Kosten- und Wirtschaftlichkeitsberechnungen 59
4.2 Methodik und Grundlagen zur Bestimmung des energetischen Nutzens der Energieeffizienz-Investitionen 63
4.2.1 Aussenwärmedämmung mittels hinterlüfteter Fassaden 63
4.2.2 Aussenwärmedämmung mit Kompaktfassaden 63
4.2.3 Fensterleibungen 64
4.2.4 Balkonplatten 67
4.2.5 Anschluss Flachdach 68
4.2.6 Natürlicher Luftwechsel und Lüftungsanlagen 69
4.2.7 Fenster 76
4.2.8 Heizwärmebedarf in Funktion der Fensterflächenanteile 82
4.2.9 Methodische Hinweise zur Bestimmung der energetischen Wirkung von Energieeffizienz-Massnahmen im Gebäudekontext 87
4.2.10 Berechnung des Wärmeleistungsbedarfs 90
4.2.11 Passivhaus 94
4.3 Kosten und energetische Nutzen von Energieeffizienzinvestitionen mit Kostenstand 2000 unter technischem Blickwinkel 97
4.3.1 Determinanten der Kosten in Abhängigkeit der energetischen Effizienz, Unterschiede zwischen Neubau und Erneuerung und Methodisches zur Datenerhebung 97
4.3.2 Methodische Hinweise zur Kostenermittlung im Bereich Wand und Fassade 99
4.3.3 Kompaktfassaden 100
4.3.4 Hinterlüftete Fassaden 114
4.3.5 Holzsystembau (Neubau) 127
4.3.6 Verglasungen 129
4.3.7 Das Fenster als Gesamtsystem 133
4.3.8 Dach 169
4.3.9 Kellerdecke, Bodenplatte 192
4.3.10 Wärmebrücken 192
4.3.11 Zusammenfassung der Grenzkosten für die verschiedenen Investitionsmassnahmen 194
4.3.12 Lüftung, Luftdichtigkeit der Gebäudehülle 196
4.3.13 Heizanlagen und Luftheizungen in Funktion der energetischen Qualität der Gebäudehülle 203
4.3.14 Fazit des empirischen Kapitels 207
4.4 Zusatzkosten und –nutzen energieeffizienter Wohnneubauten mit Kostenstand 2000 209
4.4.1 Methodisches Vorgehen 211

4.4.2 Top-down-Ansatz – Ergebnisse statistischer Auswertungen von Neubauten ... 212
4.4.3 Bottom-up Ansatz (Einfamilienhäuser und Mehrfamilienhäuser) ... 216
4.4.4 Jahreskosten von weiteren Neubaukonzepten ... 242
4.5 Dynamisierung der Kosten und energetischen Nutzen von Wärmeschutzinvestitionen bis 2030 ... 244
4.5.1 Methodische Hinweise zu Lerneffekten und Skaleneffekten – Erfahrungskurven ... 244
4.5.2 Wärmedämmung bei Fassaden ... 250
4.5.3 Fenstersysteme ... 255
4.5.4 Lüftungsanlagen ... 260
4.5.5 Neubauten: Dynamisierung des bottom-up Ansatzes durch neue Technologien ... 261
4.5.6 Dynamisierung von Neubaukonzepten durch industrielle Vorfertigung ... 261
4.6 Nicht-energetische Nutzen, Co-Benefits ... 264
4.6.1 Methodisches Vorgehen ... 265
4.6.2 Wohnkomfort durch verstärkten Wärmeschutz ... 266
4.6.3 Geringere Lärmbelastung ... 267
4.6.4 Bessere Raumluftqualität ... 269
4.6.5 Grössere Wohnraumfläche ... 271
4.6.6 Verbesserte Einbruchssicherung und weitere Nebeneffekte ... 271
4.7 Vermiedene externe Kosten durch zusätzliche Wärmeschutzinvestitionen ... 273

5 Referenzentwicklung des Gebäudebestands 2000 – 2030 ... 275
5.1 Die Referenzentwicklung des Gebäudebestandes mit Neubau und Abriss ... 275
5.1.1 Einfamilienhäuser ... 276
5.1.2 Mehrfamilienhäuser ... 277
5.2 Die künftigen Erneuerungen im Wohngebäudebestand in der Referenzentwicklung ... 278
5.2.1 Definition der Referenzfälle für 2001 bis 2010 ... 279
5.2.2 Mengengerüst der Referenzentwicklung ... 280
5.2.3 Energetische Beschreibung der Referenzentwicklung im allgemeinen ... 282
5.2.4 Detaillierte Beschreibung der Referenzentwicklung am Beispiel der EFH der Bauperiode 1900 - 1960 ... 283

6 Gesamtschweizerische Grenzkostenkurven des Wärmeschutzes (für Energiesystemmodelle) ... 285
6.1 Neubau: heutiger Kostenstand und wichtige Einflüsse für Ein- und Mehrfamilienhäuser ... 286
6.1.1 Spezifische Grenzkostenkurven auf Gebäudeebene ... 286
6.1.2 Aggregation der Grenzkostenkurven auf die gesamtschweizerische Ebene ... 296
6.2 Integration der Co-Benefits in die Grenzkostenkurven ... 301
6.3 Grenzkosten mit Einschluss der Lern- und Skaleneffekte (dynamisierte Kosten) ... 303
6.3.1 Beispiel einer Grenzkostenkurve mit dynamisierten Kosten ... 303
6.3.2 Dynamik der Kosten in Funktion der Marktentwicklung bzw. des Marktumfeldes (bzw. der energiepolitischen Rahmenbedingungen) ... 304
6.3.3 Wahl der Dämmstärke in der dynamischen Betrachtungsweise ... 305
6.4 Erneuerung des Gebäudebestandes 2001 bis 2010 ... 307
6.4.1 EFH der Bauperiode 1900 bis 1960 ... 307
6.4.2 Bauperiode 1961 - 1975 ... 309
6.4.3 Bauperiode 1976-1985 ... 309
6.5 Erneuerung des Gebäudebestandes mit dynamisierten Kosten und technischen Kennwerten am Beispiel der Einfamilienhäuser der Bauperiode 1900 - 1960 ... 311

7 Schlussfolgerungen, Empfehlungen und Grenzen der Untersuchung 313
7.1 Schlussfolgerungen 313
7.1.1 Energietechnische Aspekte 313
7.1.2 Betriebs- und wohnungswirtschaftliche sowie planerische/architektonische Aspekte 315
7.1.3 Energiewirtschaftliche und klimapolitische Schlussfolgerungen 319
7.1.4 Methodische Anmerkungen 321
7.2 Empfehlungen für Energiepolitik, die Wohnungs- und die Bauwirtschaft 322
7.3 Grenzen und Unsicherheiten der vorliegenden Analyse 324
7.4 Weiterer Forschungsbedarf 325

8 Literaturverzeichnis 327

9 Abkürzungsverzeichnis 335

A Wand- und Dachflächen im Wohngebäudebestand 339

B Erhebung Fenster 341
B.1 Erhebung Fenster 341
B.2 Beschreibende Statistik 343

C Heizwärmebedarf in Funktion verschiedener Einflussfaktoren 353
C.1 Energiebilanz von Fenstern, Sensitivitätsrechnungen 353
C.2 Heizwärmebedarf in Funktion der Fensterflächen 356
C.3 Sensitivitätsrechnungen: Grenzkosten der Vergrösserung der Fensterflächen 359

D Lüftungsanlagen 361
D.1 Grenzkosten der Lüftungsanlagen bei höheren Baukosten 361

E Liste der Daten liefernden Unternehmen 363
E.1 Fassaden und Dämmstoffe 363
E.2 Dach 363
E.3 Glas 365
E.4 Grosse und/oder innovative sowie zufällig ausgewählte Fensterfirmen 365
E.5 Verschiedene 367

Résumé

Problématique, objectifs et méthode

Situation initiale

En Suisse, le chauffage des bâtiments totalise aujourd'hui, à lui seul, 50 % de la demande d'énergie utile et près de 33 % de la demande d'énergie finale. Du point de vue du potentiel d'amélioration de l'efficacité énergétique, il s'agit donc d'un poste-clé. Or, les besoins d'énergie utile (p. ex. selon la norme MINERGIE) sont en réalité de deux tiers environ inférieurs à la consommation énergétique moyenne effective du parc immobilier. Dans le cas des maisons solaires ou passives nouvellement construites, ce facteur peut même être de un cinq jusqu'à un à dix.

Si l'on procède à la simulation des différentes étapes d'exploitation de ce potentiel en se fondant sur des modèles propres à l'économie énergétique ou que l'on examine de plus près les mesures de politique énergétique et climatique envisageables, l'évolution des coûts marginaux représente une source d'information capitale pour apprécier les investissements forcés visant à améliorer l'efficacité énergétique. En Suisse, toutefois, les informations d'ensemble disponibles à ce sujet sont déjà anciennes; par conséquent, elles ne sont guère représentatives des nouvelles constructions et du parc des bâtiments rénovés. Elles sont en outre entachées d'incertitudes. Par ailleurs, les investissements à des fins d'isolation thermique opérés dans ce secteur ont débouché, au cours des années 1990, sur d'importantes améliorations techniques et sur de réelles économies, que les données à disposition, généralement dépassées, conduisent à minimiser (il n'était guère possible alors d'estimer la rentabilité de telles mesures).

Les technologies visant à accroître l'efficacité énergétique de l'enveloppe des bâtiments et celle des techniques de chauffage sont souvent récentes, ou font appel à de nouveaux matériaux, concepts de construction ou procédures de traitement. Elles sont parfois riches en enseignements ou offrent un réel potentiel de production en série susceptible de réduire à l'avenir leurs coûts. On peut donc estimer que les coûts marginaux vont baisser sous l'effet des progrès futurs. Cet aspect a toutefois été très peu étudié: les modèles actuels de l'économie énergétique s'en tiennent à des hypothèses rudimentaires et, d'ailleurs, la dégression des coûts n'avait jamais été prise en compte dans le secteur du bâtiment (Hieber 1992, Messner 1997).

Enfin, les investissements supplémentaires dans des améliorations énergétiques des bâtiments présentent souvent des avantages secondaires (co-bénéfices) déterminants pour faire accepter lesdits investissements (p. ex. confort d'habitation et facilité de mise en œuvre, isolation phonique, sécurité accrue). Là aussi, la valeur monétaire de ces co-bénéfices n'a fait l'objet que d'estimations sommaires dans le cadre d'évaluations d'ensemble, dans les analyses de l'économie énergétique comme dans le secteur du marché immobilier (IPCC 2001). Or, ces aspects se prêtent à une évaluation économique bienvenue tant pour l'économie du logement que pour les locataires et les maîtres d'ouvrage: d'une part, l'évaluation porte sur une période suffisamment longue, d'autre part, elle tient compte du caractère multifonctionnel de tels investissements.

Objectifs du présent rapport

Au vu de la problématique évoquée plus haut, le présent projet de recherche poursuit les objectifs suivants dans le domaine des bâtiments d'habitation:

- améliorer sensiblement, par rapport à l'information disponible sur le plan suisse, l'état des connaissances tirées de l'expérience sur les coûts marginaux des mesures supplémentaires en matière d'efficacité énergétique qui pourraient revêtir une importance considérable dans les 10 à 30 prochaines années pour l'économie énergétique et la politique climatique (isolation thermique, fenêtres, ventilation);
- établir autant que possible les courbes d'efficacité des coûts pour les nouvelles constructions et les rénovations du parc immobilier sur une base empirique; ces courbes reflèteront l'état le plus récent de la technique, de la conception et de la réalisation de constructions, ainsi que les procédures de calcul des coûts;
- outre le fait de faciliter les analyses de l'économie énergétique, faire en sorte que les acteurs du marché immobilier – propriétaires, maîtres d'ouvrage, producteurs de technologies, planificateurs et entreprises d'installation – perçoivent mieux les rapports entre les coûts et les avantages et, dans la mesure du possible, dispensent une information ciblée à leurs propres publics-cibles;
- pour autant que le budget de recherche le permette, présenter les coûts (et les avantages) de manière différenciée et transparente afin, d'une part, de refléter la diversité des bâtiments existants, des investissements et des concepts de construction envisageables pour améliorer l'efficacité énergétique, et, d'autre part, de faciliter les corrections en fonction de l'évolution des connaissances sur les coûts (ou les avantages) directs;
- vérifier et expliciter l'influence de l'évolution de référence retenue pour le montant des coûts marginaux, puisque sa définition est le fruit d'une décision somme toute assez subjective.

Enfin, sur la base des résultats des travaux, il devrait être possible d'inférer, pour les divers acteurs concernés, des conclusions et (si possible) des recommandations importantes.

Aperçu méthodologique

Les objectifs précités sont trop différents pour permettre de présenter ici l'ensemble de la méthodologie. Les diverses méthodes employées n'étant évoquées ici que de manière succincte, le lecteur se reportera au chapitre concerné.

Afin de déterminer les coûts marginaux et les avantages respectifs des mesures imposées en matière d'efficacité énergétique dans le secteur des bâtiments d'habitation, il a fallu examiner – ou distinguer – les aspects suivants (cf. également l'illustration R.1):

- Les investissements accompagnent une rénovation qui aurait eu lieu de toute façon, ou une nouvelle construction; d'où la nécessité de définir un cas de référence pour les types de bâtiments et les cas d'investissement (nouvelles constructions, rénovations).
- Dans le cas des rénovations, en particulier, il a fallu traiter séparément les mesures portant sur l'enveloppe des bâtiments, le renouvellement de l'air et la technique de chauffage; une même démarche a été tentée avec les nouvelles constructions conventionnelles (bottom-up), tandis qu'une approche intégrée se justifiait pour les maisons MINERGIE ou passives.
- Des enquêtes complexes ont été nécessaires auprès des entreprises de construction, des économistes de la branche, des fabricants et des cantons, afin de préciser la pratique en vigueur dans la construction, la structure actuelle des bâtiments d'habitation (y compris les investissements dans l'isolation thermique réalisés par le passé, cf. chapitres 2, 3 et 4.5), la

structure actuelle ou passée des coûts ainsi que des marchandises produites. Or, ces enquêtes se sont avérées très lourdes.

- Le relevé ou l'estimation des coûts des divers investissements portant sur l'efficacité énergétique et l'évaluation des avantages énergétiques ou non énergétiques qui en découlent ont été replacés dans le contexte général des investissements opérés au titre de rénovation ou de construction. Il s'agissait d'une opération très complexe, qui n'a parfois pu être que partiellement réalisée.
- Les données empiriques ont été réunies par catégorie d'investissements et en fonction des types de bâtiments. Elles ont ensuite servi à établir des courbes dégageant les potentiels d'économies de coûts (compte tenu de la fréquence relative desdits investissements sur le plan suisse) par rapport à l'économie énergétique. Or cette opération a une valeur exemplaire. Elle a par ailleurs révélé l'importance de la définition d'une variante de référence pour les divers cas d'investissements.
- Afin de garantir une transparence maximale reflétant bien la diversité des acteurs, les utilisateurs nets (ou les coûts nets) ont été traités séparément, en tenant compte des co-bénéfices et des coûts externes évités. La présente analyse ne présente toutefois que des exemples ponctuels.

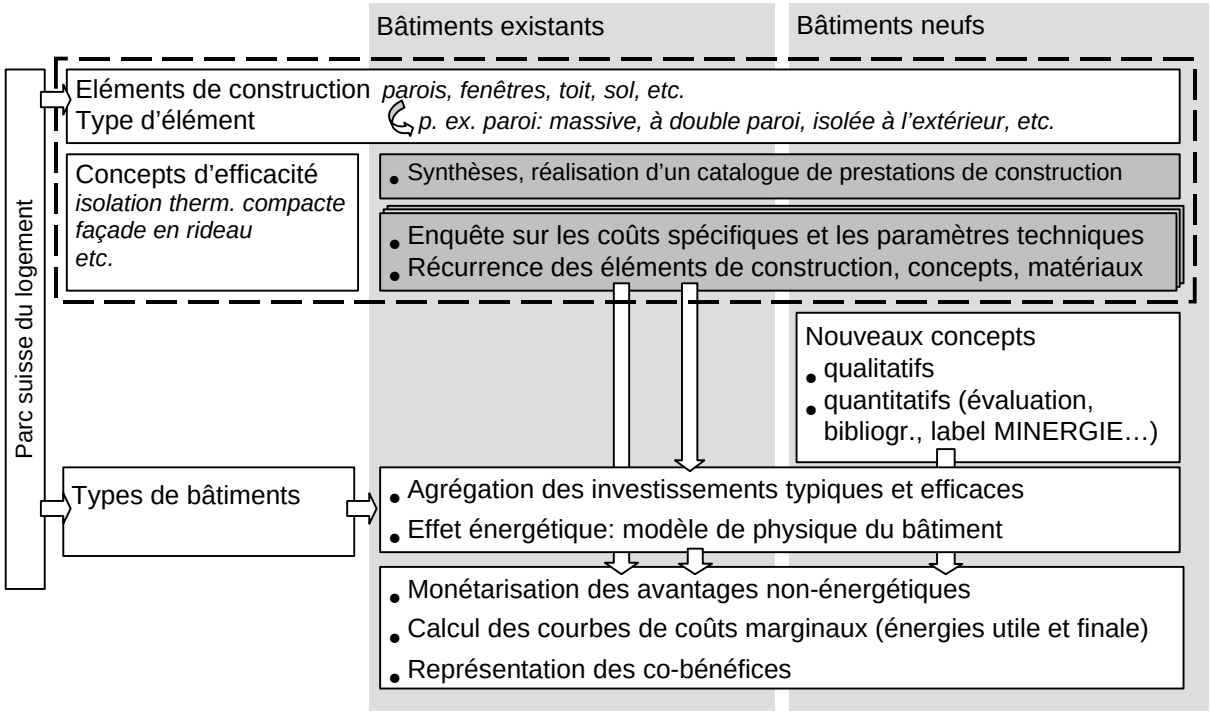


illustration R.1 Procédure d'analyse pour déterminer les coûts marginaux des investissements supplémentaires dans des améliorations énergétiques des logements

Situation initiale des bâtiments: économie et technique

Différents facteurs ont influencé et continuent d'influer sur les méthodes de construction et activités de rénovation passées, présentes et futures. De tels facteurs ont une incidence non seulement sur les décisions d'investissement et la fréquence des rénovations qui en découle, mais également, par une sorte d'effet rétroactif, sur les coûts, les améliorations énergétiques ainsi que d'autres avantages induits par les mesures de rénovation appliquées. Une classification systématique, sous l'angle de la gestion d'entreprise (état des bâtiments, rendement effectif, potentiel de rendement, aspects liés au financement, rapport propriétaire/utilisateurs), des différents cas de figure, servant de point de départ à un examen économique individuel conclusif des mesures d'efficacité du point de vue de leur rentabilité aurait été bien trop lourde à mettre en œuvre. De surcroît, elle aurait nettement dépassé le cadre du présent projet. Il serait néanmoins utile de connaître les tenants et aboutissants de ces interactions jusqu'à présent peu étudiées de manière empirique. Cela permettrait notamment de mieux comprendre le comportement des investisseurs et des propriétaires fonciers privés, d'élaborer un modèle de la rénovation du parc immobilier ou de tirer profit des potentiels existants en matière d'efficacité énergétique.

Le présent projet de recherche s'efforce cependant d'élaborer une approche des coûts marginaux portant sur les coûts et avantages supplémentaires engendrés par les mesures de promotion de l'efficacité énergétique, de même que sur les potentiels que renferment ces mesures. Un cas de référence, dont les coûts et avantages supplémentaires ont été mesurés, sert de base et de situation initiale à notre approche des coûts marginaux. Pour les nouvelles constructions, on examinera la méthode de construction; pour les rénovations de bâtiments existants, l'état du parc immobilier et les activités de rénovation.

Complétant nos propres relevés par des données tirées d'études empirique, nous avons pu mettre en évidence l'amélioration continue des propriétés énergétiques des nouvelles constructions, cette évolution prenant naissance vers le milieu des années 1970. On constate que, peu à peu, l'épaisseur de l'isolation assurée par des matériaux calorifuges est passée d'env. 4 cm à 10–12 cm (façades), resp. 12–14 cm (toitures), la perte d'énergie spécifique s'améliorant de ce fait jusqu'à un facteur d'env. 1:4 par rapport à l'efficacité énergétique de bâtiments non isolés. L'un des phénomènes les plus marquants est le progrès technico-économique réalisé au niveau des fenêtres et du vitrage, domaine dans lequel l'efficacité énergétique et économique actuelle représente un multiple de ce qu'elle était auparavant. A coûts pratiquement égaux, l'indice d'isolation thermique (valeur isolante) des vitres a chuté d'env. 3.0 W/m^2K, au début des années 1970, au niveau actuel de 1.1 W/m^2K.

Nouveaux bâtiments et rénovations: activités passées et présentes

Effectuée sur mandat de l'OFEN (Wüest und Partner, 2000), une recherche empirique révèle, pour les nouvelles constructions, des valeurs spécifiques de consommation énergétique de près de 400 MJ/m^2a (y c. consommation d'eau chaude et pertes de rendements). Ce chiffre semble indiquer que les 12 cm, resp. 14 cm précédemment mentionnés sont loin d'être généralisés. De même, la dispersion constatée eu égard à la consommation énergétique spécifique des nouvelles constructions indique que le cas de référence énergétique présente une certaine amplitude de variation, laquelle se répercute sur les coûts marginaux.

L'élan initialement imprimé par les nouvelles constructions s'est également transmis au secteur de la rénovation, excepté lorsque l'aspect énergétique n'était pas pris en compte dans les projets de rénovation. Les rénovations liées à la question énergétique font appel à des matériaux isolants d'épaisseur et à des fenêtres de qualité identiques à ceux utilisés pour les

nouvelles constructions. Les particularités techniques d'une construction et l'organisation des travaux imposent parfois des compromis (pas ou peu d'isolation des éléments de construction situés près des raccords: embrasures de fenêtre, bords de toits plats, passages dans un mur, une paroi ou vers le toit, pieds de mur). De plus, la rénovation de l'enveloppe des bâtiments n'est pas toujours intégrale, comme l'ont révélé l'examen de certains bâtiments et les entretiens auprès des entreprises spécialisées dans la couverture ou le ravalement des façades (cf. chapitre 2). La consommation énergétique des bâtiments rénovés n'atteint donc que rarement le bas niveau des nouvelles constructions actuelles. Il n'en demeure pas moins qu'il est tout à fait possible, du point de vue des techniques de construction, de parvenir à ces niveaux, voire plus bas encore. Ce fait est d'ailleurs clairement mis en évidence par les nombreux projets Minergie et P&D déjà réalisés à ce jour.

La proportion des éléments longitudinaux spécifiques ainsi que les méthodes de construction choisies – ou imposées par la situation – sont susceptibles d'induire des mesures de construction supplémentaires. Par ailleurs, en cas de compromis, qu'ils fussent obligés ou évitables, avec des éléments situés sur une même ligne tels qu'embrasures de fenêtre, pieds de mur, etc., elles peuvent aussi réduire l'efficacité énergétique des mesures appliquées sur de grandes surfaces.

Du point de vue des différences de coûts potentielles, le parc immobilier est caractérisé par les méthodes de constructions passées et les formes des édifices. Pourtant, au fil du projet, il est par exemple apparu que les murs et parois préexistants avaient une incidence somme toute minime sur les investissements propres à améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments. La pose d'une isolation thermique externe, qu'elle soit nouvelle ou complémentaire, s'avère en effet appropriée tant pour des bâtiments de type monolithique qu'avec des constructions dotées soit de murs à double paroi, soit de murs en béton, ou déjà munies d'une première isolation thermique externe. Les coûts supplémentaires découlant de l'augmentation d'épaisseur de l'isolation thermique sont à peu près identiques pour la variante d'isolation appropriée à chaque cas (façades ventilées, façades compactes). Dans certains cas, on constate naturellement des différences d'un bâtiment à l'autre; il convient alors de déterminer la variante la plus adéquate en fonction de la situation spécifique de chaque bâtiment. Cette remarque s'applique aussi aux aspects de physique du bâtiment. Néanmoins, dans 35% à plus de 60% des bâtiments, des problèmes pourraient par exemple survenir en cas de remplacement des seules fenêtres, ce qui rendrait le bâtiment trop étanche.

On a trop souvent négligé les rénovation en général, la question de l'efficacité énergétique. Entre un quart et un tiers seulement des rénovations de façades effectuées ont tenu compte de l'aspect énergétique. Les autres rénovations ne portaient que sur des améliorations cosmétiques. La proportion des rénovations tenant compte de l'aspect énergétique est un peu plus élevée dans le cas des fenêtres et des toitures; dans le cas des fenêtres, surtout parce qu'au cours de ces 15 à 25 dernières années, «rénover une fenêtre» signifiait la plupart du temps «changer de fenêtre» et que les progrès techniques réalisés dans l'intervalle étaient tels que seules des fenêtres présentant de bien meilleures performances isolantes étaient disponibles sur le marché. Globalement, cependant, le potentiel de réduction de la demande d'énergie du parc immobilier est toujours considérable, puisque la part des éléments de construction qui n'ont encore jamais été soumis à une optimisation énergétique oscille encore entre 30% et 80% suivant les éléments de construction (toiture, murs, fenêtres, plafonds de cave, etc.).

Méthodologie des coûts et avantages des investissements visant à améliorer l'efficacité énergétique (analyse technique partielle)

L'un des principaux objectifs du projet était de mieux connaître les coûts marginaux engendrés par les investissements, resp. les mesures **supplémentair(e)s** afin d'optimiser l'efficacité énergétique et de leur donner une nouvelle base empirique. La première phase consiste à présenter la procédure méthodologique concernant les données empiriques ainsi que le calcul des coûts marginaux relatifs aux coûts directs et aux améliorations énergétiques. Une évaluation économique d'ensemble fondée sur divers aspects (long terme, autres bénéfices, environnement du marché dans lequel les relevés ont été opérés, contexte de politique énergétique et environnementale) s'avère nécessaire dans une seconde phase.

Méthodologie de la détermination des coûts et des calculs de rentabilité des coûts directs et des améliorations énergétiques

Une discussion d'ordre méthodologique a d'abord été menée sur le caractère approprié des diverses méthodes de détermination des coûts marginaux, seules les méthodes dynamiques étant toutefois abordées. La méthode par annuité et la prise en compte de la valeur en capital ont été examinées de près. L'économie des bâtiments fait de plus en plus souvent appel à la méthode du «*discounted cashflow*» (actualisation des flux de trésorerie). Pour l'appliquer, il aurait toutefois fallu disposer d'une multitude de données concernant les flux des capitaux des objets concernés, données malheureusement impossibles à relever de manière représentative dans le cadre de ce projet. En fin de compte, le présent projet se fonde sur la méthode par annuité, les coûts marginaux étant quant à eux calculés suivant deux approches distinctes.

Quel est le coût supplémentaire d'une plus grande épaisseur d'isolation et quel gain d'efficacité énergétique et quelles autres réductions de coûts permet-elle d'obtenir? Pour répondre à cette question, nous nous sommes appuyés sur la méthodologie suivante:

- **Relevés directs** auprès des entreprises: structure des coûts des isolants pour façades et toitures en fonction de leur épaisseur, prix des vitres et des fenêtres et installations d'aération sur la base d'indications techniques de référence chiffrées en matière énergétique ou de leur efficacité de ventilation.
- **Détermination de l'effet énergétique,** donc du gain d'efficacité énergétique (=économies supplémentaires au niveau de la consommation d'énergies de chauffage) des diverses mesures d'optimisation de l'efficacité énergétique par le calcul des indices d'isolation thermique, resp. au moyen d'un modèle de physique du bâtiment (SIA 380/1).
- **Détermination des coûts annuels** par la méthode par annuité tout en tenant compte de la durée de vie spécifique.
- **Définition des cas de référence pertinents.**
- **Calcul des coûts marginaux** par rapport à la référence **(principe des coûts moyens)** resp. par rapport au précédent niveau d'efficacité énergétique **(principe des coûts marginaux nets).**
- **Résumé** de diverses mesures en matière d'investissement sur la base des coûts marginaux spécifiques sous forme de **faisceaux de mesures** resp. de **paquets d'investissements.**

Les coûts marginaux sont définis comme suit:

$$\textit{Coûts marginaux (estimation des coûts moyens)} = \frac{\textit{Différence de coûts annuels par rapport à la référence}}{\textit{Gain defficacité énergétique correspondant}}$$

$$\textit{Estimation des coûts marginaux nets} = \frac{\textit{Différence de coûts annuels par rapport au niveau defficacité antérieur}}{\textit{Gain defficacité énergétique correspondant}}$$

Les deux approches se caractérisent comme suit:

- Estimation des coûts moyens (coûts et avantages supplémentaires par rapport à la nouvelle construction ou à la méthode de rénovation de référence): cette approche convient à la comparaison de diverses variantes par rapport à une variante de référence, surtout pour les propriétaires fonciers, les propriétaires d'immeubles et les gérances immobilières).
- Estimation des coûts marginaux au sens propre du terme (coûts et avantages supplémentaires par rapport au précédent niveau d'efficacité énergétique) visant un examen économique compéhensive et l'élaboration de modèles d'économie énergétique permettant une optimisation sous l'angle économique des programmes de promotion, redevances incitatives, etc..

Du point de vue économique, l'estimation des coûts marginaux au sens propre du terme, en confrontant les coûts supplémentaires du niveau supérieur d'efficacité énergétique (p. ex. surcoûts entraînés par une isolation de 24 cm, comparativement à ceux d'une isolation de 20 cm) et le gain d'efficacité énergétique qui en découle (par exemple, indice d'isolation thermique (valeur U) progressant de 0.2 à 0.18 W/m^{2}K), revêt un grand intérêt. Le principe des coûts moyens correspond à la démarche des maîtres d'ouvrage ou des planificateurs qui comparent plusieurs variantes de projet à une variante de référence. Les divers niveaux d'efficacité énergétique sont alors comparés avec celui de référence, donc par exemple, une épaisseur d'isolation de 16 cm avec une de 12 cm, une épaisseur de 20 cm avec une de 12 cm, une épaisseur de 30 cm avec une de 12 cm.

Au niveau de la présentation des éléments de construction, on utilise la notion de coûts marginaux bruts pour attirer l'attention sur le fait que d'éventuelles réductions de coûts au niveau du bâtiment (installations de chauffages plus petites, entretien moindre, coûts énergétiques plus faibles) n'ont pas encore été portées en déduction. Les coûts marginaux bruts sont surtout utiles à la définition du niveau de priorité des mesures.

La définition de la référence dépend de la problématique examinée. Quand il s'agit de déterminer s'il convient de procéder à la rénovation d'une façade en tenant compte de l'aspect énergétique ou si un simple ravalement suffit, la référence doit tenir compte des coûts de remise en état du crépi et de la peinture.

Lorsqu'une isolation thermique est de toute manière appropriée, comme c'est notamment le cas pour les nouvelles constructions, la question qui se pose est celle des coûts et avantages supplémentaires qu'entraîne une augmentation de l'épaisseur de l'isolation. Les formes d'exécution actuelles, resp. les prescriptions légales en vigueur aujourd'hui font alors référence.

Il a fallu, d'une part, caractériser les formes d'exécution et de construction ainsi que les comportements en cas de rénovation, utilisés comme références, pour des cas typiques en se fondant sur les propriétés énergétiques et techniques de construction propres à chaque élément de construction / bâtiment. D'autre part, il y avait lieu de déterminer la signification quantitative de ces divers cas, c'est-à-dire leur fréquence pour l'ensemble de la Suisse. Outre le recours aux publications et statistiques existantes, il a également fallu procéder à des relevés à la source. Ont notamment été exploités à cet effet les données sur l'énergie des administrations des constructions et le programme de lutte contre le bruit du canton de Zurich afin d'obtenir non seulement des moyennes mais aussi des indications sur la répartition de paramètres tels que la demande d'énergie spécifique ou les chiffres sur l'enveloppe des bâtiments. Dans le secteur des bâtiments existants, nous avons en outre pu obtenir des renseignements sur les cas problématiques et les risques qu'une rénovation serait parfois susceptible d'entraîner du point de vue de la physique du bâtiment.

Les cas de référence suivants sont considérés comme pertinents:

- *Nouvelle construction*: les prescriptions énergétiques actuelles en matière de consommation de chaleur des bâtiments (SIA 380/1) resp. la qualité énergétique effectivement obtenue pour les nouvelles constructions avec les parts respectives des bâtiments à meilleure efficacité énergétique (Minergie), des bâtiments dont l'efficacité énergétique est située dans la moyenne et des bâtiments à moins bonne efficacité énergétique.
- Pour *la rénovation des bâtiments*, il faut distinguer *deux cas*:
  1. ravalement (p. ex. réfection du crépi ou peinture de la façade);
  2. rénovation énergétique (p. ex. isolation de la façade de 12 cm).
- *Eléments de construction*:
  isolation des murs: épaisseur d'isolation de 0 cm, resp. de près de 12 cm,
  isolation de la toiture d'une épaisseur de près de 14 cm,
  Fenêtres: Valeur U_{vitre} = 1.1 W/m²K, Valeurs $U_{CadreBois}$ = 1.4 W/m²K, Valeur $U_{lastique}$ = 1.6 W/m²K

La détermination des surcoûts induits par les investissements plus conséquents dans des améliorations énergétiques des bâtiments part du principe que ces investissements sont engagés simultanément dans le même projet de construction, c'est-à-dire que l'augmentation de l'épaisseur de l'isolation coïncide avec la période de la rénovation (avec ou sans isolation thermique) initialement prévue.

Coûts et bénéfices peuvent également être présentés sous forme annuelle en fonction des besoins Qh en énergies de chauffage (cf. illustration R.8). Cette forme de présentation facilite la comparaison avec d'autres facteurs de coûts (en particulier les loyers) de l'économie du logement.

Comme la majorité des mesures visant à améliorer l'efficacité énergétique et des investissements dans les bâtiments entraînent assez peu d'entretien, la part des coûts en capital est généralement proche de 100% (sauf pour les installations d'aération). Les coûts annuels resp. les coûts marginaux réagissent de la même manière face au taux d'intérêt hypothétique. Du point de vue économique tout comme à long terme, un taux réel de 3% à 3,5% peut être considéré comme réaliste. A l'heure où nous rédigeons le présent rapport, il est difficile d'estimer si la tendance à exiger des taux d'intérêts plus élevés se poursuivra chez les gros investisseurs institutionnels, surtout par rapport aux bâtiments d'exploitation, et si cette situation aura une incidence significative sur une partie des immeubles locatifs. Pour illustrer notre propos, les coûts marginaux ont parfois été calculés pour un taux d'intérêts réel de 5.5%. D'autres aspects liés au choix du taux d'intérêts réel seront abordés au prochain chapitre qui traite de l'évaluation économique compréhensive.

Eléments d'une évaluation économique compréhensive

L'évaluation économique compréhensive doit intégrer les éléments supplémentaires suivants:

- Interprétation économique des coûts relevés
- Progrès techniques et dynamique des coûts
- Evolution future du prix de l'énergie
- Evolution des conditions-cadres – Evaluation du rendement, diminution et vieillissement de la population résidente
- Avantages supplémentaires pour le particulier et pour la collectivité

Interprétation économique des coûts relevés

L'interprétation des données des coûts liés à ce que l'on appelle les «investissements forcés en vue d'améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments» doit tenir compte du fait que le marché y relatif n'est encore qu'embryonnaire. Tant sur le plan des aspects techniques que celui du calcul des coûts, les entreprises – du moins une partie d'entre elles – n'ont encore que peu d'expérience, voire pas d'expérience du tout. La dispersion des coûts de ce genre de mesures plus conséquentes n'en est que plus forte, au contraire du secteur du standard de construction, aujourd'hui devenu usuel, où l'on relève une dispersion beaucoup moins importante. Les indications fournies en matière de coûts comportent souvent une composante de coûts d'apprentissage ou de «prudence»; parfois, le fournisseur suppose que le maître d'ouvrage conscient des questions énergétiques se considère comme un «pionnier en matière de technique de chauffage» et acceptera donc un prix plus élevé (marché des pionniers). La méthodologie adoptée tient compte de cet état de fait en prenant en considération, non seulement les chiffres moyens, mais également la *best practice*, de même qu'en excluant les chiffres anormalement élevés de la définition des moyennes.

Progrès techniques et dynamique des coûts

Pour les investisseurs gérant un important portefeuille immobilier et, en particulier, pour l'administration et les politiciens, il est important de savoir que des progrès technico-économiques ont été observés par le passé en matière d'isolation thermique. Du point de vue méthodologique, ces progrès peuvent être décrits grâce au concept des «courbes d'apprentissage et d'expérience». Suivant ces modèles, les nouvelles technologies commencent toujours par être relativement chères lors de leur lancement sur le marché, mais l'expérience démontre qu'à chaque fois que double leur taux d'utilisation, leurs coûts diminuent à raison d'un certain pourcentage (en général 10% à 20%). Les mesures d'amélioration énergétique (en particulier celles concernant les bâtiments) présentent une structure de coûts multiple. Différents coefficients de déflation (déflateurs) ont été attribués aux divers facteurs de coûts afin de convertir au niveau actuel des coûts l'évolution nominale des prix enregistrée auprès des entreprises, resp. d'établir les différentes réductions des coûts, ce qui permet de procéder à des estimations de l'évolution probable des coûts pour ces deux à trois prochaines décennies.

En raison des interactions entre les quantités converties et les réductions de coûts, l'évolution future des coûts ainsi que les progrès techniques prévisibles sont, dans une certaine mesure, modulables. En favorisant l'efficacité énergétique par la mise en place de conditions-cadre appropriées (condtions-cadres, programmes de promotion limités dans le temps, redevances incitatives, etc.), on permet aux entreprises d'accumuler de l'expérience et d'initialiser des processus d'apprentissage.

Evolution future du prix des énergies

Deux raisons justifient que les calculs relatifs à la rentabilité des investissements engagés dans l'isolation thermique, dont l'efficacité s'étale sur des périodes allant de 30 à plus de 50 ans, ne s'appuient pas sur les prix actuels de chauffage, respectivement sur les prix actuels de l'énergie, mais sur des bases plus élevées à estimer comme prix moyens pour toute la période d'utilisation.

- *L'industrialisation et la motorisation rapide* de la Chine, de l'Inde et de l'Amérique du Sud au cours des quelques décennies à venir impliquent une croissance élevée de la demande d'énergie, soit env. 2% par année pour l'ensemble de la Terre et s'ajoutent à un recul des possibilités de production de pétrole et de gaz naturel dans les pays qui ne sont pas membre de l'OPEP. De plus, les *maxima de la production pétrolière globale* devraient être atteints entre les années 2020 et 2030. Ces deux évolutions entraîneront, ces deux prochaines décennies, une *rapide reconcentration de l'extraction du pétrole au Proche-Orient,* dont la part actuelle de 30% de la production pétrolière mondiale passera à 50% d'ici 2020. Même dans l'hypothèse où cette région de production pétrolière devrait se stabiliser politiquement, on peut s'attendre à ce que le prix du baril du pétrole franchisse la barre des 25$ le baril du fait du retour à un oligopole pétrolier.
- Bien que les graves conséquences des changements climatiques actuellement en cours ne se manifesteront probablement que dans quelques décennies, leurs premiers effets comme le recul des glaciers alpins, le retrait des régions de permafrost, l'augmentation des précipitations et le prolongement de la période de croissance en Europe (IPCC2001) sont déjà perceptibles aujourd'hui. La loi sur le CO_2 adoptée par la Suisse et les engagements de la plupart des Etats industrialisés vis-à-vis du protocole de Kyoto ne représentent qu'un embryon de réactions politiques aux changements climatiques. A titre d'exemple, une redevance sur le CO_2 de 100 CHF par tonne de CO_2 émis ou un certificat d'émission de 70$ par tonne de CO_2 doubleraient les prix actuels du pétrole et du gaz naturel et feraient augmenter le prix du chauffage de 70 à 80% environ.

Evolution des conditions-cadres – Evaluation du rendement, diminution et vieillissement de la population résidente

Il est plus qu'improbable que le taux d'intérêts réel supposé reste à peu près constant pendant les très longues périodes d'utilisation considérées. On peut s'attendre à *des changements des conditions de crédit ainsi qu'à une évolution à long terme de la demande de logements.*

- L'Accord de Bâle II oblige les banques à procéder dès 2006 à une évaluation de la solvabilité de leurs clients. Dans le cas des propriétaires fonciers et des entreprises de construction de logements, cette classification dépendra notamment de l'état de leurs bâtiments du point de vue de leur technique de construction, de leur valeur et de leur facilité de location. Les expériences déjà réalisées dans ce domaine montrent qu'une bonne ou mauvaise estimation du rendement peut se traduire par un point entier de pourcentage sur le taux d'intérêt exigé, ce qui peut rapidement entraîner des différences de l'ordre de 25% au niveau des coûts des intérêts. Ce qu'un propriétaire économise aujourd'hui en termes d'investissements portant sur l'isolation thermique d'une maison ou d'un immeuble, il devra ultérieurement le consacrer non seulement au paiement de surcoûts énergétiques, mais peut-être aussi à des surcoûts liés à l'application d'un taux d'intérêt supérieur.
- La demande d'appartements bien isolés pourrait augmenter en raison de l'évolution à long terme de la population résidant en Suisse. Un recul des habitants de notre pays transformerait le marché immobilier et le marché du logement en un marché vendeur. L'Office fédéral de la statistique base son «évolution de la tendance» de la population résidente de la Suisse sur l'hypothèse que la *population résidente diminuera à partir de*

2002. Si tel devait être le cas, le marché du logement se transformerait rapidement en un marché vendeur, ce qui entraînerait un taux de logements vides élevé pour les appartements moins biens lotis du point de vue de leur isolation thermique (ce qui déboucherait également sur une estimation défavorable de la solvabilité des propriétaires concernés). Même dans le cas où un tel recul de la population résidente pourrait être évité par le biais d'une politique d'émigration correspondante, cela n'aurait aucune incidence sur le *fort vieillissement de la population*. En raison de leur circulation sanguine souvent mauvaise, les personnes âgées préfèrent vivre dans des pièces bien chauffées et tendent à aérer moins souvent et leurs revenus relativement plus faibles les incitent à opter pour des appartements aux charges réduites. Bien que ces deux derniers facteurs démographiques d'influence ne puissent être directement intégrés aux calculs de la rentabilité des investissements dans l'isolation thermique des bâtiments, ils peuvent, en tant qu'informations supplémentaires, revêtir une certaine importance lors des décisions d'investissement.

Avantages supplémentaires pour le particulier et pour la collectivité

Les rénovations des bâtiments d'habitation sont très rarement entreprises du seul point de vue des améliorations énergétiques et celles ayant trait à l'enveloppe des bâtiments comprennent la plupart du temps plus que des mesures pertinentes en termes d'efficacité énergétique (p. ex. ravalement de façades, aménagement de chiens-assis, étanchéification des murs de cave). A cela s'ajoute le fait que bon nombre des investissements consacrés à l'amélioration de l'efficacité énergétique entraînent fréquemment, à plusieurs égards, *des avantages supplémentaires* par rapport aux économies liées aux coûts énergétiques qu'il s'agit de prendre en considération dans leur contexte global, notamment pour des raisons d'économie d'entreprise (cf. notamment Ostertag, 1999).

L'évaluation de ce genre d'avantages supplémentaires du point de vue économique (p. ex. amélioration du confort liée à une température des murs plus agréable ou à des pièces bien aérées, amélioration de la sécurité ou possibilités de plonger les pièces dans l'obscurité pendant la journée grâce aux stores, amélioration de l'isolation phonique entraînant une plus-value du bâtiment, resp. une plus grande facilité de location des logements, cf. tableau 1) n'a souvent pas été prise en considération dans les précédentes évaluations de l'économie du logement. Comme sa prise en compte détaillée entraînerait des surcoûts considérables, elle n'est la plupart du temps que partiellement examinée sous l'angle quantitatif par l'investisseur, voire uniquement considérée sous l'angle qualitatif, ou carrément omise (IWO 2000), dans la mesure où le propriétaire de ses quatre murs aura tendance à faire intervenir ses propres préférences, tandis que le bailleur y inclura son estimation des recettes supplémentaires à réaliser sur les loyers, de la plus grande facilité à louer les logements ou de la plus-value liée à l'amélioration du confort d'habitation. Cet exemple montre que les bases d'évaluation économique peuvent prendre des formes variables selon que l'on ait affaire à des propriétaires privés, des gérances immobilières ou des locataires.

L'intégration de ce type d'avantages complémentaires dans une évaluation économique formelle échoue bien souvent par manque d'informations disponibles sur la quantification de ces éléments ou de leur monétisation. Ce domaine nécessiterait par conséquent de mener d'importantes recherches afin d'être en mesure de prendre des décisions objectives en matière de politique énergétique (un tel projet de recherche (EWG) est en cours depuis juillet 2002).

Tableau 1: Exemples d'un avantage non-énergétique des mesures d'isolation thermique et approches méthodologiques de sa monétisation.

Avantage non-énergétique	Base d'évaluation méthodologique
Confort lié à des températures plus élevées à la surface des murs et à une réduction des courants d'air près des fenêtres.	Economies d'énergie supplémentaires liées à la possibilité d'abaisser la température moyenne de la pièce tout en bénéficiant d'une température plus élevée à la surface des murs et des fenêtres et en diminuant les courants d'air.
Réduction des nuisances sonores grâce à des fenêtres à double ou triple vitrage avec effet d'insonorisation indirecte, éventuellement en relation avec une aération contrôlée.	Disponibilité à payer pour une meilleure insonorisation, différenciée par classes de revenus, nuisances sonores, jour/nuit ou surcoûts par rapport à une vitrification antibruit.
Amélioration de la qualité de l'air par aération, humidité contrôlée ainsi que nettoyage de l'air amené.	Pour l'asthme et d'autres maladies des voies respiratoires, réduction des coûts liés à la santé (approche économique top–down).
Agrandissement de la surface utile, c.-à-d. de l'espace habitable en cas d'isolation du toit permettant une extension des combles.	Réduction des déperditions de chaleur liées à la surface du logement ainsi que des coûts de chauffage spécifiques.
Espaces extérieurs utilisables **plus vastes** et plus nombreux (vitrage et/ou agrandissement des balcons, jardins d'hiver).	Pertinent pour les locatifs exposés à des nuisances sonores importantes ou normales; gérances d'immeubles interrogées au sujet de l'évaluation de l'attribut «balcon».
Protection contre les effractions par réduction des fenêtres ouvertes en cas d'aération.	Estimation des réductions de primes d'assurances, compa-raison avec d'autres mesures préventives contre l'effraction.

Coûts externes

En outre, dans le considérations de politique énergétique et environnemental il faudrait que la confédération et les cantons tiennent en compte les coûts externes qui peuvent être évités par des émissions énergétique réduits en effectuent des investissements d'efficacité énergétique. Or, tout en étant conscient des incertitudes, le montant des coûts externes est considérable. Le médian des coûts externes des polluants « classique » s'élève à 2.4 centimes/kWh pour le mazout et à 0.8 centimes/kWh pour le gaz naturel. De plus on estime les coûts des dommages par l'effet de serre à 6 centimes/kWh pour le mazout et à 4.5 centimes/kWh pour le gaz naturel. Du point de vue d' économie de prospérité, ceci sont des valeurs non négligeable.

Relevés et calculs de coûts et bénéfices

Les coûts et les avantages sont tout d'abord examinés au niveau des éléments de construction afin d'élaborer des concepts architectoniques, resp. des faisceaux de mesures aussi avantageux que possible, notamment sur la base des découvertes réalisées (ainsi que d'autres facteurs d'influence).

Eléments de construction: murs, toit et fenêtres

Comme le présent projet avait pour objectif d'identifier l'effet systématique de l'efficacité énergétique sur les coûts et par manque de données chiffrées en matière d'énergie et de coûts, voire de données incomparables entre elles, nous avons opté pour la méthode consistant à obtenir les données idoines directement auprès des fabricants des divers composants d'isolation thermique, resp. des entreprises qui les installent et des économistes de la construction. Une exploitation des projets de construction réalisés aurait posé de gros problèmes de comparaison des données. Par ailleurs, les données disponibles ne se prêtaient pas bien à une approche statistique (régression) puisque peu de bâtiments présentent une efficacité énergétique suffisante et en raison de la multitude des facteurs ayant une incidence sur les coûts.

Des relevés directs auprès des entreprises ont permis d'obtenir des informations sur les prix des matériaux d'isolation des façades et des toits en fonction de l'épaisseur de l'isolation, des informations sur les prix des vitres et des fenêtres en fonction de chiffres de référence en matière de technique énergétique, de même que des informations sur les prix des installations d'aération en fonction de leur type et de leur efficacité énergétique et d'aération et ce, tant pour les nouvelles constructions que pour les projets de rénovations.

Isolation des façades et du toit

Les entreprises de ravalement de façades dans le domaine des façades compactes ventilées, de même que les entreprises de couverture ont fourni des données sur les coûts en fonction de l'épaisseur de l'isolation (cf. p. ex. l'exemple de l'illustration R.2 «Surcoûts des façades ventilées et compactes en fonction de l'augmentation de l'épaisseur d'isolation»). Nous avons recueilli des données concernant des zones d'épaisseurs d'isolation jusqu'à env. 30 à 35 cm, aujourd'hui courantes, et demandé, outre les coûts totaux pour une surface donnée, la structure des coûts. Il est ainsi apparu que les surcoûts ne sont en fait imputables à l'augmentation du coût des matériaux plus épais que pour le tiers à la moitié environ. Le solde des coûts supplémentaires provient des constructions, des matériaux de fixation (p. ex. chevilles), du travail supplémentaire (manutention plus difficile, traitement en deux couches); certains surcoûts sont aussi dus à l'échafaudage (consoles).

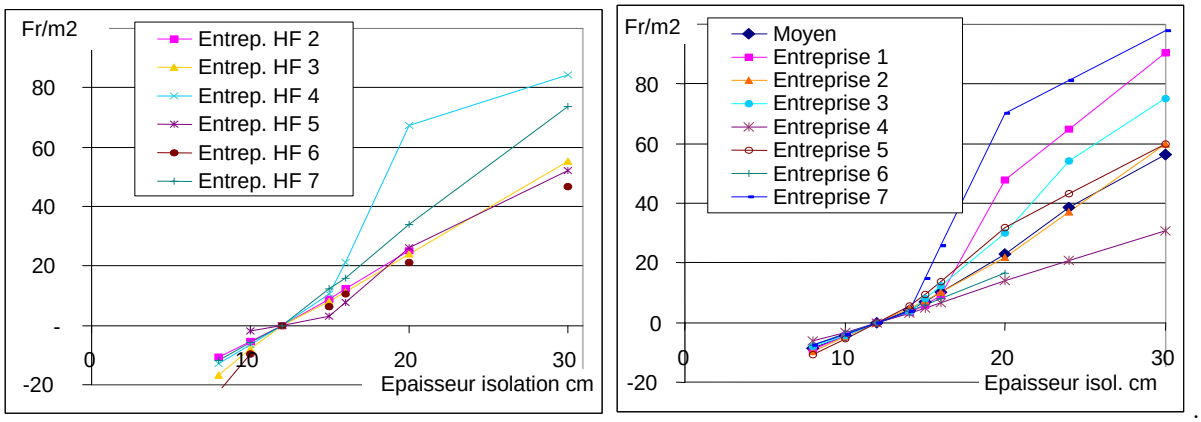


Illustration R.2 Surcoûts d'investissement en fonction de l'épaisseur d'isolation pour isolation des murs extérieurs, à l'exemple d'une façade de fibrociment de petit format (à gauche) et de façades compactes (à droite) par rapport à une épaisseur d'isolation de référence de 12 cm.

Contre toute attente, la différence de progression des coûts entre nouvelle construction et bâtiment rénové est minime. Il est également surprenant de constater que les coûts des façades ventilées ont plutôt tendance à grimper de manière moins brutale que ceux des façades compactes. Cela s'explique par le fait que, dans le cas des façades compactes, une fixation mécanique supplémentaire devient nécessaire à partir d'une certaine épaisseur d'isolation, ce système de fixation étant de toute façon utilisé pour les façades ventilées. Par ailleurs, un examen plus approfondi des détails de construction ainsi que des raccordements d'éléments de construction adjacents amène des constatations intéressantes. Dans le cas de rénovations, l'isolation des embrasures de fenêtres ou des bordures de toit entraîne certes des coûts supplémentaires, mais leur meilleure efficacité énergétique induit des coûts marginaux sur les économies d'énergie qui ne sont la plupart du temps pas plus élevés qu'avec les éléments de surface. Une planification pertinente des rénovations vaut donc la chandelle et doit être recommandée, même si les rénovations doivent s'échelonner dans le temps.

Le dépouillement des données recueillies révèle aussi que la progression des coûts des épaisseurs d'isolation aujourd'hui usuelles (de 8 à env. 16 cm) est à peu près identique dans toutes les entreprises, mais que pour des épaisseurs d'isolation plus élevées, une forte dispersion des coûts est à relever (cf. illustration R.2). Ces écarts s'expliquent par les différences dans les expériences réalisées par les entreprises; les indications relatives à des surcoûts élevés sont donc le résultat d'une moindre expérience au niveau du calcul des coûts, de l'adjonction d'une marge de sécurité et des marges sur les marchés pionniers.

Tableau 2: Investissements consacrés à l'isolation thermique des façades dans le cas des rénovations (moyenne et *best practice*) et coûts marginaux (approche des coûts moyens, intérêt réel de 3,5%) en comparaison avec les cas de référence «Réfection [2]» et «Rénovation énergétique [1]».

Epaisseur d'isolation (cm)	Valeur isolante (W/m^2K)	Coûts d'investissement (CHF/m^2)		Coûts marginaux bruts (Rp/kWh_{NE})		
				par rapport à réf. [1]		par rapport à réf. [2]
		Moy	Best	Moy	Best	Moyens
0 (Réf. [2])	0.85 - 1.0	35		n.p.	n.p.	-
12 (Réf. [1])	0.28	117	112	-	-	6.1
16	0.23	127	119	12	8.0	6.5
20	0.20	140	133	17	10	7.0
30	0.15	174	143	25	13	8.4

Réf. [2] = Référence «Réfection» (ravalement du crépi, nouvelle peinture)
Réf. [1]= Référence «Rénovation énergétique» (isolation thermique extérieure de 12 cm)
n.p. = données non pertinentes

Comme le montre le tableau 2, la dispersion déjà mentionnée a une grande influence sur les coûts marginaux. Les coûts marginaux de l'entreprise dont les coûts progressent le plus modérément (best practice) sont presque deux fois plus bas que la moyenne et donc beaucoup plus proches de la limite de rentabilité, en particulier pour les isolations plus épaisses. Du point de vue de la politique énergétique et climatique, mettre en place une dynamique en stimulant le marché sera donc particulièrement efficace. Un aménagement pertinent de cette dynamique permettra d'activer les potentiels d'apprentissage et d'expérience et, par conséquent, de faire baisser les coûts de toutes les entreprises au niveau de la *best practice*.

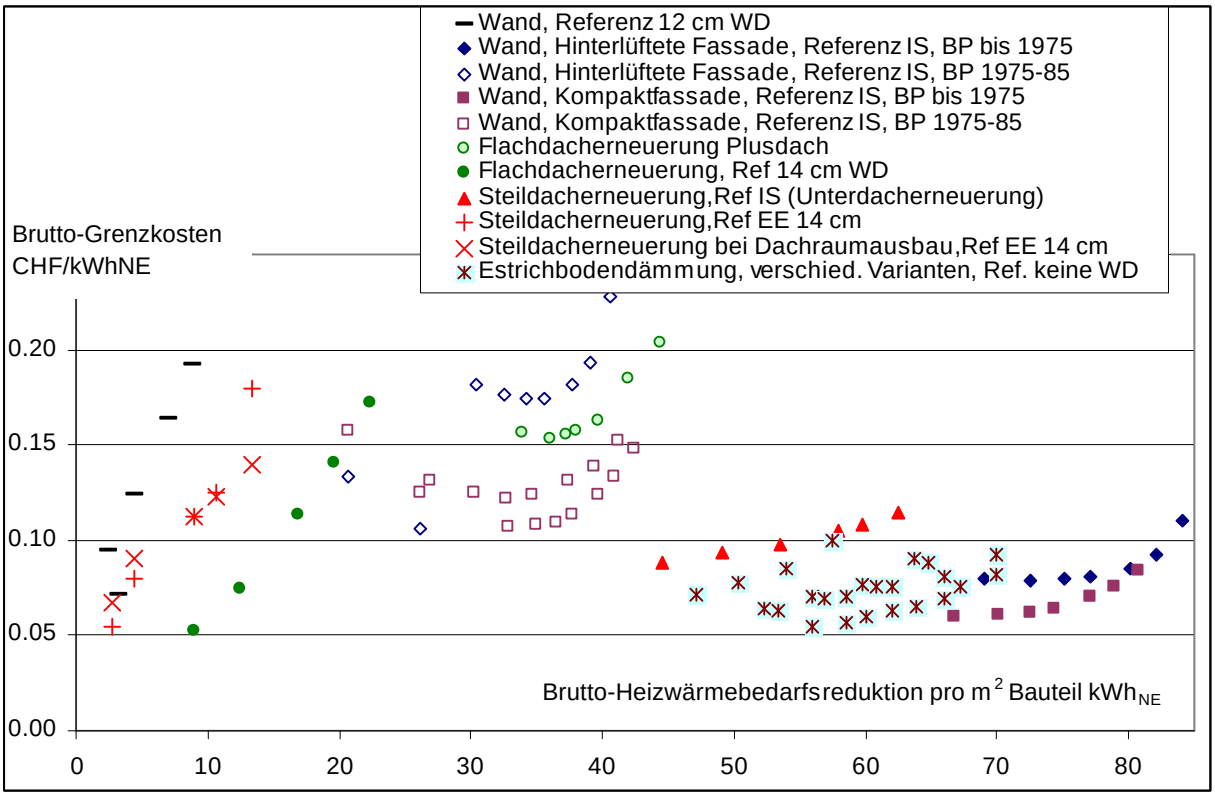


Illustration R.3 Présentation résumée des coûts marginaux bruts (approche des coûts moyens) pour les rénovations (cas de référence: rénovations énergétiques usuelles aujourd'hui) et les nouvelles constructions.

Le cas de référence d'une isolation thermique selon les standards actuels, nécessaire ou prévue de toute façon, montre que, pour la plupart des éléments de construction opaques, la progression des coûts moyens est à peu près identique à la réduction d'énergie utile, c.-à-d. qu'il faut s'attendre à des surcoûts à peu près équivalents pour chaque kWh_{NE} de déperdition de chaleur en moins obtenu pour l'élément de construction concerné (cf. illustration R.3). Autrement dit, à certains coûts marginaux, le gain d'efficacité énergétique par m^2 est à peu près équivalent. On note cependant une exception: les toits plats, qui présentent des coûts marginaux nettement inférieurs.

Par contre il y a une grande différence entre les deux cas de référence principaux : isolation avec épaisseur de référence ou réfection. Comme le montre le tableau 2, les coûts marginaux (approche des coûts moyens) sont notablement plus bas par rapport au cas de référence de réfection. De plus, le gain d'efficacité énergétique par m^2 de surface est considérablement plus élevé (69 kWh/m^2 avec 12 cm par rapport à 0 cm, 80 kWh/m^2 avec 20 cm par rapport à 0 cm), tendis que le gain énergétique utile est seulement de 7 à 9 kWh/m^2 si l'on passe de 12 cm à 20 cm.

Les fenêtres doivent être considérées sous un autre angle, car dans ce cas, le bilan énergétique et, par conséquent, les gains d'efficacité énergétique des divers types de fenêtres et de vitres dépendent beaucoup de leur situation (ombre, durée d'ensoleillement, proportions par rapport à la surface, rapport entre gains et déperdition de chaleur). Voir également «Autres exécutions» au prochain chapitre.

Fenêtres et cadres de fenêtre

Des offres indicatives de prix ont été demandées à une centaine d'entreprises, choisies au hasard, spécialisées dans la construction de fenêtres. En outre, les grandes entreprises de construction de fenêtres ont été délibérément sélectionnées, de même que celles proposant des fenêtres d'une très grande efficacité énergétique.

Par le passé, l'amélioration des performances énergétiques des fenêtres a surtout été le fait des remarquables progrès techniques réalisés au niveau des vitrages. Même le standard actuel de 1.1 W/m²K peut encore être abaissé par une amélioration des enduits, le recours à d'autres gaz de remplissage et un triple plutôt qu'un double vitrage. Les surcoûts y relatifs sont identiques pour les fenêtres en bois ou en matière synthétique;de nettes différences apparaissent toutefois entre les petites et les grandes fenêtres, comme le révèle l'illustration R.4. En raison de leurs proportions géométriques et du fait que les vitres présentent des indices d'isolation plus bas que les cadres, les valeurs initiales des grandes fenêtres sont non seulement plus basses, mais la progression de leurs coûts en fonction des améliorations apportées au plan énergétique est également plus graduelle. La grande fenêtre d'une maison passive peut être acquise à un prix spécifique comparable à celui d'une petite fenêtre standard.

Ces dernières années, des efforts ont également été entrepris pour optimiser les cadres de fenêtres. Les fenêtres à cadre en matière synthétique présentent une évolution beaucoup plus avancée que celles à cadre métallique ou en bois. Cette réalité se traduit sur le marché par une offre plus large en ce qui concerne les qualités de cadres et apparaît sur l'illustration 4. L'augmentation de coûts des cadres optimisés est considérablement plus marquée pour les cadres en bois que pour les fenêtres à cadre en matière synthétique. L'augmentation de la demande de fenêtres bien isolées résultant des prescriptions de construction Minergie a toutefois également créé pour les fenêtres à cadres de bois, un segment de l'offre qui, jusqu'à présent, ne concerne que les strictes exigences du standard des maisons passives. .

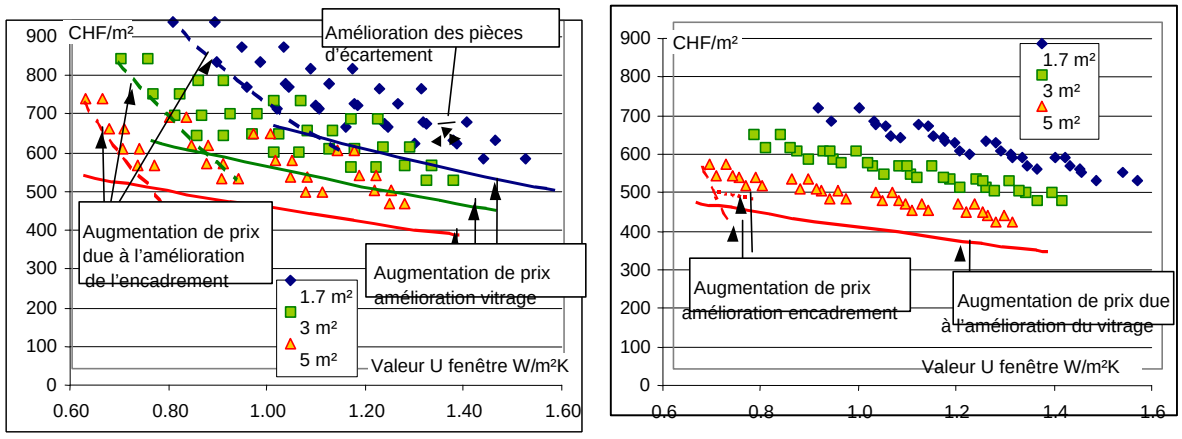


Illustration R.4 Coûts d'investissement des fenêtres en bois (à gauche) et en matière synthétique (à droite) pour des fenêtres de différentes dimensions en fonction de l'indice d'isolation de l'ensemble de la fenêtre.

La relation coût/avantages des fenêtres est influencée par d'autres facteurs encore que leur valeur isolante. Pour les fenêtres orientées vers le sud, mais aussi en cas d'orientation est et ouest peu ombragée, le flux énergétique est positif pendant toute la période de chauffage où la fenêtre fonctionne comme un collecteur solaire et emmagasine de la chaleur solaire, ce qui se répercute sur la consommation d'énergie de chauffage. Le choix de la qualité du vitrage ne

tient donc plus uniquement compte de l'indice d'isolation, mais également d'un indice g aussi élevé que possible (taux global de pénétrations de l'énergie ≥ 50% en % de l'ensoleillement), car sinon, le gain d'isolation serait compensé par une moindre absorption d'énergie solaire.

Les fenêtres doivent donc être considérées différemment des autres éléments de construction puisque, outre la réduction de la déperdition énergétique par transmission de chaleur, il convient dans ce cas de tenir compte également des gains d'énergie solaire, si bien qu'on obtiendra, pour une fenêtre ayant un indice d'isolation donné, des coûts marginaux très variables en fonction de son orientation, de l'ombre et de sa valeur g. Les chiffres de la fenêtre présentée à la illustration R.5 illustrent bien cette situation.

La diversité des possibilités d'influer positivement tant sur les coûts que sur les bénéfices énergétiques dans les nouvelles constructions apparaît sur le l'illustration R.5. Un élément architectonique très attrayant consiste à concevoir de grandes plutôt que de petites fenêtres. De même, l'agrandissement de la surface totale des fenêtres permet d'abaisser la demande d'énergie de chauffage et ce, à des coûts spécifiques relativement peu élevés, en particulier lorsque, simultanément, on utilise de grandes plutôt que de petites fenêtres.

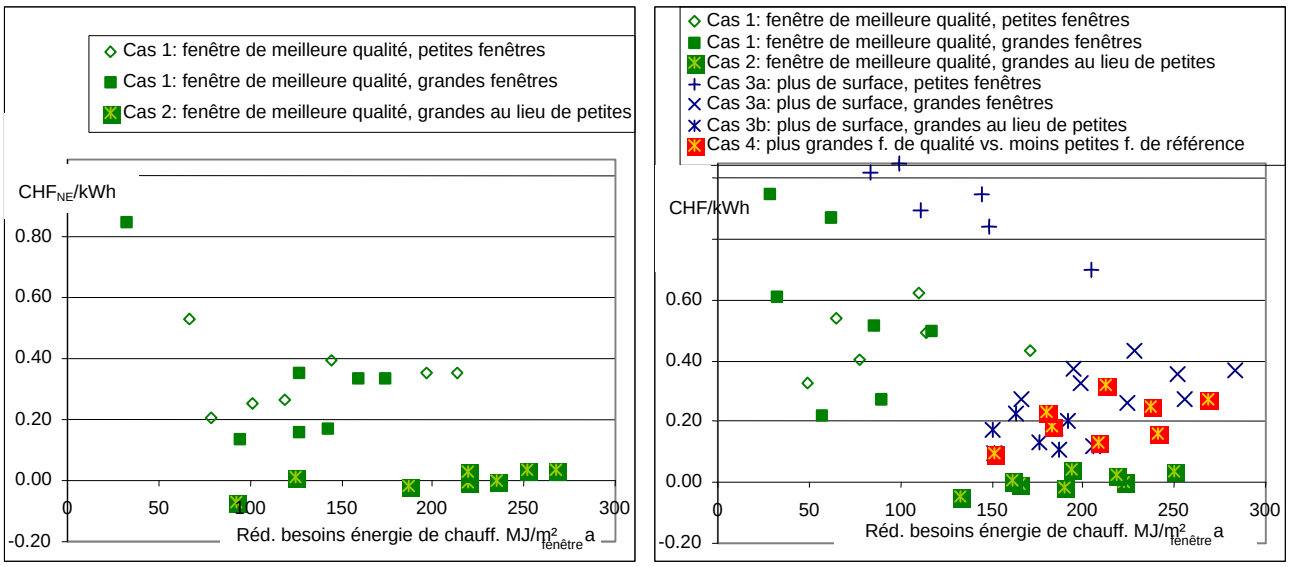


Illustration R.5 Présentation résumée des coûts marginaux bruts (approche des coûts moyens) des fenêtres pour différents cas et orientations (illustration de gauche: nord; illustration de droite: sud), taux d'intérêt réel de 3,5%, pour une durée de vie de 30 ans.

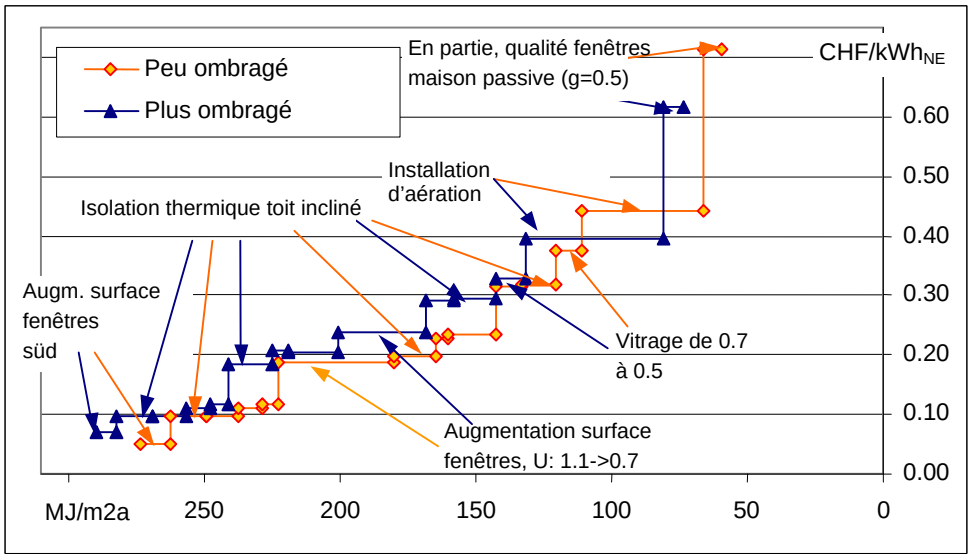
Le bâtiment dans son ensemble

En passant des divers éléments d'une construction au bâtiment dans son ensemble, il faut être conscient du fait qu'il existe certaines interactions entre les différents facteurs de coûts, de même qu'entre les avantages énergétiques des divers secteurs d'investissement. Dès lors, les relations coûts/bénéfices peuvent se déplacer par rapport à l'analyse isolée effectuée sur les types d'éléments de construction. Au plan énergétique, il faut par exemple mentionner le degré d'utilisation de la chaleur libre (chaleur solaire plus chaleur des personnes et appareils), lequel diminue légèrement à mesure qu'augmentent l'isolation thermique ou les gains d'énergie solaire. De même, on constate certaines interactions au niveau des coûts: les coûts de

production et de distribution de chaleur peuvent être réduits en cas de diminution croissante de la demande d'énergie de chauffage.

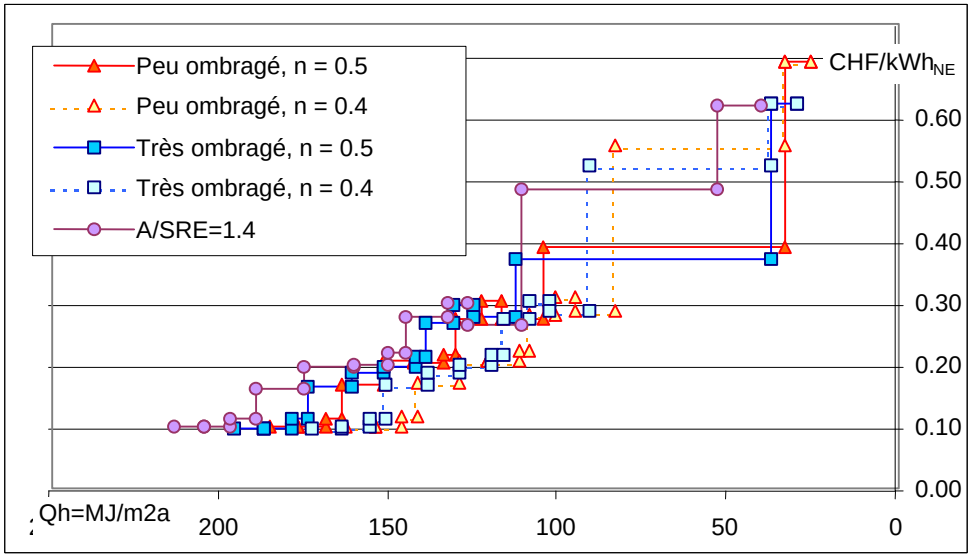
Les rapports des surfaces d'un bâtiment dans son ensemble étant connus d'avance pour tout le parc immobilier, il est possible d'inférer directement son potentiel d'améliorations de l'efficacité énergétique en se fondant sur les divers éléments de construction. Pour les nouvelles constructions, on dispose d'une certaine marge de manœuvre pour influer sur la demande d'énergie du bâtiment, notamment par le truchement de sa conception architectonique. Une autre marge de manœuvre existe au niveau de la couverture du reste de la demande d'énergie de chauffage, car la liberté d'opérer des choix en matière de technique ménagère y est plus importante que pour le parc immobilier, qui impose de tenir compte de la situation préexistante et pour lequel un changement de système présente souvent des inconvénients au plan économique (coûts transactionnels).

L'examen de plusieurs concepts de nouvelles constructions et de divers cas de figure a révélé que la courbe de leurs coûts marginaux présentait une progression relative similaire (cf. illustration R.6 et R.7). Cela s'explique par le fait que les coûts marginaux des divers éléments de construction progressent eux aussi de manière assez identique. Des différences existent bien sûr au niveau de l'apparence extérieure. Plus favorable est le rapport entre l'enveloppe du bâtiment et la surface de référence énergétique (A/SRE), plus basse est la valeur énergétique initiale et, par conséquent, plus abruptement se redresse la courbe des coûts marginaux. A supposer que les mesures d'amélioration de l'efficacité énergétique doivent être strictement adoptées dans l'ordre croissant de leurs coûts marginaux, la séquence desdites mesures pourra aussi changer dans certains cas. Il est néanmoins assez essentiel que des mesures progressives soient appliquées pour tous les éléments de construction et non seulement ponctuellement pour certains d'entre eux.



Calculs CEPE

Illustration R.6 Courbe des coûts marginaux bruts (ne tenant pas compte de la réduction des coûts au niveau de la production et de la distribution de chaleur) pour des locatifs peu ombragés et pour des locatifs plus fortement ombragés (séquence des mesures selon le principe des coûts marginaux croissants)



Calculs CEPE

Illustration R.7 Courbe des coûts marginaux bruts (ne tenant pas compte de la réduction des coûts au niveau production/distribution de chaleur) pour des locatifs diversement ombragés et pour différentes situations initiales au niveau de la ventilation (renouvellement de l'air).

En conclusion, on retiendra qu'une stratégie d'isolation thermique conséquente ou une stratégie combinée de gain d'isolation et de gain solaire entraîne des coûts similaires (sur le Plateau). Ceci reste vrai tant que l'on a affaire à un site relativement peu ombragé, donc en particulier dans le cas des maisons individuelles ainsi que des locatifs situés dans des régions à faible densité d'utilisation.

Les coûts marginaux bruts présentés ci-dessus ont permis de situer, les uns par rapport aux autres, les différents investissements visant une amélioration d'efficacité énergétique, de même que la comparaison de divers concepts de nouvelles constructions. Il n'est toutefois pas encore possible d'effectuer une évaluation de rentabilité définitive. Dans une prochaine étape, les coûts de production de chaleur en fonction des besoins en énergie de chauffage, resp. des besoins d'énergie utile devront être intégrés dans l'analyse. Le calcul des dimensions des installations a été réalisé en vertu des besoins d'énergie utile, ces derniers étant toutefois calculés de manière différenciée selon les concepts de construction réellement examinés. En effet, la plupart du temps, les besoins d'énergie utile diminuent mois que proportionnellement à la réduction de la demande annuelle d'énergie de chauffage, car le dimensionnement de la puissance des installations est fondé sur les besoins pendant les jours les plus froids de l'année, en l'absence d'ensoleillement et donc de gains solaires et ce, bien que les gains d'énergie solaire soient susceptibles d'entraîner une réduction de la demande d'énergie de chauffage. Les compensations des coûts potentielles découlant de la possibilité de recourir à de plus petites installations de chauffage sont assez réduites dans le cas des chauffages au mazout, au gaz et au bois. Les coûts d'investissement des pompes à chaleur et, en particulier, des pompes à chaleur sol/eau, enregistrent un net recul. Les surcoûts des investissements consacrés à l'enveloppe des bâtiments ne peuvent toutefois être entièrement compensés par aucun type d'installation, même si la distribution hydraulique de chaleur peut être négligée lorsque le standard de la maison passive est correctement exécuté.

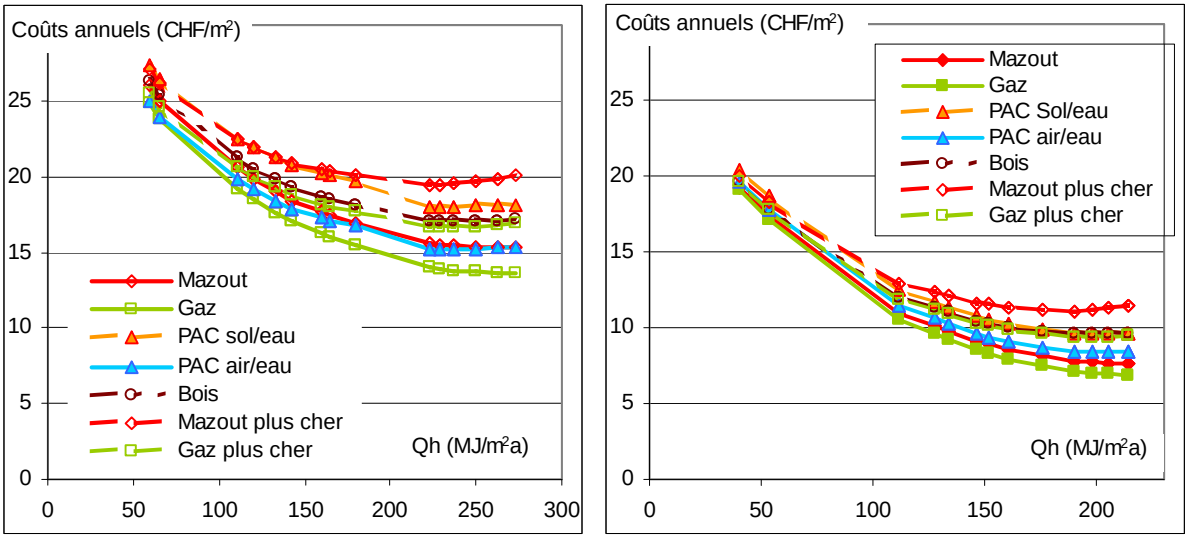


Illustration R.8 Coûts annuels (tenant compte de la réduction des coûts au niveau production/distribution de chaleur) de divers types d'installations pour maisons individuelles (à gauche) et immeubles locatifs (à droite). Prix de l'énergie plus élevé pour chauffages au mazout ou au gaz: majoration de 210 CHF/t CO_2.

Comme le montre l'illustration R.8, les coûts annuels d'ensemble (nets) se distinguent par une progression d'abord très lente dans le secteur des méthodes de constructions actuelles ainsi qu'en dessous (p. ex. entre 250 et 200 MJ/m²a). L'exemple illustré ici permet d'atteindre sans surcoûts trop importants une amélioration des besoins spécifiques d'énergie de chauffage Qh de 40 MJ/m²a à 60 MJ/m², resp. d'un quart et ce, même dans l'hypothèse conservatrice où le prix de l'énergie ne s'élève, en moyenne pour toute la durée de vie des mesures concernées, qu'à 4.5 cts/kWh (env. 45 CHF/100 l). Au-delà de 100 MJ/m²a, la demande d'énergie de chauffage peut être réduite pour des coûts nets de 2 à 3 CHF/m² ce qui, pour un appartement de 120 m², représente des surcoûts de 20 à 30 CHF/mois. En cas de hausse du prix de l'énergie prévue en raison d'un impôt de 210 CHF par tonne de CO_2, la progression des coûts s'aplatit encore un peu plus et la condition économique optimale se déplace vers la gauche, à un niveau inférieur de demande d'énergie spécifique.

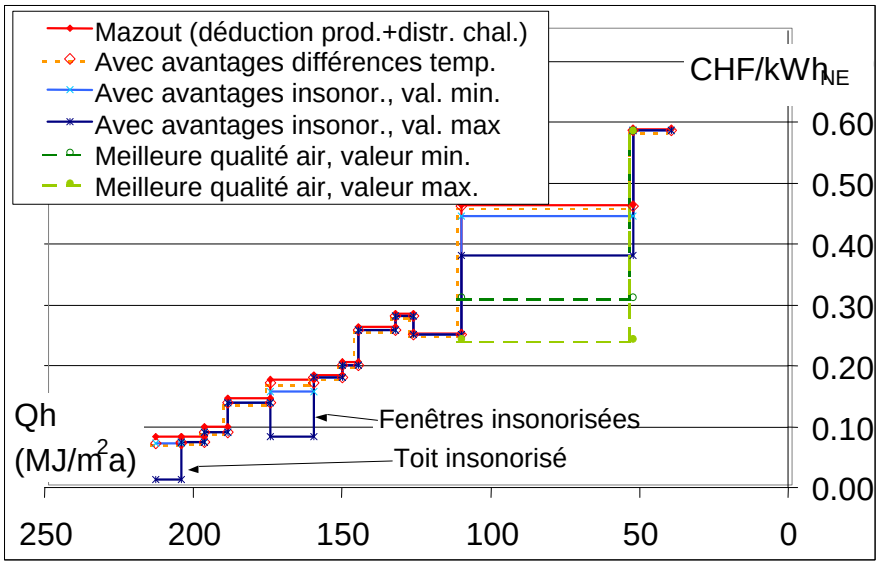
La présentation ci-dessus ne prend pas en compte le fait que des architectes et des entreprises de construction à la pointe en matière d'efficacité énergétique sont simultanément ceux qui proposent les coûts de construction les plus bas, notamment dans le souci de compenser au moins partiellement les surcoûts occasionnés par l'efficacité énergétique. Dans certains cas, la hausse des coûts peut donc tout à fait évoluer de manière plus modérée (à ce sujet, se référer également à la variation des surcoûts présentée à l'illustration R.2).

N'ont pas non plus été pris en compte, dans la présentation ci-dessus, d'autres avantages dits «non-énergétiques» souvent constatés lors de l'adoption de mesures plus rigoureuses visant une amélioration de l'efficacité énergétique (voir le prochain chapitre).

Avantages supplémentaires des investissements consacrés à l'isolation thermique (co-bénéfices)

Les trois exemples ci-après illustrent la manière dont l'intégration d'autres avantages dans l'évaluation économique peut réduire les coûts marginaux liés à l'énergie (cf. illustration R.9).

- Pour quantifier l'augmentation du confort d'habitation, nous nous sommes basés sur des recherches empiriques sur le confort prenant en compte les différences de température entre les murs et l'air ambiant ainsi que les conditions du courant dans le salon. On a déjà découvert depuis de nombreuses années qu'à confort équivalent, une diminution de, par exemple, 5° C de la différence de température entre les murs d'une pièce et la température moyenne de son air permet une réduction de 1° C de la température de la pièce. La prise en compte de cet effet n'entraîne en fait qu'un avantage supplémentaire relativement minime, soit tout au plus un centime par kWh d'énergie de chauffage.
- Le remplacement d'anciennes fenêtres à double vitrage, l'utilisation de vitrages doubles ou triples avec structure asymétrique du verre, de même que de verres spéciaux (résine moulée), le remplacement des boîtiers de stores ainsi que des matériaux d'isolation (lourds) à base de substances minérales contribuent à une diminution de la transmission de l'énergie sonore à l'intérieur des bâtiments. Une quantification de la réduction de bruit ainsi obtenue peut être faite en se basant sur une évaluation de la réduction des coûts induits par le bruit. Ces coûts liés au bruit peuvent être observés de manière empirique, notamment au travers des pertes de loyer consécutives aux nuisances sonores; diverses études les chiffrent entre 0.6% et 0.9 %/dB. Le facteur de réduction du bruit de loin le plus important provient du secteur fenêtres et/ou stores; une première estimation grossière permet de le fixer à 50% des coûts susmentionnés lorsqu'une installation d'aération est utilisée simultanément. Mais les mesures d'isolation thermique faisant appel à des matériaux minéraux dans le secteur des toitures revêtent également une certaine importance (en particulier contre les nuisances sonores, transmises sur de longues distances, liées aux transports aériens ou à la circulation routière, de même que le bruit produit par des installations de production industrielle). Les exemples choisis montrent que la protection contre le bruit au niveau des fenêtres et du toit peuvent avoir une incidence importante voire décisive sur la rentabilité des mesures d'isolation thermique (illustration R.9).
- L'utilisation d'installations d'aération a une influence non moins importante sur l'amélioration de la qualité de l'air dans les pièces. Elle peut améliorer la qualité de l'air à l'intérieur des bâtiments situés dans des quartiers d'habitation très pollués (p. ex. routes à forte circulation), que ce soit par la réduction du taux de renouvellement de l'air en cas d'assainissement des portes et des fenêtres ou par le filtrage de l'air amené depuis l'extérieur pour les installations d'aération, et/ou assurer l'aspiration de l'air par le côté du bâtiment le plus éloigné de la circulation routière. L'autre cas est celui d'un taux de renouvellement de l'air trop faible dans des bâtiments d'habitation bénéficiant d'une bonne isolation thermique et présentant une atmosphère interne trop humide (p. ex. en raison d'une humidité croissante) ou des concentrations de produits toxiques relativement élevées provoquées par les aménagement intérieurs (p. ex. tapis synthétiques, meubles en aggloméré à haute teneur en produits chimiques), insupportables pour les asthmatiques et pour d'autres personnes prédisposées aux allergies et aux maladies des voies et organes respiratoires. Il est toutefois presque toujours très difficile de quantifier ces effets, leur monétisation devant par conséquent la plupart du temps être réalisée par des méthodes économétriques.



Source: calculs CEPE

Illustration R.9 Courbe des coûts marginaux des investissements consacrés à l'isolation thermique, compte tenu de certains co-bénéfices (confort accru, insonorisation, meilleure qualité de l'air dans les pièces grâce aux installations d'aération)

Les avantages des co-bénéfices sont également visibles par la forme de présentation des coûts annuels (cf illustration R.10). En particulier, la forte progression des coûts de l'installation d'aération s'aplanit considérablement lorsque sont pris en compte les avantages supplémentaires apportés par une installation d'aération et lorsque tous les coûts d'amélioration de l'efficacité énergétique sont attribués.

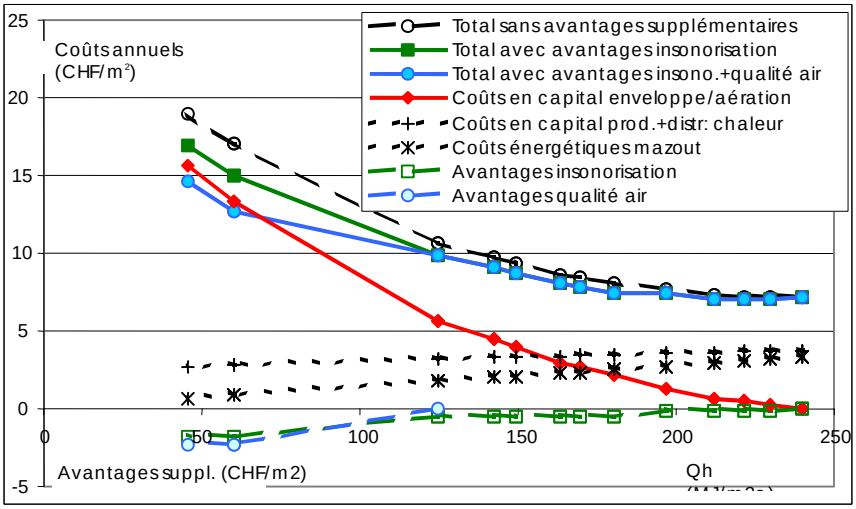


Illustration R.10 Coûts annuels totaux et leurs composants (surcoûts des investissements consacrés à l'efficacité énergétique, réduction des coûts de production / distribution de chaleur), de même qu'avantages supplémentaires. Présentation fondée sur l'exemple d'un nouvel immeuble locatif. Hypothèses: intérêt réel de 3%, prix de l'énergie de 4.5 cts/kWh

Au contraire des coûts annuels, les coûts d'investissement commencent immédiatement à grimper dès le point de référence énergétique, même si ce n'est que légèrement (cf. illustration R.10). Les décisions uniquement fondées sur les coûts d'investissement ne mènent donc pas à des modes de constructions optimaux du point de vue énergétique et économique. Bien que cette affirmation soit en soi triviale et n'apporte pas grand-chose de neuf, elle est en réalité fréquemment négligée et ce, bien souvent, en raison du dilemme investisseur / utilisateur.

Coûts et avantages futurs des investissements consacrés à l'efficacité énergétique

A ce jour, la méthode des courbes d'apprentissage et d'expérience était surtout appliquée dans le domaine des centrales nucléaires, de même que des équipements et installations de conversion énergétique. Dans le présent projet, elle a été transposée au domaine des mesures d'efficacité énergétique. Il faut tenir compte des différences suivantes par rapport aux champs d'application antérieurs de la méthode:

Les quantités caractérisant le progrès d'apprentissage et les effets d'échelle (p. ex. m^2 de fabrication de vitres ou de fenêtres, ou quantité de matériaux d'isolation thermique) peuvent être obtenues de manière empirique et leur influence sur la régression des coûts inférée pour les trois dernières décennies. Ainsi, depuis 1970, les progrès techniques en matière du protection contre le chaleur se sont élevés à env. 1,8 %/a pour les systèmes de fenêtres et env. 2,3 %/a pour les matériaux d'isolation thermique. Simultanément, les coûts de fabrication réels découlant des effets d'apprentissage et d'échelle ont diminué de 0,8 %/a en moyenne. On peut en déduire les chiffres des coefficients dégressifs en cas de doublement de la production. Selon l'état du cycle d'innovation, ceux-ci sont situés dans une plage oscillant habituellement entre 0,8 et 0,9.

Comme les effets d'apprentissage et d'échelle des diverses mesures d'isolation thermique dus à une réduction de la pénétration du marché et/ou de nouvelles techniques (isolation du noyau ultraperformante, fenêtres à haute efficacité énergétique) sont encore loin d'être épuisés, il faut compter avec des réductions supplémentaires des coûts pour chaque kWh de déperdition de chaleur évitée dans tous les secteurs du bâtiment. Ainsi, depuis un certain temps, par exemple, la plaque isolante de Styropor est munie d'un noyau en matière synthétique moussée présentant une conductivité thermique moindre au facteur de 1,8. Par rapport aux autres matériaux habituellement utilisés de nos jours, on réduit ainsi de près de 40% l'épaisseur de l'isolation. Pour les épaisseurs d'isolation de 100 à 120 mm, ce nouveau matériau – et ces nouvelles solutions de construction – permettent d'atteindre un standard énergétique extrêmement bas, en particulier au niveau des raccords, en fonction de la pratique habituelle en matière de coûts. Ce produit est disponible sur le marché, de même qu'un Styropor aux performances de 10% à 20% supérieures amélioré grâce à des particules de graphite. La technique de l'isolation sous vide d'air est très prometteuse; elle revêt un grand intérêt pour la plus grande liberté qu'elle autorise au niveau de la conception architecturale du fait de son haut pouvoir isolant et ce, pour de relativement faibles épaisseurs d'isolation, resp. une faible profondeur de panneaux.

En ce qui concerne les systèmes de fenêtres, le progrès technique passe par une amélioration des pièces d'écartement, des enduits des vitres, du remplissage avec des gaz nobles, des triples vitrages et de l'amélioration de l'isolation des cadres. A moyen terme, on peut prévoir le développement de vitres plongées sous vide d'air ainsi que de l'insertion de films isolants entre les verres. Ces nouvelles technologies sont souvent très chères lorsqu'elles sont lancées sur le marché, mais l'expérience démontre que chaque fois que leur utilisation double, les prix diminuent ensuite de 10 à 15 %.

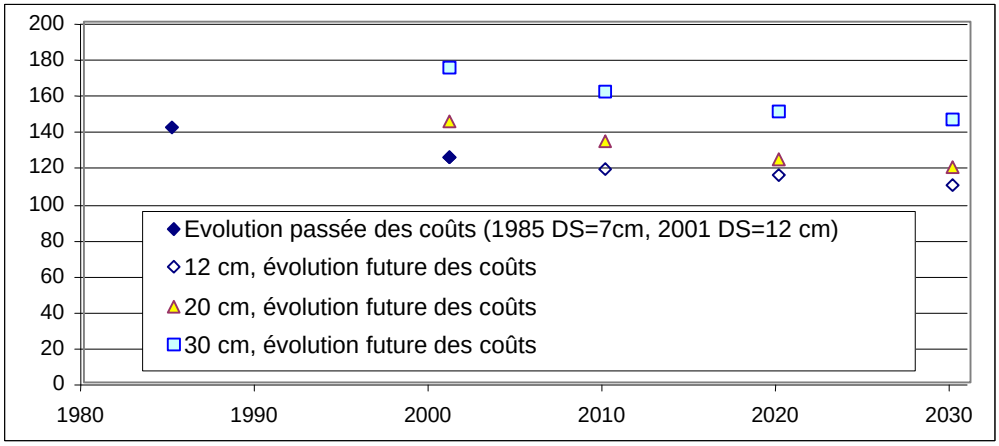


Illustration R.11 Evolution passée et future des coûts d'isolation thermique des façades compactes (relevés et calculs CEPE)

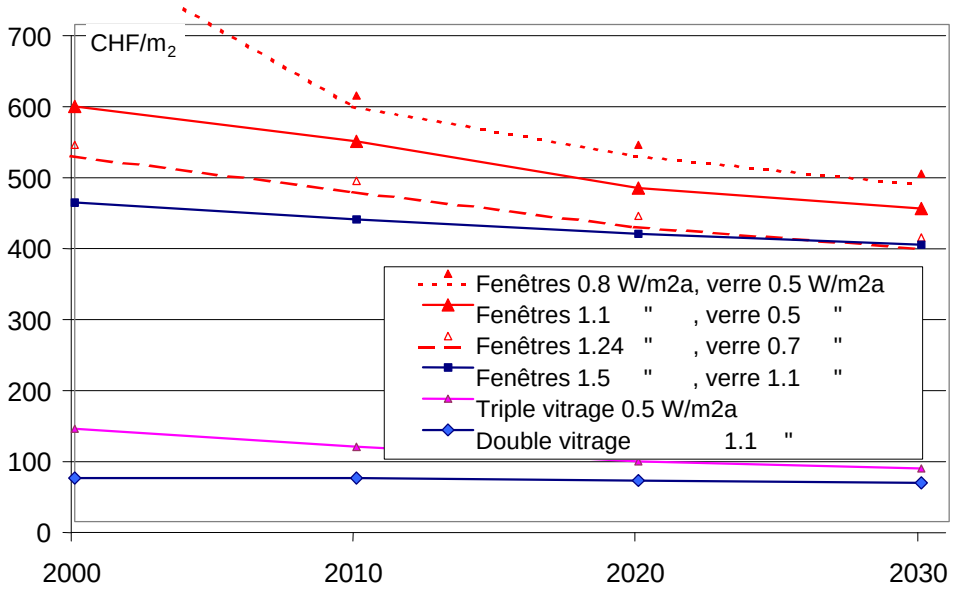


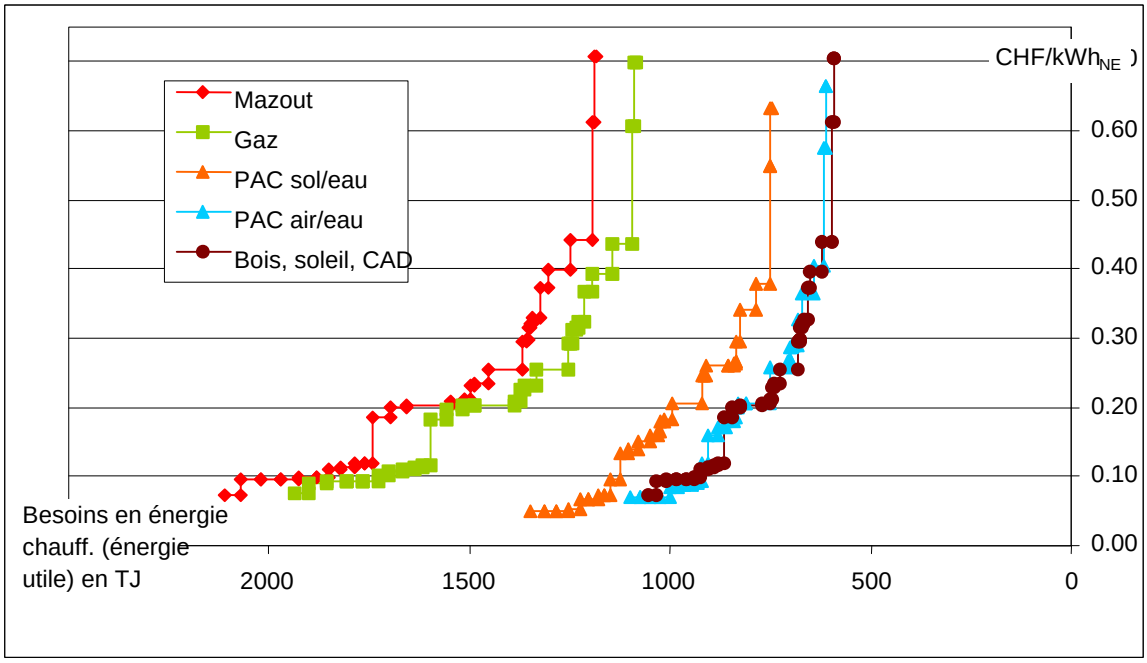
Illustration R.12 Evolution future des coûts des fenêtres et des vitres (relevés et calculs CEPE)

En conséquence de la prévisible baisse des coûts et des futurs progrès techniques (cf. illustration R. 11 et R.12), les coûts marginaux de l'efficacité énergétique diminueront aussi. La dynamique des coûts marginaux est à ce sujet, pour des raisons arithmétiques, sujette à une dynamique particulière, comme l'illustre l'exemple du cas ci-après. Dans la situation initiale, le niveau de prix se situe à 450 CHF/m² et la différence des coûts pour une fenêtre plus efficace s'élève actuellement à 140 CHF/m². En supposant que la fenêtre plus efficace enregistrera une évolution plus dynamique induisant une réduction des coûts de 15%, les coûts d'une fenêtre «normale» ne diminuant quant à eux que de 10%, la différence de coût sera ainsi inférieure à 100 CHF /m². La différence de coût (pertinente dans l'approche des coûts marginaux) s'en trouverait donc réduite de plus de 30%. Cet effet sera encore plus marqué en cas de plus faible différence de coût (de même que, évidemment, en cas de plus grande différence de la dynamique).

Courbes des coûts concernant l'ensemble de la Suisse

La définition d'une évolution de référence constitue une base indispensable de l'approche des coûts marginaux, car tous les investissements supplémentaires et toutes les économies d'énergie qui en découlent sont établis sur ce point de repère. En considérant l'ensemble de la Suisse, il est nécessaire, outre les caractéristiques techniques de construction, de définir une structure quantitative des nouvelles constructions et des activités de rénovation futures.

Pour les nouvelles constructions, c'est encore assez simple, puisqu'il suffit de connaître la future superficie des nouvelles constructions ainsi que les méthodes de constructions actuellement appliquées pour les divers éléments de construction (cf. chapitre précédent). La superficie future des nouvelles constructions peut largement s'appuyer sur les perspectives de *Wüest und Partner*. Jusqu'à l'an 2010, on peut tabler sur une superficie de nouvelles constructions de près de 27 millions de m² pour les maisons individuelles et d'env. 25 millions de m² pour les immeubles locatifs.



Source Calculs CEPE

Illustration R.13 Courbes des coûts marginaux pour l'ensemble de la Suisse (potentiel réalisable) des nouvelles maisons individuelles, période 2001 à 2010, état actuel des coûts.

Pour le cas de référence, les besoins d'énergie utile des bâtiments qui seront nouvellement construits jusque en 2010 s'élèvent à près de 7600 TJ. Jusqu'à des coûts marginaux bruts de 10 cts/kWh$_{NE}$, la demande d'énergie de chauffage (au niveau de l'énergie utile) pourra être réduite de 1300 TJ environ dans l'ensemble de la Suisse pour les nouvelles maisons individuelles par l'adoption de mesures touchant au sol, au toit, aux murs et aux fenêtres des bâtiments (total des économies des courbes de coûts marginaux des cinq types d'installations de l'illustration R.13). Jusqu'à des coûts marginaux de 20 cts/kWh$_{NE}$, on obtient encore 935 TJ supplémentaires. Un potentiel comparativement élevé de réduction de la consommation d'énergies de chauffage réside dans l'intégration des installations d'aération. En supposant que tous les immeubles

locatifs comprennent une installation d'aération, le potentiel théorique s'élève à 1300 TJ. Selon l'hypothèse, le potentiel réalisable d'ici 2010 ne représente que 30% de ce chiffre. Selon la situation et la production de chaleur, les coûts marginaux varient de 23 à 38 cts/kWh$_{NE}$ si l'ensemble des coûts de l'installation d'aération est attribué à l'énergie. Ces coûts marginaux doivent être placés en regard des coûts de chauffage actuels (prix de l'énergie déterminés à long terme divisé par le taux d'utilisation des installations). Le prix du chauffage oscille entre 5 cts/kWh (prix actuel de l'énergie) et près de 10 cts/kWh (hausse des prix internationaux de l'énergie et/ou redevance sur le CO_2). Pour les immeubles locatifs, la consommation annuelle d'énergie de chauffage pour une surface de nouvelles constructions de 25 millions de m^2 découlant du cas de référence s'élève à près de 5600 TJ. La consommation d'énergie de chauffage peut être réduite de 700 TJ environ pour autant que les investissements consacrés à l'efficacité énergétique soient engagés jusqu'à des coûts marginaux bruts de 10 cts/kWh.

La définition de l'évolution du cas de référence dans le domaine de la rénovation des bâtiments est par contre un peu plus complexe. Outre la connaissance de la condition initiale du point de vue des méthodes de construction des diverses catégories de bâtiments (type, période de construction), il est également nécessaire de connaître les taux et les variantes de rénovation (réfection ou isolation thermique) et ce, tant pour les surfaces de référence énergétiques concernées que pour les divers éléments de construction (murs, toit, fenêtres, plafond de cave, etc., de même que combinaisons correspondantes). En Suisse, la base empirique concernant les activités de rénovation passées au niveau de l'efficacité énergétique susceptible de servir de base à la définition de l'évolution future est assez ténue. A l'heure où nous achevons la rédaction du présent rapport, tous les points des données relevées dans le cadre d'un projet de recherche suggéré par le CEPE visant à combler cette lacune n'ont pas encore été soumis à estimation. Dès lors, la définition de l'évolution de référence dans le domaine des rénovations repose en parti sur des hypothèses encore provisoires. Néanmoins, les courbes des coûts marginaux dans le domaine de la rénovation des bâtiments pour l'ensemble de la Suisse sont extrêmement révélatrices dans le sens où apparaît un important potentiel d'amélioration de l'efficacité énergétique à des coûts marginaux relativement bas, c'est-à-dire à un niveau rentable, surtout lorsque l'on procède à une évaluation économique globale.

Cette situation est illustrée pour les maisons individuelles de la période de construction qui s'étend de 1900 à 1961. Dans le cas de référence, les réductions de consommation d'énergie de chauffage des bâtiments de cette période s'élèvent à 7% jusqu'en 2010, car dans le cas de référence, il convient de procéder à des rénovations énergétiques en plus des réfections usuelles. Dans le cas des rénovations énergétiques plus en profondeur (approche des coûts marginaux), on part du principe qu'en plus, 15% de la surface globale des murs devra être isolée et que les façades doivent être munies d'une isolation de 20 cm plutôt que de 12 cm. Pour le toit, on suppose que la couverture ne doit pas seulement être réparée et que la charpente (sous-toit) ne doit pas uniquement être remplacée, mais qu'une isolation thermique est en outre indiquée. Cela s'applique à 1.9 millions de m^2 au cours de ces 10 prochaines années. Or, avec 1.5 millions de m^2 de toits rénovés (application du cas de référence d'une isolation thermique), l'épaisseur de l'isolation passe de 14 à 20 cm. Le segment des coûts marginaux bruts jusqu'à 11 cts/kWh$_{NE}$ renferme un potentiel considérable en matière de réduction des besoins d'énergies de chauffage (cf illustration R.14). Les besoins d'énergies de chauffage de l'ensemble du parc immobilier des maisons individuelles de la période 1900 – 1961 pourraient, à ces coûts, être réduits de 9% supplémentaires par rapport à l'évolution de référence. Avec des coûts bruts allant de 9 à 13 cts/kWh$_{NE}$, les besoins d'énergie de chauffage pourraient encore être réduits de 3% supplémentaires. De ces données sur les coûts, il y a lieu de soustraire les coûts économisés au niveau de la production et de la distribution de la chaleur. A long terme, cela représente entre 2 et 5 cts/kWh pour les installations de même que, pour les coûts énergétiques, entre 4 et 6 cts/kWh, aux prix de l'énergie de ces dernières années, respectivement 8 à 12 cts/kWh, si l'on se réfère à la projection des prix futurs de l'énergie. A

partir de ce point, le potentiel de réduction des mesures plus radicales ainsi que les coûts marginaux commencent vraiment à progresser de façon très marquée.

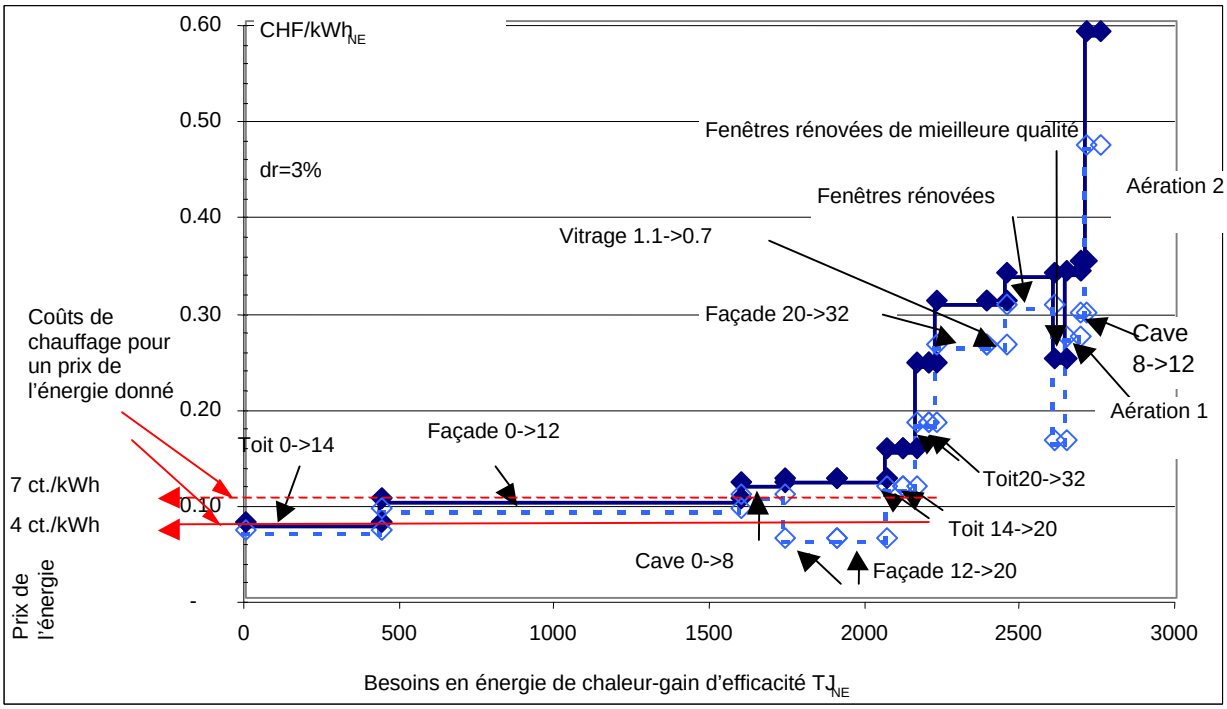


Illustration R.14 Courbe des coûts marginaux des maisons indiv. pour la période de construction 1900 – 1960, au niveau actuel des coûts (courbe en escalier continue) ainsi qu'au niveau des coûts dynamiques (courbe en escalier hachurée).

Dans l'approche dynamique, outre un potentiel déjà important, on constate un potentiel de gain d'efficacité énergétique supplémentaire de près de 500 TJ dans la plage de rentabilité et ce, même si les prix de l'énergie n'enregistrent pas une forte croissance. Ceci correspond à un supplément de 2% de l'ensemble des besoins d'énergie de chauffage pour ce groupe de bâtiments, resp. 20% du potentiel des rénovations réalisables.

Conclusions et bilan

L'analyse du parc immobilier ainsi que les mesures d'isolation thermique envisageables et leurs structures de coûts mettent en lumière la grande complexité de l'objet de nos recherches. Dans les précédentes analyses et les précédents modèles économiques en matière d'énergie, cet objet avait, dans une large mesure, été simplifié à outrance, si bien que l'on parvenait toujours à des évaluations assez clichés, souvent réitérées, selon lesquelles les mesures d'isolation thermique seraient peu rentables et ne pourraient être promues, dans le domaine de la construction, que par des incitations financières. Nos analyses débouchent plutôt sur les constats suivants:

- Les mesures d'isolation thermique du parc immobilier dont les façades, toitures ou caves n'ont pas encore été isolées sont rentables dans bon nombre de cas, surtout lorsque le

propriétaire de l'immeuble tient compte, dans le prix du chauffage, des possibles hausses futures des prix de l'énergie ainsi que des avantages complémentaires liés à l'isolation du bâtiment.

- Du point de vue de l'économie énergétique, des mesures d'isolation thermiques radicales sont efficaces au niveau des coûts, puisque les avantages supplémentaires qu'elles induisent, les coûts externes qu'elles permettent d'éviter et les hausses des prix des énergies auxquelles on peut s'attendre (y compris impôts écologiques et certificats d'émission) doivent être pris en compte pour une longue durée d'utilisation de 30 ou 40 ans.
- Du point de vue économique, il en découle d'autres avantages comme la substitution des énergies d'importation par des biens et des services efficaces produits en Suisse, la possibilité de réinvestissement des économies réalisées sur les coûts de l'énergie, de même que des innovations, diminutions des coûts et exportations (progrès techniques induits par la politique) supplémentaires rendues possibles, sans oublier leurs effets bénéfiques pour l'emploi.

Du point de vue des responsables du bâtiment (propriétaires de maisons individuelle actuels ou futurs, investisseurs immobiliers), il est indiqué d'aborder l'isolation thermique avec une optique à long terme, car leurs investissements (presque toujours liés au bâtiment) ont une très longue portée et qu'une isolation thermique réalisée plus tard, après-coup, revient considérablement plus cher (jusqu'au triple). Une isolation thermique ambitieuse fait en outre l'effet d'une assurance contre la hausse des prix de l'énergie (pensée sécurisante). Au bout du compte, il convient d'en examiner tous les avantages. Autres exemples de co-bénéfices: possibilité d'agrandir l'espace habitable dans les combles en cas d'isolation de la toiture ou protection contre la chaleur en été et propriétés d'insonorisation en cas de rectification des balcons saillants.

Du point de vue de l'économie de l'énergie et de la politique climatique, la rénovation des bâtiments et ses importants potentiels d'efficacité proches de la rentabilité ressortent clairement. Comparativement à d'autres coûts dans le domaine de la protection de l'environnement et du climat, tant la rénovation des bâtiments existants que les nouvelles constructions présentent un potentiel relativement important pour des coûts comparativement peu élevés. Et même du strict point de vue économique, l'optimisation de l'isolation thermique fonctionne comme une assurance, réduisant les risques liés à la fluctuation future des prix de l'énergie.

Pour **tirer profit de ces potentiels,** les instruments suivants sont notamment à l'étude:

- La **fixation de normes et de prescriptions légales** est immédiatement efficace à plusieurs niveaux. D'une part, elle aide à réduire la consommation d'énergie des nouveaux bâtiments et du parc immobilier existant. D'autre part, elle fait appel à l'innovation et au progrès technique, crée des incitations et des marchés. Ainsi, les effets d'apprentissage et d'échelle peuvent se déployer, ce qui permet d'abaisser plus rapidement le seuil de rentabilité à un niveau encore inférieur. Le renforcement et l'adaptation des normes prescrites à l'évolution de la technique sera à cet égard inévitable.
- Par leur rôle de précurseurs et comme premier élan, **les labels tels que MINERGIE** ont également un effet stimulant pour l'innovation, raison pour laquelle il est tout à fait recommandé de les introduire sous une forme adéquate.
- Enfin, **des impulsions au niveau économique** et la définition de conditions-cadres sont également utiles, par exemple l'introduction d'une redevance incitative comme la taxe sur le CO_2. On sait aussi que le dilemme utilisateur/investisseur devrait être surmonté et le

droit du bail adapté. L'annonce des loyers bruts (charges comprises) constitue une première étape dans ce sens.

Les analyses sont documentées dans un rapport final. Il est toutefois manifeste que d'autres analyses détaillées au sujet des calculs des coûts et des rendements sont souhaitables du point de vue des divers acteurs concernés, y compris en ce qui concerne les co-bénéfices (avantages supplémentaires) afin d'être en mesure d'évaluer toutes les mesures d'isolation thermique des bâtiments en parfaite connaissance de cause. Dans ce contexte, il y aurait lieu d'examiner avec toute l'attention nécessaire, en particulier, le dilemme investisseur/utilisateur, c'est-à-dire la problématique bailleur/locataire.

Autre domaine de recherches: approfondir les avantages complémentaires

N'examiner les coûts de mesures d'amélioration de l'efficacité énergétique plus radicales qu'à l'aune des seuls avantages énergétiques, c'est souvent faire preuve de myopie Tant dans le cas d'une rénovation que lors d'une nouvelle construction, il est possible de tirer d'autres avantages d'un gain d'efficacité énergétique. Toutefois, pour pouvoir, économiquement parlant, profiter de ces avantages supplémentaires et les faire entrer en ligne de compte dans les discussions, il est nécessaire de les quantifier et de les monétiser, raison pour laquelle le programme «Fondements de l'économie énergétique» (EWG) de l'OFEN a lancé le projet «Co-bénéfices directs et indirects des bâtiments d'habitation performants en matière d'énergie». Ce projet a pour but d'identifier, de quantifier et de monétiser ces avantages complémentaires (Ott, Jakob 2002).

L'efficacité énergétique obtenue lors de la construction, de l'entretien, de la rénovation et de l'exploitation d'immeubles locatifs n'est pas uniquement tributaire des coûts et avantages énergétiques abordés dans le cadre de ce projet, mais également de toute une série d'autres facteurs tels que l'environnement de l'économie du logement, la situation de refinancement, les traditions de la branche, l'état général du bâtiment, les aspects architectoniques, etc. Pour être en mesure de promouvoir et continuer à soutenir efficacement les constructions et rénovations performantes en matière d'énergie, les interactions entre ces divers facteurs doivent être mieux étudiées.

Zusammenfassung

Problemstellung, Zielsetzungen und methodisches Vorgehen

Ausgangslage

Die grossen Energieeffizienzpotenziale liegen in der Schweiz heute u. a. in der Verminderung des Raumwärmebedarfs, der etwa 50% des Nutz- und etwa ein Drittel des Endenergiebedarfs ausmacht. Denn der Nutzenergiebedarf für Raumwärme könnte gegenüber dem heutigen Durchschnittswert des Gebäudebestandes um etwa zwei Drittel niedriger liegen (z.B. nach dem Minergiestandard) und beim Neubau von Solarpassivhäusern können Verbesserungen um einen Faktor fünf bis zehn erreicht werden.

Angesichts der Zielsetzungen des Schweizer CO_2-Gesetzes, die brennstoffbezogenen CO_2-Emissionen in 2010 um 15 % gegenüber jenen des Jahres 1990 zu reduzieren, hat dieses Energieeffizienz- und CO_2-Minderungs-Potenzial im Bereich der Gebäude - und insbesondere im Bereich der Wohngebäude - eine grosse Bedeutung. Allerdings wird dieses Potenzial derzeit von vielen Hausbesitzern und Wohnungsbaugesellschaften bei Erneuerungen sehr wenig genutzt. Als Argument unzureichender Nutzung dieser Energieeffizienzpotenziale wird immer wieder mangelnde ökonomische Rentabilität als Argument genannt. Für eine aktuelle und sachadäquate ökonomische Bewertung der Wärmeschutzinvestitionen sind die heutigen und zukünftigen Kosten und Nutzen dieser Optionen und auch ihr Grenzkostenverlauf als Informationsbasis von grosser Bedeutung.

Neben einer differenzierten Aktualisierung der heutigen Kosten stellt sich die Frage der Kostenentwicklung der Energieeffizienztechniken an Gebäudehülle und der Heiztechnik. Hier handelt es sich häufig um neue Technologien, neue Werkstoffe und Baukonzepte oder Bearbeitungsverfahren. Diese beinhalten zum Teil erhebliche Lernpotenziale oder Potenziale der Serienfertigung, die in Zukunft die Kosten dieser neuen Techniken und Baukonzepte reduzieren könnten. Diese Kostendynamik war bisher nicht untersucht. Über die lange Nutzungsperiode von Wärmeschutzinvestitionen an Gebäuden muss in den kommenden Jahrzehnten infolge des erwarteten Produktionsmaximums von Erdöl mit einem steigenden Energiepreisniveau gerechnet werden, was auch in den Nutzenbewertungen der Wärmeschutzinvestitionen berücksichtigt werden sollte.

Bei der Bewertung derartiger Investitionen an Wohngebäuden geht es i.a. nicht nur um einen energetischen Nutzen, sondern auch andere *begleitende Nutzen (Co-Benefits*, z. B. höherer Wohn- und Bedienungskomfort, Lärmschutz, zusätzliche Sicherheit, geringere Häufigkeit der Erkrankung der Atmungsorgane, verbesserte Vermietbarkeit). Diese begleitenden Nutzen werden meist weder angesprochen noch quantifiziert. Nur in wenigen Fällen liegen monetarisierte Werte dieser Co-Benefits vor. Aber gerade hier liegen sowohl für die Wohnungswirtschaft wie auch für die Mieter und Bauherren weitere Aspekte einer angemessenen ökonomischen Bewertung. Schliesslich bleibt aus volkswirtschaftlicher Sicht der Aspekt der Vermeidung externer Kosten durch geringere Emissionen.

Zielsetzungen des vorliegenden Berichts

Aufgrund der in der Problemstellung genannten Aspekte verfolgt das hiermit abgeschlossene Forschungsprojekt für den Bereich Wohngebäude folgende Ziele:

- Die empirisch abgestützten Kenntnisse zu den Kosten und Grenzkosten für Wärmeschutz- bzw. Energieeffizienz-Massnahmen (Wärmedämmung, Fenster, Lüftung) sollten gegenüber den bisher für die Schweiz vorliegenden Informationen deutlich verbessert werden.
- Die erforderlichen technischen Kennwerte und Kostendaten für Kosten-Effizienzkurven sollten für den Neubau und für Erneuerungen im Gebäudebestand auf möglichst empirischer Basis aktualisiert werden; sie sollten den neuesten Stand technischer verfügbarer Möglichkeiten, der Baukonzeption und -durchführung sowie der Berechnungsverfahren zur Kostenermittlung (einschliesslich der Dynamisierung zukünftiger Kosten) wiedergeben.
- Die Kosten und (begleitenden) Nutzen sollten – soweit dies das Forschungsbudget zuliess – so differenziert und transparent dargestellt sein, dass sie einerseits die Vielfalt bestehender Gebäude und möglicher Energieeffizienz-Investitionen und Baukonzepte reflektieren, andererseits bei neuen Erkenntnissen zu Einzelkosten oder Einzelnutzen auf einfache Weise entsprechende Korrekturen bei der ökonomischen Bewertung ermöglichen.
- Auf diese Weise sollte auch erreicht werden, dass neben dem Informationsbedarf energiewirtschaftlicher Analysen die Akteure des Immobilienmarktes, der Gebäudebesitzer, der Bauherren und der Technologieproduzenten, Planer und Installationsbetriebe einen genaueren Einblick in diese Kosten- und Nutzenzusammenhänge erhalten und nach Möglichkeit für eine differenzierte Information ihres jeweiligen Zielpublikums in Zukunft nutzen können.

Schliesslich sollten aus den Ergebnissen Schlussfolgerungen und (soweit möglich) wesentliche Empfehlungen für die verschiedenen Akteursgruppen abgeleitet werden.

Methodisches Vorgehen im Überblick

Wegen der Vielfalt der Forschungsfragen sind die einzelnen methodischen Vorgehensweisen in den jeweiligen Kapiteln beschrieben. Konzeptionell wurde wie folgt vorgegangen (vgl. auch Abbildung ZF. 1):

- Die Investitionen zum Wärmeschutz werden im Re-Investitionszyklus einer erforderlichen Erneuerung bzw. anlässlich eines Neubaus getätigt; dies erfordert in allen Berechnungsfällen jeweils die Definition eines *Referenzfalles* für die jeweiligen Gebäudetypen (z.B. Ein- und Mehrfamilienhäuser) und Investitionsfälle (z.B. Neubau, Erneuerung);
- Insbesondere bei *Erneuerungen war eine getrennte Behandlung der Massnahmen* an der Gebäudehülle, im Bereich des Luftwechsels und der Heiztechnik erforderlich; sie wurde auch im konventionellen Neubau versucht (bottom-up), aber eine *integrierte Betrachtung beim Neubau von Minergie- und Passivhäusern* war sachlich geboten;
- Für die Beschreibung der bisherigen Baupraxis, der heutigen Wohngebäudestruktur (mit Einschluss bisher erzielter Wärmeschutzinvestitionen, vgl. Kap. 2 und 3), der Kostenstruktur von heute (2001) und der vergangenen Jahrzehnte sowie der hergestellten Güter waren *umfangreiche Erhebungen* bei Bauunternehmen, Bauökonomen, Herstellern und Kantonen erforderlich. Diese Erhebungen erwiesen sich als sehr aufwändig, aber auch als sehr informativ.
- Die Erhebung bzw. Schätzung der Kosten der einzelnen Energieeffizienz-Investitionen und der damit verbundenen *energetischen und nichtenergetischen Nutzen* im Gesamtkontext der jeweiligen Erneuerungs- bzw. Neubauinvestitionen war ebenfalls extrem aufwändig und zum Teil nur ansatzweise zur Demonstration des methodischen Vorgehens oder der Werte der Co-Benefits bzw. vermiedenen externen Kosten durchführbar.

- Die Aggregation der empirischen Investitionsdaten zu *typischen Investitionsbündeln* für definierte Gebäudetypen und weiter zu energiewirtschaftlichen Kostenpotentialkurven (unter Berücksichtigung der relativen Häufigkeiten auf gesamtschweizerischer Ebene) erfolgte *exemplarisch*; sie zeigte aber auch die Bedeutung der Definition einer Referenz-Variante für die einzelnen Investitionsfälle und ihre resultierende ökonomische Bewertung.
- Der *Nettonutzen (oder die Nettokosten) wurde unter Einbezug von Co-Benefits und vermiedener externer Kosten* zur Gewährleistung einer möglichst transparenten und akteursspezifischen Darstellung *separat* behandelt, konnte aber in dieser Analyse exemplarisch behandelt werden.

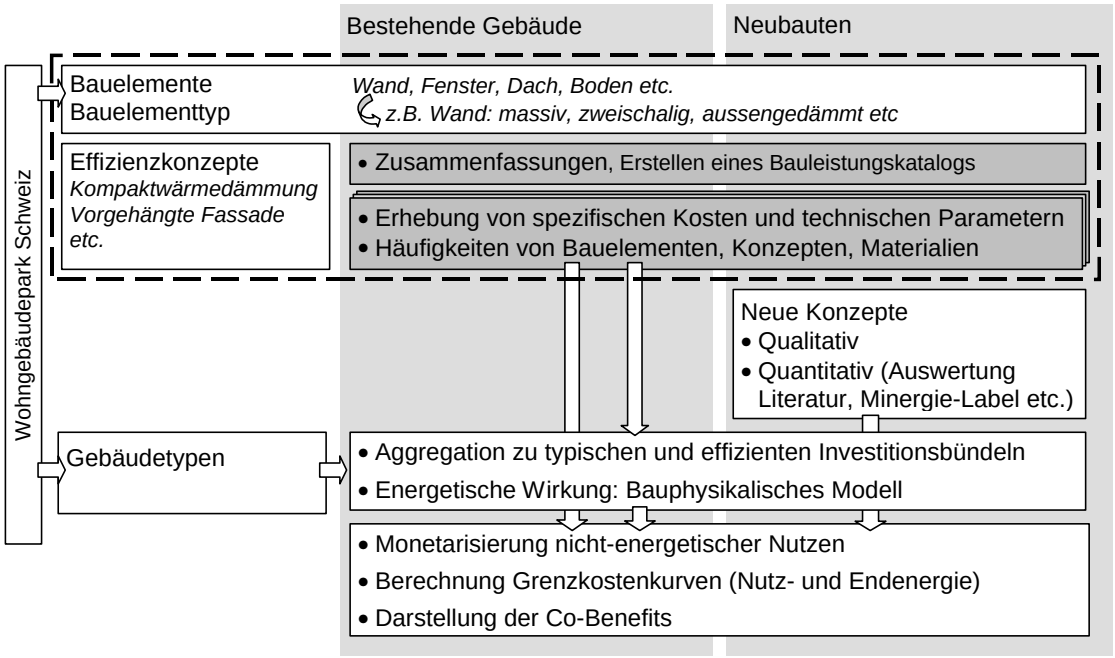


Abbildung ZF. 1 Strukturierung der Analyseinhalte und -teilschritte zur Bestimmung der Grenzkosten und -nutzen zusätzlicher Energieeffizienz-Investitionen in Wohngebäuden

Die gebäudewirtschaftliche und -technische Ausgangssituation

Die vergangene, heutige und künftige Bauweise bzw. Erneuerungstätigkeit wurde und wird von sehr verschiedenen Einflussfaktoren bestimmt. Diese Faktoren beeinflussen sowohl die Investitionsentscheide und die damit verbundene Erneuerungshäufigkeit, aber auch in einer Art Rückkopplung die Kostenentwicklung sowie die energetischen und weiteren Nutzen der Erneuerungsmassnahmen. Eine systematische Kategorisierung der unterschiedlichen betriebswirtschaftlichen Ausgangslagen (Gebäudezustand, Ertragslage und –potential, Finanzierungsaspekte, Besitzer-/Nutzerverhältnis) und typische darauf aufbauende Investitionsentscheide zu Wärmeschutz- und Energieeffizienzmassnahmen konnten nur in begrenztem Umfang angegangen werden.

Das vorliegende Forschungsprojekt verfolgt in seinem Fokus den Grenzkostenansatz, der auf die Zusatzkosten und –nutzen von weitergehenden baulichen Energieeffizienzmassnahmen und deren Potenziale abzielt. Basis und Ausgangslage des Grenzkostenansatzes ist der Referenzfall, an dem die Zusatzkosten und –nutzen gemessen werden. Beim Neubau ist dies die

Bauweise, bei der Gebäudeerneuerung der Zustand des Gebäudeparks und die Erneuerungstätigkeit.

Die vorhandene, empirisch abgestützte Literatur zur gebäudetechnischen Ausgangssituation wurde durch eigene Erhebungen ergänzt. Damit konnte z.B. eine kontinuierliche Verbesserung der energetischen Qualität bei den Neubauten nachgewiesen werden, wobei die Entwicklung etwa ab ca. Mitte der 1970er Jahre - wenige Jahre nach der ersten Ölpreiskrise - einsetzt (vgl. Kap.2). Sukzessive wurden die Dämmstärken der Wärmedämmungen von rund 4 cm auf 10 cm bis 12 cm (Fassade) bzw. 12 cm bis 14 cm (Dach) erhöht, wodurch der spezifische Energieverlust gegenüber dem ungedämmten Zustand um ca. einen Faktor 4 verbessert wurde. Ähnlich markant war der technisch-wirtschaftliche Fortschritt im Bereich der Fenster bzw. der Gläser, wo die energetische und wirtschaftliche Effizienz um ein Dreifaches gesteigert werden konnte: bei praktisch konstanten Kosten wurde der Glas-U-Wert von rund 3.0 W/m^2K zu Beginn der 1970er Jahr auf den heutigen Standard von 1.1 W/m^2K gesenkt.

Die vergangene und heutige Neubau- und Erneuerungstätigkeit

Eine Untersuchung von Wüest und Partner (2000) berichtet für den *Neubau* spezifische Energieverbrauchswerte von rund 400 MJ/m^2a (inkl. Warmwasser-Bedarf und Wirkungsgradverluste); dies deutet darauf hin, dass die oben erwähnten 12 cm bis 14 cm in der Praxis nicht flächendeckend erreicht werden. Auch die festgestellte Streuung beim spezifischen Energiebedarf der Neubauten bedeutet, dass der energetische Referenzfall mit der Wahl eines bestimmten Energiebedarfs eine Typisierung darstellt, die in der Praxis Abweichungen hat.

Die Impulse zu höherem Wärmeschutz, die von den Neubauten ausgingen, übertrugen sich auch auf die *Gebäudeerneuerung*, jedoch nur dann, wenn bei den Erneuerungen der Energieaspekt für den Investor eine Bedeutung hatte. Wenn energetisch erneuert wird, sind die Dämmstärken und die eingesetzten Fensterqualitäten in der Regel ähnlich wie im Neubaufall. Aufgrund der bautechnischen Gegebenheiten und der Bauabläufe müssen allerdings zum Teil Abstriche gemacht werden (keine oder nur geringe Dämmung der Anschlüsse angrenzender Bauteile wie Fensterleibungen, Flachdachränder oder Wand-/Dachübergänge sowie Sockel). Auch wird die Gebäudehülle vielfach nicht integral erneuert, wie die durchgeführten Erhebungen und Befragungen bei Fassaden- und Dachunternehmungen gezeigt haben (siehe Kap. 3). Der Energiebedarf der erneuerten Gebäude erreicht deshalb meistens nicht das niedrige Energieverbrauchs-Niveau der heutigen Neubauten. Auf dieses Niveau und sogar niedriger zu kommen, ist aus bautechnischer Sicht jedoch durchaus möglich, wie die Vielzahl der in den letzten Jahren durchgeführten Minergie- und P&D-Projekte belegen.

Die Anteile der *längenspezifischen Elemente* und die gewählten bzw. die sich aus der Situation heraus ergebenden Bauabläufe führen zum einen zu Zuschlägen bei den baulichen Massnahmen, zum anderen können sie die energetische Wirkung flächiger Massnahmen schmälern, wenn bei linienbasierten Elementen wie Fensterleibungen, Sockel etc. Kompromisse gemacht werden bzw. gemacht werden müssen.

Im Hinblick auf mögliche Kostenunterschiede wurde der *Gebäudepark* hinsichtlich der vergangenen Bauweise und der Gebäudeformen charakterisiert. Im Lauf der Projektarbeit zeigte sich jedoch, dass z.B. die bestehende Wandkonstruktion nur einen geringen Einfluss auf energetische Effizienzinvestitionen hat; sowohl bei monolithischen Konstruktionen, Zweischalenmauerwerk, Betonwänden oder auf bestehende Aussenwärmedämmung kann eine neue oder ergänzende Aussenwärmedämmung angebracht werden. *Die Mehrkosten* bei erhöhten Dämmstärken sind für die jeweils geeigneten Dämmvarianten (hinterlüftete Fassaden, Kompaktfassaden) sehr ähnlich. Im Einzelfall kann es von Gebäude zu Gebäude zu Unterschieden

kommen. Unter *bauphysikalischen Aspekten* könnten bei 35% bis über 60% der Gebäude Folgeprobleme auftreten, wenn z.B. nur die Fenster ausgewechselt würden und das Gebäude nachher zu dicht wäre, d.h. Feuchtigkeitsfolgen an den unzureichend gedämmten Wänden auftreten könnten.

Häufig wurde (und wird immer noch) der Wärmeschutz bei einer *Gebäudeerneuerung* seitens der Hausbesitzer aus mehreren Gründen vernachlässigt. Nur bei einem Viertel bis einem Drittel der im letzten Jahrzehnt durchgeführten Fassadenerneuerungen wurden Fassaden auch energetisch erneuert; die übrigen erfuhren nur eine Putzausbesserung bzw. einen Neuanstrich. Im Dach- und Fensterbereich ist der Anteil der energetischen Erneuerungen etwas höher, beim Fenster vor allem deswegen, weil eine Fenstererneuerung in den letzten 15 bis 25 Jahren meistens ein Fensterersatz bedeutete und aufgrund des grossen technischen Fortschrittes jeweils nur noch merklich verbesserte Fenster erhältlich waren. Insgesamt besteht immer noch ein sehr grosses Potential, den Energiebedarf des Gebäudebestandes zu senken, da der Anteil der noch nicht energetisch verbesserten Bauteile je nach Bauteil (Dach, Wand, Fenster, Kellerdecke etc.) immer noch zwischen 30% und 80% beträgt.

Methodik der Kosten und Nutzen von Energieeffizienz-Investitionen (einzelwirtschaftliche Partialanalyse)

Eines der Hauptziele des Projektes war, die Kenntnis der Grenzkosten von *forcierten Wärmeschutz- bzw.* Energieeffizienzinvestitionen zu verbessern, d.h. auf eine neue empirische Grundlage zu stellen. Zunächst sei kurz das methodische Vorgehen zu den empirischen Erhebungen und zur Grenzkostenberechnung der direkten Kosten und der energetischen Nutzen skizziert. In einem zweiten Schritt wird erläutert, dass dieser einzelwirtschaftliche Bewertungsansatz allein zu kurz greifen würde, wollte man daran die Entscheidungen zu baulichen Energieeffizienz-Investitionen messen.

Wie viel mehr kostet eine höhere Dämmstärke und welcher energetische Effizienzgewinn und welche weiteren Kostenreduktionen lassen sich damit erreichen? Um diese Frage zu beantworten, wurde methodisch wie folgt vorgegangen.

- *Direkterhebungen* bei Unternehmen: Kostenstruktur der Fassaden- und Dachdämmungen in Funktion der Dämmstärke, Preise von Gläsern und Fenstern sowie von Lüftungsanlagen in Funktion der energietechnischen Kennwerte bzw. ihrer lüftungstechnischen Effizienz. Auf die speziellen Interpretationsprobleme bei Preisangaben neuer Technologien wird im nachfolgenden Absatz noch eingegangen.
- *Bestimmen der energetischen Wirkung*, also des energetischen Effizienzgewinns (=zusätzliche Einsparung des Heizwärmebedarfs) der einzelnen Effizienzmassnahmen mittels U-Wert-Berechnungen bzw. eines gebäudephysikalischen Modells (SIA 380/1).
- *Ermittlung der Jahreskosten*, wobei die (hier dominanten) Kapitalkosten mittels der Annuitätenmethode unter Berücksichtigung der spezifischen Lebensdauer berechnet wurden.
- *Definition der relevanten Referenzfälle* (vgl. unten stehende Erläuterungen).
- *Berechnung der Grenzkosten* gegenüber dem jeweiligen Referenzfall (Durchschnittskostenprinzip) bzw. gegenüber dem jeweils vorangehenden Effizienzlevel (reines Grenzkostenkonzept).
- *Zusammenfassung* einzelner investiver Massnahmen aufgrund der spezifischen Grenzkosten zu *Massnahmenbündeln bzw. Investitionspaketen*.

Die Referenzneubauweise und das Referenzerneuerungsverhalten war zunächst bzgl. energetischer und bautechnischer Merkmale auf der Ebene Bauteil bzw. Gebäude für typische Fälle festzulegen, anschliessend war die quantitative Relevanz, d.h. die gesamtschweizerische Häufigkeit dieser Fälle zu bestimmen. Dazu wurden nebst dem Zurückgreifen auf bestehende Publikationen und Statistiken auch Primärerhebungen durchgeführt. Namentlich wurden Energienachweise bei Bauverwaltungen und das Lärmprogramm des Kantons ZH ausgewertet, um für Parameter wie spezifischer Energiebedarf oder Gebäudehüllenziffern nicht nur einen Durchschnittswert, sondern auch eine Verteilung zu erhalten.

Folgende *Referenzfälle* wurden unterschieden:

- *Neubau*: die aktuellen energetischen Vorschriften bzgl. Wärmeschutz und -bedarf der Gebäude (SIA 380/1) bzw. die tatsächlich realisierte energetische Neubauqualität mit empirisch ermittelten Anteilen von energetisch effizienteren Gebäuden (Minergie), durchschnittlichen und weniger effizienten Gebäuden>;
- Bei der *Gebäudeerneuerung sind zwei Referenzfälle* zu unterscheiden:
  1. *Instandsetzung* (z.B. Putzerneuerung/Fassadenanstrich);
  2. *energetische Erneuerung* (z.B. Fassadendämmung 12 cm);
- *Bauteile*:
  Wanddämmungen: 0 cm bzw. rund 12 cm Dämmstärke,
  Dachdämmungen rund 14 cm Dämmstärke,
  Fenster: U-Wert$_{Glas}$ = 1.1 W/m^{2}K, U-Werte$_{RahmenHolz}$ = 1.4 W/m^{2}K, U-Werte$_{Kunststoff}$ = 1.6 W/m^{2}K

Die Grenzkosten werden wie folgt definiert:

$$Grenzkosten\,(Durchschnittskostenansatz) = \frac{Jahreskostendifferenz\ zu\ Referenz}{Energetischer\ Effizienzgewinn\ gegenüber\ der\ Referenz}$$

$$Reiner\ Grenzkostenansatz = \frac{Jahreskostendifferenz\ zu\ vorherigem\ Effizienzlevel}{Energetischer\ Effizienzgewinn\ gegenüber\ dem\ vorherigen\ Effizienzlevel}$$

Die beiden Ansätze lassen sich wie folgt charakterisieren:

- *Durchschnittskostenansatz* (Mehrkosten und –nutzen gegenüber der Referenzneubau- bzw. Erneuerungsweise): geeignet und in der Praxis verwendet für den Vergleich von Investitions-Varianten gegenüber einer Referenz-Investition, vor allem für Gebäudebesitzer, Immobilienbesitzer und Liegenschaftsverwaltungen. Die verschiedenen Effizienzlevel werden dabei mit der Referenz verglichen, also z.B. die Dämmstärke 16 cm mit 12 cm, 20 cm ebenfalls mit 12 cm, 30 cm ebenfalls mit 12 cm.
- *Reiner Grenzkostenansatz* (Mehrkosten und –nutzen gegenüber dem jeweils in konkreten Schritten definierten, vorangegangenen Effizienzlevel) für die gesamtwirtschaftliche Betrachtung und für energiewirtschaftliche Modelle zwecks rationaler Gestaltung und Begrenzung von Förderprogrammen, Lenkungsabgaben etc. Beispielsweise werden die Mehrkosten einer Wärmedämmung von 24 cm im Vergleich zu 20 cm dem damit verbundenen Effizienzgewinn gegenübergestellt (z.B. U-Wert-Verbesserung 0.2 auf 0.18 W/m^{2}K).

Bei der Bestimmung der Mehrkosten der weitergehenden Energieeffizienzinvestitionen wird davon ausgegangen, dass diese beim gleichen Bauvorhaben so getätigt werden, dass eine

Erhöhung der Dämmstärke gleichzeitig zur ohnehin geplanten Erneuerung (mit oder ohne Wärmedämmung) erfolgt.

Da es sich bei den meisten Energieeffizienzmassnahmen um bauliche Investitionen mit geringem Unterhaltsanteil handelt, liegt der Kapitalkostenanteil meist bei rund 100% (ausser bei Lüftungsanlagen). Entsprechend ist die Sensitivität der Jahres- bzw. Grenzkosten gegenüber der Annahme zum Realzinssatz. Aus gesamtwirtschaftlicher Sicht wird ein Realzins von 3% bis 3.5% als angemessen angesehen und für den reinen Grenzkostenansatz verwendet. Ob die Tendenz zu Forderungen nach höheren Zinssätzen, die bei grossen institutionellen Anlegern vor allem bzgl. Wirtschaftsbauten anhalten wird und ob dies auch für einen Teil der Wohngebäude von Bedeutung sein wird, ist zur Zeit der Berichtsverfassung schwierig abzuschätzen. Zur Illustration wurden die Durchschnittskosten teilweise auch mit 5.5% Realzins gerechnet.

Die Kosten und Nutzen lassen sich auch als Jahreskosten in Funktion des Heizwärmebedarfs Qh darstellen, siehe z.B. Graphik 4. Diese Form der Darstellung erleichtert den Vergleich mit anderen Kostenkomponenten in der Wohnungswirtschaft, insbesondere mit dem Mietzins.

Elemente einer ganzheitlichen ökonomischen Bewertung

Zu einer ganzheitlichen ökonomischen Bewertung sind gegenüber den oben beschriebenen Kosten und Nutzenberechnungen weitere Elemente mit einzubeziehen: Das Marktumfeld der Erhebungen zu den Kosten, der technische Fortschritt und seine induzierte Kostendynamik, die ökonomische Bewertung der eingesparten Energien und begleitende Nutzen der Investitionen; aus gesamtwirtschaftlicher Sicht kommen vermiedene externe Kosten noch hinzu.

Ökonomische Interpretation der erhobenen Kosten

Bei der Interpretation der Kostenangaben der forcierten Energieeffizienz-Investitionen ist zu beachten, dass der entsprechende Markt erst im Entstehen ist. Die installierenden Unternehmen (oder mindestens ein Teil von ihnen) verfügt über keine oder nur geringe Erfahrung, sowohl was die technischen Aspekte als auch was die Kostenkalkulation betrifft. Entsprechend gross ist die Streuung der Kosten solcher weitergehender Massnahmen, dies im Gegensatz zum Bereich des heute üblichen Baustandards, bei dem die Streuung wesentlich geringer ist. In den Kostenangaben sind häufig Lernkosten oder "Angstzuschläge" präsentiert, oder der Anbieter vermutet, dass der energiebewusste Bauherr sich als "wärmetechnischen Pionier" versteht und daher auch höhere Preise akzeptiert (Pioniermarkt). Methodisch wird diesen Sachverhalten Rechnung getragen, indem nebst dem Mittelwert auch die best practice-Werte betrachtet werden bzw. als "Ausreisser nach oben" identifizierte Werte bei der Mittelwertbildung ausgeschlossen werden.

Technischer Fortschritt und Kostendynamik

Für Anleger mit grossen Immobilienportfolios, besonders aber für die Verwaltung und die Politik ist von Bedeutung, dass bei Wärmeschutzmassnahmen in der Vergangenheit ein technisch-ökonomischer Fortschritt zu beobachten war. Methodisch kann dieser mit dem Konzept der Lern- und Erfahrungskurven beschrieben werden. Danach sind neue Technologien zu Beginn des Markteintritts meist relativ teuer, aber erfahrungsgemäss sinken die Kosten mit jeder Verdopplung ihrer Anwendung um einen gewissen Prozentsatz (meist 10% bis 20%). Energetische Massnahmen (insbesondere bauliche) weisen eine vielfältige Kostenstruktur auf, Für die einzelnen Kostenkomponenten mussten unterschiedliche Deflatoren verwendet werden, um die bei den Unternehmen erhobene nominelle Preisentwicklung auf den heutigen

Kostenstand umzurechnen, bzw. unterschiedliche Kostenreduktionen für die Kostenschätzungen für die kommenden zwei bis drei Jahrzehnte.

Wegen des Zusammenhangs zwischen umgesetzten Mengen und sinkenden Kosten sind die *künftige Preisentwicklung sowie der technische Fortschritt bis zu einem gewissen Mass gestaltbar*. Wenn die Energieeffizienz durch geeignete Rahmenbedingungen (zeitlich begrenzte Förderprogramme, Lenkungsabgaben, Exportförderung, Produktionskooperationen, Pooling von Nachfrage etc.) gefördert wird, ermöglicht dies den Unternehmen, Erfahrungen zu sammeln, Lernprozesse zu initialisieren bzw. grössere Serien zu produzieren.

Künftige Entwicklung der Energiepreise

Zwei Gründe sprechen dafür, dass die Wirtschaftlichkeitsrechnungen zu den Wärmeschutz-Investitionen, deren Nutzungszeiten zwischen 30 und mehr als 50 Jahren liegen, nicht mit heutigen, sondern mit höheren Wärme- bzw. Energiepreisen durchgeführt werden sollten, die im betrachteten Nutzungszeitraum als durchschnittliche Preise anzusetzen sind.

- *Die schnelle Industrialisierung* und *Motorisierung* von China, Indien und Südamerika in den kommenden wenigen Jahrzehnten mit einem hohen Zuwachs des weltweiten Energiebedarfs fällt zusammen mit einem Rückgang der Produktionsmöglichkeiten für Erdöl und Erdgas in den Nicht-OPEC-Staaten. Zudem erwartet man in der Zeit zwischen 2020 und 2030 das *globale Produktionsmaximum für Erdöl*. Diese beiden Entwicklungen führen in den nächsten zwei Jahrzehnten zu einer *schnellen Rekonzentration der Erdölförderung im Nahen Osten* von derzeit 30 % Anteil der Welterdölförderung auf 50 % in 2020. Selbst wenn diese Förderregion politisch stabilisiert wird, ist für Erdöl mit einem höheren Erdölpreis als 25 $/barrel zu rechnen.
- Obwohl schwerwiegende Folgen des Klimawandels möglicherweise erst in einigen Jahrzehnten wahrzunehmen sein werden, zeigen sich bereits heute erste kleinere Auswirkungen wie die Halbierung der alpinen Gletscher, verstärkte Niederschläge und eine Verlängerung der Wachstumsperiode in Europa (IPCC 2001). Das CO_2-Gesetz der Schweiz und die Verpflichtungen der meisten Industriestaaten gemäss dem Kyoto-Protokoll sind wohl erst ein Anfang politischen Reaktionen auf den Klimawandel. Aber bereits eine CO_2-Abgabe von 100 CHF/t CO_2 oder ein Emissionszertifikat von 70 $/t CO_2 würde die heutigen Heizöl- bzw. Erdgaspreise verdoppeln und den Wärmepreis deutlich ansteigen lassen.

Veränderte Rahmenbedingungen - Bonitätsbewertung, rückläufige und alternde Wohnbevölkerung

Veränderte und vom Investor zum Teil beeinflussbare Spielregeln zur Festlegung der Kreditzinsen und eine längerfristig veränderte Wohnungsnachfrage sind absehbar neue Rahmenbedingungen, die zwar heute noch nicht wirksam sein mögen, aber bei Investitionsentscheiden berücksichtigt werden sollten.

- Das Baseler Abkommen II verpflichtet die Banken ab dem Jahre 2006 zu einer Bonitätsbewertung ihrer Kunden. Diese Einstufung wird bei Hauseigentümern und Wohnungsbaugesellschaften nicht zuletzt von dem bautechnischen Zustand der Wohngebäude, ihrem Wert und ihrer Vermietbarkeit abhängen. Eine gute oder schlechte Bonitätseinschätzung kann nach bisherigen Erfahrungen einen ganzen Prozentpunkt an den Kreditzinsen ausmachen, d.h. einen Unterschied der Zinskosten von bis zu 20 %. Was der Gebäudebesitzer heute an Wärmeschutz-Investitionen spart, haben er oder seine Mieter in Zukunft nicht nur über erhöhte Energiekosten auszugleichen, sondern vielleicht auch zusätzlich über erhöhte Zinskosten.

- Die Nachfrage nach gut wärmegedämmten Wohnungen könnte aufgrund der sich langfristig verändernden Schweizer Wohnbevölkerung zunehmen. Denn eine rückläufige Wohnbevölkerung würde den Haus- und Wohnungsmarkt zu einem Käufermarkt wandeln; von einer schrumpfenden Wohnbevölkerung geht das Bundesamt für Statistik in seiner "Trendentwicklung" nach dem Jahre 2020 aus. Erhebliche Leerstände bei wärmetechnisch schlechten Wohnungen sind dann wahrscheinlich, und damit auch eine schlechte Bonitätseinschätzung der betroffenen Besitzer und höhere Kreditzinsen.
- Selbst wenn eine schrumpfende Wohnbevölkerung durch die Schweizer Einwanderungspolitik vermieden werden sollte, so bliebe der Trend einer *stark alternden Bevölkerung* erhalten. Ältere Menschen bevorzugen wegen des meist schlechten Blutkreislaufs höhere Zimmertemperaturen und geringe Luftwechselraten sowie wegen ihrer relativ geringeren Einkommen niedrige Heizkosten.

Private und öffentliche Zusatznutzen

Erneuerungen von Wohngebäuden werden sehr selten allein im Hinblick auf energetische Verbesserungen vorgenommen, und die Erneuerungen an der Gebäudehülle umfassen meist mehr als nur energierelevante Massnahmen (z.B. Verschönerung der Fassaden, Ausbau von Dachgauben, Feuchtigkeitsschutz von Kellerwänden). Hinzu kommt, dass nicht wenige Energieeffizienz-Investitionen häufig in mehrfacher Hinsicht einen *zusätzlichen Nutzen* zu den Energiekosteneinsparungen mit sich bringen, die in einzelwirtschaftlichen Bewertungen häufig "vergessen" werden.

Die ökonomische Bewertung derartiger zusätzlicher Nutzen (z.B. Komforterhöhung durch angenehme Wandtemperaturen oder gut gelüftete Räume, Verbesserung der Sicherheit oder Verdunklungsmöglichkeit am Tage durch Rollladen, Verbesserung des Lärmschutzes und daraus resultierend eine Wertsteigerung des Gebäudes bzw. bessere Vermietbarkeit, vgl. Tabelle ZF.1) wird in wohnungswirtschaftlichen Bewertungen bisher häufig nicht gemacht; sie ist vollumfänglich auch nur mit erheblichem Mehraufwand möglich und wird vom Investor meist nur teilweise quantitativ, ansonsten lediglich qualitativ, falls überhaupt, in seine Entscheidungen einbezogen, indem der Haus-Eigennutzer seine Präferenzen mit einbezieht und der Vermieter seine Einschätzung über zusätzlich zu erzielende Mieteinnahmen, die verbesserte Vermietbarkeit oder die Wertsteigerung infolge des erhöhten Wohnkomforts.

Der Einbezug derartiger begleitender Nutzen in die formale ökonomische Bewertung scheitert nicht selten an den verfügbaren Informationen zur Quantifizierung dieser Effekte oder ihrer Monetarisierung. Hier ist deshalb noch ein hoher Forschungsbedarf, um im Erneuerungsalltag und in der Energiepolitik zu sachgerechten Entscheidungen zu kommen (seit Juli 2002 läuft ein entsprechendes EWG Forschungsprojekt bei econcept/CEPE).

Tabelle ZF.1 Beispiele des nicht-energetischen Nutzens von Wärmeschutzmassnahmen und methodische Ansätze zu seiner Monetarisierung

Nichtenergetischer Nutzen	Methodischer Ansatz zur Bewertung
Behaglichkeit durch höhere Oberflächentemperaturen der Wände und verminderte Zugluft im Fensterbereich	Über zusätzliche Energieeinsparung durch Absenkmöglichkeit der durchschnittlichen Raumtemperatur bei höherer Temperatur der Wand– und Fensterflächen und verminderter Zugluft
Geringere Lärmbelastung durch doppelt-/dreifach verglaste Fenster mit indirekter Schalldämmwirkung, evtl. in Verbindung mit kontrollierter Lüftung	Zahlungsbereitschaft zur Lärmvermeidung, differenziert nach Einkommensklassen, Lärmbelastung, Tag / Nacht oder Mehrkosten gegenüber Schallschutzverglasung
Verbesserte Luftqualität durch gewährleistete Lüftung, kontrollierte Feuchtigkeit und Staubreinigung von Zuluft	Für Asthma und ähnliche Krankheiten der Atemwege verminderte Gesundheitskosten (volkswirtschaftlicher top–down Ansatz)
Vergrösserung der Nutzfläche, d.h. des Wohnraums bei Dachdämmungen, die mit einem Dachraumausbau verbunden sind	Geringere wohnflächenbezogene Wärmeverluste und geringere spezifische Heizkosten
Grössere und vielfältiger benutzbare **Aussenräume** (verglaste und/oder vergrösserte Balkone und Wintergärten)	Relevant für MFH, sowohl an lärmbelasteten wie normalen Wohnlagen; Befragung von Immobilienbewirtschaftern bzgl. Bewertung des Attributs „Balkon“
Einbruchschutz durch weniger offen stehende Fenster bei Komfortlüftung	Schätzung über reduzierte Versicherungsprämien, Vergleich mit andern Einbruchschutzmassnahmen

Vermiedene externe Kosten

Für energiepolitische Überlegungen der öffentlichen Hand in Bund und Kantonen sind auch die vermiedenen externen Kosten durch geringere energiebedingte Emissionen zu betrachten, da sie - bei aller Unsicherheit der Schadensquantifizierung und -monetarisierung - in ihren Medianwerten auf etwa 2.4 Rp/kWh Heizöl und Kohle sowie auf etwa 0.8 Rp/kWh Erdgas für Schäden konventioneller Luftschadstoffe und zusätzlich auf etwa 8 Rp/kWh Kohle, 6 Rp/kWh Heizöl und 4.5 Rp/kWh Erdgas für Schäden durch Treibhausgasemissionen geschätzt werden. Dies sind nicht vernachlässigbare Werte aus wohlfahrtsökonomischer Sicht.

Ergebnisse zu einzelwirtschaftlichen Kosten und energetischen Nutzen

Wenngleich die Kosten und Nutzen auf der Ebene der einzelnen Bauteile, der Massnahmenbündel und ganzer Baukonzepte erhoben bzw. berechnet wurden, werden im folgenden schwerpunktmässig die Ergebnisse auf der Ebene der Massnahmenbündel bei Erneuerungen und auf der Ebene des Neubaus dargestellt.

Die benötigten Daten zu den Investitionskosten wurden unmittelbar bei den Herstellern von einzelnen Komponenten des Wärmeschutzes bzw. bei Installationsfirmen und Bauökonomen erhoben. Eine Auswertung von realisierten Bauprojekten hätte zur Frage der Vergleichbarkeit aus statistischen Gründen eine empirische Basis von mehreren tausend Häusern haben müssen, wobei Daten zu sehr vielen Kosten beeinflussenden Faktoren hätten zur Verfügung stehen müssen. Deshalb wurden die Preisinformationen zu Fassaden- und Dachdämmungen in Funktion der Dämmstärke, Glas- und Fensterpreisen in Funktion der energietechnischen Kennwerte sowie von Lüftungsanlagen in Funktion ihres Typs und der energetischen und

lüftungstechnischen Effizienz erhoben, und zwar getrennt für die Anwendungsfälle Neubau und Gebäudeerneuerung.

Wärmedämmung von Fassade und Dach

Bei Fassadenunternehmen im Bereich der Kompaktfassaden und der hinterlüfteten Fassaden sowie bei Dachunternehmen wurden die Kosten in Funktion der Dämmstärke erhoben (siehe dazu als Beispiel in Abbildung ZF.2). Abgedeckt wurde der Bereich der heute üblichen Dämmstärken bis zu rund 30 cm bis 35 cm, und abgefragt wurde nebst dem Total der Flächenpreise auch die Kostenstruktur. Daraus wurde ersichtlich, dass die Mehrkosten nur zu rund einem Drittel bis zur Hälfte aufgrund der höheren Dämmmaterialkosten verursacht werden. Die übrigen Mehrkosten betreffen Konstruktionen, Befestigungsmaterial (z.B. Dübel), erhöhter Arbeitsaufwand (aufwendigeres Handling, doppellagiles Verarbeiten) und zum Teil Mehrkosten beim Gerüst (Konsolen).

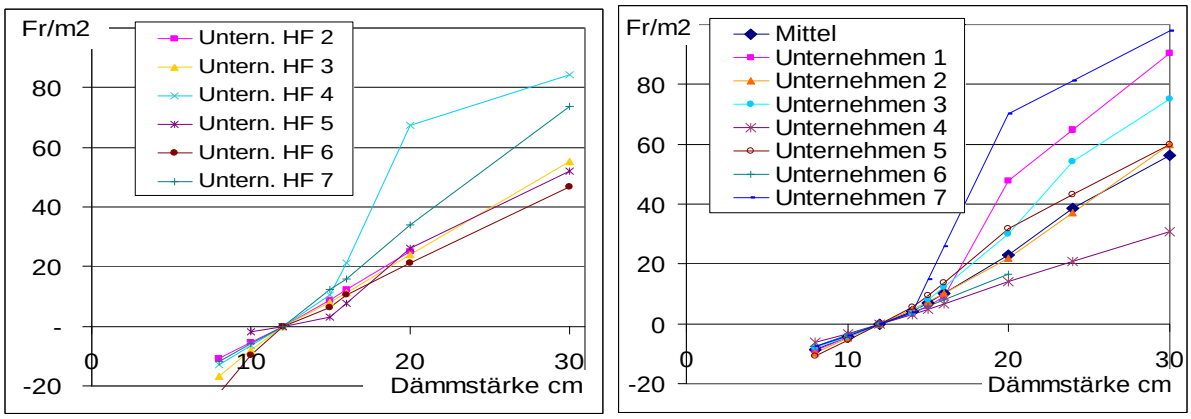


Abbildung ZF.2 Investitionsmehrkosten von Wandaussenwärmedämmungen am Beispiel der kleinformatigen Faserzementfassade (links) und von Kompaktfassaden (rechts) gegenüber der Referenzdämmstärke 12 cm von in Funktion der Dämmstärke.

Die Unterschiede im Kostenverlauf zwischen Neubau und Erneuerung sind wider Erwarten gering. Die Kosten bei den hinterlüfteten Fassaden steigen eher weniger steil an als bei den Kompaktfassaden, weil bei den Kompaktfassaden ab einer gewissen Dämmstärke eine zusätzliche mechanische Befestigung notwendig wird, während eine solche bei den hinterlüfteten Fassaden ohnehin vorhanden ist. Betrachtet man die Baudetails und Anschlüsse von einander angrenzenden Bauteilen näher, so ist bei Erneuerungen die Dämmung der Fensterleibungen oder des Dachrandes zwar mit Mehrkosten verbunden, aber die zusätzliche energetische Wirkung führt zu Grenzkosten der eingesparten Energie, die meistens nicht höher sind als bei Flächenelementen. Eine abgestimmte Planung der Erneuerungen ist hier lohnenswert und zu empfehlen, auch wenn die Erneuerungen zeitlich gestaffelt erfolgen.

Die Auswertungen zeigen auch, dass der Kostenverlauf bei den heute üblichen Dämmstärken (8 cm bis ca. 16 cm) bei allen Unternehmen etwa gleich ist, dass bei höheren Dämmstärken aber eine sehr grosse Streuung zu verzeichnen ist (siehe Abbildung ZF.2). Diese wird durch den unterschiedlichen Erfahrungsschatz bei den Unternehmen erklärt; die Angaben der hohen Mehrkosten kommen durch wenig Erfahrung bei der Kostenkalkulation, Sicherheitszuschläge und Pioniermarktmargen zustande.

Die erwähnte Streuung hat einen grossen Einfluss auf die Grenzkosten (vgl. Tabelle ZF.2). Die Grenzkosten des Unternehmens mit dem geringsten Kostenanstieg (best practice) liegen beinahe halb so tief wie der Mittelwert und sind damit wesentlich näher der Wirtschaftlichkeitsgrenze, besonders auch bei hohen Dämmstärken. Aus energie- und klimapolitischer Sicht ist es also besonders wirkungsvoll, mittels initiierter Marktstimulation eine Dynamik in Gang zu setzen. Bei geeigneter Ausgestaltung können die Lern- und Erfahrungspotenziale aktiviert und die Pioniermarktmargen durch mehr Wettbewerb vermieden werden, um damit die Kosten bzw. Preise aller Unternehmen an die best practice heranzuführen.

Tabelle ZF.2 Investitionen von Fassadenwärmedämmungen bei Erneuerungen (Mittelwert und best practice) und Grenzkosten (Durchschnittskostenansatz, Realzins 3.5%) verglichen mit den Referenzfällen „Instandsetzung" bzw. „Energetische Erneuerung"

Dämmstärke (cm)	U-Wert (W/m^2K)	Investitionskosten (CHF/m^2)		Brutto-Grenzkosten (Rp/kWh_{NE})		
				Verglichen mit Ref. EE		Verglichen mit Ref. IS
		Mittel	Best pratice	Mittel	Best pratice	Mittel
0 (Ref. IS)	0.85 - 1.1	35		n.z.	n.z.	-
12 (Ref. EE)	0.28	117	112	-	-	6.1
16	0.23	127	119	12	8.0	6.5
20	0.20	140	133	17	10	7.0
30	0.15	174	143	25	13	8.4

Ref. IS = Referenz Instandsetzung (Putzausbesserung, Fassadenanstrich)
Ref. EE= Referenz Energetische Erneuerung (12 cm Aussenwärmedämmung)
n.z. = nicht zutreffend

Für den Referenzfall einer ohnehin notwendig oder geplanten Wärmedämmung im heutigen Standard (12 cm energetische Erneuerung) zeigt sich, dass der Verlauf der Durchschnittskosten der verminderten Nutzenergie für die meisten opaken Bauteile in etwa gleich ist, d.h., zu bestimmten Grenzkosten ist der Effizienzgewinn pro m^2 in etwa gleich gross (vgl. Abbildung ZF.3). Eine Ausnahme bildet das Flachdach, wo die Grenzkosten deutlich tiefer liegen.

Wesentlich tiefer sind verständlicherweise die Grenzkosten (Durchschnittskostenansatz) gegenüber dem Referenzfall der Instandsetzung IS (nur Putzausbesserung und Neuanstrich, vgl. Tabelle ZF.2), denn der Effizienzgewinn pro m^2 erneuerte Fassadenfläche ist wesentlich grösser (z.B. 69 kWh_{NE}/m^2 bei 12 cm gegenüber 0 cm und 80 kWh_{NE} $/m^2$ bei 20 cm gegenüber 0 cm, während es von 12 cm auf 20 cm nur zwischen 7 und 9 kWh_{NE} $/m^2_{Bauteil}$ sind).

Differenzierter zu betrachten ist das Fenster, weil hier die Energiebilanz und damit die Effizienzgewinne der verschiedenen Fenster- und Gläsertypen von der Einbausituation abhängen (z.B. Verschattung, Sonnenstunden, Flächenverhältnisse, Verhältnis Wärmegewinne zu Transmissionsverluste, siehe unten).

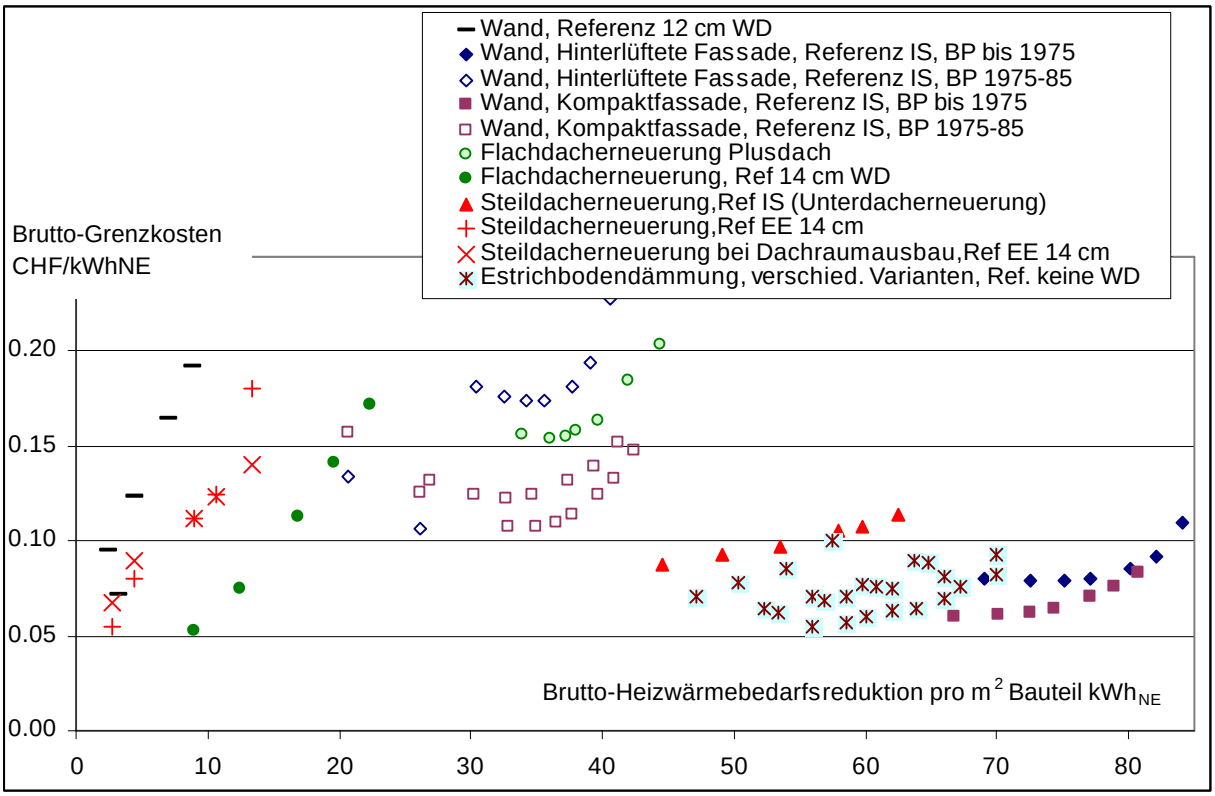


Abbildung ZF.3 Zusammenfassende Darstellung der Brutto-Grenzkosten (Durchschnittskostenansatz) für Erneuerungen (Referenzfall: heute übliche energetische Erneuerungen) und Neubauten

Fenster und Fensterrahmen

Bei den Fensterfirmen wurden ca. hundert zufällig ausgewählte Betriebe um Richtpreisofferten angefragt. Ausserdem wurden gezielt grosse Fensterfirmen befragt sowie solche, bei denen bekannt war, dass sie auch sehr energieeffiziente Fenster im Angebot haben.

Die energetische Verbesserung der Fenster wurde in der Vergangenheit vor allem über den markanten technischen Fortschritt bei den Verglasungen erreicht. Auch der heute erreichte Standard von 1.1 W/m²K kann durch verbesserte Beschichtungen, andere Gasfüllungen und Drei- statt Zweifachverglasungen weiter unterboten werden. Die Mehrkosten dafür sind bei Holz- und Kunststofffenstern ähnlich, zwischen kleinen und grossen Fenstern bestehen jedoch deutliche Unterschiede (vgl. aus Abbildung ZF. 5). Grosse Fenster haben wegen der geometrischen Verhältnisse und der Tatsache, dass Gläser tiefere U-Werte aufweisen als die Rahmen, nicht nur geringere energetische und preisliche Ausgangswerte, sondern der Kostenanstieg bei energetischen Verbesserungen verläuft auch flacher. Ein grosses Passivhaus-Fenster kann zu einem vergleichbaren spezifischen Preis erstanden werden wie ein kleines Standardfenster. Wirtschaftlich attraktiv ist daher das architektonische Element insbesondere beim Neubau, gross- statt kleinflächige Fenster zu konzipieren.

In den letzten Jahren wurden auch Bestrebungen unternommen, die Fensterrahmen zu verbessern. Beim Kunststoff-Fenster ist die Entwicklung weiter fortgeschritten als beim Holz- bzw. Holz-Metallfenster. Dies drückt sich durch ein breiteres Marktangebot im Bereich der Rahmenqualitäten aus und wird auch aus Abbildung ZF. 5 ersichtlich. Die Kostensteigerung von

Rahmenverbesserungen ist beim Holzfenster wesentlich stärker ausgeprägt als beim Kunststoff-Fenster. Die zunehmende Nachfrage nach gut isolierten Fenstern aufgrund der Minergie-Bauweise hat jedoch auch beim Holzfenster ein Angebotsegment induziert, das sich bis zur strengen Anforderung des Passivhausstandards erstreckt.

Die Fenster sind differenziert zu betrachten, da nebst der Verringerung der Transmissionsverluste die energetischen solaren Gewinne mitberücksichtigt werden müssen, so dass sich je nach Orientierung, Verschattung und g-Wert für Fenster mit einem bestimmten U-Wert sehr unterschiedliche Grenzkosten ergeben. Die Werte für die Fenster in Abbildung ZF.4 sollen dies illustrieren. Bei südorientierten Fenstern, aber auch bei wenig verschatteter Ost- und Westorientierung, ist der Energiefluss über die ganze Heizperiode gesehen positiv und das Fenster wirkt wie ein Solarkollektor zur Gewinnung solarer Wärme, was sich mindernd auf den Heizwärmebedarf auswirkt. Bei der Wahl der Gläserqualität sind hier nicht nur tiefe U-Werte massgebend, sondern auch möglichst hohe g-Werte (Gesamtenergiedurchlassgrad ≥ 50% der Sonneneinstrahlung), da ansonsten die U-Wert-Verbesserung durch geringere solare Gewinne wieder kompensiert wird.

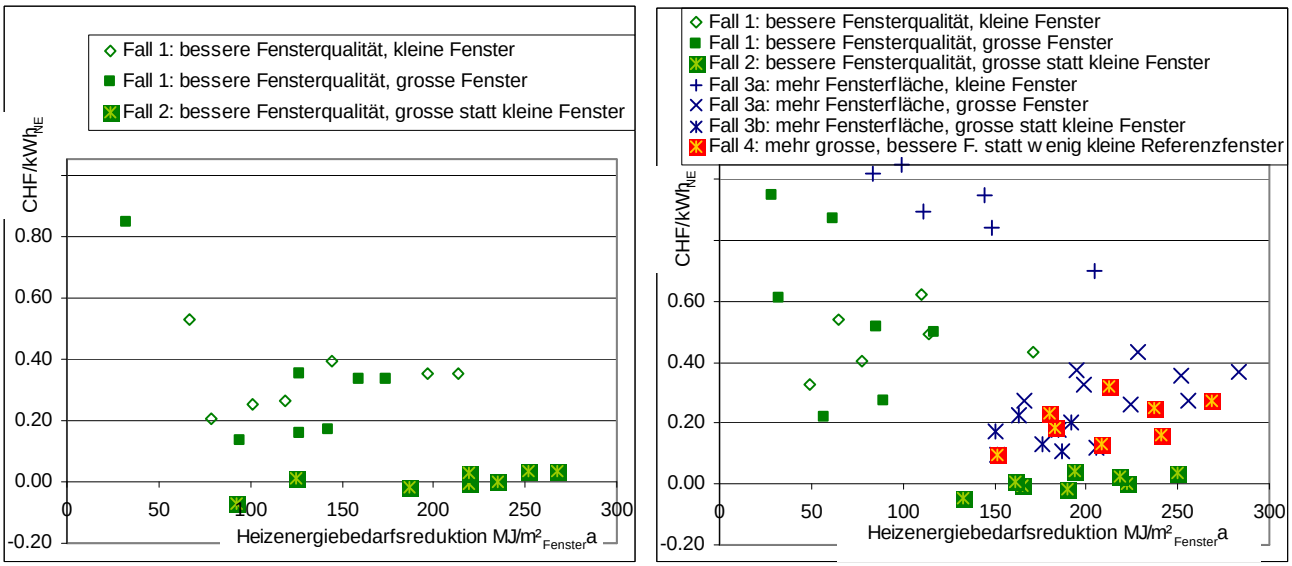


Abbildung ZF.4 Zusammenfassende Darstellung der Brutto-Grenzkosten (Durchschnittskostenansatz) von Fenstern für verschiedene Fälle und Orientierungen (Nord: linke Abbildung, Süd rechte Abbildung), Realzinssatz 3.5%, 30 Jahre Lebensdauer

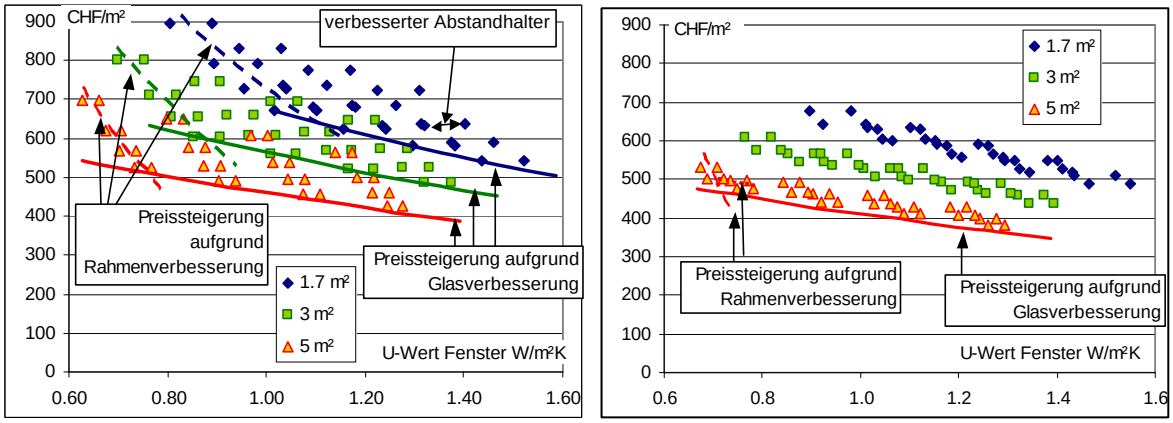


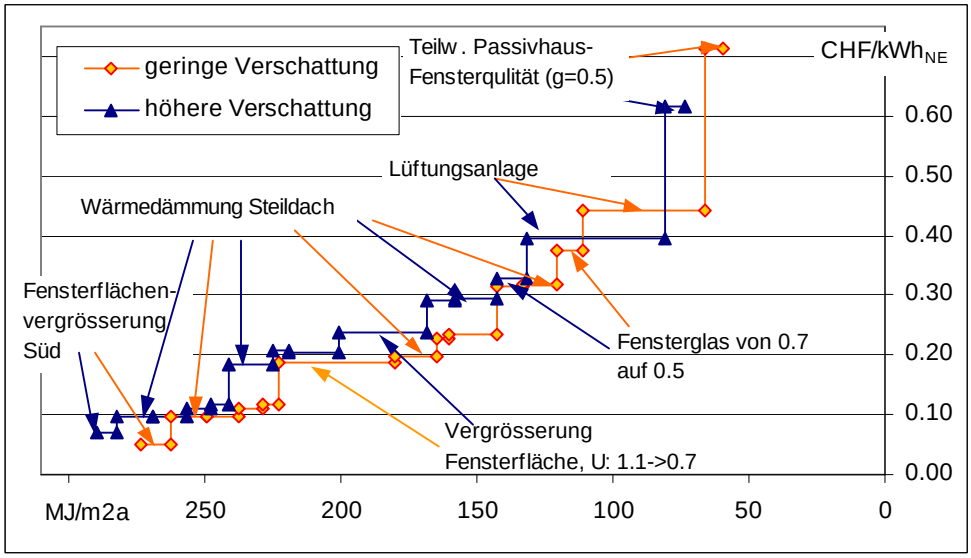
Abbildung ZF. 5 Investitionskosten von Holzfenstern (linke Abbildung) und Kunststofffenstern (rechte Abbildung) für verschiedene Fenstergrössen in Funktion des Gesamtfenster-U-Wertes

Das Gebäude als Ganzes

Beim Schritt von den einzelnen Bauteilen zum Gebäude als Ganzes ist zu beachten, dass die jeweiligen Kosten und auch die energetischen Nutzen der verschiedenen Investitionsbereiche sich zum Teil gegenseitig beeinflussen können. Deshalb können sich die Kosten-Nutzenrelationen im Vergleich zur isolierten Betrachtung auf Bauteilebene verschieben. Auf der energetischen Ebene zu nennen sind z.B. der Ausnutzungsgrad der freien Wärme (solare Wärme plus Wärme von Personen und Geräten), der sich bei zunehmender Wärmedämmung oder erhöhten Solargewinnen leicht verschlechtert. Auch auf der Kostenebene gibt es Interaktionen zu verzeichnen: die Kosten von Wärmeerzeugung und –verteilung können bei zunehmend geringerem Wärmebedarf reduziert werden.

Die Flächenverhältnisse oder die Ausrichtung eines Gebäudes sind beim Gebäudebestand vorgegeben, und entsprechend lässt sich das Potential der Energieeffizienzverbesserungen direkt anhand der einzelnen Bauteile ableiten. Beim Neubau besteht ein gewisser Spielraum, den Energiebedarf des Gebäudes mittels architektonischer Gestaltung zu beeinflussen und Verschattung zu vermeiden (vgl. Abbildung ZF.6 und Abbildung ZF.7). Ein weiterer Spielraum besteht bei der Deckung des restlichen Wärmebedarfs, weil die Wahlfreiheit bei der Haustechnik grösser ist als im Gebäudebestand, wo auf die bestehende Bausubstanz Rücksicht genommen werden muss bzw. Nachrüstungen oft höhere Kosten aufweisen.

Die Untersuchung von verschiedenen Neubaukonzepten und Ausgangslagen hat gezeigt, dass die Grenzkostenkurve einen ähnlichen relativen Verlauf aufweisen. Dies liegt darin begründet, dass auch die Grenzkosten der einzelnen Bauteile und Einzelmassnahmen einen ähnlichen Verlauf haben. Unterschiede gibt es im Erscheinungsbild. Je günstiger das Verhältnis der Gebäudehüllenfläche zur Energiebezugsfläche ist (A/EBF), desto tiefer ist der energetische Ausgangswert und desto steiler erscheint die Grenzkostenkurve.



Berechnungen CEPE

Abbildung ZF.6 EFH-Bruttogrenzkostenkurve (ohne Berücksichtigung der Kostenreduktion auf Seite Wärmeerzeugung/-verteilung) für geringe Verschattung und für höhere Verschattung (Massnahmenreihenfolge gemäss dem Prinzip der ansteigenden Grenzkosten)

Auch der Einfluss des Luftwechsels auf die Grenzkosten nimmt besserem wärmetechnischen Zustand zu (vgl. Abbildung ZF.7). Im Einzelfall kann sich auch die Reihenfolge der zu treffenden Effizienzmassnahmen ändern, sofern diese strikt nach aufsteigenden Grenzkosten getroffen werden sollen. Es ist jedoch eher wesentlich, dass bei allen Bauteilen sukzessive Massnahmen ergriffen werden und nicht nur punktuell bei einigen Bauteilen.

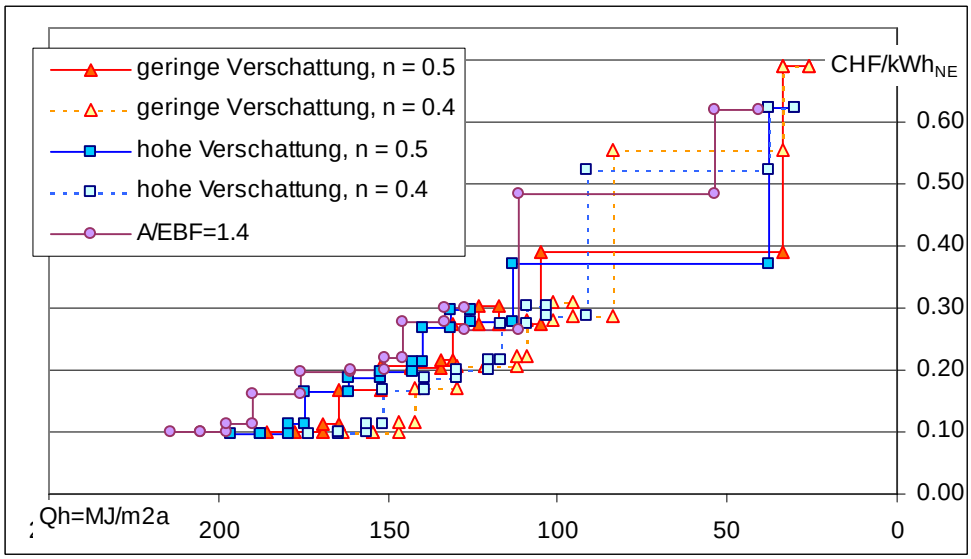


Abbildung ZF.7 MFH-Bruttogrenzkostenkurve (ohne Berücksichtigung der Kostenreduktion auf Seite Wärmeerzeugung/-verteilung) für verschiedene Ausgangslagen der Verschattung und des Luftwechsels

Als ein Fazit kann festgehalten werden, dass (im Mittelland) sowohl eine konsequente Wärme-Dämmstrategie als auch eine kombinierte Dämm- und Solargewinnstrategie zu ähnlichen Kosten führen. Dies gilt für einigermassen verschattungsfreie Situation, also insbesondere beim Einfamilienhaus und für MFH für Gebiete mit geringer Ausnützungsziffer.

Die Brutto-Grenzkosten in der oben dargestellten Form erlauben einen Vergleich der einzelnen Investitionsoptionen untereinander sowie den Vergleich von verschiedenen Neubaukonzepten, jedoch noch nicht eine abschliessende Beurteilung der Wirtschaftlichkeit unter Einbezog der Wärmebereitstellung. Die Berechnung der Anlagengrösse erfolgte über den Leistungsbedarf, wobei dieser differenziert aufgrund der tatsächlich betrachteten Gebäudekonzepte berechnet wurde. Denn der Leistungsbedarf sinkt meistens unterproportional zur Reduktion des jährlichen Wärmeenergiebedarfs, weil für die Leistungsdimensionierung der kälteste Tag in Abwesenheit von solaren Gewinnen massgebend ist, während der Wärmeenergiebedarf durch solare Gewinne reduziert werden kann. Die erreichbaren Kostenminderungen infolge der Möglichkeit, kleinere Anlagen einzusetzen, sind bei den Heizöl-, Gas- und Holzheizungen eher gering. Bei den Wärmepumpen - und hier insbesondere bei den Sole-WP - gehen die Investitionskosten markant zurück (vgl. Abbildung ZF.8). Die Mehrkosten der Wärmeschutz-Investitionen lassen sich jedoch nach derzeitigem Kostenstand bei keinem Anlagetyp gänzlich kompensieren, selbst wenn beim gut ausgeführten Passivhausstand die hydraulische Wärmeverteilung weggelassen wird.

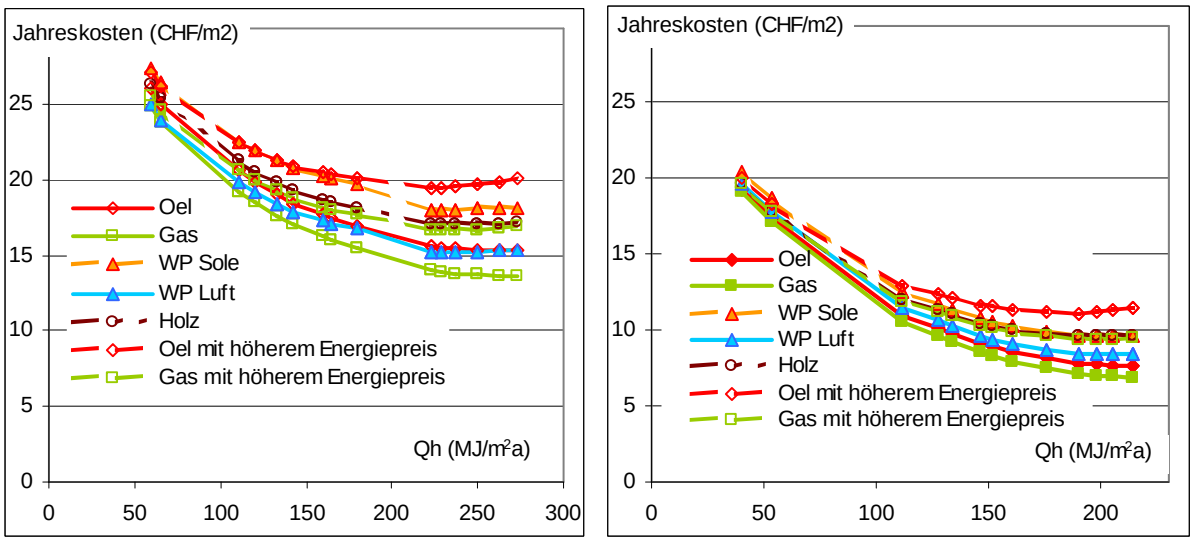


Abbildung ZF.8 Jahreskosten unter Berücksichtigung der Kostenreduktion auf Seite Wärmeerzeugung/-verteilung) für verschiedene Anlagetypen für EFH (linke Abbildung) und MFH (rechte Abbildung). Höherer Energiepreis bei Öl- bzw. Gasheizungen: Zuschlag in der Höhe von 210 CHF/t CO_2

Die ermittelten Gesamtjahreskosten (netto) weisen - ohne Berücksichtigung begleitender Nutzen - einen zunächst sehr flachen Verlauf im Bereich der heutigen Bauweise und darunter (z.B. zwischen 250 und 200 MJ/m²a) auf (vgl. Abbildung ZF.8). Im dargestellten Beispiel kann ohne wesentliche Mehrkosten eine Verbesserung des spezifischen Heizwärmebedarfs Qh um 40 MJ/m²a bis 60 MJ/m²a bzw. um einen Viertel erreicht werden, dies selbst mit der unwahrscheinlichen Annahme, dass der Energiepreis im Durchschnitt über die gesamte Lebensdauer nur rund 5.5 Rp/kWh beträgt (ca. 55 CHF/100 l). Um insgesamt über 100 MJ/m²a lässt sich der Heizwärmebedarf zu Nettokosten von 2 CHF/m² bis 3 CHF/m² vermindern, was 20 bis

30 CHF/Monat Mehrkosten für eine Wohnung von 120 m² bedeutet. Wird eine Energiepreiserhöhung im Bereich einer CO_2-Steuer von 210 CHF/t CO2 veranschlagt, verflacht sich der Kostenverlauf weiter, und das wirtschaftliche Optimum verschiebt sich weiter nach links hin zu einem tieferen spezifischen Energiebedarf.

Den Werten der Abbildung ZF.8 wurden nicht die best practice Kosten zugrunde gelegt (siehe dazu auch die Variation der Mehrkosten in Abbildung ZF.2); in Zukunft könnte mit wachsenden Lern- und Skaleneffekten die Kostensteigerung durchaus auch moderater verlaufen, als hier dargestellt. Ebenfalls nicht berücksichtigt sind die nicht-energetischen Nutzen, die bei weitergehenden Energie-Effizienzmassnahmen häufig beobachtet werden (siehe unten). Insofern sind die oben beschriebenen einzelwirtschaftlichen Netto-Kosten unvollständig und können zu Fehlentscheidungen bei Wärmeschutz- und Energieeffizienz-Investitionen führen.

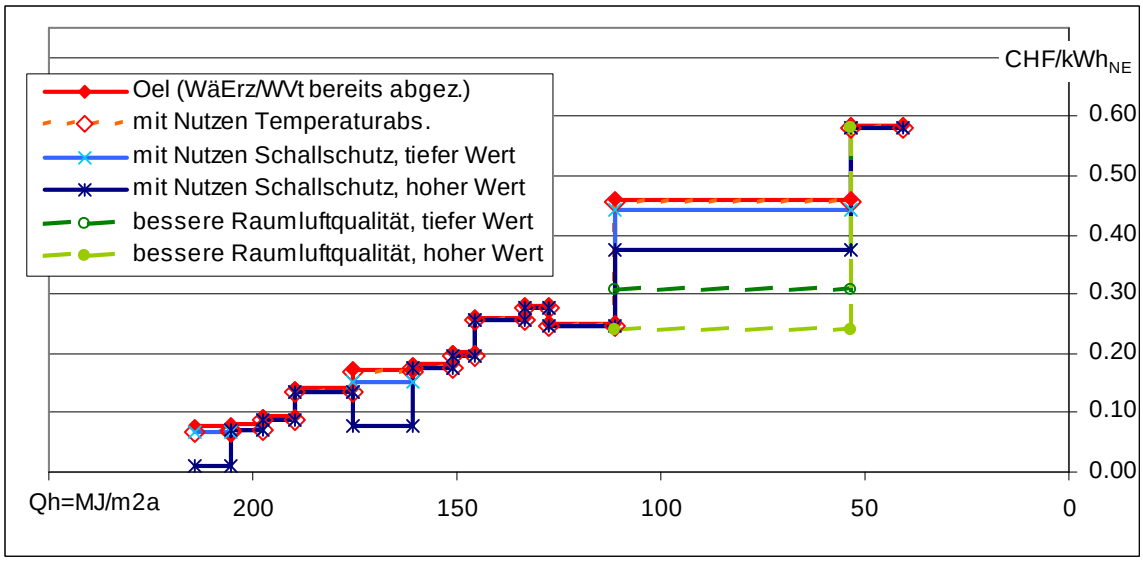
Begleitende Nutzen (Co-Benefits) von Wärmeschutzinvestitionen

An drei Beispielen sei im folgenden illustriert, wie der Einbezug der begleitenden Nutzen in die einzelwirtschaftliche Bewertung die energetisch bedingten Grenzkosten verringern kann (siehe Abbildung ZF.9):

- Für die Quantifizierung des Zuwachses an Wohnkomfort orientierte man sich an empirischen Untersuchungen zur Behaglichkeit anhand der Temperaturunterschiede zwischen Wand und Raumlufttemperatur sowie der Strömungsverhältnisse im Wohnraum. Schon vor Jahren fand man heraus, dass eine Verminderung der Temperaturdifferenz zwischen der Wand eines Raumes und seiner durchschnittlichen Lufttemperatur von etwa 5°C bei *gleichem Behaglichkeitsniveau eine Absenkung der Raumtemperatur* um 1°C ermöglicht. Die Berücksichtigung dieses Effektes führt allerdings nur zu relativ kleinen begleitenden Nutzen von allenfalls einem Rappen je kWh Wärmeenergie.
- Ein Ersatz von alten Doppelverglasungsfenstern, der Einsatz von Zweifach- oder Dreifachverglasung mit asymmetrischem Glasaufbau und speziellen Glasarten (Giessharz), die Erneuerung von Rollladenkästen sowie (schweres) Wärmedämm-Material aus mineralischen Stoffen tragen zur Verminderung der Transmission von Lärmenergie in das Innere von Wohngebäuden bei. Eine Quantifizierung der Lärmminderung kann durch eine Abschätzung der Verminderung der durch den Lärm verursachten Kosten erfolgen. Diese Lärmkosten wurden empirisch u.a. durch Mietzinseinbussen in Funktion der Lärmbelastung beobachtet und von verschiedenen Studien mit 0.6% bis 0.9 % je zusätzliches dB angegeben. Der weitaus grössere lärmmindernde Effekt ist vom Bereich Fenster und/oder Rollläden zu erwarten; sein Nutzen wird grob auf etwa 50% der oben erwähnten spezifischen Kosten geschätzt, wenn gleichzeitig eine Lüftungsanlage zum Einsatz kommt. Aber auch Dämm-Massnahmen mit mineralischen Materialien im Bereich des Daches haben eine relevante Bedeutung (insbesondere gegen Fluglärm oder über weitere Strecken übertragener Verkehrslärm). Die gewählten Beispiele zeigen, dass der Schallschutz bei Fenster und Dach die Rentabilität der Wärmeschutzmassnahme entscheidend beeinflussen kann (Abbildung ZF.9). Umgerechnet auf Nutzen je kWh Nutzenergie ergibt der Einbezug der begleitenden Nutzen durch Lärmminderung Werte zwischen 6 und 8 Rp/kWh, d.h., für diese Beispiele liegt er in der Höhe heutiger Wärmekosten.
- Einen ähnlich grossen Einfluss hat der Einsatz von Lüftungsanlagen bei der Verbesserung der Raumluftqualität (vgl. Abbildung ZF.9). Es wird entweder eine verbesserte Luftqualität in der Wohnung von solchen Wohngebäuden erreicht, die in stark belasteten Wohnquartieren (z.B. sehr verkehrsreiche Strassen) gelegen sind, und zwar entweder durch eine reduzierte Luftwechselrate bei Fenster- und Türsanierungen oder durch Filterung der Aussenluft bei Lüftungsanlagen und/oder dem Ansaugen der Luft von der strassenabgewandten Seite.

Der andere Fall ist eine zu geringe Luftwechselrate in gut wärmegedämmten Wohngebäuden, die ein zu feuchtes Innenklima (z.B. durch aufsteigende Feuchte) oder eine durch die Bewohner (starkes Rauchen) bzw. durch die Inneneinrichtung (z.B. synthetische Teppiche, chemikalienhaltige Pressspanmöbel) verursachte relativ hohe Schadstoffkonzentrationen aufweisen, die für Asthmakranke und andere Menschen mit einer Disposition für Allergien und Erkrankungen der Atmungsorgane unverträglich sind. Die Quantifizierung dieser Effekte ist allerdings meist sehr schwierig; ihre Monetarisierung muss deshalb derzeit meist mit ökonometrischen Methoden über die Miethöhe oder mit epidemiologischen Analysen für entsprechende Krankheitsbilder versucht werden.

Die Nutzen der Co-Benefits werden auch in der Darstellungsform der Jahreskosten sichtbar (vgl. Abbildung ZF.10). Insbesondere der steile Kostenanstieg der Lüftungsanlage wird wesentlich flacher, wenn die mit einer Lüftungsanlage verbundenen Zusatznutzen miteinbezogen werden und wenn - fälschlicherweise - nicht alle Kosten allein der Energieeffizienz zugeordnet werden.



Quelle: Berechnungen CEPE

Abbildung ZF.9 Grenzkostenkurve von Wärmedämminvestitionen unter Berücksichtigung ausgewählter Co-Benefits (höherer Komfort, Schallschutz, bessere Raumluftqualität durch Lüftungsanlagen), Fallbeispiel mit Ölheizung

Im Gegensatz zu den Jahreskosten beginnen die Investitionskosten ab dem energetischen Referenzpunkt sofort zu steigen, wenn auch nur leicht (siehe Abbildung ZF.10). Entscheide, die sich nur auf die Investitionskosten abstützen, führen also nicht zu einer energetisch und ökonomisch optimalen Bauweise. So trivial und so wenig neu diese Feststellung ist, so häufig wird sie in der Realität nicht beachtet, in vielen Fällen wegen des Investor-/Nutzerdilemmas und einer Mietgesetzgebung, die diese Zusammenhänge nicht hinreichend wahrnimmt

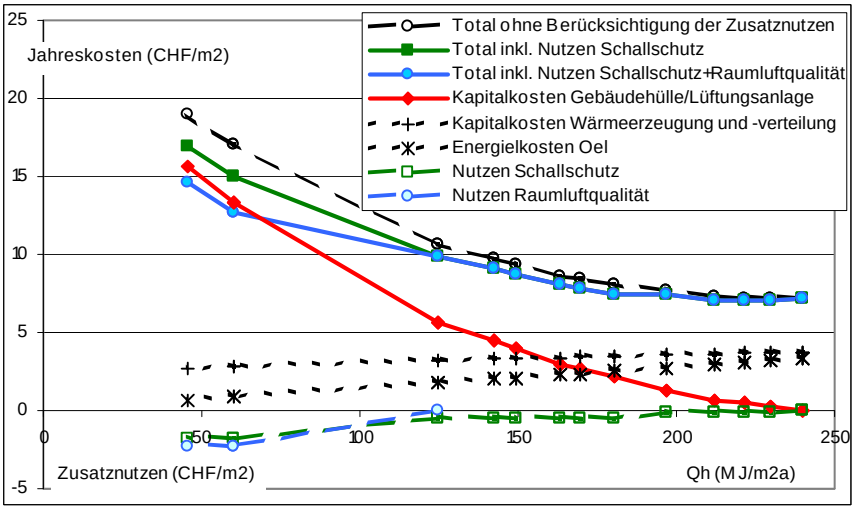


Abbildung ZF.10 Gesamte Jahreskosten und ihre Komponenten (Mehrkosten der Energieeffizienzinvestitionen, Minderkosten der Wärmeerzeugung– und –verteilung) sowie der Zusatznutzen. Beispielhafte Darstellung für einen MFH-Neubau. Annahmen: Realzins 3%, Brennstoffpreis 4.5 Rp/kWh

Künftige Kosten und Nutzen der Energieeffizienz-Investitionen

Wie die Analysen der Vergangenheitsentwicklung der Wärmeschutzmassnahmen zeigten, waren die Lern- und Skaleneffekte in den vergangenen drei Jahrzehnten gewaltig und dürften es wegen der weiteren Innovationen auch in Zukunft sein. So betrug der technische Fortschritt des Wärmeschutzes bei Fenstersystemen seit 1970 etwa 1,8 %/a und bei der Wärmedämmung 2,3 %/a. Gleichzeitig reduzierten sich real die Herstellkosten durch Lern- und Skaleneffekte um 0,8 %/a im Durchschnitt. Daraus lassen sich die Werte der Degressionskoeffizienten bei Produktionsverdopplung ableiten. Diese liegen im üblichen Bereich zwischen 0.8 und 0.9, je nach Stand im Innovationszyklus des jeweils betrachteten Bauteils oder der Investition.

Da die Lern- und Skaleneffekte bei einzelnen Wärmedämm-Massnahmen infolge geringer Marktdurchdringung oder/und neuer Techniken (Hochleistungskerndämmung, hocheffiziente Fenster) bei weitem noch nicht ausgeschöpft sind, wird mit weiteren Kostendegressionen je vermiedene kWh Wärmeverluste in gleicher Höhe von 10 bis 20 % bei jeder Produktions- bzw. Installationsverdopplung gerechnet (vgl. Abbildung ZF. 11). So wird beispielsweise seit einiger Zeit die Dämmplatte aus Styropor wird mit einem Kern aus einem geschäumten Kunststoff versehen, welcher eine um den Faktor 1,8 tiefere thermische Leitfähigkeit aufweist. Dadurch kann die Dämmstärke gegenüber dem derzeit üblichen Material um rund 40% vermindert werden. Bei Dämmstärken von 100 bis 120 mm dieses neuen Materials und konstruktiven Lösungen insbesondere im Bereich der Anschlüsse, die kostenseitig der heutigen Praxis entsprechen, kann der Niedrigenergiestandard erreicht werden. Das Produkt ist auf dem Markt erhältlich, ebenso ein mit Graphitpartikeln um 10 bis 20 % verbessertes Styropor. Die Technik der Vakuum-Isolation ist für die Zukunft vielversprechend und insbesondere für die Gestaltungsfreiheit von Architekten aufgrund der hohen Dämmwirkung bei relativ geringer Dämmstärke bzw. Bautiefe der Panel-Elemente attraktiv.

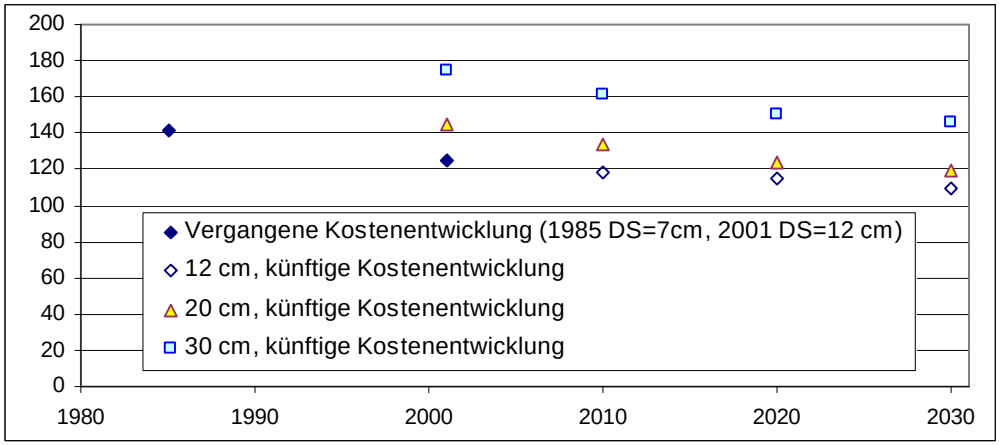


Abbildung ZF. 11 Vergangene und künftige Entwicklung der Kosten von Kompaktfassaden-wärmedämmungen (Erhebungen und Berechnungen CEPE)

Bei Fenstersystemen geht der technische Fortschritt über verbesserte Abstandshalter, Beschichtung der Gläser, Edelgasfüllung, Dreifachverglasung und verbesserte Dämmung der Rahmen. Mittelfristig sind Vakuum-Gläser sowie Folien zwischen den Gläsern absehbar. Diese neuen Technologien sind zu Beginn des Markteintritts meist relativ teuer, aber erfahrungsgemäss sinken die Kosten mit jeder Verdopplung ihrer Anwendung von anfänglich 15 auf später 10 % (vgl. Abbildung ZF. 12).

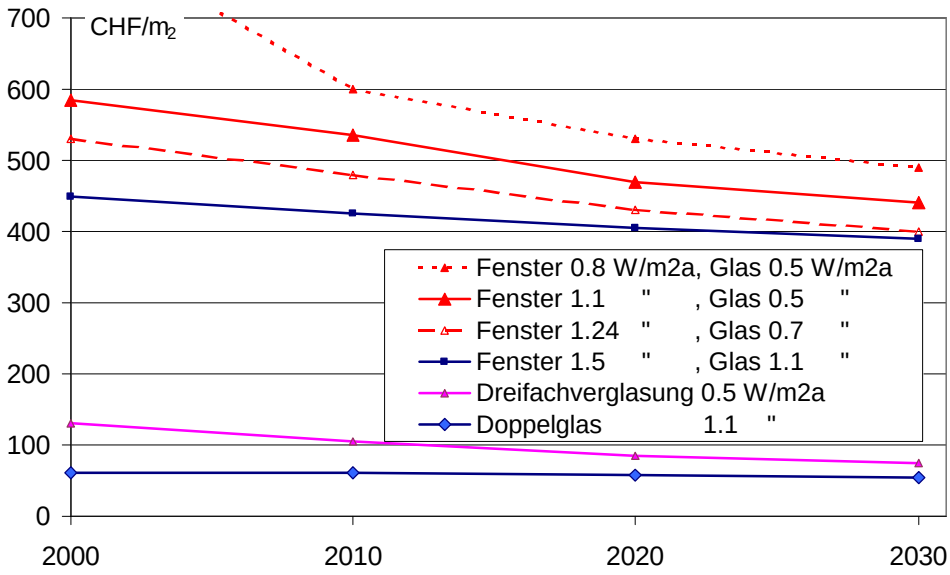


Abbildung ZF. 12 Künftige Entwicklung der Kosten von Fenstern und Gläsern (Erhebungen und Berechnungen CEPE)

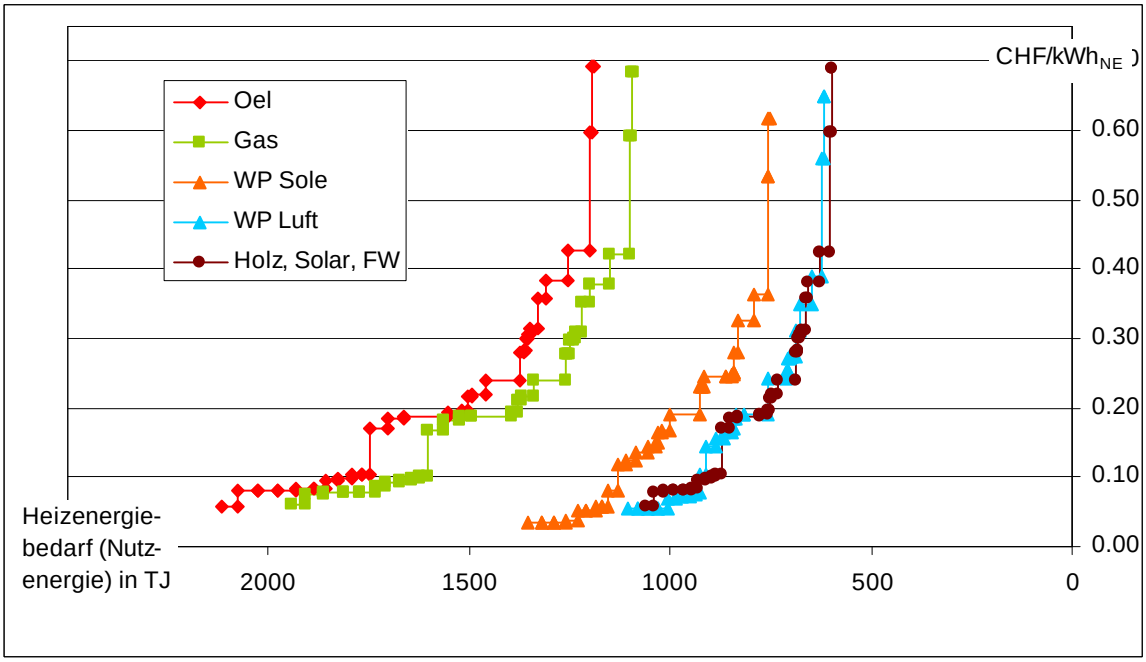
Als Konsequenz der auch künftig sinkenden Kosten und des technischen Fortschritts werden sich auch die Grenzkosten der Energieeffizienz verringern. Der zeitliche Verlauf der Grenzkosten erfährt dabei aus Gründen der Arithmetik eine besondere Dynamik. Beispielsweise liegt In

der Ausgangslage das Kostenniveau bei 450 CHF/m² und die Kostendifferenz beträgt heute 140 CHF/m² für das effizientere Fenster. Unter der Annahme, dass das effizientere Fenster infolge seiner heutigen geringen Stückzahlen eine dynamischere Entwicklung erfährt, die z.B. zu einer Kostenreduktion von 15% je Verdopplung führt, während die Kosten für das „normale" Fenster nur um 10% zurückgehen, beträgt die Kostendifferenz nach drei Verdopplungsperioden der neuen Technik weniger als 100 CHF /m². Die Kostendifferenz (und diese ist ja für den Grenzkostenansatz relevant) reduziert sich damit um mehr als 30%.

Gesamtschweizerische Kostenkurven

Beim Grenzkostenansatz ist die Definition einer Referenzentwicklung ein unabdingbare Grundlage, denn alle zusätzlichen Investitionen und die damit verbundenen Energieeinsparungen gehen von dieser Referenz aus. Bei einer gesamtschweizerischen Betrachtung wird nebst der bautechnischen Charakterisierung die Festlegung eines Mengengerüsts zur künftigen Neubau- und Erneuerungstätigkeit notwendig. Beim Neubau ist dies relativ einfach; hier genügt die Kenntnis der künftigen Neubaufläche und der heutigen Neubauweise bei den einzelnen Bauteilen (siehe vorangehende Kapitel). Bzgl. der künftigen Fläche der Neubauten kann weitgehend auf die Perspektiven von Wüest und Partner zurückgegriffen werden. Bis ins Jahr 2010 wird beispielsweise von einer Neubaufläche von rund 27 Mio m² bei den Einfamilienhäusern und von rund 25 Mio m2 bei den MFH ausgegangen.

Im Referenzfall beträgt der Nutzenergiebedarf der Gebäude, die bis 2010 neu gebaut werden, rund 7.6 PJ. Bis zu Brutto-Grenzkosten von 10 Rp/kWh$_{NE}$ lässt sich der Heizwärmebedarf (auf Ebene Nutzenergie) mit Massnahmen an Boden, Dach, Wand und Fenster gesamtschweizerisch bei EFH-Neubauten um rund 1300 TJ reduzieren (Summe der Einsparungen der Grenzkostenkurven der fünf Anlagetypen in Abbildung ZF. 13). Bis zu Grenzkosten von 20 Rp/kWh$_{NE}$ sind es weitere 935 TJ. Ein vergleichsweise grosses Einsparpotential von . 1300 TJ der Heizwärme bietet theoretisch der Einbau von Lüftungsanlagen (wenn in allen MFH eine Lüftungsanlage eingebaut würde). Der realisierbare Anteil wird allerdings nur mit 30% angenommen. Die Grenzkosten betragen je nach Situation und Wärmeerzeugung 23 Rp/kWh$_{NE}$ bis 38 Rp/kWh$_{NE}$, wenn die gesamten Kosten der Lüftungsanlage der Energie zugerechnet würden. Diesen Grenzkosten ist der jeweilige Wärmepreis gegenüber zu stellen (langfristig gemittelter Energiepreis dividiert durch den Nutzungsgrad der Anlagen). Der Wärmepreis beträgt zwischen 5 Rp/kWh (heutige Brennstoffpreise) und rund 10 Rp/kWh (gestiegene internationale Brennstoffpreise und/oder CO_2-Abgabe bzw. -Emissionszertifikate). Bei den MFH beträgt der jährliche Heizwärmebedarf der 25 Mio m² Neubau-EBF im Referenzfall rund 5.6 PJ. Um rund 0,7 PJ lässt sich der Heizwärmebedarf reduzieren, wenn Energieeffizienzinvestitionen bis zu Brutto-Grenzkosten von 10 Rp/kWh ergriffen würden.



Quelle Berechnungen CEPE

Abbildung ZF. 13 Gesamtschweizerische Grenzkostenkurven (realisierbares Potential) für den EFH-Neubau 2001 bis 2010, heutiger Kostenstand

Etwas komplexer gestaltet sich die Beschreibung der Referenzentwicklung im Bereich der Gebäudeerneuerung. Nebst der Kenntnis des bautechnischen Ausgangszustandes der verschiedenen Gebäudekategorien (Typ, Bauperiode) sind zusätzlich Annahmen zu den Erneuerungsraten und –Varianten (Instandsetzung bzw. Wärmedämmung) notwendig und zwar sowohl bzgl. der betroffenen Energiebezugsflächen wie auch bezüglich der einzelnen Bauteile (Wand, Dach, Fenster, Kellerdecke etc. sowie entsprechende Kombinationen). Die empirische Basis bzgl. der Erneuerungstätigkeit im Hinblick auf Wärmeschutz in der Vergangenheit, die als Grundlage für die Beschreibung der künftigen Entwicklung dienen könnte, ist in der Schweiz (und in allen Ländern) relativ schwach. Die Erhebungen eines vom CEPE angeregten Forschungsprojekts mit dem Ziel, diese Lücke zu schliessen, waren bei Fertigstellung dieses Berichts noch nicht ausgewertet, so dass für die Referenzentwicklung im Erneuerungsbereich zum Teil vorläufige Annahmen getroffen werden mussten. Trotz dieses Vorbehaltes sind die gesamtschweizerischen Grenzkostenkurven für die Erneuerung der Wohngebäude sehr aufschlussreich, weil ein grosses Energieeffizienzpotential zu relativ geringen Kosten ermittelt wurde, besonders wenn eine ganzheitliche ökonomische Bewertung zur Anwendung kommt.

Illustriert wird dies für die Einfamilienhäuser der Bauperiode 1900 bis 1961. Im Referenzfall der beträgt die Reduktion für Heizwärme für die Gebäude dieser Bauperiode 7% bis zum Jahr 2010, da im Referenzfall nebst Instandsetzungen auch energetischen Erneuerungen angenommen werden. Im Fall der weitergehenden energetischen Erneuerungen (Grenzkostenansatz) wird davon ausgegangen, dass zusätzlich 15% der gesamten Wandflächen wärmegedämmt und dass die Fassaden statt mit 12 cm mit 20 cm gedämmt werden (vgl. Abbildung ZF.14). Beim Dach wird angenommen, dass die Eindeckung nicht nur repariert und das Unterdach nicht nur erneuert wird, sondern dass ausserdem eine Wärmedämmung angebracht wird. Dies betrifft 1.9 Mio m² innerhalb der nächsten 10 Jahre. Und bei 1.5 Mio m² Dacherneuerungen, bei denen im Referenzfall eine Wärmedämmung angebracht wird, sei diese von 14 cm auf 20 cm verstärkt.

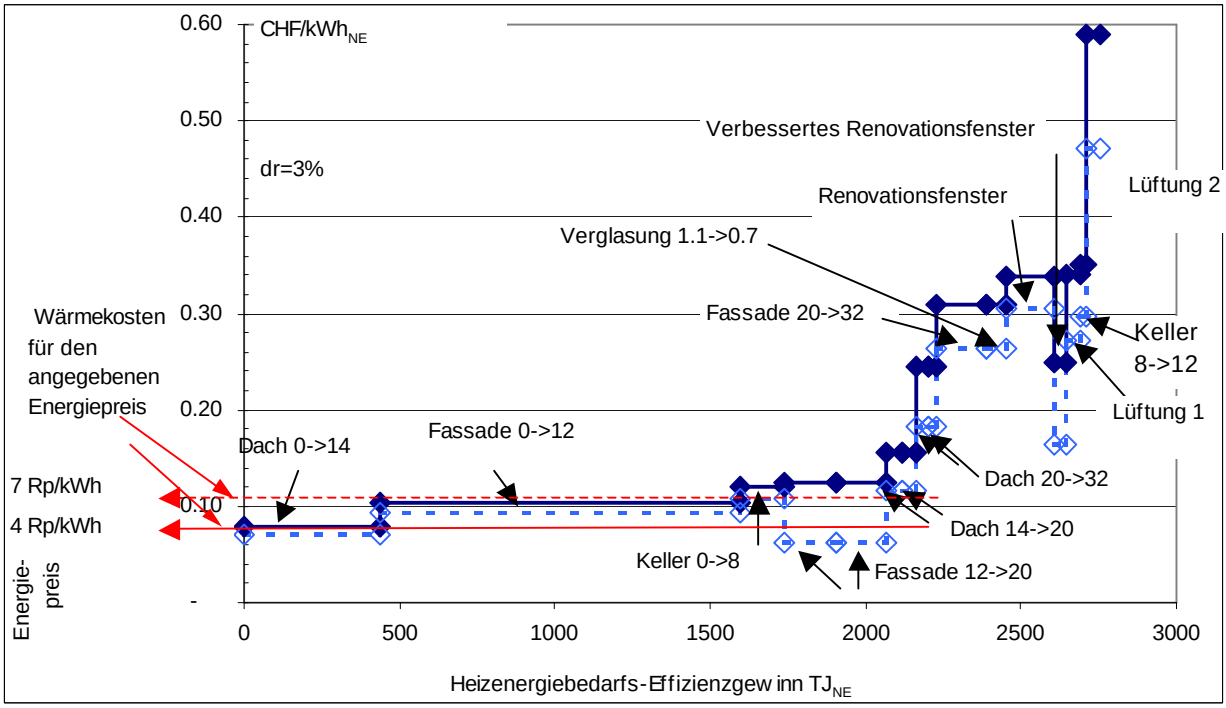


Abbildung ZF. 14 Grenzkostenkurve der EFH mit Bauperiode 1900 – 1960, mit heutigem Kostenstand (durchgezogene Treppenkurve) sowie mit dynamisierten Kosten (gestrichelte Treppenkurve)

Ein beachtliches Potential an Heizwärmebedarfsreduktion von etwa 1'100 TJ liegt im Bereich von Brutto-Grenzkosten bis 11 Rp/kWh$_{NE}$. Um weitere 9% zusätzlich zur Referenzentwicklung könnte der Heizwärmebedarf des Gesamtbestandes der EFH der Periode 1900 bis 1960 zu diesen Kosten reduziert werden. Mit Brutto-Kosten zwischen 9% bis 13 Rp/kWh$_{NE}$ könnten weitere 3% des Heizwärmebedarfs reduziert werden. Von diesen Kostenangaben sind die eingesparten Kosten auf Seite Wärmeerzeugung und –verteilung abzuziehen. Langfristig sind dies zwei bis fünf Rp/kWh für die Anlagen und für die Energiekosten 4 bis 6 Rp/kWh bei Energiepreisen der vergangenen Jahre und 8 bis 12 Rp/kWh für künftige Energiepreise. Anschliessend reduziert sich das jeweilige Reduktionspotential der weitergehenden Massnahmen, und die Grenzkosten beginnen markant anzusteigen (vgl. Abbildung ZF. 14).

Zieht man Kostensenkungspotenziale für 2010 mit ein, fallen nebst dem bereits grossen Potential weitere rund 500 TJ Effizienzgewinn durch Kellerwanddämmung und verstärkte Fassadendämmung in den Bereich der Wirtschaftlichkeit, dies selbst dann, wenn keine Energiepreissteigerung angenommen wird. Dies entspricht weiteren 2% des gesamten Heizwärmebedarfs dieser Gebäudegruppe bzw. 20% des realisierbaren Erneuerungspotentials.

Schlussfolgerungen und Fazits

Die vorliegende Analyse des Wohngebäudebestands und die möglichen Wärmeschutzmassnahmen mit ihren Kostenstrukturen und begleitenden Nutzen verdeutlichen eine Komplexität des Untersuchungsgegenstands, der in den bisherigen energiewirtschaftlichen Analysen und Modellen in hohem Masse vereinfacht wurde, so dass es auch immer wieder zu den beobachteten, klischeehaften Bewertungen kommen musste, Wärmedämm-Massnahmen

seien wenig kosteneffizient und im Gebäudebestand nur durch finanzielle Anreize in Gang zu setzen. Die Analysen legen vielmehr folgendes nahe:

- Wärmedämm-Massnahmen im Gebäudebestand mit bisher ungedämmten Fassaden, Dächern oder Kellern sind in den meisten Fällen rentabel, insbesondere dann, wenn der Gebäudebesitzer beim Wärmepreis hochwahrscheinliche Energiepreissteigerungen während der langen Nutzungszeiten und begleitende Nutzen in die einzelwirtschaftliche Betrachtung mit einbezieht.
- Aus energiewirtschaftlicher Sicht sind weitergehende Wärmedämm-Massnahmen kosteneffizient, weil begleitende Nutzen, die nicht alle privat angeeignet werden können (z.B. vermiedene Krankheits- und Lohnausfallkosten), sowie vermiedene externe Kosten in den Bereichen konventioneller Luftschadstoffe (in Höhe von 0.8 bis 3.4 Rp/kWh) und der Treibhausgasemissionen (in Höhe von 4.5 bis 8 Rp/kWh) miteinbezogen werden müssen.

Nicht in dieser Analyse untersucht, aber doch erwähnenswert sind weitere Nutzen aus gesamtwirtschaftlicher Sicht infolge der Substitution von Energieimporten durch inländisch erzeugte Effizienzgüter und -dienstleistungen, durch Wiederverausgabung eingesparter Energiekosten und durch zusätzlich möglich werdende Innovationen, Kostendegressionen und Exporte (politikinduzierter technischer Fortschritt) sowie zusätzliche Beschäftigung, auch in den ländlichen und Bergkantonen.

Aus Sicht der Bauträgerschaften (heutige oder künftige private EFH-BesitzerInnen und MFH-Investoren) ist es angezeigt, den Wärmeschutz mit langfristigem Blickwinkel zu betrachten; denn die (meist baulichen) Investitionen haben eine sehr lange Lebensdauer von drei bis mehr als fünf Jahrzehnten, und späterer, nachträglich anzubringender Wärmeschutz ist wesentlich kostenintensiver (bis zu einem Faktor 3). Ein grosszügiger Wärmeschutz hat sehr geringe Risiken und ist eher wie eine ertragreiche Versicherung gegenüber steigenden Energiepreisen einzuschätzen, weil die Grenzkostenverläufe relativ flach im Bereich heutiger Wärmepreise verlaufen. Da die begleitenden Nutzen, die häufig nicht monetarisiert, ja nicht einmal beachtet werden, von gleicher Grössenordnung sein können wie die Verminderung der Wärmekosten, empfehlen die Autoren eine grössere Beachtung dieser geldwerten Effekte. Die induzierte Wertsteigerung der Gebäude bzw. die verbesserte Vermietbarkeit gut wärmegedämmter Gebäude gehen zwar nicht in die Wirtschaftlichkeitsberechnungen von Wärmeschutzmassnahmen ein, aber sie sind aufgrund des sich ändernden Umfeldes (Bonitätsbewertung durch die Banken, alternde Bevölkerung) für Investitionsentscheide von zentraler Bedeutung.

Aus energiewirtschaftlicher und klimapolitischer Sicht verdienen die Gebäudeerneuerung und ihre grossen Effizienz-Potenziale nahe der Wirtschaftlichkeit mehr Beachtung. Im Vergleich zu anderen Umwelt- und Klimaschutzkosten bietet insbesondere die Gebäudeerneuerung, aber auch der Neubau ein vergleichsweise grosses Potential zu vergleichsweise geringen oder gar negativen Grenzkosten (d.h. Gewinnen), insbesondere bei Erneuerung statt Instandsetzung.

Um *die bestehenden Potenziale zu erschliessen*, liegen aufgrund der Ergebnisse dieser Arbeiten u.a. folgende Instrumente oder Massnahmen für eine nähere Betrachtung nahe:

- Das *Setzen von Bau-Standards und ihre Kontrolle* wirkt auf mehreren Ebenen: zum einen hilft es, den spezifischen Energiebedarf der Neubauten mit jeder Novellierung zu senken, vermittelt über die Baupraxis und identische Bauelemente (z.B. Fenster, verbessertes Isolationsmaterial, rationalisierte Installation) auch den Bedarf des Gebäudebestandes zu mindern. Zum anderen fördern die Standards neue technische Lösungen und über Lern- und Skaleneffekte bei Herstellern und Installationsbetrieben weitere Kostensenkungen und damit neue Märkte. Ein periodisches Verschärfen der Bau-Standards gemäss der technischen Entwicklung ist daher unabdingbar.

- Durch ihre Rolle als Vorreiter und Impulsgeber für Hersteller, umweltbewusste Gebäudebesitzer und Architekten haben auch *Standards und Labels der Bauwirtschaft wie MNERGIE* eine innovationsstimulierende Wirkung, sie dienen als Benchmark und der Markttransparenz ebenso wie zum Experimentieren für die nächste Novellierung kantonaler Baustandards.
- Die durch besseren Wärmeschutz vermeidbaren externen Kosten der Energienutzung und erreichbare zusätzliche Begleitnutzen, die nicht privatisiert werden, in Höhe von einigen Rappen je kWh legitimieren auch weitere *staatliche Rahmenbedingungen pretialer Art*, z.B. die Einführung einer Lenkungsabgabe (z.B. die CO_2-Abgabe des CO_2-Gesetzes). Auch die *Anpassung des Mietrechtes*, das die begleitenden Nutzen (Lärmschutz, bessere Innenluft) aus der Sicht des Mieters bisher nicht berücksichtigt, erscheint dringend geboten, um das User/Investor-Dilemma zu überwinden. Die Kommunikation der Bruttomieten (inkl. Nebenkosten) ist ein erster Schritt dazu.
- Die Ergebnisse dieser Arbeit sind auf Seiten der Kosten und des energetischen Nutzens sehr umfangreich; sie könnten durch *weitere detailliertere und praxisnahe Beispiele* für einzelne Akteurs- und Zielgruppen (z.B. Architekten, Bauhandwerker, Hausbesitzer, Bauwillige) sowie *Kommunikationskanäle* (Fortbildungsunterlagen, Informationsbroschüren, Fachzeitschriften, Bausparer-Zeitschriften) weiter aufbereitet bzw. verwertet werden.
- Das Ausmass und die Monetarisierung der begleitenden Nutzen von Wärmeschutzmassnahmen ist wenig analysiert und bekannt. Um diese Nutzen wie selbstverständlich bei den Investitionsentscheiden einbeziehen zu können, bedarf es weiterer Forschung in diesem Bereich (inzwischen durch das Programm „Energiewirtschaftliche Grundlagen“ (EWG) des BFE mittel eines Projektes in Angriff genommen).

Insgesamt stimmen die Ergebnisse optimistisch, weil die Innovationsschleife "Standards/-Innovationen/Kostensenkung", die Imitation und Diffusion der Neubaustandards bei den Erneuerungs-Investitionen und der zukünftige Einbezug der begleitenden Nutzen hoffnungsvolle Ansatzpunkte für eine nachhaltige Entwicklung im Wohnbereich sind.

1 Problemstellung, Zielsetzungen und methodisches Vorgehen

1.1 Problemstellung und Ausgangslage

Die grossen Energieeffizienzpotenziale liegen in der Schweiz heute u. a. in der Verminderung des Raumwärmebedarfs, der etwa 50% des Nutz- und etwa 33% des Endenergiebedarfs ausmacht. Denn der Nutzenergiebedarf für Raumwärme könnte gegenüber dem heutigen Durchschnittswert des Gebäudebestandes um etwa zwei Drittel niedriger liegen (z.B. nach dem Minergiestandard) und beim Neubau von Solarpassivhäusern können Verbesserungen um einen Faktor fünf bis zehn erreicht werden.

Angesichts der Zielsetzungen des Schweizer CO_2-Gesetzes, die brennstoffbezogenen CO_2-Emissionen in 2010 um 15% gegenüber jenen des Jahres 1990 zu reduzieren, hat dieses Energieeffizienz- und CO_2-Minderungs-Potenzial im Bereich der Gebäude - und insbesondere im Bereich der Wohngebäude - eine grosse Bedeutung. Allerdings wird dieses Potenzial derzeit von vielen Hausbesitzern und Wohnungsbaugesellschaften bei Erneuerungen sehr wenig genutzt, so dass die Zielsetzung des CO_2-Gesetzes bei gleichbleibendem Renovierungsverhalten nicht erreicht würde (Aebischer et al. 2002). Als Argument unzureichender Nutzung der Energieeffizienzpotenziale wird immer wieder mangelnde ökonomische Rentabilität als Argument genannt. Hierbei stellt sich die Frage, inwieweit derartige Bewertungen von der aktuellen Datenbasis ausgehen und ob sie als vollständig anzusehen sind. Will man daher eine aktuelle und sachadäquate ökonomische Bewertung der Wärmeschutzinvestitionen durchführen oder in energiewirtschaftlichen Modellen die möglichen Realisierungspfade simulieren und für energie- und klimapolitische Massnahmen genauer anschauen, so sind die Kosten und Nutzen dieser Optionen und auch ihr Grenzkostenverlauf bei forcierten Effizienzinvestitionen als Informationsbasis von grosser Bedeutung.

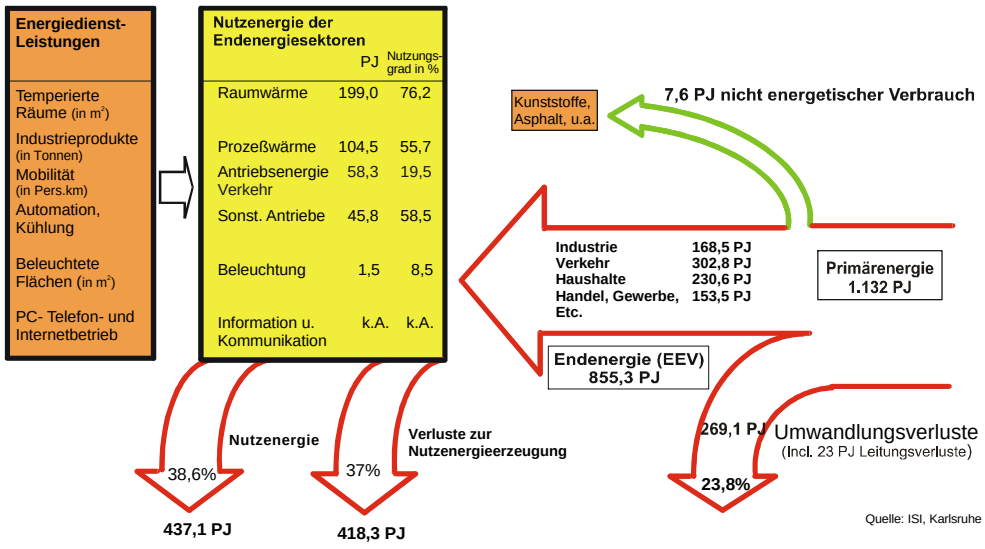


Abbildung 1.1-1: Energiefluss von der Primärenergie bis zur Energiedienstleistung in der Schweiz, 2000

Über die *technische und Kostenbasis dieser Grenzkosten* gibt es in der Schweiz nur ältere aufbereitete Informationen; sie sind für den Neubau und die Erneuerung des Gebäudebestandes nur bedingt repräsentativ und ausserdem mit Unsicherheiten behaftet. Hinzu

kommt, dass auf diesem Gebiet der Wärmeschutzinvestitionen in den 1990er Jahren technisch und kostenseitig erhebliche Verbesserungen erzielt wurden, die in den meist älteren Daten zu Kosten und Technik zu einer Unterschätzung der heutigen (oder in den vergangenen Jahren abschätzbaren) Wirtschaftlichkeit derartiger Massnahmen führen. Sehr wenige OECD-Länder haben eine aktuelle, empirisch einigermassen abgesicherte Informationsbasis, die zwischen verschiedenen Investitionsmassnahmen zum Wärmeschutz und Gebäudetypen, zwischen Neubau und Erneuerung im Gebäudebestand unterscheidet (z. B. die IKARUS-Datenbank für Deutschland in Rouvel u. a. 1999). Meist liegen derartige Informationen in dieser detaillierten und aktuellen Form für Wohngebäude nicht vor, weil die Typisierung des sehr variantenreichen Gebäudebestandes durch empirische Erhebungen sehr aufwändig ist.

Energieeffizienztechniken an Gebäudehülle und der Heiztechnik greifen heute häufig auf neue Technologien zu oder nutzen neue Werkstoffe, Baukonzepte oder Bearbeitungsverfahren. Diese neuen oder modifizierten technischen Optionen beinhalten zum Teil erhebliche *Lernpotenziale oder Potenziale der Serienfertigung*, die in Zukunft die Kosten dieser neuen Techniken und Baukonzepte reduzieren könnten. Die Grenzkosten weiterer Energieeffizienzfortschritte in Wohngebäuden unterliegen damit in Zukunft einer absehbaren Kostendegression, die in diesem zentralen energiewirtschaftlichen Bereich der Raumwärme weitgehend unerforscht ist. Kostendynamik neuer Energietechnologien wird in heutigen energiewirtschaftlichen Analysen und Modellen nur rudimentär für Energiewandler durch Annahmen berücksichtigt (Hieber 1992, Messner 1997) und wurde bisher nicht für den Nutzenergiebereich der Gebäude angewandt.

Obwohl Investitionen zum Wärmeschutz an Gebäuden Nutzungszeiten von 30 bis mehr als 50 Jahren haben, wird in der Regel die Wirtschaftlichkeitsberechnung mit heutigen Energie- bzw. Wärmepreisen durchgeführt. Allerdings sprechen zwei Gründe dafür, dass man nicht mit heutigen, sondern mit *höheren Wärme- bzw. Energiepreisen* als durchschnittliche Preise einer so langen Nutzungsperiode rechnen müsste: das Produktionsmaximum der globalen Erdölförderung in den nächsten 20 bis 30 Jahren und der Handel mit Emissionsrechten für Treibhausgase im Rahmen einer zunehmenden internationalen Klimapolitik. Obwohl sich diese Einflüsse gegenseitig teilweise kompensieren könnten, erscheint die Frage einer angemessenen Bewertung der vermiedenen Energieverbräuche über eine so lange Nutzungsperiode von Bedeutung.

Schliesslich haben zusätzliche Energieeffizienzinvestitionen an Wohngebäuden häufig nicht nur einen energetischen Nutzen, sondern auch andere *begleitende Nutzen (Co-Benefits*), die für die Akzeptanz der Investitionsmassnahmen eine wichtige Rolle spielen können (z. B. höherer Wohn- und Bedienungskomfort, Lärmschutz, zusätzliche Sicherheit, geringere Häufigkeit der Erkrankung der Atmungsorgane, verbesserte Vermietbarkeit und dadurch abgeleitet eine bessere Bonität des Gebäudebesitzers). Diese begleitenden Nutzen werden in vielen Fällen von Wärmeschutzinvestitionen weder angesprochen noch quantifiziert. In wenigen Fällen liegen monetarisierte Werte dieser Co-Benefits vor, um eine gesamtheitliche Bewertung bei energiewirtschaftlichen Analysen und im Immobilienmarkt zu ermöglichen (IPCC 2001). Aber gerade hier liegen sowohl für die Wohnungswirtschaft wie auch für die Mieter und Bauherren weitere Aspekte einer angemessenen ökonomischen Bewertung, die zeitlich nicht zu kurz greift und die Multifunktionalität derartiger Investitionen auch berücksichtigt.

1.2 Zielsetzungen des vorliegenden Berichts

Aufgrund der in der Problemstellung genannten Aspekte verfolgt das hiermit abgeschlossene Forschungsprojekt für den Bereich Wohngebäude folgende Ziele:

- Die empirisch abgestützten Kenntnisse zu den Grenzkosten für zusätzliche Wärmeschutz- bzw. Energieeffizienz-Massnahmen (Wärmedämmung, Fenster, Lüftung), die in den

kommenden 10 bis 30 Jahren von erheblicher energiewirtschaftlicher und klimapolitischer Bedeutung sein könnten, sollten gegenüber den bisher für die Schweiz vorliegenden Informationen deutlich verbessert werden.

- Die erforderlichen technischen und Kostendaten für Kosten-Effizienzkurven sollten für den Neubau und Erneuerungen im Gebäudebestand auf möglichst breiter empirischer Basis aktualisiert werden; sie sollten den neuesten Stand technischer verfügbarer Möglichkeiten, der Baukonzeption und -durchführung sowie der Berechnungsverfahren zur Kostenermittlung (einschliesslich der Dynamisierung zukünftiger Kosten) widergeben.
- Die Kosten und (begleitenden) Nutzen sollten – soweit dies das Forschungsbudget zuliesse – so differenziert und transparent dargestellt sein, dass sie einerseits die Vielfalt bestehender Gebäude und möglicher Energieeffizienz-Investitionen und Baukonzepte reflektieren, andererseits bei neuen Erkenntnissen zu Einzelkosten oder Einzelnutzen auf einfache Weise entsprechende Korrekturen bei der ökonomischen Bewertung ermöglichen.
- Auf diese Weise sollte auch erreicht werden, dass neben dem Informationsbedarf energiewirtschaftlicher Analysen die Akteure des Immobilienmarktes, der Gebäudebesitzer, der Bauherren und des Technologieproduzenten, Planer und Installationsbetriebe einen genaueren Einblick in diese Kosten- und Nutzenzusammenhänge erhalten und nach Möglichkeit für eine differenzierte Information ihres jeweiligen Zielpublikums in Zukunft nutzen können.

Schliesslich sollten aus den Ergebnissen Schlussfolgerungen und (soweit möglich) wesentliche Empfehlungen für die verschiedenen Akteursgruppen abgeleitet werden.

1.3 Methodisches Vorgehen im Überblick

Die o.g. Ziele sind so unterschiedlich, dass an dieser Stelle nicht das gesamte methodische Vorgehen dargelegt wird, sondern nur kurz auf die verschiedenen verwendeten methodischen Vorgehensweisen hingewiesen wird. Die methodischen Vorgehensweisen sind im Detail in den jeweiligen Kapiteln beschrieben (insbesondere Kap. 4.1 und Anfangskapitel von 4.3 bis 4.6).

Zur Bestimmung der Grenzkosten von forcierten Energieeffizienz-Massnahmen nach Bauelementen in den verschiedenen Typen von Wohngebäuden und der damit verbundenen Nutzen waren folgende Aspekte zu beachten bzw. zu unterscheiden (vgl. auch Abb.1.3-1):

- Die Investitionen werden gleichzeitig zu einer ohnehin getätigten Erneuerung bzw. beim Neubau gleichzeitig als Baukonzept-Alternative vorgenommen; dies erfordert die Definition eines Referenzfalles für die jeweiligen Bauelemente, Gebäudetypen und Investitionsfälle (Neubau, Erneuerung).
- Insbesondere bei Erneuerungen war eine getrennte Behandlung der Massnahmen an der Gebäudehülle, im Bereich des Luftwechsels und der Heiztechnik erforderlich; sie wurde auch im konventionellen Neubau versucht (bottom-up), aber eine integrierte Betrachtung beim Neubau von Minergie- und Passivhäusern war in den meisten Fällen sachlich geboten.
- Für die Beschreibung der bisherigen Baupraxis, der heutigen Wohngebäudestruktur (mit Einschluss bisher erzielter Wärmeschutzinvestitionen, vgl. Kap. 2 und 3), der heutigen und vergangenen Kostenstruktur sowie hergestellten Güter waren umfangreiche Erhebungen bei Wohnungsbaugesellschaften, Kantonen, Herstellern und Bauökonomen erforderlich. Der Aufwand für diese Erhebungen und Auswertungen wurde bei der Gesuchstellung klar unterschätzt (vgl. Kap. 4.3 bis 4.5);
- Die Erhebung aktueller und früherer Kosten diente auch als Basis zur Schätzung zukünftiger Kosten der einzelnen Energieeffizienz-Investitionen, wobei zwischen neuen

Technologien und Verbesserungsinnovationen bzw. Produktivitätsfortschritten bei der Montage unterschieden wurde (Kosten-Dynamisierung, vgl. Kap.4.5).

- Für die ökonomische Bewertung vermiedener Energie- und Wärmemengen wurden sowohl mögliche Preisentwicklungen fossiler Brennstoffe diskutiert als auch die Kostendefinitionen aus Sicht der Bauwirtschaft, privater Gebäudebesitzer und der Gesamtwirtschaft erläutert. Die Quantifizierung und fallweise Monetarisierung von nicht-energetischen Nutzen wurde methodisch erläutert. Diese Arbeiten waren ebenfalls extrem aufwändig und zum Teil nur ansatzweise durchführbar (vgl. Kap. 4.6).
- Die Aggregation der empirischen Investitionsdaten zu typischen Investitionsbündeln für definierte Gebäudetypen und weiter zu energiewirtschaftlichen Kostenpotentialkurven (unter Berücksichtigung der relativen Häufigkeiten auf gesamtschweizerischer Ebene) erfolgte exemplarisch; sie zeigte aber auch die Bedeutung der Definition einer Referenz-Variante für die einzelnen Investitionsfälle (vgl. Kap. 6).
- Die Ermittlung der Nettonutzen (oder der Nettokosten), auch unter Einbezug von Co-Benefits aus einzelwirtschaftlicher Perspektive und vermiedener externer Kosten aus gesamtwirtschaftlicher Perspektive (vgl. Kap. 4.7), wurde zur Gewährleistung einer möglichst transparenten und akteursspezifischen Darstellung separat behandelt, konnte aber in dieser Analyse nur exemplarisch angedeutet werden.

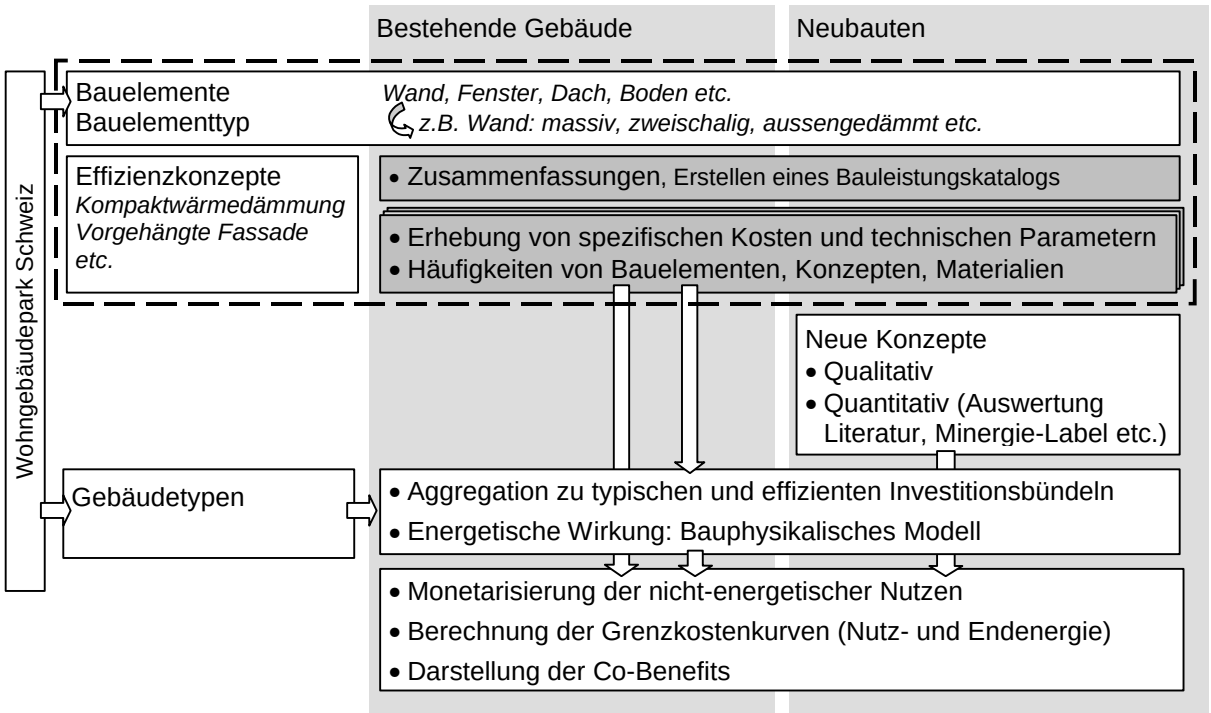


Abbildung 1.3-1: Strukturierung der Analyseinhalte und -teilschritte zur Bestimmung der Grenzkosten zusätzlicher Energieeffizienz-Investitionen in Wohngebäuden

2 Die gebäudewirtschaftliche und –technische Ausgangs-situation und die Erneuerungstätigkeit im Gebäudebestand

Die vergangene, heutige und künftige Bauweise bzw. Erneuerungstätigkeit wurde und wird von verschiedenen Einflussfaktoren bestimmt. Diese Faktoren beeinflussen sowohl die Investitionsentscheide und die damit verbundene Erneuerungshäufigkeit, aber auch in einer Art Rückwirkung die Kosten sowie die energetischen und weiteren Nutzen der Erneuerungsmassnahmen. Eine systematische Kategorisierung der unterschiedlichen betriebswirtschaftlichen Ausgangslagen (Gebäudezustand, Ertragslage und –potential, Finanzierungsaspekte, Besitzer-/Nutzerverhältnis) und eine darauf aufbauende einzelwirtschaftliche und abschliessende Rentabilitätsbetrachtung der Effizienzmassanahmen wäre zu aufwändig gewesen und stand nicht im Fokus des vorliegenden Projekts. Diese noch wenig empirisch erforschten Wechselwirkungen zu kennen wäre jedoch ebenfalls wichtig, um das Verhalten der Investoren und privaten Gebäudeeigentümer zu verstehen, die Erneuerung des Gebäudebestandes zu modellieren oder die Energie-Effizienzpotentiale zu erschliessen.

Das vorliegende Forschungsprojekt verfolgt jedoch auf einen Grenzkostenansatz, der auf die Zusatzkosten und –nutzen von weitergehenden baulichen Energieeffizienzmassnahmen und deren Potentiale abzielt. Basis und Ausgangslage des Grenzkostenansatzes ist der Referenzfall, an dem die Zusatzkosten und –nutzen gemessen werden. Beim Neubau ist dies die Bauweise, bei der Gebäudeerneuerung der Zustand des Gebäudeparks und die Erneuerungstätigkeit. Um eine Grundlage für den Grenzkostenansatz zu erhalten, wird in diesem Kapitel u.a. folgenden Fragen zur gebäudewirtschaftlichen und -technischen Ausgangssituation nachgegangen:

- Wie ist die wärmetechnische Ausgangssituation bei den bestehenden Wohngebäuden?
- Welches sind die wesentlichen Faktoren, welche die Kosten von energetischen Erneuerungen derzeit beeinflussen bzw. in der Vergangenheit beeinflussten?
- Wodurch und wie wird die energetische Wirkung der energetischen Erneuerungsmass-nahmen beeinflusst?
- Wie sind die Sanierungsraten des Wohngebäudebestandes im Re-Investitionszyklus der Fassaden und Dächer? Welche typischen Wärmedämmmassnahmen werden in der Gebäudesanierung vorgenommen?
- Welche Hinweise erhält man über den Gesamt-Absatz von Wärmedämmstoffen, Fassadenerneuerungen und Fenstern?

Dieses Kapitel versucht diese Fragen durch Literaturauswertungen und Befragungen nachzugehen, um eine Ausgangsbasis für die weiteren Analysen zu legen.

2.1 Wohnungswirtschaftliche Ausgangslage und Abgrenzung des Projekts

Die vergangene, heutige und künftige Bauweise bzw. die Instandsetzungs- und Erneuerungstätigkeit wurde und wird von verschiedenen Einflussfaktoren bestimmt, sowohl auf der Kosten- wie auch auf der Ertragsseite. Diese Faktoren können sich im Zeitablauf verändern, womit eine dynamische Betrachtung der folgenden Faktoren notwendig wird:

- Wohnungswirtschaftliche Rahmenbedingungen (Mietergesetz, Baugesetze etc.)
- Ertragslage und –perspektiven (abhängig von Mikro- und Makrolage, Marktsituation, sozialen Faktoren, Ausstattung, Wohnungsgrösse und –einteilung, Gebäudezustand etc.)
- Besitz- bzw. Mietverhältnisse, Investorkategorie und –ziele (langfristige Anlage oder kurzfristig gewinnorientierte Zielsetzung, Eigenwohnbedarf etc.)
- Gebäudezustand und erwartete Entwicklung desselben.

- Baukosten von Instandsetzungs- und Erneuerungsmassnahmen, sowie die damit verbundenen Nutzen (Gebäude wird wieder erneuert, Energie- und Unterhaltskosten werden verringert, Wert- und Gebäudesubstanzzerfall wird gestoppt)
- Finanzierungskosten (vorhandenes Eigenkapital, Fremdkapitalkosten, Bonität etc.)

Diese Faktoren beeinflussen sowohl die Investitionsentscheide und -strategien und die damit verbundene Erneuerungshäufigkeit, aber auch in einer Art Rückwirkung die Kosten sowie die energetischen und weiteren Nutzen der Erneuerungsmassnahmen. Zudem besteht die Möglichkeit, das Gebäude mittel- oder langfristig auf Abbruch zu bewirtschaften, wenn damit z.B. die Kosten tiefer gehalten werden können, die künftigen Bedürfnisse der BewohnerInnen besser befriedigt werden können oder die Ertragslage gesteigert werden kann (Neubau, evtl. mit grösserer Ausnützungsziffer). Die Antwort zur Frage Abbruch und Neubau versus Sanierung hängt wiederum von vielen Einflussfaktoren ab. Dieser Fragestellung wurde im Projekt „Neubauen statt Sanieren"nachgegangen (Econcept, 2002a).

Eine systematische Kategorisierung der unterschiedlichen betriebswirtschaftlichen Ausgangslagen und Strategieziele (Gebäudezustand, Ertragslage und –potential, Finanzierungsaspekte, Besitzer-/Nutzerverhältnis, langfristige Erneuerungs- bzw. Abbruchstrategie etc.) und eine darauf aufbauende, einzelwirtschaftliche und abschliessende Rentabilitätsbetrachtung der Energieeffizienzmassanahmen wäre zu aufwändig gewesen und stand nicht im Fokus des vorliegenden Projekts. Diese noch wenig empirisch erforschten Wechselwirkungen zu kennen wäre jedoch ebenfalls wichtig, um das Verhalten der Investoren und privaten Gebäudeeigentümer zu verstehen, die Erneuerung des Gebäudebestandes zu modellieren oder die Energie-Effizienzpotentiale zu erschliessen.

Das vorliegende Forschungsprojekt verfolgt jedoch auf einen Grenzkostenansatz, der auf die Zusatzkosten und –nutzen von weitergehenden baulichen Energieeffizienzmassnahmen und deren Potentiale abzielt. Basis und Ausgangslage des Grenzkostenansatzes ist der Referenzfall, an dem die Zusatzkosten und –nutzen gemessen werden. Beim Neubau hängt dies von der Bauweise, bei der Gebäudeerneuerung vom Zustand des Gebäudeparks und von denErneuerungstätigkeiten ab.

2.2 Besitzer- und Nutzerverhältnis und andere Hemmnisse der Energieeffizienz in Wohngebäuden

Von verschiedener Seite und seit vielen Jahren wurde auf das Besitzer-Nutzer Dilemma im Zusammenhang mit energetischen Erneuerungen von vermieteten Wohngebäuden hingewiesen (Metron 1998, Econcept 2002a, UNDP/WEC/UNDESA 2000). Das Verhältnis zwischen Besitzer und Nutzer der Gebäude beeinflusst die Investitionsentscheide qualitativ wie folgt:

- Private EFH-Besitzer und -nutzer: Die Kosten und die Nutzen von energieeffizienten Erneuerungen fallen direkt beim Investierenden an, sowohl was die direkten wirtschaftlichen Nutzen wie auch die Co-Benefits betrifft, soweit er sie als Individuum als Nutzen erleben kann.
- Privater MFH-Besitzer: er wohnt selbst im Gebäude; er partizipiert an dem Teilnutzen und an den Co-Benefits und erhält die soziale Anerkennung der Mieter, „dass etwas passiert".
- Privater MFH-Besitzer (bzw. Wohnungsbaugesellschaften), wohnt nicht selbst im Gebäude: hier ist das Besitzer-Nutzer-Dilemma voll wirksam, weil der Gebäudebesitzer nicht weiss, ob er alle zusätzlichen Kapitalkosten über eine bessere Miete und einen geringeren Leerstand kompensiert bekommt und der Mieter selten nach der Warmmiete seine Wohnungswahl trifft. Dies gilt häufig auch für Kapitalanleger in Immobilien.

Auch die Verwaltungsform beeinflusst möglicherweise Investitionsentscheide. Zu unterscheiden sind:

- Private Eigentümer oder Unternehmen, welche die Gebäude selbst verwalten, erfahren über den unmittelbaren Mieterkontakt Wünsche, Beschwerden und Zufriedenheitsäusserungen.
- Immobilientreuhänder verwalten die Gebäude anderer Besitzer, so dass der unmittelbare Kontakt zwischen Besitzer und Mieter meist unmöglich ist. Erst über eine schlechte Vermietbarkeit und hohe Leerstände kommt es zu Nachfragen seitens der Gebäudebesitzer.

Diese Eigentümer-Nutzer-Konstellationen erklären einen Teil der grossen Vielfalt bei dem heutigen Stand der wärmetechnischen Ausstattung und Eigenschaften von Wohngebäuden.

2.3 Architektonische Gliederung des Gebäudebestandes

Die Architektur der bestehenden Gebäude beeinflusst die Kosten und Nutzen von Wärmeschutzmassnahmen in einem nicht unwesentlichen Mass. Bei der Fassadenwärmedämmung sind die Längen der Fensterleibungen im Verhältnis zur Fassadenfläche kostenbeeinflussend, beim Flachdach das Verhältnis von Dachrandlänge zu Dachfläche .Und der **spezifische, auf die EBF bezogene** Heizwärmebedarf wird nebst den energie-technischen Kennwerten der Gebäudehülle und dem Luftwechsel durch verschiedene Verhältniszahlen bestimmt, welche auch Bestandteil der architektonischen Charakterisierung sind. Die energetische Solargewinn-/Wärmeverlustsituation im Gebäude. hängt z.B. stark vom Verhältnis der Fensterfläche zur Fläche der opaken Bauteile bzw. zur Energiebezugsfläche ab.

2.3.1 Gebäudeformen, Flächen- und Längenverhältnisse

Die Wirkung einer energetischen Massnahme an der Gebäudehülle ist, absolut gemessen, also z.B. in Litern Öl oder kWh Gas oder Strom pro Jahr, näherungsweise unabhängig von der Energiebezugsfläche. Dies gilt näherungsweise auch für die spezifischen (Grenz-)Kosten. Näher betrachtet ist der **Heizwärmebedarf** in einem Gebäude jedoch von den verschiedenen Faktoren abhängig, die sich gegenseitig beeinflussen. Die wesentlichen Grössen sind die Anteile der Transmissionsverluste, der solaren und übrigen Wärmegewinne sowie der Lüftungsverluste. Und wenn Aussagen über die Wirkung pro Energiebezugsfläche gemacht werden sollen, müssen natürlich die Flächenverhältnisse der einzelnen Bauteile bekannt sein. Die Energiebezugsfläche ist zudem eine Grösse, die am ehesten statistisch erfasst wird bzw. von anderen Grössen (Wohnfläche) abgeleitet werden kann.

Über die gesamtschweizerischen Wand- und Dachflächen der Ein- und Mehrfamiliehäuser liegen Schätzungen von Wüest und Partner vor, differenziert nach den einzelnen Bauperioden (siehe Tabelle 2.3-1). Das Verhältnis Wand zu EBF ist bei den EFH tiefer als bei den MFH, dasselbe gilt für das Verhältnis Dach zu EBF.

Für Betrachtungen, die sich auf die Energiebezugsfläche beziehen, ist die Gebäudehüllenziffer ein entscheidender Faktor, siehe dazu auch die Ausführungen im Kapitel 4.2). Wie zu erwarten ist die Gebäudehüllenziffer bei den EFH höher als bei den MFH . Das A/EBF bleibt auch über fast alle Bauperioden auf einem ähnlichen Niveau: zwischen 1.8 und 2.4 bei den EFH und zwischen 1.4 und 1.7 bei den MFH (vgl. Tabelle 2.3-2). Erst in der Bauperiode 1961 bis 1975 geht das A/EBF bei den MFH deutlich zurück. Bei den MFH dürften die tiefen A/EBF einerseits vor allem auf die geringen Raumhöhen und die grossen, mehrstöckigen Wohngebäude dieser Bauperiode zurückzuführen sein. Nicht überraschend ist diese vielfach energetisch und bautechnisch suboptimale Gebäudesubstanz auch unter den Gesuchen des Investitionsprogramms Energie 2000 häufig vertreten.

Tabelle 2.3-1 Energiebezugsflächen sowie Wand- und Dachflächen der Wohngebäude in der Schweiz für das Jahr 2000,in Mio. m^2

	EFH			MFH		
	EBF	Wand	Dach	EBF	Wand	Dach
Vor 1900	38	17	11	21	30	30
1900-60	52	35	24	65	61	58
1961-75	34	20	19	63	32	38
1976-85	29	17	15	36	16	27
1986-00	44	26	23	51	24	40
Total	197	116	92	236	162	193

Quelle Wüest und Partner 1994, 2000, Prognos 1996, Berechnungen CEPE

Tabelle 2.3-2 Gebäudehüllenziffer (gewichtete Gebäudehüllenfläche / EBF = A/EBF) . Angegeben sind Median sowie 1. und 3. Quantil der beobachteten Gebäudehüllenziffern sowie die Anzahl ausgewerteter Fälle in Klammer.

	Bauperiode	Vor 1900	1901-20	1921-45	1946-60	1961-75
EFH	Anzahl Fälle	(119)	(21)	(48)	(47)	(45)
	1. Quantil	1.5	1.9	1.6	1.8	1.8
	Median	1.8	2.3	1.9	2.4	2.2
	3. Quantil	3.0	3.3	2.4	3.1	2.7
MFH	Anzahl Fälle	(77)	(20)	(34)	(21)	(155)
	1. Quantil	1.3	1.4	1.4	1.2	1.0
	Median	1.7	1.6	1.6	1.4	1.1
	3. Quantil	2.2	1.8	2.5	1.7	1.3

Quelle Investitionsprogramm Energie 2002. Basis: Sanierungen ohne Um- oder Anbau, Abgeschlossene Projekte. Auswertungen CEPE

Die Flächenverhältnisse Fassade zu EBF sind Tabelle 2.3-3 aufgeführt. Ein tieferes Wand/EBF-Verhältnis bei den MFH der Bauperiode 1960-75 ist auch bei den gesamtschweizerischen Flächenangaben festzustellen (siehe Tabelle 2.3-1). Im Gegensatz zu den gesamtschweizerischen Werten weisen bei den Gesuchen die MFH eher tiefere Werte auf als die EFH.

Tabelle 2.3-3 Verhältnis der Fassadenaussenfläche zur EBF. (Median sowie 1. und 3. Quantil) sowie die Anzahl ausgewerteter Fälle in Klammer

	Bauperiode	Vor 1900	1901-20	1921-45	1946-60	1961-75
EFH	Anzahl Fälle	(144)	(29)	(66)	(81)	(114)
	1. Quantil	0.7	0.9	0.8	0.8	0.8
	Median	0.9	1.1	1.0	1.2	1.0
	3. Quantil	1.2	1.4	1.3	1.6	1.2
MFH	Anzahl Fälle	(86)	(30)	(39)	(129)	(366)
	1. Quantil	0.6	0.6	0.8	0.7	0.5
	Median	0.7	0.7	1.0	0.8	0.6
	3. Quantil	0.9	1.0	1.1	0.9	0.8

Quelle Investitionsprogramm Energie 2000. Basis: Sanierungen, abgeschlossene Projekte,. Auswertungen CEPE

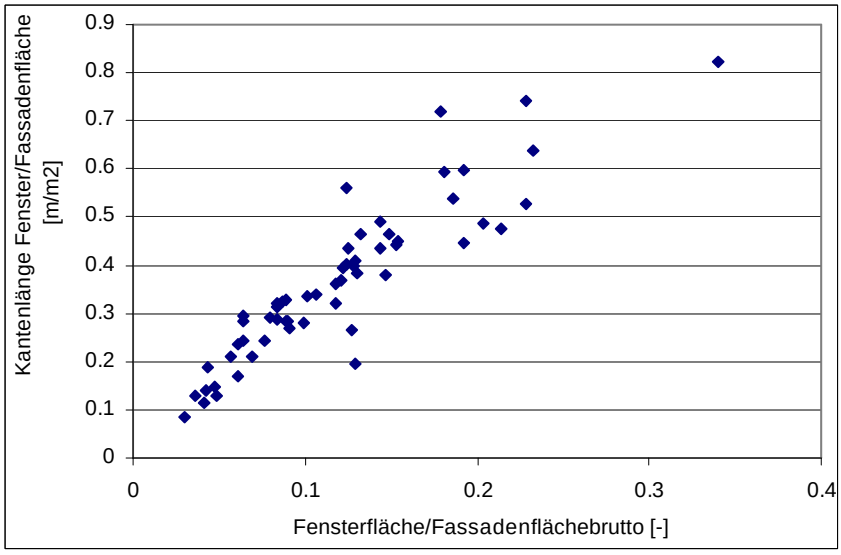
Des weiteren ergibt die Auswertung des Investitionsprogramms Energie 2000 relativ konstante Fensterflächenanteile für alle Bauperioden bis Mitte der 1970er Jahre. Nur bei den EFH sind in der Bauperiode 1976 bis 1985 erhöhte Anteile festzustellen (für die Bauperiode nach 1985 standen nicht genügend Fälle für eine Auswertung zur Verfügung). Wegen der unterschiedlichen vorhandenen Möglichkeit solarer Einstrahlungsgewinne wäre die Kenntnis der Fensterflächenanteile für die verschiedenen Orientierungen ebenfalls hilfreich. Für diese Anteile konnten keine quantitativen empirischen Grössen gefunden werden. Es ist davon auszugehen, dass die Fenster gegen Norden tendenziell etwas kleiner geplant wurden bzw. dass weniger Fenster eingesetzt wurden, die Fensterflächenanteile dort also leicht tiefer liegen. Wir gehen davon aus, dass die Verbreitung grossflächiger Fenster oder hohen Fensterflächenanteilen gegen Süden und evtl. gegen Ost und West vor allem ab den 1980er Jahren ihren Anfang nahm, gleichzeitig mit den empirisch beobachteten höheren Gesamtanteilen (siehe Tabelle 2.3-4).

Tabelle 2.3-4 Verhältnis der Fensterfläche zur Fassadenaussenfläche (brutto, i.e. $A_{Fe}/(A_{Fe}+A_{Fa})$). Angegeben sind Median sowie 1. und 3. Quantil der beobachteten Verhältnisse sowie die Anzahl ausgewerteter Fälle in Klammer.

	Bauperiode	Vor 1900	1901-20	1921-45	1946-60	1961-75	1976-85
EFH	Anzahl Fälle	(298)	(56)	(132)	(134)	(196)	(30)
	1. Quantil	0.10	0.11	0.11	0.10	0.12	0.16
	Median	0.13	0.14	0.14	0.13	0.16	0.28
	3. Quantil	0.18	0.18	0.19	0.19	0.21	0.54
MFH	Anzahl Fälle	(183)	(50)	(85)	(223)	(647)	(22)
	1. Quantil	0.11	0.11	0.12	0.13	0.16	0.16
	Median	0.14	0.14	0.15	0.16	0.20	0.19
	3. Quantil	0.21	0.21	0.19	0.20	0.25	0.25

Quelle Investitionsprogramm Energie 2000, Auswertungen CEPE

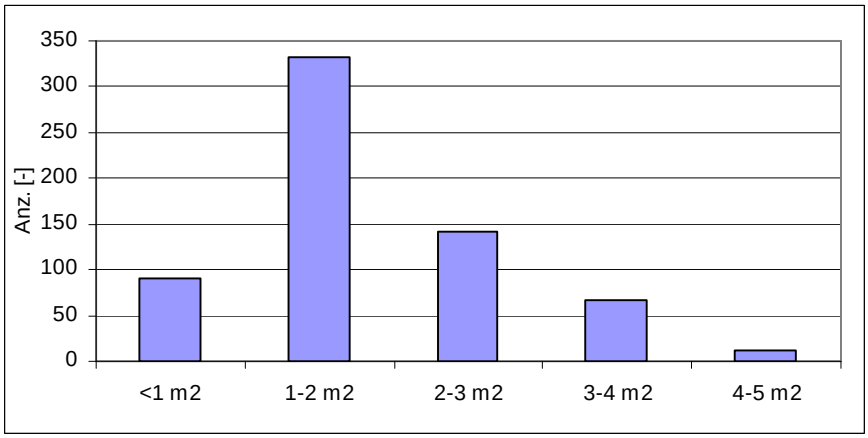
Die Kosten von Fassadenwärmedämmungen sowie deren energetische Wirkung hängen von den architektonischen Formen, den Längen der Anschlüsse, insbesondere der Fenster ab. Auch die energetische Wirkung der Wärmedämmungen wird durch die Anteile der Längen pro m² Fassadenfläche beeinflusst, weil hier Möglichkeiten von Ventilationsverlusten und Wärmebrücken infolge der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten der Bauelemente gegeben sind (vgl. Kapitel 4.2.3). Aus Abbildung 2.3-1 geht hervor, dass die Kantenlänge der Fenster relativ gut anhand der Fensterfläche abgeschätzt werden kann.



Quelle Lärmschutzprogramm Kt. ZH, 3 Gemeinden, 57 Gebäude aus allen Bauperioden, Auswertung CEPE

Abbildung 2.3-1 Spezifische Fensterkantenlänge pro Fassadenfläche in Funktion des Verhältnisses Fensterfläche/Fassadenfläche (brutto) im Gebäudebestand.

Die spezifischen Kosten von Fenstern hängen stark von der Fenstergrösse (i.e. der Fensterfläche) ab. Empirische Analysen im Gebäudebestand kommen zu dem Ergebnis, dass gut 50 % der Fenster zwischen 1 und 2 m² und ein knappes Viertel der Fenster zwischen 2 und 3 m² gross sind (vgl. Abbildung 2.3-2). Die Fläche eines sogenannten Standardfensters beträgt 1.7 m².



Quelle Lärmschutzprogramm Kt. ZH, 3 Gemeinden, 57 Gebäude aus allen Bauperioden, Auswertung CEPE

Abbildung 2.3-2 Verteilung der Fenstergrössen im Gebäudebestand

Weitere Auswertungen betreffen die Verhältnisse Dach zu Fassade sowie Dach zu Kellerdecke. Der Median des Dach/Wand-Verhältnisses der MFH liegt bei während der ganzen Bauperiode 1990 bis 1975 zwischen 0.5 und 0.6 und bei 0.8 bei den Gebäuden vor 1900. Die Quantile liegen jeweils 0.2 darüber bzw. darunter. Zwischen dem ersten und dem dritten Quantil ergibt sich also eine Variation um ca. den Faktor zwei.

2.3.2 Ästhetische und denkmalpflegerische Aspekte

Wärmeschutzmassnahmen an der Gebäudehülle können auch die Architektur und die Erscheinungsform der Gebäude beeinflussen. Dies kann einerseits energetische Erneuerungen behindern oder einschränken, andererseits aber bietet sich auch eine Chance, die Gebäude in einen neuen architektonischen Kontext zu stellen. Zudem können die Aussenräume, namentlich neu gestaltet (indem Balkone abgetrennt und durch solche mit grösserer Nutzfläche ersetzt werden) oder gar neu geschaffen werden,

Die Architektur und Erscheinungsform der Gebäude der 1960er und 1970er Jahre, vor allem auch der typischen vielstöckigen MFH, kann durch Aussenwärmedämmungen oft auch verbessert werden, wie eine Reise des Autors mit dem Zweck zur stichprobenartigen architektonischen Charakterisierung durch die Schweiz gezeigt hat.

Die Architekten und Unternehmen haben in den letzten Jahren eine grosse Palette von konstruktiven Lösungen und Produkten entwickelt, um nebst den wärmetechnischen auch den ästhetischen Ansprüchen zu genügen.

- Gegen markante Dämmstärken wird oft das Argument der dadurch entstehenden markanten Fenstertiefen ins Feld geführt. Gerade aber bei markanten Dämmstärken lässt sich das Fenster jedoch nach vorne versetzen, in die Ebene der vormaligen Aussenwandoberfläche (dies ist natürlich nur möglich, wenn Fenster und Fassade im gleichen Bauvorhaben erneuert werden). Dies hat zudem den Vorteil, dass die linearen Wärmeverluste der Fensterleibungen stark reduziert werden.
- Sind bei Gebäuden Natur- oder Kunststeingesimse und/oder –gewände vorhanden, lassen sich diese nach aussen ergänzen, indem ähnliche Materialen „aufgedoppelt“ werden. Ein solches Gewände oder Gesimse kann dann gleichzeitig als Schutz für die an der Fassade angrenzende Wärmedämmung dienen. Der Markt bietet zudem sind solche Produkte mit tiefer Wärmeleitfähigkeit an.
- Auch der Übergang der Fassade zum Dach kann so gestaltet werden, dass das Vordach immer noch als schlank erscheint. Auch hier ist eine gleichzeitige Ausführung oder mindestens eine Planung, d.h. eine Vorbereitung für das nachfolgende Erneuerungsprojekt von Vorteil.

Auch die Einschränkung infolge denkmalpflegerischen Bestimmungen darf nicht überschätzt werden. Diese sind von Kanton zu Kanton verschieden und eine vergleichbare gesamtschweizerische Statistik ist nicht vorhanden. Der Anteil der geschützten Bauten wird auf ca. 5% geschätzt (Denkmalpflege, 2002), wobei einzelne höhere (bis 10%) und andere Kantone tiefere Anteile (2%) aufweisen. Ausserdem kann der Anteil geographisch variieren, etwa wenn ganze Strassenzüge oder Quartiere unter Schutz gestellt sind. Bei den meisten Gebäude bzw. Bauteilen lassen sich jedoch Lösungen finden, um den Wärmeschutz stark zu verbessern. Beim Fenster kann z.B. eine Doppel-Wärmeschutzverglasung angebracht werden. Wände gegen aussen können z.B. kombiniert innen und aussen gedämmt werden; selbst relativ geringe Dämmstärken weisen eine relativ grosse Wirkung auf; denn die ersten paar Zentimeter haben bekanntlich die grösste Wirkung. Oft sind auch nicht alle Orientierungen unter Schutz gestellt, sondern nur diejenige gegen die Strasse. Und im Dachbereich lassen sich ohnehin Lösungen finden, sei es mittels Estrichbodendämmung oder Zwischen- und Unter-

sparrendämmungen (wichtig ist natürlich jeweils die fachgerechte Ausführung) oder mittels Ersatz des gesamten Dachaufbaus. Im Rahmen eines Erneuerungsvorhabens, das als Pilot- und Demonstrationsprojekt geführt wurde, ist es denn auch gelungen, den Energiebedarf eines denkmalgeschützten Gebäudes (Viriden, 2001) beinahe bis auf den Passivhausstandard zu reduzieren.

2.4 Gliederung des Gebäudebestandes nach wärmetechnischen Gesichtspunkten sowie die Bauweise in Abhängigkeit der Bauperioden

Die bestehende Gebäudesubstanz beeinflusst die energetischen Nutzen der Erneuerungsmassnahmen, was mittels gebäudephysikalischer Energiebedarfsmodelle hinreichend demonstriert werden kann. Dieses gebäudestatistisch orientierte Kapitel dient dazu, eine Übersicht über den Schweizerischen Gebäudebestand nach wärmetechnischen Gesichtspunkten für die verschiedenen Gebäudeelemente und Bauperioden zu geben.

a) Wärmedämmungen

Wärmedämmungen nach dem heutigen Verständnis mit modernen Dämmmaterialien wurden punktuell etwa ab Mitte der 1960er Jahre, in verstärktem Masse ab Mitte der 1970er angewendet. Seit diesem Zeitpunkt wurde die Dämmstärke bei den verschiedenen Bauteilen sukzessive gesteigert (vgl. Tabelle 2.4-1). Dabei fällt auf, dass ab der Periode 1971-75 die Dämmstärken wegen der ersten Ölpreiskrise (1973) und der zweiten Ölpreiskrise (1979/80) deutlich schneller anstiegen und ein weiterer Anstieg auch nach 1986 beibehalten werden konnte, obwohl die Heizenergiepreise seitdem rückläufig waren und Ende der 1990er Jahre wieder das Niveau der frühen 1970er Jahre erreichten. Diese Entwicklung deutet bereits auf eine grossen technischen Fortschritt bei der Wärmedämmtechnik hin.

Zu vermerken ist hierbei, dass die Preise nicht nur einen direkten Effekt auf das Investitionsverhalten (z.B. die Wahl der Dämmstärken) hat, sondern dass auch die Verbände und Verwaltungen aktiv wurden und den Wärmeschutz in die gesetzlichen Bestimmungen aufgenommen bzw. zum Stand der Technik erhoben hatten.

Tabelle 2.4-1 Vergangene Entwicklung der Dämmstärke für die verschiedenen Bauteile, in mm

	< 1960	1961-1965	1966-1970	1971-1975	1980	1985	1990	1993	1995	1997	2000
Schrägdach			50	75	90	100*	105	117	129	129	135
Kompaktfassade					60-80	75	84		91	96	108
Flachdach	30	40	50	60-80	80-100		110		120		140
Kellerdecke				20	30		40				
*Systemwechsel: Platte statt Rolle. Zusammen mit Dampfbremse qualitativ besser als frühere Aluflexrolle											

Quelle Führender Dämmstoff-Hersteller

Erfahrungsgemäss werden bei Neubauten die Dämmstärken zu etwa 10% dicker gewählt und bei Erneuerungen um etwa 10% dünner als der Durchschnitt der Wärmedämminvestitionen. Eine erste Ausgangslage für die energetische Beschreibung der Gebäudesubstanz aus energiewirtschaftlicher Sicht liefert die sogenannte „Kontrollrechnung zur Sanierungstätigkeit“, die im Auftrag des Kantons ZH erstellt wurde (Wüest und Partner, 1998b).

b) Wandaufbau

Für die verschiedenen Bauperioden sind gesamtschweizerisch der Wandaufbau und der Dachaufbau für beide Grössentypen bekannt. Für drei Zeitperioden und die beiden Gebäudegrössen EFH (Einfamilienhaus)und MFH (Mehrfamilienhaus) wurden über die Flächenangaben jene Gebäudemerkmale herausgearbeitet, die technologisch am häufigsten vorkommen, nachfolgend dargestellt am Beispiel der Wandaufbautypen (vgl. Tabelle 2.4-2).

Tabelle 2.4-2 Wandaufbautypen: Anteile pro Bauperiode (%) sowie gesamtschweizerische Wandflächen pro Bauperiode von Wohngebäuden (Mio m²)

	EFH			MFH		
	bis 1960	1961-75	1976-95	bis 1960	1961-75	1976-95
1) Monolithische Konstruktionen	**83%**	11%	10%	**85%**	12%	10%
2) Zweischalige Konstruktionen	5%	**30%**	**44%**	2%	**22%**	**27%**
3) Massive Konstruktionen	4%	6%	6%	4%	2%	5%
4) (geringe) Aussendämmung	0%	**45%**	**30%**	0%	**64%**	**55%**
5) Skelettbau	8%	8%	10%	8%	0%	3%
Alle Konstruktionsarten (Mio m²)	52	20	35	91	32	32

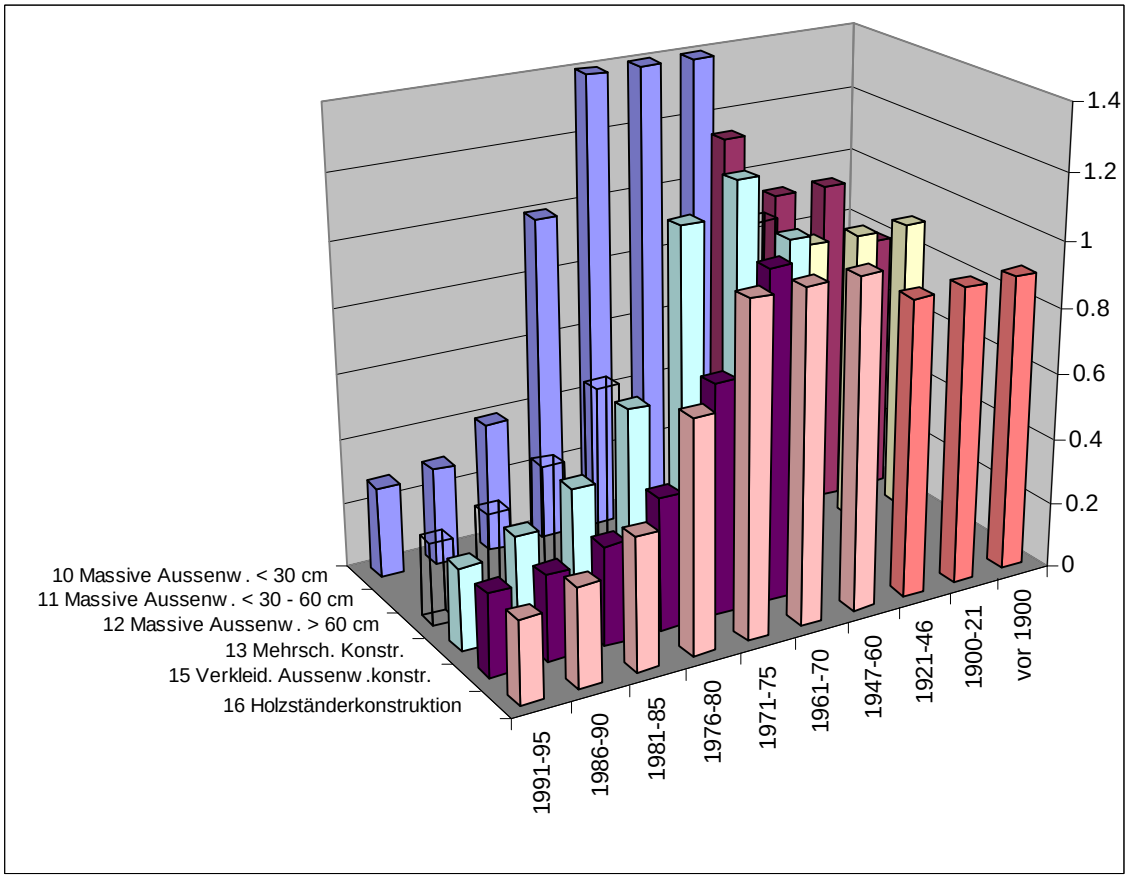
Quelle Wüest und Partner,1998a

Folgende Feststellungen lassen sich machen:

- In der Periode vor 1960 ist die monolithische Konstruktion (EFH und MFH) mit 83% bzw. 85% sehr dominant.
- In der Periode 1960 bis 1975 ist die relativ dünnwandige (<30 cm) Massivkonstruktion mit geringer Aussenwärmedämmung die häufigste Konstruktionsart (knapp die Hälfte bei den EFH und rund zwei Drittel bei den MFH), gefolgt von der zweischaligen Konstruktion (rund 30% bei den EFH bzw. 20%). Bei den EFH kann die Skelettbauweise zudem energetisch und kostenmässig wie in der Periode vor 1960 behandelt werden.
- In der Periode 1976-1995 gewinnen die zweischaligen Konstruktionen zulasten der Aussenwärmedämmung an Bedeutung; die Summe der beiden macht aber immer noch drei Viertel (EFH) bzw. über 80% (MFH) aus.
- Im Dachbereich wurden nur die zwei Arten des Ziegelsteildachs und des Flachdachs analysiert.

Mit den jeweils zwei häufigsten Wandaufbautypen lassen sich also durchschnittlich rund 80% der bestehenden Gebäude erfassen, was für die Überlegungen in Kap. 6 ein wichtiges Ergebnis ist.

In der „Kontrollrechnung Sanierungstätigkeit" (Wüest und Partner, 1998b) werden folgende U-Werte für die verschiedenen Wandaufbautypen und Bauperioden angegebenen (vgl. Abbildung 2.4-1). Während die U-Werte aller Gebäudetypen bis 1970 über 0.9 W/m²K liegen, sinken sie sämtlich bis zur Periode 1991-95 unter den Wert 0.3 W/m²Kfür die neugebauten Wohngebäude.



Quelle Wüest und Partner 1998b

Abbildung 2.4-1 U-Werte(W/m²K) für verschiedene Wandaufbautypen und Bauperioden.

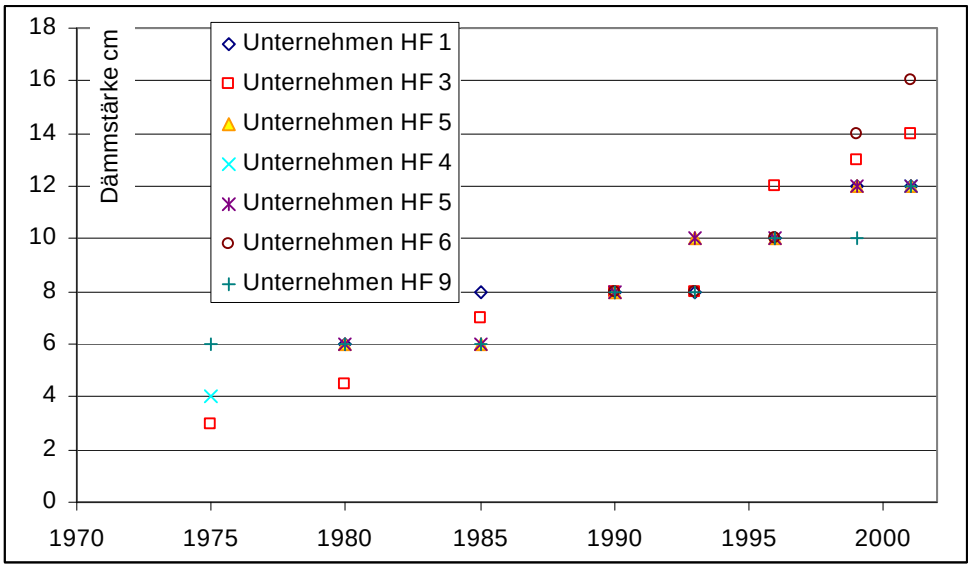
Für das vorliegende Projekt wurden die U-Werte denjenigen Wandaufbautypen, für welche gesamtschweizerische Werte vorliegen, zugeordnet und zur Vermeidung zu vieler Perioden etwas zusammengefasst (siehe Tabelle 2.4-3).

Tabelle 2.4-3 U-Werte (W/m²K) für die verschiedenen Wandaufbautypen und Bauperioden (energetisch nicht erneuert). Nach Wüest und Partner 1998a und 1998b.

	vor 1960	1961-75	1975-95
1) Monolithische Konstruktionen	1.0	1.4	0.5
2) Zweischalige Konstruktionen	1.0	1.2	0.4
3) Massive Konstruktionen	1.0	1.4	0.5
4) Aussendämmung	-	1.2	0.4
5) Skelettbau	0.9	1.0	0.4

Quelle Wüest und Partner, 1998a und 1998b

Diese Werte lassen sich aufgrund der Angaben der befragten Fassadenunternehmen plausibilisieren.



Quelle CEPE-Umfrage bei SFHF- und anderen Unternehmen

Abbildung 2.4-2 Vergangene zeitliche Entwicklung der Dämmstärken bei hinterlüfteten Fassaden an Neubauten.

Eine ähnliche Entwicklung ergab sich bei einer Erhebung des CEPE für die Erneuerung von hinterlüfteten Fassaden und Kompaktfassaden an bestehenden Wohngebäuden (vgl. Abbildung 2.4-2). So nahm die durchschnittliche Dämmstärke von 4 bis 6 cm Mitte der 1970er Jahre auf 12 bis 14 cm Anfang dieses Jahrzehnts zu. Besonders bemerkenswert ist dabei der Anstieg der Dämmstärke seit 1986, seitdem die Heizenergiepreise real sich mehr als halbierten.

c) Dachaufbau

Analog wird der Dachaufbau betrachtet. Interessant sind hier insbesondere auch nachträglich ergriffene Wärmedämmassnahmen, da die Dachbodendämmung relativ einfach zu realisieren ist, weil der kalte Teil direkt begehbar ist. Dachausbauten zu Wohnungszwecken führten ebenfalls zwingend zu Dämmungen, in diesem Fall an der Dachhaut entweder von innen oder von aussen (vgl. Tabelle 2.4-4). In diesen Gebäuden ist auch die Innendämmung der Wände zu berücksichtigen, so weit das aus bauphysikalischen Gründen möglich ist

Tabelle 2.4-4 U-Werte (W/m²K) für die verschiedenen Dachaufbautypen und Bauperioden (energetisch nicht erneuert). Nach Wüest und Partner 1998a und 1998b.

Bauperiode	vor 1960	1961-75	1975-95
Schrägdach	0.7 - 1.0	0.85	0.25 - 0.6
Flachdach	unbedeutend	1.0	0.22 - 0.5

Quelle Wüest und Partner 1998a und 1998b.

Wie weit die verschiedenen Konstruktionsarten im Dachbereich spezifisch unterschiedliche Wärmedämmtechniken und/oder -kosten erfordern bzw. verursachen, wurde in einem nächsten Schritt geklärt. Je nach möglichem Arbeitsaufwand und Differenzierungsbedarf können die vorhandenen Daten durch Typenbildung wieder mehr zusammengefasst werden.

d) Fenster

Bezüglich der Akzeptanz zusätzlicher Kosten des Fensterersatzes spielt das bestehende Fenster bei Investitionsentscheidungen meist nur eine geringe Rolle. Die Charakterisierung der Fenster ist jedoch hinsichtlich der energetischen Wirkung der Erneuerungsmassnahmen und der Referenzerneuerung in energiewirtschaftlichen Analysen wichtig.

Von Bauperiode zu Bauperiode gab es periodenabhängige Verbesserungen der U-Werte durch verbesserte Beschichtung der Scheiben, Zwei- und Dreifachverglasung und Verbesserung der Rahmen, so dass der U-Wert binnen 30 Jahren mehr als halbiert wurde (vgl. Tabelle 2.4-5). Bei den Gebäuden mit Baujahr vor 1960 ist davon auszugehen, dass der grösste Teil der Fenster nachträglich durch mindestens doppelverglaste Fenster mit einem entsprechenden U-Wert ausgetauscht wurde, siehe Abbildung 2.5-8 und Abbildung 2.5-7 im Kapital 2.5.3.

Tabelle 2.4-5 U-Werte (W/m²K) für die verschiedenen Fenstertypen und Bauperioden (energetisch nicht erneuert).

Bauperiode		U-Wert Glas		U-Wert Fenster	
		Standard	Verbessert	Standard	Verbessert
Bis 1960	Einfachverglasung	3.7 – 6			
1961-75	Doppelverglasung, ab 1970 IV	2.8 - 3.3			
1976-85	Doppelverglasung bis IV Verglasung (3-Fachverglasung)	2.7	1.7	2.0 – 2.5	1.6
1986-90	IV Verglasung bis Wärmeschutzverglasung	1.3 - 1.8		1.4 - 1.7	
1990-93	Wärmeschutzverglasung, Zweifach und Dreifach	1.1	0.7	1.3 – 1.5	1.2
1993-2002		1.0 – 1.1	0.5	1.3 – 1.5	1.0

Quellen Wüest und Partner 1998a und 1998b, Fensterunternehmen (Glas-U-Werte, Rahmenmaterialien und U-Werte), Erhebung und Auswertung CEPE

e) Keller

Schliesslich muss noch die Frage der Kellerdecken bzw. der Kellerwanddämmung geklärt werden. Wegen der einfachen Zugänglichkeit geniesst die Kellerdeckenwärmedämmung eine relativ hohe Akzeptanz. Allerdings ist anzunehmen, dass die Dämmstärken generell tiefer sind als bei nachträglichen Dach- und Wanddämmungen.

Tabelle 2.4-6 U-Werte (W/m²K) für Kellerböden oder Kellerwand gegen aussen (Annahmen).

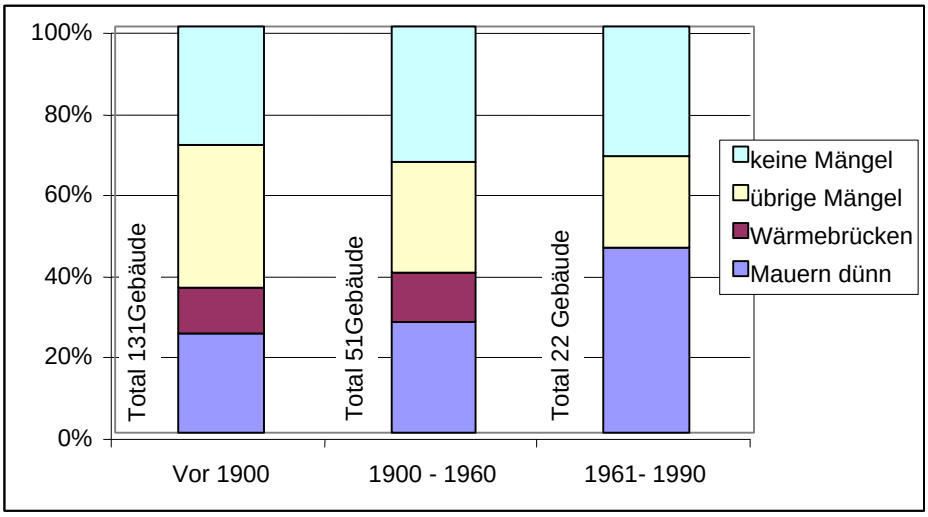
Bauperiode	vor 1960	1961-75	1975-95
Nicht erneuert	1.0	0.9	0.6
Erneuert	0.6	0.6	0.4

Quelle Annahmen CEPE

f) Wärmebrücken und andere bauphysikalische Schwachstellen

Es gibt einige Einzelanalysen zum Gebäudebestand, die bauphysikalische und wärmetechnische Mängelberichte ermöglichen (z.B. die Auswertung des Lärmschutzprogramms des

Kantons ZH). Hierbei wurden in etwa zwei Drittel der Fälle bauphysikalische Mängel (zu dünne Mauern, Wärmebrücken und sonstige Mängel, z.B. an Rolladenkästen) gefunden, die eine alleinige Sanierung von Fenstern (hier zum Lärmschutz) nicht als wünschenswert und kosteneffizient erscheinen lassen (vgl. Abbildung 2.4-3). Vielmehr sollten Fenster bei Vorhandensein derartiger Mängel nur bei gleichzeitiger Behebung erneuert werden. Bei rund zwei Drittel der Gebäude sollten also mit dem Fensterwechsel entweder gleichzeitig eine Aussenwärmedämmung angebracht oder die Rolladenkästen erneuert werden.



Quelle Lärmschutzprogramm Kt. ZH, 3 Gemeinden, 57 Gebäude aus allen Bauperioden, Auswertung CEPE

Abbildung 2.4-3 Verteilung bauphysikalischer und wärmetechnischer Mängel bei der Analyse von Wohngebäuden nach Baujahr

Weitere grobe Abschätzungen zu den typischen Wärmebrücken im Gebäudebestand sind im Wärmebrückenkatalog 3 des SIA zu finden (SIA, 1993). Weitergehende empirisch abgestützte Daten zu Art und Häufigkeit der Wärmebrücken sind leider nicht vorhanden und bei der Berechnung der Grenzkostenkurven im Gebäudebestand wird zum Teil mit Annahmen gearbeitet werden müssen. Diese stützen sich auf allgemein bekanntes Fachwissen (z.B. die durchgehenden Decken und Betonplatten der 1970er Jahre) sowie auf Hinweise von Baufachleuten.

Auf weitere Aspekte der Wärmebrücken vor und nach Erneuerungen derselben bzw. der angrenzenden Bauteile wird in den Kapiteln 4.2 eingegangen.

2.5 Die vergangene und heutige Erneuerungstätigkeit unter energiewirtschaftlichem und energietechnischem Blickwinkel

Die folgenden Überlegungen und Grundlagen dienen der Festlegung der Referenz-Erneuerungsweise (energetische Ausgangslage, Dämmstärke etc), der Berechnung der Kosten pro Gebäudetyp anhand der spezifischen Kosten sowie der Gewichtung derselben (Mengengerüst).

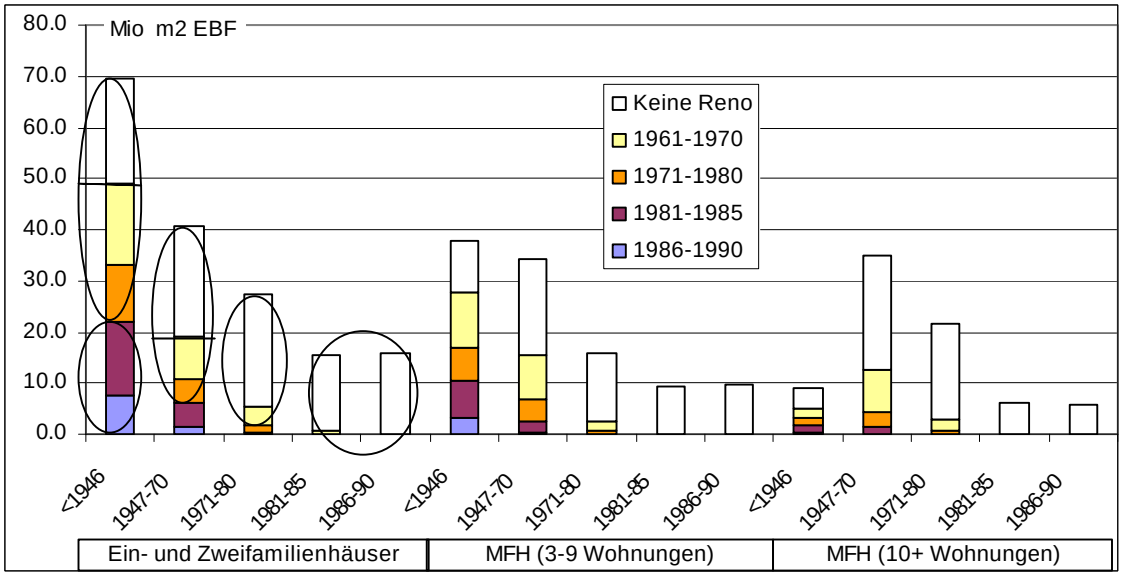
2.5.1 Datenlage, Ausgangslage und Überblick

In diesem Kapitel wird ein Überblick über die in der Schweiz verfügbaren empirischen Grundlagen über die vergangenen und heutigen Erneuerungen gegeben. Es kann vorweg-

genommen werden, dass wenige davon einen en expliziten Bezug zu energetischen Belangen enthalten.

Zunächst werden die Erneuerungsanteile gemäss der vom Bundesamt für Statistik (BFS) alle zehn Jahre durchgeführten vom Gebäude- und Volkszählung in Erinnerung gerufen (vgl. Abbildung 2.5-1). Diese haben einen starken Bezug zum Innern der Gebäude. Die Gebäude- und Wohnungszählung zielt auf grössere (wertvermehrende) Renovationen ab, ohne jedoch zwischen energetischen (z.B. Aussenwärmedämmung, Fensterersatz) und nicht-energetischen Renovationen (z.B. Küchen- oder Baderneuerung) zu unterscheiden. Zudem wird nicht zwischen Gebäudeinnerem und Gebäudehülle unterschieden. Dasselbe gilt für die jährlichen Erhebungen des BFS bzgl. Bauausgaben bzw. Bauinvestitionen für Umbauten und Renovationen (Bau- und Wohnstatistik). In der Folge werden deshalb ergänzende Überlegungen zu den Erneuerungen der Aussenhülle entwickelt werden müssen.

Die zunächst folgenden Erneuerungs- und Sanierungsüberlegungen haben jedoch durchaus ihre Relevanz für das Grenzkostenprojekt, nämlich für den Bereich der Lüftungsanlagen, deren Einbaumöglichkeiten und Kosten auch von derartigen Erneuerungen im Innern des Gebäudes abhängen.



Quelle BFS, Berechnungen CEPE

Abbildung 2.5-1 EBF in Wohngebäuden nach Bau- und Renovationsperiode gemäss Volks- und Gebäudezählung 1990

Gemäss der Volks- und Gebäudezählung von 1990 werden bei allen Typen von Wohngebäuden mit einem Alter jünger als 20 Jahre praktisch keine Renovierungen oder Erneuerungen durchgeführt (Abbildung 2.5-1) Hingegen waren die Wohnungen mit einem Alter von 20 bis 43 Jahren knapp zur Hälfte renoviert.

Eine weitere Quelle mit Angaben zu vergangenen Erneuerungen stellen die Perspektiven von Wüest und Partner dar (Wüest et al., 1994). Darin wird zwischen sogenannten Voll- und Teilsanierungen unterschieden. Dabei handelt es sich um eine Gebäudemodell mit idealtypischen Sanierungszyklen und Realisierungswahrscheinlichkeiten, wobei Teilsanierungen mit 25 Jahren und Vollsanierungen mit 50 Jahren angenommen wurden. Energetisch wird die Teilsanierungen mit geringer Verbesserung (Küche, Bad, Heizung) und die Vollsanierungen mit

grösserer Verbesserung (Gebäudehülle, Fenster, Haustechnik) charakterisiert. Empirisch abgestützt ist das Modell ebenfalls auf die oben erwähnte Gebäude- und Wohnungszählung sowie auf einen Datensatz der Gebäudeversicherung des Kantons GR. Ein empirischer Bezug auf die Energierelevanz der Sanierungen bzw. eine Unterscheidung zwischen energetisch relevanten bzw. energetisch nicht relevanten Erneuerungsinvestitionen wird im Modell nicht explizit gemacht. Auch wird zwischen den verschiedenen Bauteilen der Gebäudehülle nicht unterschieden.

Die bisher in den Energieperspektiven verwendete Grundlage für die Beurteilung der künftigen Erneuerungen im Wohngebäudebestand waren die Teil- und Vollerneuerung gemäss Wüest et al. (1994) sein, wobei zwischen Ein- und Mehrfamilienhäusern unterschieden werden kann (vgl. Tabelle 2.5-1). Aufgrund des zu geringen Bezugs zu energetischen Belangen und weil neue empirische Grundlagen vorliegen bzw. erwartet werden können (siehe weitere Ausführungen dazu im Kapitel 2)., werden diese Annahmen im vorliegenden Bericht jedoch nicht eins zu eins übernommen, um zu einer Referenzentwicklung für die Schweiz zu kommen. Ausserdem ergibt der idealtypische Ansatz für einzelne Bauperioden unplausible Werte (70% Teilsanierungen innerhalb einer Dekade).

Tabelle 2.5-1 Teil- und Vollsanierungsraten[1] in Anteilen/Dekade für EFH und MFH für die Periode 1990 bis 2000

		Teilsanierung		Vollsanierung	
		EFH	MFH	EFH	MFH
Gebäude-Erstelllungs-periode	bis 1970	0.13	0.10	0.12	0.10
	1971-75	0.33	0.37	-	
	1976-80	-	0.70	-	
	1981-85	-	0.34	-	
	1986-90	-	-	-	

Quelle Wüest und Partner, 1994

Eine Abschätzung über die bisher durchgeführten energetischen Erneuerungen im Gebäudebestand wurde jedoch im Rahmen einer Kontrollrechnung zur Sanierungstätigkeit im Auftrag des Kantons ZH durchgeführt (Wüest und Partner, 1998b). Dabei wurde ein Zusammenhang zwischen den bauphysikalischen Kennwerten der Bauteile und den empirisch abgestützten Energiekennzahlen hergestellt. Die relative Bedeutung der erneuerten Bauteile ist in der folgenden Tabelle 2.5-2 zusammengefasst. Die Anteile sind für EFH und MFH unterschiedlich, was im Projekt berücksichtigt wurde. So betreffen die erneuerten Flachdächer fast ausschliesslich MFH. (Bei den Gebäuden mit Baujahr vor 1960 ist anzunehmen, dass ein Teil der Bauteile, insbesondere der Fenster, schon vor 1980 erneuert wurde. Insbesondere ist anzunehmen, dass die überwiegende Mehrheit der Fenster in ganzjährlich bewohnten Gebäuden eine Doppelverglasung aufweisen.

[1] Wir verwenden hier die Originalbegriffe der zitierten Berichte, obwohl wir in den übrigen Berichtsteilen die Begriffe Instandsetzung und Erneuerung gebrauchen.

Tabelle 2.5-2 Durchschnittliche kumulierte Anteile der zwischen 1980 und 1995 erneuerten Bauteile

Bauperiode	Wand	Dach	Fenster
Vor 1960	30%	31%	40%*
1961-75	5%	21%	14%
1976-85	0.5%	1.4%	1.2%
1986-95	vernachlässigbar	vernachlässigbar	vernachlässigbar

Quelle Wüest und Partner, 1998b

Diese Werte lassen sich nun mit den Ergebnissen der Umfrage zum Erneuerungsverhalten erhaltenen Ergebnisse vergleichen, siehe dazu die folgenden Unterkapitel. Denn wegen der oben dargelegten empirischen Lücke hat das CEPE eine empirische Studie angeregt, um mehr über die energie-relevante Erneuerungstätigkeit im Wohngebäudebereich zu erfahren (Jakob et al., 2002). In den folgenden Unterkapiteln zu den Erneuerungen mit Unterscheidung der einzelnen Bauteile und zwischen energetischen und nicht-energetischen Erneuerungen sind erste Auswertungsergebnisse der erwähnten Erhebung eingefügt. Bei der Interpretation ist zu berücksichtigen, dass es sich um vorläufige Ergebnisse handelt und insbesondere die Stichprobenverzerrung noch nicht geprüft wurde. Bis zur definitiven Auswertung könnten sich demzufolge noch Verschiebungen aufgrund von Neugewichtungen ergeben. Genaueres wird man nach Vorliegen der Erhebungsergebnisse Ende 2002 sagen können.

2.5.2 Fassadenerneuerungen

Auch auf Bauteilebene sind zwei Aspekte wesentlich, um die Erneuerungstätigkeit zu beschreiben:

- Erneuerungsaktivität (Anteile)
- bautechnische Aspekte.

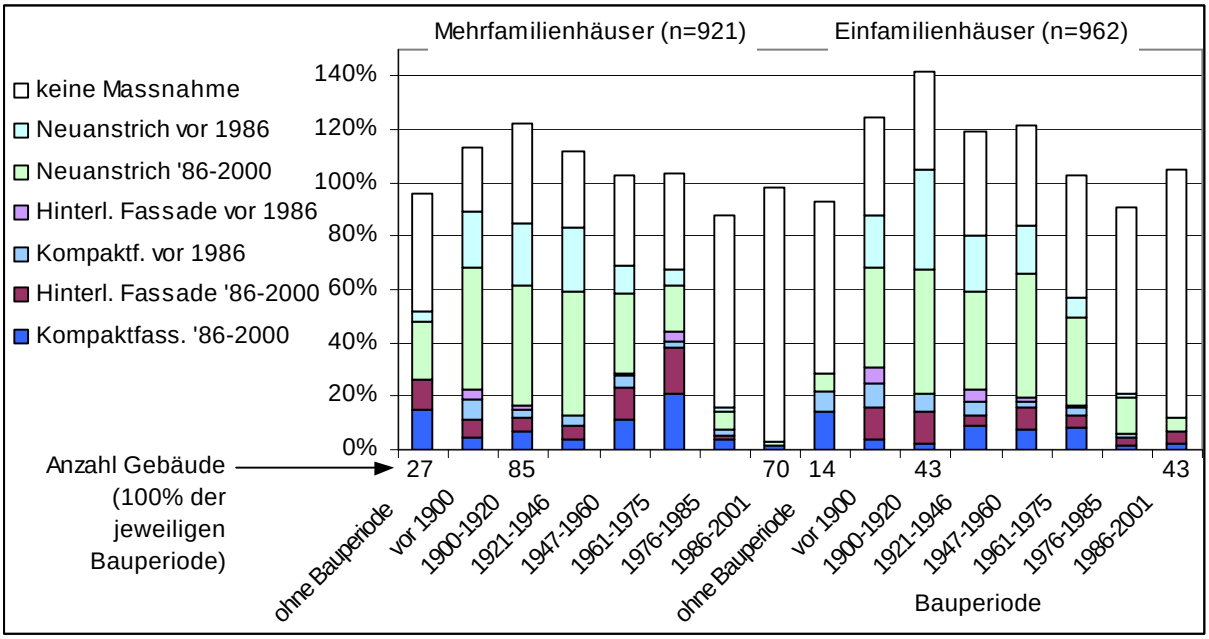
a) Erneuerungsaktivität (Anteile)

Aus den quantitativen Indikationen, die sich aus den ersten Auswertungen des Projekts „Erhebung des Erneuerungsverhaltens bei Wohngebäuden“ (Jakob, 2002) ziehen lassen (Abbildung 2.5-2 bis Abbildung 2.5-4), ergeben sich folgende Feststellungen.

- Für die Bauperiode bis 1960 sind die Anteile der energetischen Wanderneuerungen den Vollsanierungsraten gemäss Wüest und Partner (vgl. Tabelle 2.5-1) ähnlich (rund 10% pro Dekade)
- Die Erhebung zeigt bei den MFH der Periode 1961 bis 1975 starke Unterschiede zu den vorangegangenen Bauperioden; die Anteile der energetischen Erneuerungen liegen seit Mitte der 1980er Jahre bei über 10% pro 5-Jahresperiode, also markant höher als bei den Gebäuden der früheren Bauperioden.
- Die Anteile der energetischen Erneuerungen liegen vor allem bei den MFH ebenfalls markant höher als die Vollsanierungsraten (Tabelle 2.5-1) bzw. die Werte der sogenannten Kontrollrechnung von Wüest und Partner aus dem Jahr 1998 (Tabelle 2.5-2), bei den EFH etwas höher.
- Die folgende Bauperiode (1975-85) weist nicht unerwartet erst geringe Anteile von energetischen Erneuerungen auf.

- Zwischen den verschiedenen Bauperioden vor 1960 lassen sich nur geringe Unterschiede bzgl. der energetischen Erneuerungen ausmachen. Diese betreffen die Erneuerungsperiode vor 1986, wobei anzumerken ist, dass für die definitive Auswertung noch miteinzubeziehen ist, wie lange die Antwortenden das Gebäude bereits besitzen bzw. verwalten. Das Gebäudealter scheint also für die Gebäude vor 1960 nur einen geringen Einfluss auf die Anteile zu haben.

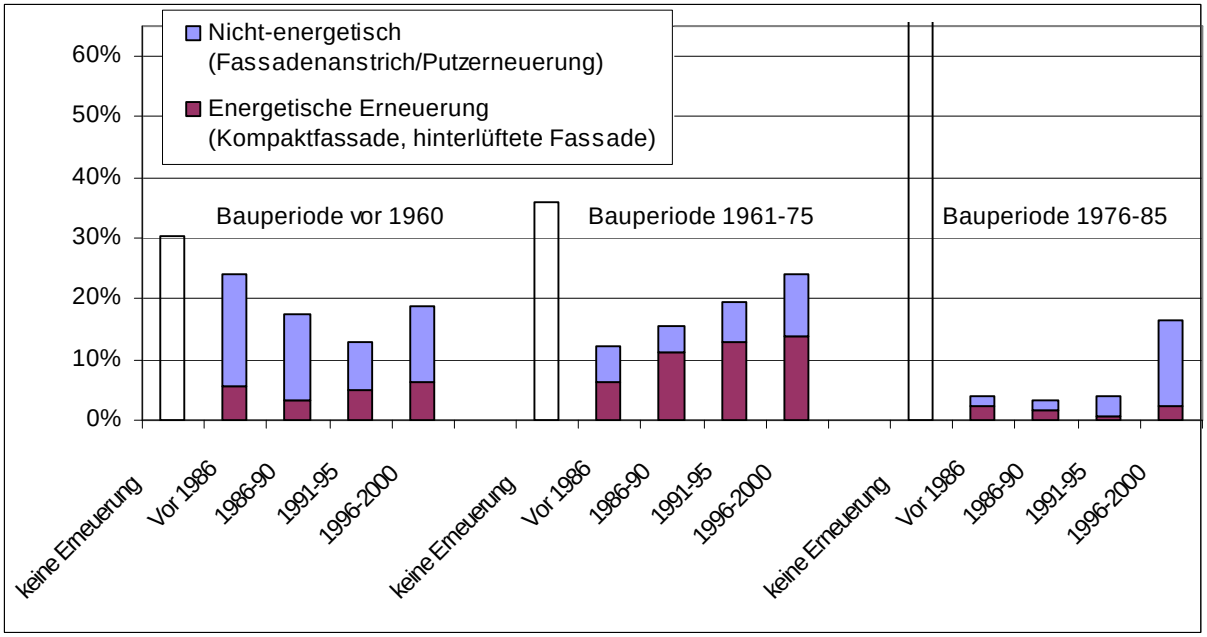
Letzteres ist mit der Feststellung kohärent, dass die Erneuerung die Aussenwärmedämmung im wesentlichen erst zu Beginn der 1980er Jahre startete und erst ab Mitte der 1980er, Anfang der 1990er Jahre eine wesentliche Bedeutung bekam, zu einer Periode also, als die Lebensdauer dieser Fassaden der 1960er Jahre gemäss IP-Bau Untersuchung schon im Bereich des Endes ihrer Lebensdauer war. Entsprechend wenig wurde für die Aussenwärmedämmung der Periode vor 1986 im Vergleich zu den späteren Erneuerungsperioden angegeben. Dass die Fassaden der älteren Gebäude eine so viel längere Lebensdauer haben als diejenigen der 60er Jahre bzw. nicht schon frühzeitiger, in jüngeren Jahren sozusagen, wärmegedämmt wurden, hat auch damit zu tun, dass damals die entsprechende Technik nicht zur Verfügung stand. Diese Aussage wird zudem weiter untermauert durch die Feststellung, dass beim Fassadenanstrich, wo eine „praktizierte Technik" zur Verfügung stand, durchaus signifikante Unterschiede zwischen Bauperioden festzustellen sind; der Anteil des Neuanstrichs ist bei den Gebäuden vor 1960 fast doppelt so hoch wie bei denjenigen nach 1960.



Quelle Projekt „Erhebung des Erneuerungsverhaltens bei Wohngebäude, erste Auswertungen, CEPE

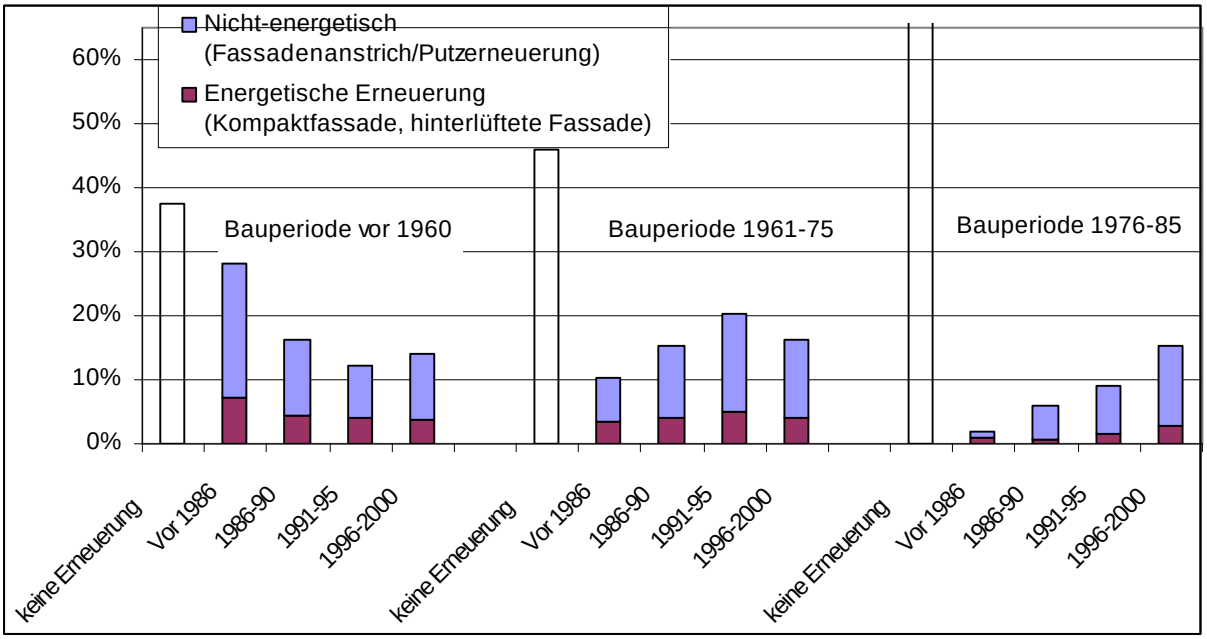
Abbildung 2.5-2 Anteil der durchgeführten Erneuerungen im Bereich Fassade für EFH und MFH, bezogen auf das Total der Gebäude der jeweiligen Bauperioden (Mehrfachnennungen möglich)

Zu beobachten ist auch, dass die Fassadeninstandsetzungen (Anstrich plus Putzausbesserung) ca. 15 bis 20 Jahre nach der Gebäudeerstellung anzusteigen beginnen. Betroffen ist jedoch nur ein relativ geringer Teil der Gebäude; von den im Durchschnitt 20 Jahre alten Gebäude gaben über 70% explizit an, keine Instandsetzung oder Erneuerung durchgeführt zu haben und auch bei folgenden Bauperiode 1961 bis 1975 sind rund 35% (MFH) bzw. 45% (EFH) „never touched".



Quelle Projekt „Erhebung des Erneuerungsverhaltens bei Wohngebäude, erste Auswertungen, CEPE

Abbildung 2.5-3 Anteil der durchgeführten Erneuerungen im Bereich Fassade für MFH im Zeitablauf der Erneuerungsperioden, bezogen auf das Total der jeweiligen Bauperioden der Gebäude (Mehrfachnennungen möglich)



Quelle Projekt „Erhebung des Erneuerungsverhaltens bei Wohngebäude, erste Auswertungen, CEPE

Abbildung 2.5-4 Anteil der durchgeführten Erneuerungen im Bereich Fassade für EFH im Zeitablauf der Erneuerungsperioden, bezogen auf das Total der jeweiligen Bauperioden der Gebäude (Mehrfachnennungen möglich)

b) Bautechnische Aspekt, Bauabläufe

Zwischen Fassadenerneuerungen mit Kompaktfassaden und hinterlüfteten Fassaden ist bzgl. der ausgeführten Dämmstärken und der Bauabläufe kein grundsätzlicher Unterschied festzustellen, weshalb die beiden Systeme nachfolgend zusammengefasst dargestellt werden. Allerdings sind sie kostenseitig zu unterscheiden (vgl. Kap. 4.3).

Die häufigsten Dämmstärken, die heute bei Erneuerungen von Fassaden und Dächern beobachtet werden, liegen

- bei Fassaden bei 10-12 cm,
- bei Sockeln zwischen 8-10 cm,
- bei Fensterleibungen (wegen dem andernfalls reduzierten Lichteinfall) bei 2-4 cm und
- bei Dächern bei 11 bis 14 cm (vgl. Tabelle 2.5-3 und Tabelle 2.5-7).

Tabelle 2.5-3 Genannte Häufigkeiten der Dämmstärken bei Fassadenerneuerungen.

		sehr häufig	häufig	weniger häufig	selten
Fassade	8 cm - 10 cm	2	4	1	-
	10 cm - 14 cm	8	3	-	-
	14 cm - 20 cm	-	1	4	1
	Mehr als 20 cm	-	-	2	4
Sockel	8 cm - 10 cm	5	3	1	-
	10 cm - 14 cm	4	4	-	-
	14 cm - 20 cm	-	-	4	1
	Mehr als 20 cm	-	-	-	4
Fensterleibung	0 cm - 2 cm	1	4	3	-
	2 cm - 4 cm	7	2	-	-
	4 cm - 8 cm	1	1	4	1

Quelle CEPE-Umfrage bei SFHF- und Unternehmen im Bereich Kompaktfassade (Systemhalter).

Die Bauabläufe können einen entscheidenden Einfluss auf die Kosten von wärmetechnischen Massnahmen haben. Dies gilt insbesondere für die EFH und die kleinen MFH, wo die längenspezifischen Kosten (z.B. beim Dachrand oder beim Sockel) aus geometrischen Gründen einen höheren Anteil ausmachen.

Bei den antwortenden Unternehmen des SFHF bzw. den befragten Systemhaltern überwiegen kombinierte Erneuerungen (Fassade zusammen mit angrenzenden Bauteilen wie Rolladenkästen, Sockel, Flachdach etc.) gegenüber Einzelerneuerungen oder Nicht-Erneuerung der angrenzenden Bauteile (vgl. Tabelle 2.5-4), allerdings nur leicht.

Tabelle 2.5-4 Genannte Bauabläufe bei Fassadenerneuerungen

		sehr häufig	häufig	weniger häufig	selten
Gebäudehülle wird integral erneuert		2	4	2	1
Rolladenkasten	Schon früher wärmetechnisch erneuert	-	-	2	8
	Gleichzeitig mit Fassade erneuert	3	5	2	-
	Nicht/minimal erneuert	1	1	5	3
Flachdach	Schon früher wärmetechnisch erneuert	1	2	3	4
	Flachdach schon früher gedämmt	-	5	2	3
	Gleichzeitig mit Fassade erneuert	4	4	1	1
	Nicht/minimal erneuert	-	3	3	4
Balkon wird wärmetechnisch erneuert		-	3	5	3
Sockeldämmung auch unter Terrainniveau		3	3	2	2

Quelle CEPE-Umfrage bei SFHF-Mitgliedern und Unternehmen im Bereich Kompaktfassade (Systemhalter).

2.5.3 Fenstererneuerungen

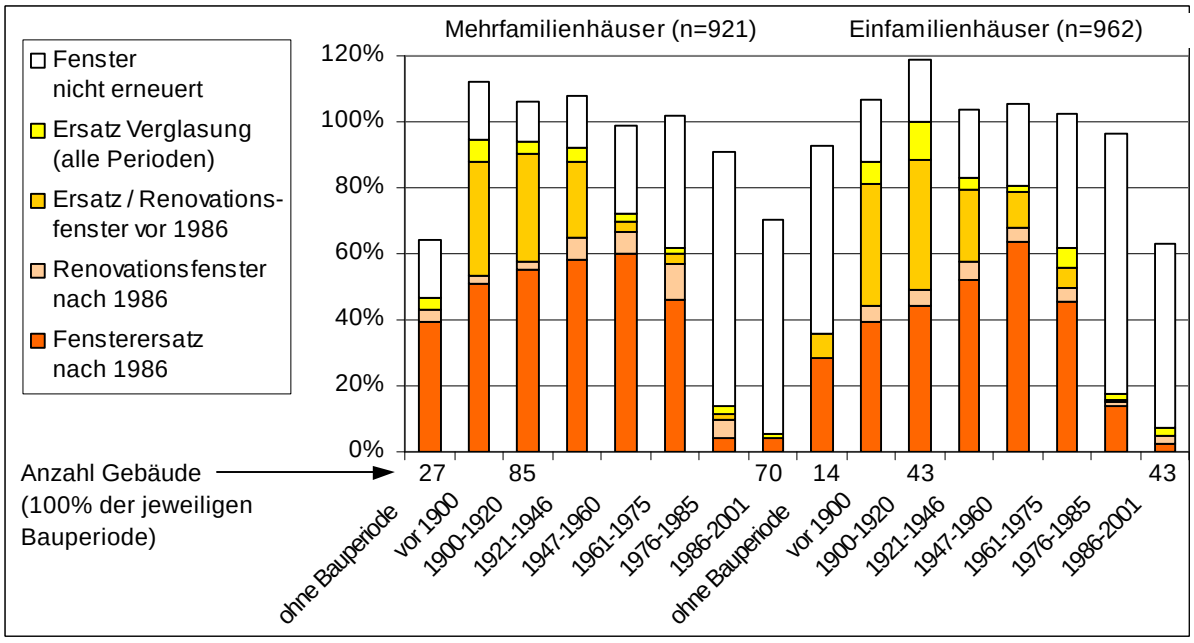
Fenster haben erfahrungsgemäss eine Lebensdauer von 20 bis 25 Jahren, teilweise bis 30 Jahre. Es gibt aber auch Gebäude, bei welchen Fenster sehr viel länger nicht ausgewechselt werden bzw. wurden. Die Lebensdauer sowohl der Holzfenster, aber auch der Kunststoffenster hat sich in den letzten Jahren tendenziell erhöht. Beim Holzfenster sind es wetterfestere und industrialisiertere Farbanstriche (Farbanstrich im Werk statt von Hand auf der Baustelle) und die Entwicklung der Holz-Metallfenster.

Über die tatsächlichen Erneuerungsraten gab es in der Schweiz bis anhin kaum flächendeckende empirische Untersuchungen. Im Rahmen der Planungsarbeiten der Lärmsanierungsprogramme des Bundes, der Kantone und Städte bzw. Gemeinden wurde bei lärmbelasteten Gebäuden der Ist-Zustand der Fensterqualität erhoben. Um eine erste empirisch abgestützte Abschätzung über den Zustand der Fenster zu erhalten, wurde ein Teil des Lärmschutzprogramms des Kantons ZH ausgewertet. Weitere Informationen über die vergangenen Erneuerungen lassen sich aus dem Projekt „Erhebung des Erneuerungsverhaltens bei Wohngebäude“ gewinnen (Jakob et al., 2002).

Abbildung 2.5-5 zeigt die Anteile der durchgeführten Erneuerungen für MFH und EFH für die verschiedenen Gebäudeerstellungsperioden (Bauperioden). Dabei wird zwischen Erneuerungen der letzten 15 Jahre und solchen davor unterschieden, ebenso zwischen verschiedenen Erneuerungstypen. In der Abbildung ist auch das Total der Antworten pro Bauperiode angegeben, falls es sich um weniger als hundert Antworten handelt, denn bei geringer Anzahl im Bereich von einigen wenigen zehn ist bei der Interpretation der grössere Stichprobenfehler zu berücksichtigen. Ebenso sind bei der Interpretation die Mehrfachnennungen zu berücksichtigen sowie die Tatsache, dass pro Gebäude auch nur ein Teil der Fenster erneuert wurde, siehe dazu die Ausführungen weiter unten.

Festzustellen ist, dass die Gebäude der gesamten Bauperiode vor 1975 relativ hohe kumulierte Fenstererneuerungsanteile aufweisen, wobei der Anteil auch für die Erneuerungsperiode der letzten 15 Jahre (Erneuerung nach 1985 durchgeführt) als hoch bezeichnet werden kann. 40% bis 60% für 15 Jahre entsprechen knapp 3% bis 4% pro Jahr bzw. 13% bis 20% pro 5-Jahres-

periode. Bei den EFH würden die Erneuerungen bei den älteren Gebäuden tendenziell eher vor 1986 durchgeführt; die Anteile der kürzlichen Erneuerungen nehmen mit dem Gebäudealter sukzessive ab. Ab der Gebäudeerstellungsperiode 1960 beginnt der Anteil der Gebäude, die explizit keine Fenstererneuerung angaben, zu steigen (diejenigen, die sich zu dieser Frage nicht äusserten, ergänzen zu 100%). 25% der MFH bzw. 27% der EFH der Bauperiode bis 1975 gaben an, keine (grösseren) Erneuerungen im Fensterbereich durchgeführt zu haben (Malerarbeiten an den Fenstern wurden nicht abgefragt). Die Nicht-Erneuerungen sowie die länger zurückliegenden Erneuerungen können als Potential für künftige Erneuerungen der nächsten zehn bis zwanzig Jahre betrachtet werden.



Quelle Projekt „Erhebung des Erneuerungsverhaltens bei Wohngebäude, erste Auswertungen, CEPE

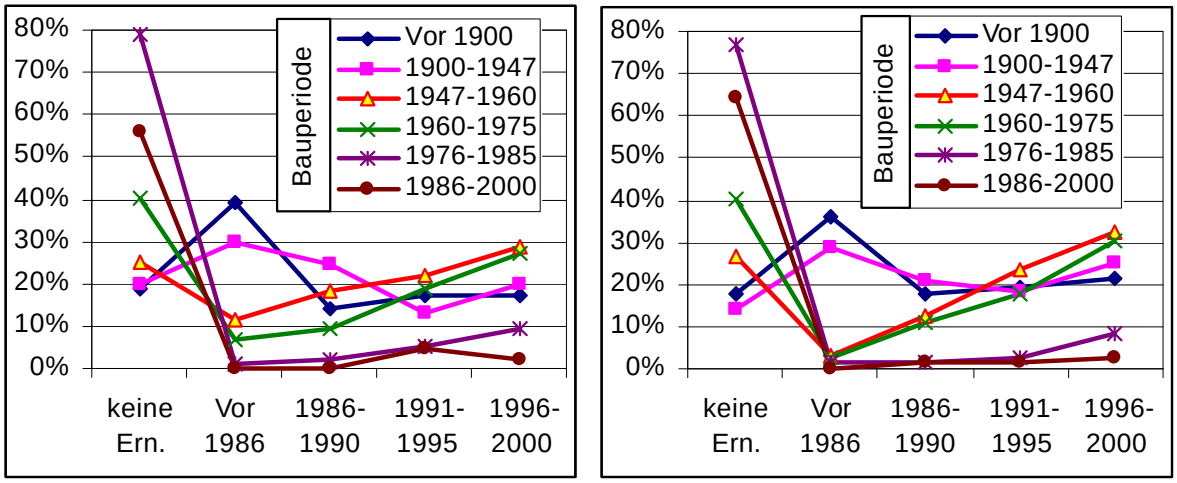
Abbildung 2.5-5 Anteil der durchgeführten Erneuerungen im Bereich Fenster für MFH und EFH, bezogen auf das Total der jeweiligen Bauperioden der Gebäude (Mehrfachnennungen möglich)

Mehrfachnennungen: Bei insgesamt 125 MFH und 143 EFH wurden sowohl vor 1986 als auch nach 1986 Erneuerungen durchgeführt, zählen also in der Abbildung 2.5-5 als Mehrfachnennungen, was knapp 15% entspricht. Weitere Mehrfachnennungen sind innerhalb der Periode 1986-2000 möglich, wurden aber nicht ausgewertet. Bei der Interpretation der Mehrfachnennungen ist zu beachten, dass es auch möglich ist, dass pro Erneuerungsperiode auch nur ein Teil der Fenster erneuert wurde. Bei 15% der Antworten des telefonischen Rückfragechecks 1 war dies der Fall (bezogen auf 100% der Gebäude), bzw. bei rund 30% beim Rückfragecheck 2 (bezogen auf diejenigen Gebäude mit Fenstererneuerung).

Teilerneuerungen: Bei den Rückfragechecks wurde festgestellt, dass bei rund 25% bzw. 30% der Projekte nur ein Teil der Fenster erneuert wird (bezogen auf das Total der Fenstererneuerungen, nicht auf das Total der Gebäude). Damit können auch die Anteile von über 100% erklärt werden, denn die Anteile werden nicht auf das Total der angegebenen Massnahmen, sondern auf das Total der Gebäude der jeweiligen Bauperiode bezogen.

Illustrativ ist auch die Darstellung der Erhebungsergebnisse in Form von 5-Jahresraten (siehe Abbildung 2.5-6). Dabei ist für die letzten 15 Jahre eine relativ konstante Rate bei den vor 1947

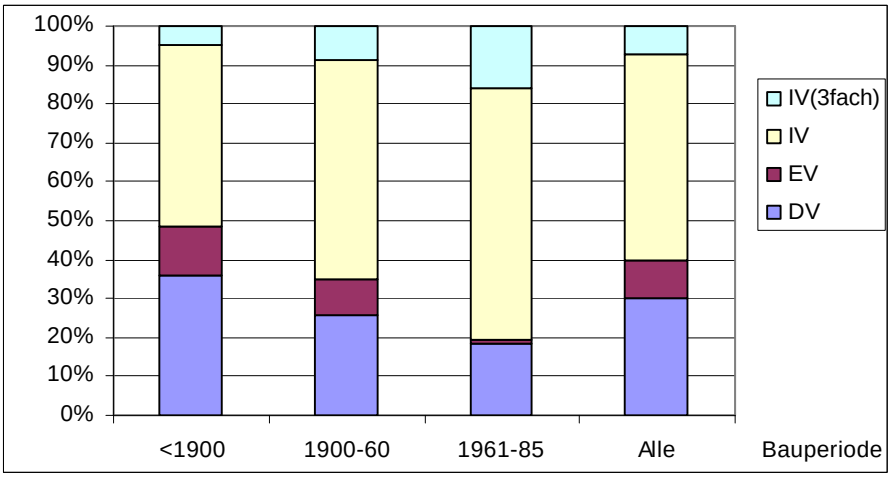
erstellten Gebäuden festzustellen, die bei rund 20% pro 5 Jahre liegt (MFH knapp darunter). Bei den Gebäuden, die zwischen 1947 und 1975 erstellt wurden, verläuft die Rate im Zeitablauf ziemlichparallel; sie beginnt ab den 1980er Jahren anzusteigen (bei den MFH etwas früher, dafür weniger steil als bei den EFH) und erreicht in den letzten fünf Jahren rund 30%.



Quelle Projekt „Erhebung des Erneuerungsverhaltens bei Wohngebäude, erste Auswertungen, CEPE

Abbildung 2.5-6 5-Jahresrate der durchgeführten Erneuerungen im Bereich Fenster bzw. nicht-erneuerte Fenster bei MFH (linke Abbildung) und EFH (rechte Abbildung), bezogen auf das Total der jeweiligen Bauperioden der Gebäude (Mehrfachnennungen möglich)

Die Auswertungsergebnisse sind auch kohärent mit der Auswertung des Lärmschutzprogramms des Kantons ZH, siehe dazu die nachfolgenden Erläuterungen und Auswertungen.

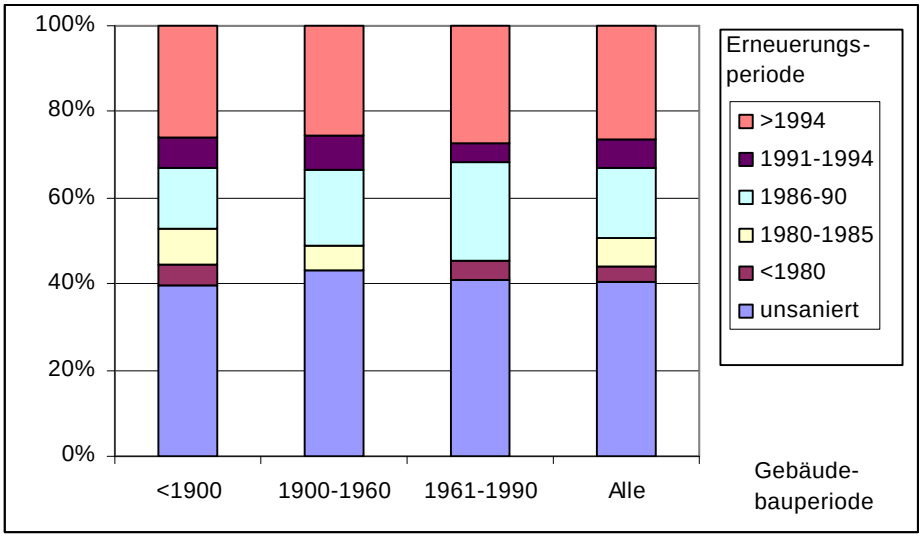


Quelle Lärmschutzprogramm des Kantons ZH, Auswertung CEPE

Abbildung 2.5-7 Anteile der verschiedenen Fenstertypen in Funktion der Bauperiode der Gebäude

Abbildung 2.5-7 zeigt die Bestandesaufnahme des Lärmschutzprogramms des Kantons ZH, welche die Grundlage zu Beiträge bzw. Rückvergütungen für Schallschutzfenster bildet. Bei der Interpretation der Abbildung 2.5-7 muss zwar beachtet werden, dass die Lärmschutzgesetzgebung und ihre damit verbundenen Beiträge bzw. Rückvergütungen sowie der Lärm selbst einen Impuls zum vermehrten (gegenüber Gebäuden an nicht exponierten Lagen) Ersetzen von Fenstern gegeben haben. Andererseits war der Informationsstand der Gebäudebesitzer eher gering und auf das Instrument der Rückvergütung musste eher selten gegriffen werden, was darauf hindeutet, dass die Verteilung der Fenstertypen in den übrigen Gebäuden an nicht lärmexponierten Strassen ähnlich ist.

Festzustellen ist, dass je mehr „alte" DV- und sogar EV-Fenster noch in den Gebäuden eingebaut sind, je älter die Gebäude sind. Dabei ist anzumerken, dass die Gebäude an lärmbelasteter Strasse häufig alte Gebäude im Zentrum der Ortschaften sind, welche überdurchschnittlich häufig (35% der ausgewerteten Gebäude) im Verzeichnis der kommunalen Denkmalschutzverzeichnisse aufgeführt sind, (was eine Fenstererneuerung zwar nicht verunmöglicht, aber aus Sicht der Gebäudebesitzer möglicherweise ein Hindernis darstellt.



Quelle Lärmschutzprogramm des Kantons ZH

Abbildung 2.5-8 Erneuerungsperioden der Fenster für verschiedenen Gebäudeperioden

Heute sind rund 45% der Fenster älter als 20 Jahre. Eigentlich würde man erwarten, dass der Anteil der nicht erneuerten Fenster geringer ist. Grund für den hohen Anteil könnten auch die befürchteten Bauschäden sein, die mit einer Fenstererneuerung einhergehen, wenn nicht gleichzeitig die bauphysikalischen Problemstellen behoben werden. Letzteres ist häufig mit markantem Aufwand verbunden, wenn dies nicht zusammen mit einer ohnehin stattfindenden Gebäudehüllenerneuerung realisiert wird. Der Anteil der nicht erneuerten Fenster bildet das Potential der kommenden Erneuerungen, insbesondere in Verbindung mit weiteren Massnahmen, insbesondere an der Fassade und im Zusammenhang mit der Rolladenkastensanierung.

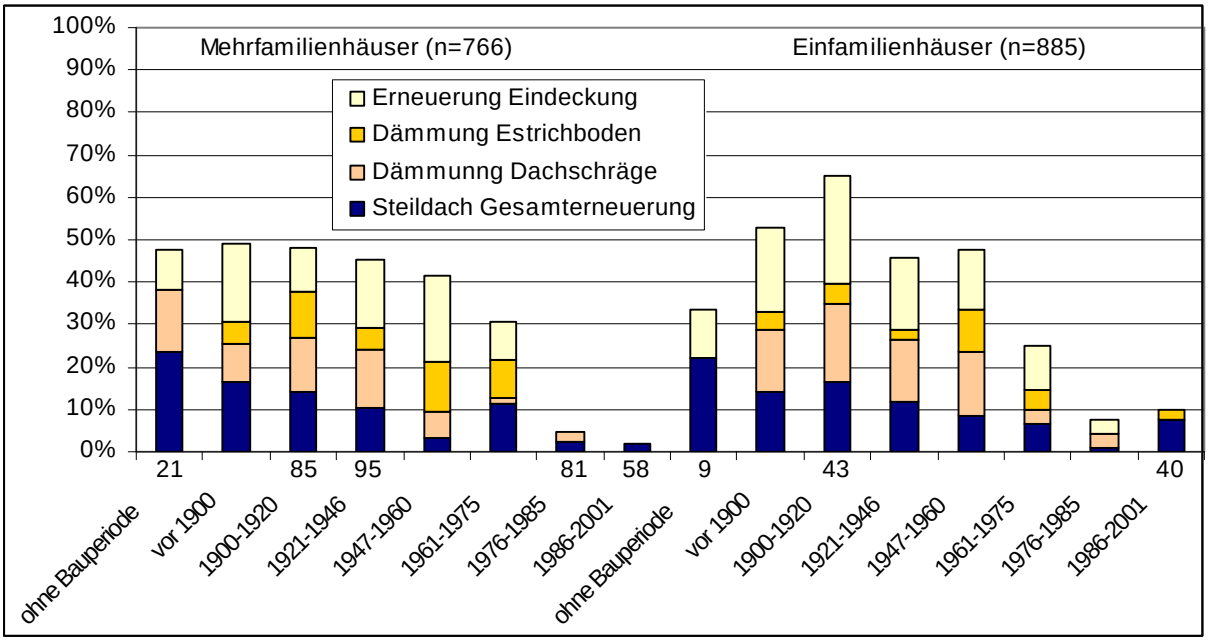
Die bei der Auswertung des Lärmschutzprogramms gemachten Beobachtungen decken sich mit den Annahmen der „Kontrollrechnung Sanierungstätigkeit" (Wüest und Partner, 1998b), siehe Tabelle 2.5-2.

2.5.4 Dacherneuerungen

Auch bei den Dacherneuerungen wird zwischen mengenspezifischen und bautechnischen Aspekt unterschieden. Im ersten Teil des Kapitels wird die vergangene Erneuerungsaktivität anhand der Auswertungsergebnisse der Umfrage bei Gebäudebesitzern und Liegenschaftsverwaltungen aufgezeigt (Jakob et al., 2002), danach wird auf die bautechnischen Aspekte eingegangen, wobei hierzu eine Umfrage bei Mitgliedfirmen des Schweizerischen Verbandes für Dach und Wand durchgeführt wurde.

Bei Gebäuden mit Steildächern der Bauperioden bis 1947 zeichnet sich ein relativ einheitliches Bild bzgl. der Erneuerungen mit Wärmedämmungen: bei gut 30% bis 40% wurde in den letzten 15 Jahren eine solche angebracht, sei dies in Form der Dämmung des Estrichbodens, der Dachschräge oder im Zusammenhang mit einer Gesamterneuerung des Daches (siehe Abbildung 2.5-9). Die Anteile der Gesamterneuerung sind um so höher, je älter die Gebäude sind. Uneinheitlich ist die Bauperiode 1947-1975; die EFH fallen mit hohen Wärmedämmerneuerungs-Anteilen bei den Gebäuden der unmittelbaren Nachkriegsperiode auf und dafür relativ tiefen bei denjenigen aus der Zeit zwischen 1960 und 1975. Überraschenderweise ist der Anteil der Dachbodendämmung im Durchschnitt eher tief, am häufigsten wurde diese Variante bei den Gebäuden aus der Nachkriegszeit angegeben (bei den MFH auch bei den Gebäuden der 1960er bis Mitte 1970er Jahre Gebäude).

Im Verhältnis zu den Fassaden wurden schon überproportional viele Dächer wärmetechnisch verbessert Das gilt für den Flachdachbereich, der im Zuge der in der Vergangenheit häufig notwendig gewordenen Abdichtungserneuerung auch wärmetechnisch verbessert wurde, aber auch für die Gebäude mit Steildächern der Bauperiode vor 1947 (MFH) bzw. vor 1960 (EFH), vgl. Abbildung 2.5-2 mit Abbildung 2.5-9.



Quelle Projekt „Erhebung des Erneuerungsverhaltens bei Wohngebäude, erste Auswertungen, CEPE

Abbildung 2.5-9 Anteil der durchgeführten Erneuerungen zwischen 1985 und 2000 im Bereich Fassade für EFH und MFH, bezogen auf das Total der Gebäude mit Steildächern der jeweiligen Bauperioden (Mehrfachnennungen möglich)

Weiteren Aufschluss, auch über den zeitlichen Ablauf der Erneuerungsraten, sind im Schlussbericht des Projekts „Erneuerungsverhalten bei Wohngebäude“ zu erwarten.

Bei der Erneuerung von Dächern ist grundsätzlich zwischen Flach- und Steildach zu unterscheiden, sowohl was die auslösenden Elemente für eine Dacherneuerung, die unterschiedlichen Ausgangslagen sowie die technischen Möglichkeiten betrifft. Die Relevanz dieser Fälle, die dazu möglichen Wärmedämmvarianten und die dabei typischen Dämmstärken wurden in Zusammenarbeit mit dem SVDW eruiert und bei den SVDW-Mitgliedfirmen mittels Fragebogen erhoben. Abgestimmt auf den Preiserhebungsfragebogen erhielten die Unternehmen einen Fragebogen aus zu einem der folgenden vier Bereiche:

- Steildach-Neubau
- Flachdach-Neubau
- Steildach-Erneuerung
- Flachdach-Erneuerung

Die Fragebogen hatten damit einen Bezug zu den Preiserhebungsbogen, siehe dazu die Übersichtstabelle und weitere Ausführungen zur Erhebung im Kapitel 4.3.

a) Steildächer

Die typischen Fälle, bei denen im Dachbereich eine Wärmedämmung angebracht wird oder werden könnte, sind bei Gebäuden mit Steildach folgende:

- Unterdach und evtl. Eindeckung ist schadhaft und muss erneuert werden
- Dachraum soll zu Wohnzwecken ausgebaut werden
- Energetische Situation soll verbessert werden

Die Vorabklärungen hatten ergeben, dass die Verbesserung der energetischen Situation nur bei der Dämmung des Estrichbodens (und beim Flachdach, siehe dazu das nächste Unterkapitel) das eine Erneuerung motivierende Moment ist, nicht jedoch bei der Dämmung der Dachschräge.

Zunächst wurde untersucht, welche Situation vor einer Erneuerungen im Dachbereich wie häufig angetroffen wird, zum einen, um Hinweise auf erneuerunsgsauslösende Momente zu erhalten und die Relevanz der einzelnen spezifischenn Kostenelemente zu erhalten.

Bei den EFH werden alle drei Ausgangssituationen tendenziell häufiger genannt als bei den MFH (Tabelle 2.5-5). Besonders ausgerägt ist der Unterschied beim kalten Dachraum, der zu Wohnzwecken ausgebaut werden soll. Beim EFH wird also zu einem grossen Teil das Dach nicht aus bautechnischen Gründen erneuert, sondern aus dem Wunsch heraus, die Wohnfläche zu vergrössern.

Bei der Interpretation der Umfrageergebnisse ist zu beachten, dass nicht in allen Fällen ein Auftrag an ein im SVDW organisiertes Unternehmen vergeben wird. Dacherneuerungen von innen, Dauchraumausbauten und Estrichbodendämmungen werden auch von Zimmermanns-, Gipser-Unternehmen oder in Eigenleistung ausgeführt), während dessen Dacherneuerungen von aussen meistens durch ein SVDW-Mitgliedunternehmen ausgeführt werden. Auch wegen der relativ geringen Anzahl der Antworten darf die Interpretation der Ergebnisse nicht überstrapaziert werden.

Tabelle 2.5-5 Ausgangssituation beim Erneuern von Steildächern (Anzahl Nennungen)

Ausgangslage	EFH				MFH			
	sehr häufig	häufig	verbreitet	wenig	sehr häufig	häufig	verbreitet	wenig
1 Bereits ausgebauter (beheizter) Dachraum	2	5	5	5	2	2	6	7
2 Kalter Dachraum wird (zu Wohnzwecken) ausgebaut	2	12	3	-	1	6	5	5
3 Nicht ausgebauter (kalter) Dachraum	1	4	7	5	-	2	5	10

Quelle CEPE-Umfrage bei SVDW-Mitgliedunternehmen

Tabelle 2.5-6 Häufigkeit von verschiedenen Dacherneuerungsvarianten bei bereits ausgebautem Dachraum (Ausgangslage 1) sowie Schwierigkeitsgrad, Häufigkeit und Dämmstärken von Wärmedämmungen für die Varianten. (Anzahl Nennungen)

Dacherneuerungsvarianten	Häufigkeit der Varianten				Wärmedämmen ist...			Häufigkeit* einer Wärmedämmung				Dämmstärke			
	sehr häufig	häufig	verbreitet	wenig	einfach	eher aufwändig	sehr aufwändig	sehr häufig	häufig	verbreitet	wenig	bis 10 cm	11 cm - 14 cm	15 cm bis 18 cm	mehr als 18 cm
Lokale Reparatur	2	2	7	5	3	1	10	-	-	-	6	2	4	3	-
Umdecken der Eindeckung	-	4	4	9	4	7	5	-	2	1	3	2	6	2	-
Neues Unterdach	4	4	4	5	12	3	-	-	4	1	2	1	9	2	1
Ersatz der Innenraumbekleidung	-	-	-	15	5	3	3	-	-	-	6	2	4	1	-
*) Häufigkeit bezüglich jeweiligem Vorgehen															

Quelle CEPE-Umfrage bei SVDW-Mitgliedunternehmen

Laut Angaben der Unternehmen wird bei bereits ausgebauten Dachraum das Schrägdach kaum je von innen erneuert und entsprechend selten wird eine Wärmedämmung bei dieser Variante angebracht (vgl. Tabelle 2.5-6). Ebenso selten bei einer nur lokalen Reparatur der Eindeckung, vor allem weil dies in diesem Fall sehr aufwändig wäre. Etwas einfacher wäre dies im Falle eines Umdeckens während des Verarbeitens der Wärmedämmung, am einfachsten jedoch im Fall, wenn ohnehin ein neues Unterdach angebracht werden muss.

Als typische Dämmstärken für Dachraumausbauten wird am häufigsten der Bereich 10 cm bis 14 cm genannt und wesentlich weniger häufig - je gleichen Teilen - die Dämmstärkenbereiche oberhalb und unterhalb (vgl. Tabelle 2.5-7) .

Tabelle 2.5-7 Häufigkeit des Vorgehens und der Dämmstärken bei Dachraumausbauten (Ausgangslage 2)

Wrämedämmvarianten	Häufigkeit				Dämmstärke			
	sehr häufig	häufig	verbreitet	wenig	bis 10 cm	11 cm - 14 cm	15 cm - 18 cm	mehr als 18 cm
Dämmen von unten	3	7	1	6	1	9	4	-
Dämmung von oben, zwischen den Sparren.	-	4	2	11	1	8	5	1
Dämmung von oben, auf den Sparren	2	5	3	7	1	10	4	1

Quelle CEPE-Umfrage bei SVDW-Mitgliedunternehmen

Bei der Variante Dachraumausbau wird zu etwa gleichen Teilen von unten wie von oben gedämmt, im letzteren Fall etwas häufiger auf den Sparren als zwischen den Sparren. Wenn der Dachraum ausgebaut wird, kann davon ausgegangen werden, dass eine Wärmedämmung appliziert wird. Die Referenzdämmstärke ist aufgrund der Nennungen eher am oberen Ende des Bereichs 11 cm bis 14 cm anzusetzen (vgl. Tabelle 2.5-8).

Tabelle 2.5-8 Häufigkeit des Vorgehens und der Dämmstärken bei nicht ausgebautem, kaltem Dachraum (Ausgangslage 3). (Anzahl Nennungen)

Variante	Häufigkeit der Variante				Ablauf für WD			Häufigkeit *)				Dämmstärke **)			
	sehr häufig	häufig	verbreitet	wenig	einfach	eher aufwändig	sehr aufwändig	sehr häufig	häufig	verbreitet	wenig	bis 10 cm	11 cm - 14 cm	15 cm bis 18 cm	mehr als 18 cm
Lokale Reparatur	5	4	6	2	3	3	9	-	-	-	5	-	4	1	1
Umdecken der Eindeckung	1	6	4	4	5	6	2	-	1	1	3	-	6	2	-
Neues Unterdach	3	5	5	2	9	3	-	-	2	4	-	-	3	2	-
Dachboden- Dämmung	-	3	6	7	11	1	-	-	1	2	4	-	6	-	-
*) Häufigkeit von Wärmedämmungen bezüglich jeweiligem Vorgehen															

Quelle CEPE-Umfrage bei SVDW-Mitgliedunternehmen

b) Flachdach

Die erste Funktion, die ein Dach zu erfüllen hat, ist die Gewährleistung der Dichtigkeit. Beim Flachdach ist die Dichtigkeit bzw. deren Mangelhaftigkeit gleichzeitig auch ein häufiger Auslöser für Instandsetzungen und Erneuerungen. Ein weiterer Auslöser ist eine ungenügend dimensionierte Wärmedämmung, vor allem bei Flachdächern aus den 60er und 70er Jahren. Nebst dem Aspekt des hohen Energieverlustes solcher Dächer bedeutet eine mangelhafte Wärmedämmung für die Bewohner gerade auch im Sommer eine markante Komforteinbusse.

Dass die Flachdachabdichtung vergangener Flachdächer ein Schwachpunkt ist, zeigt sich auch bei der Häufigkeit der ausgeführten Flachdacherneuerungen. In nur wenigen Fällen bleibt bei einer Wärmedämmung die Abdichtung bestehen, obwohl dies technisch gut möglich wäre (vgl. Tabelle 2.5-9). Auch das alleinige Reparieren bzw. Ersetzen der Flachdachabdichtung scheint wenig ausgeführt zu werden (etwas mehr bei den MFH als bei den EFH); fällt eine Erneuerung an, wird meistens die bestehende Wärmedämmung und die Abdichtung abgebrochen und durch eine neue ersetzt.

Tabelle 2.5-9 Art und Häufigkeit der ausgeführten Flachdacherneuerungen. Anzahl Nennungen, Basis: 9 Unternehmen

	EFH				MFH			
	sehr häufig	häufig	verbreitet	wenig	sehr häufig	häufig	verbreitet	wenig
Flachdachabdichtung repariert/ersetzt (WD bleibt bestehen)	-	1	1	7	-	-	4	4
Flachdach wird mit neuer WD versehen (+Abdichtung ersetzt)	5	2	-	2	5	2	1	1
Zusätzliche WD wird auf bestehende WD augedoppelt	1	-	2	6	1	-	1	6

Quelle CEPE-Umfrage bei SVDW-Mitgliedunternehmen, 2001

In den Fällen, in denen die bestehende Wärmedämmung abgebrochen wird, beträgt die häufigste Dämmstärke 10 bis 14 cm (vgl. Tabelle 2.5-10). Wird eine zusätzliche Wärmedämmung auf die bestehende Wärmedämmung aufgedoppelt, wird der Effekt der bestehenden Wärmedämmung durchaus mitberücksichtigt, weshalb die Dämmstärke dann eher 8 bis 10 cm beträgt.

Tabelle 2.5-10 Häufigkeit der ausgeführten Dämmstärken bei den Flachdacherneuerungen mit Wärmedämmung. (Anzahl Nennungen), Basis: 9 Unternehmen

	Flachdach wird mit einer neuen Wärmedämmung versehen (Flachdachabdichtung wird komplett ersetzt)				Zusätzliche Wärmedämmung wird auf die bestehende Wärmedämmung aufgedoppelt			
	Sehr häufig	häufig	verbreitet	wenig	Sehr häufig	häufig	verbreitet	wenig
8 cm - 10 cm	1	1	1	4	5	1	-	2
10 cm - 14 cm	6	-	1	-	-	-	1	4
14 cm - 18 cm	-	1	-	5	-	1	-	5
> 18 cm	-	-	-	6	-	-	-	5

Quelle CEPE-Umfrage bei SVDW-Mitgliedunternehmen, 2001

Die Fälle, bei denen das Flachdach zusammen mit der Fassade (und evtl. weiteren Gebäudeteilen) gleichzeitig erneuert wird, halten sich in etwa die Waage mit den Varianten, in denen

nur das Flachdach erneuert wird (vgl. Tabelle 2.5-11). Dass die Fassade schon vorgängig wärmegedämmt wurde, wird weit weniger häufig genannt; die Vorbereitung des Anschlusses der Fassade an das Dach ist aus technischen Gründen kaum praktikabel und erfolgt deshalb selten.

Tabelle 2.5-11 Art und Häufigkeit der ausgeführten Flachdacherneuerungen um 2000. (Anzahl Nennungen). Basis: 9 Unternehmen

	sehr häufig	häufig	weniger häufig	selten
Gebäudehülle wird integral erneuert	1	2	3	2
Flachdach wird gleichzeitig mit Fassade erneuert	1	3	4	-
Fassade wurde schon früher nachträglich gedämmt, Anschluss an Flachdach ist vorbereitet	-	-	-	8
Fassade wurde schon früher nachträglich gedämmt, Anschluss an Flachdach ist nicht vorbereitet	-	1	3	4
Flachdach wird erneuert, Fassade wird nicht erneuert, Anschluss an Fassade wird für spätere Fassadenwärmedämmung vorbereitet	-	3	1	4
Flachdach wird erneuert, Fassade wird nicht erneuert, Anschluss wird nicht für spätere Fassadendämmung vorbereitet	1	2	2	3

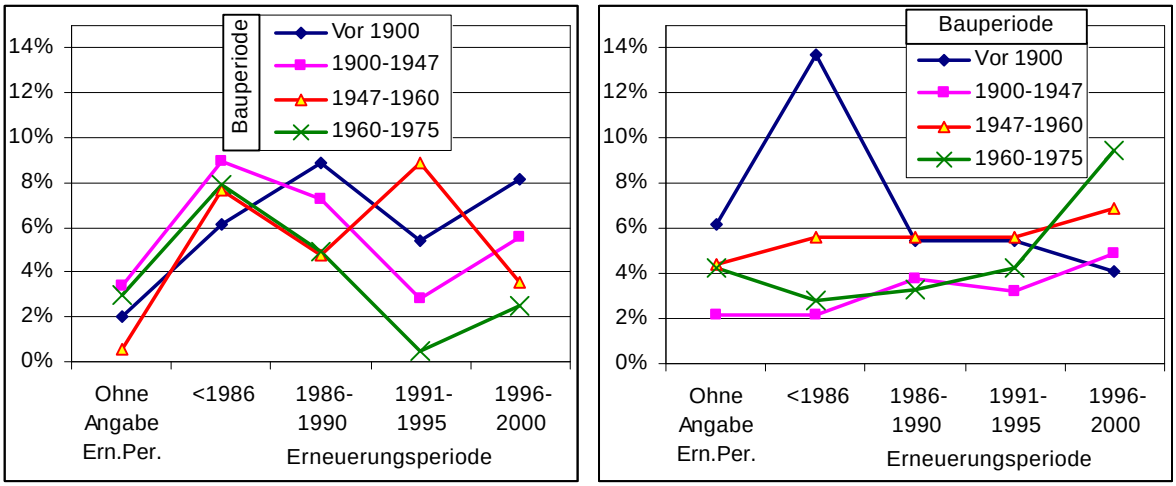
Quelle CEPE-Umfrage bei SVDW-Firmen

2.5.5 Kellerdecke

Auch bei der Kellerdecke interessiert die Frage, inwieweit diese im Lauf der letzten Jahre schon wärmegedämmt wurde und somit für ein künftiges Energieeffizienpotential nicht mehr zur Verfügung stünde.

Obwohl die Wärmedämmung der Kellerdecke „à première vue" eine relativ einfach auszuführende Wärmeschutzvariante ist, wurde sie relativ wenig ausgeführt, wie Abbildung 2.5-10 zeigt, nämlich im Durchschnitt der letzten 15 Jahre nur zu ca. 4% bis 5% pro 5-Jahresperiode. Dies ist nicht häufiger als die wärmetechnische Erneuerung der Fassaden. Zu vermuten ist, dass Kellerdeckendämmungen aus folgenden Gründen nicht häufiger durchgeführt wurden:

- Die Dämmung der Kellerdecke wird als unnötig erachtet, weil die Wärmeverluste tiefer sind als gegen aussen
- Die Dämmung der Kellerdecke verursacht Umstände (Leerung der Kellerräume bzw. –abteile) oder ist zu teuer
- Die Raumhöhe im Keller ist zu gering und würde zu stark eingeschränkt
- Die Wirkung ist begrenzt (Wärmeabfluss bei den häufigen Dämmunterbrechnungen bei Sockel und Kellerwänden
- Es gibt keinen unmittelbaren Grund (ausser den des Wärmeschutzes), die Kellerdecke zu dämmen



Quelle Projekt „Erhebung des Erneuerungsverhaltens bei Wohngebäude, erste Auswertungen, CEPE

Abbildung 2.5-10 Anteile der Kellerdeckendämmungen in den verschiedenen 5-Jahresperioden bei MFH (linke Abbildung) und EFH (rechte Abbildung), bezogen auf das Total der Gebäude der jeweiligen Bauperioden (Mehrfachnennungen möglich)

2.5.6 Art der Erneuerungen, Massnahmenkombinationen

Weitere empirische Evidenz bzgl. Gebäudeerneuerungen kann durch die Auswertung der Gesuche des Investitionsprogramms Energie 2000 hinsichtlich der Art der Erneuerungen (Sanierung, Umbau, Ausbau) und der Massnahmenbündel gewonnen werden.

Tabelle 2.5-12 Anzahl und Häufigkeit der drei Erneuerungstypen bei EFH und MFH

	EFH		MFH	
	Anzahl	%	Anzahl	%
ohne Angabe	10	1%	8	0%
Anbau	3	0%	4	0%
Umbau	88	7%	70	4%
Umbau und Anbau	32	2%	21	1%
Sanierung	655	51%	1262	73%
Sanierung und Anbau	66	5%	58	3%
Sanierung und Umbau	344	27%	241	14%
Sanierung/Umbau/Anbau	92	7%	64	4%
Total	1290	100%	1728	100%

Quelle Investitionsprogramm Energie 2000, Auswertungen CEPE

„Sanierung“ war der am häufigsten angegebene Erneuerungstyp (siehe Tabelle 2.5-12). Bei den MFH wurde dieser Erneuerungstyp zu knapp drei Viertel und bei den EFH immerhin noch bei knapp der Hälfte angegeben. Auffallend bei den Einfamilienhäuser ist jedoch, dass mit den Sanierungen häufiger Umbauten (27%) bzw. Anbauten oder beide zusammen kombiniert wurden. Insgesamt sind über 40% kombinierte Erneuerungen. Bei den EFH scheinen also Um-

und Anbauten die Möglichkeit für Gebäudesanierungen zu eröffnen. Bei den MFH sind diese Anteile der kombinierten Erneuerungen wesentlich tiefer. Die Basis der Auswertung sind alle Gesuche, bei den abgeschlossenen Projekten ist die Verteilung sehr ähnlich.

Um Aufschluss über die relative Häufigkeit der einezlnen Bauteilerneuerungen und vor allem über die durchgeführten Erneuerungspakete zu erhalten, wurde die Gesuchsdatendabank entsprechend ausgewertet. (siehe Tabelle 2.5-13) Als Erneuerung wurden diejenigen Fälle bzw. Bauteile gezählt, bei denen sowohl die Flächen, die Kosten als auch die U-Werte plausible Werte aufwiesen. Bei den EFH ist dies bei 80% der abgeschlossenen Projekte der Fall (die übrigen Gesuche betreffen die Haustechnik inkl. Anlagen für erneuerbare Energien), bei den MFH bei 87% der Projekt. Davon wurde in bemerkenswerten 95% der Fälle eine energetische Erneuerung der Wand vorgesehen. Sehr selten wurde die Aussenwand allein erneuert; zu einem ebenfalls sehr hohen Anteil wurde die Wanderneuerung mit weiteren Massnahmen ergänzt, wobei vor allem bei den EFH die gesamte oder beinahe die gesamte Gebäudehülle miteinbezogen wurde. Auch die übrigen Bauteile (Dach, Fenster, Kellerdecke, Estrichboden) wurden selten einzeln erneuert. Bei den MFH haben Teilerneuerungen etwas grössere Anteile. Die Kombination von Wand und Fenster wurde z.B. in rund einem Fünftel der Fälle angegeben.

Tabelle 2.5-13 Anzahl und Häufigkeit der verschiedenen Kombinationen der Bauteilerneuerung bei EFH und MFH (Auswertung der Gesuche des Investitionsprogramms Energie 2000. Basis: abgeschlossene Gesuche)

	EFH		MFH	
Wand, Fenster, Dach, Keller, evtl. andere	315	45%	279	29%
Wand, Fenster, Dach, evtl. andere	140	20%	196	21%
Wand, Fenster, evtl. Estrich, Keller oder andere	116	17%	225	24%
Wand, Fenster	74	11%	177	19%
Wand ohne Fenster, evtl. weitere	9	1%	17	2%
nur Wand	5	1%	14	1%
nur Fenster	16	2%	24	3%
Fenster plus weitere, aber ohne Wand	15	2%	12	1%
Nur Keller oder Estrich oder Dach	7	1%	5	1%
Total Gebäudehüllenerneuerung	697	100%	949	100%
Andere als Gebäudehüllenerneuerung	*171*		*148*	
Total	*868*		*1097*	

Quelle Investitionsprogramm Energie 2000, Auswertungen CEPE (Wuest und Partner, 2000)

2.6 Marktvolumen und -anteile der opaken Bauteile, Wärmedämmstoffe und Fenster

Die Kenntnis der Marktvolumina pro Baukategorie und Gebäudetyp könnte als Basis für die Definition der Referenzentwicklung des Neubaus und der Gebäudeerneuerung dienen. Differenzierte absolute Werte über die verschiedenen Bereiche des Baumarktes sind jedoch in der Schweiz nur schwierig bzw. nur mit pekuniären Mitteln zu erhalten. Leichter verfügbar sind relative Werte, die von Wüest und Partner in ihrem Immo-Monitoring veröffentlicht werden (siehe unten).

Gemäss Bundesamt für Statistik betrugen die Neu- und Umbauinvestitionen bei den Einfamilienhäusern im Jahr 2000 rund 8.5 Mia CHF (davon rund 7 Mia Neubau) und bei den Mehrfamilienhäusern rund 9 Mia CHF (davon rund 6.2 Mia Neubau). Bei den EFH stieg das Investitionsvolumen seit 1994 leicht an, bei MFH es jedoch stark rückläufig. Bemerkenswerterweise erfolgte dieser Rückgang nicht auf Kosten von Umbau/Erneuerung, sondern auf Kosten des Neubaus. Das Verhältnis zwischen Umbau/Erneuerung hat sich bei den MFH dadurch weiter erhöht; schon 1994 war es bei den MFH höher als bei den EFH.

Vom erwähnten Investitionsvolumen entfallen gemäss Abschätzungen der HTA Luzern die Werte gemäss Tabelle 2.6-1 auf die Gebäudehülle.

Tabelle 2.6-1 Investitionen im Jahr 1999 in die Gebäude hülle bei Wohngebäude in Mio CHF/Jahr

	Neubau	Umbau	Total
EFH	550	400	950
MFH	790	300	1090

Quelle Lutiger, 2001

Bzgl. Marktanteile und Marktvolumen der verschiedenen Fassadentypen liegen teilweise Schätzungen vor, die von Marktteilnehmern abgegeben wurden. Das Unternehmen Nr. DS1 geht von 1 Mio. m² hinterlüfteter Fassade aus und von 3 Mio. m² bis 3.5 Mio m² Kompaktfassade (Fassade mit verputzter Aussenwärmedämmung). Ein anderes Unternehmen geht von einem Marktvolumen von etwas mehr als 5 Mio m² aus. Bzgl. dem Gesamtinvestitionsvolumen für Fassaden bzw. Aussenwände (Neubau und Umbau/Erneuerung) haben die EFH und die MFH je einen Anteil von 31% bzw. 35%. Auffallend ist der hohe Anteil an Kompaktfassaden (vgl. Tabelle 2.6-4), wobei anzumerken ist, dass Immo-Monitoring einen leicht rückläufigen Trend beobachtet.

Tabelle 2.6-2 Investitionsanteile der verschiedene Fassadentypen bei EFH und MFH (Neubau und Erneuerung) in %

	Putz	Stein / Sichtmauerwerk	Holz	Glas / Metall	vorgehängt	**Summe**
EFH	73	3	16	3	5	**100**
MFH	78	4	8	1	9	**100**

Quelle Immo-Mmonitoring 2001, Teil 3 (Baumarkt), (Wuest und Partner, 2000)

Im Hinblick auf die gesamtschweizerische Gewichtung der Grenzkosten ist auch die Kenntnisse der Anteile der verarbeiteten Dämmstoffe in den einzelnen Anwendungsbereichen von Interesse. Allerdings haben Kosten der Dämmstoffe einen relativ geringen Effekt auf die Gesamtkosten der Wärmedämmungen und auch die Grenzkosten verändern sich nicht sehr stark. Eine schematische Übersicht über die Marktstruktur im Fassadenbereich mit einer Schätzung der Fassadentyp und der Dämmstoffanteile ist in Tabelle 2.6-4 gegeben. Im Erneuerungsbereich ist der Anteil der hinterlüfteten Fassaden aus bautechnischen Gründen etwas höher als im Neubaubereich.

Tabelle 2.6-3 Übersicht über die Marktstruktur im Bereich der Fassadenerneuerung (schematisch, ohne Anspruch auf Vollständigkeit)

System Anteil (geschätzt)	Kompaktfassaden 70% - 80%			Hinterlüftete Fassaden ** 20% -30%			
Dämmstoffe Anteil (geschätzt)	Styropor 80%	Steinwolle 20%		Glaswolle 70%	Steinwolle 20%,	Styropor <10%	
Dämmstoff-produzenten	Firmen des EPS-Verbundes: Alporit, Gonon, ...			v.a. , Flumroc*, Isover, wenig Import			
Systemhalter	Systeme: Styropor Lamitherm Unternehmen: Marmoran * Sto * Sarnagranol* Wancor* Dyckerhof*			Unterkonstruktion		Bekleidung	
				Systeme: Holzlattung Holzmetall Metall (Konsolen, Dübel) Unternehmen: SFS, Wagner (zusammen >90%)		Faserzement 50% Eternit* Verputzelemente 20% Sto-Veratec, Sarnagranol, Dyckerhof Keramik, Kunststein 20% Metalle. Naturstein	
Verlegende und applizierende Firmen	Spezialisierte Fassaden-unternehmen, z.T. auch im Bereich hinterlüftete Fassaden tätig, z.B. BWT*, Nebatherm *		Kleingewerbe (Gipser, Maler, Dachdecker)	Spezialisierte Fassadenfirmen, im Verband SFHF organisiert, z.T. gleichzeitig auch im Bereich Kompaktfassaden tätig. BWT*, Nebatherm*			

* Mit diesen Firmen stand CEPE in direktem Kontakt

** In Zusammenarbeit mit dem Schweizerischen Fachverband für Hinterlüftete Fassaden (SFHF) führte CEPE eine Umfrage bei seinen Mitgliedsfirmen durch.

Quelle Darstellung CEPE

Der gesamte Markt für Dämmstoffe aus Mineralwolle beträgt ca. 110'000 t/Jahr. Über die relative Bedeutung der Mineralwolle gibt Tabelle 2.6-4 Aufschluss. Entsprechend dem etwas unterschiedlichen Preis gegenüber den geschäumten Dämmstoffen und der unterschiedlichen Materialeigenschaften sind die Anteile in den einzeln Anwendungnsfeldern versdchieden.

Tabelle 2.6-4 Relative Bedeutung des Dämmstoffs „Mineralwolle“ für die verschiedenen Bereiche

	Mineralwolle (Stein- und Glaswolle)	übrige
Hinterlüftete Fassade	>90%	< 10 % (z.B. Pavatherm)
Kompaktfassade	15%	85%
Zweischalenmauerwerk	60%-65%	35% - 40%
Schrägdach	60%	40% (Holzfaser, Isofloc, Geschäumte)
Flachdach	25%	75% (Schaumglas, EPS, XPS)
Dachboden	60%	40%
Kellerdecke	50%	50%

Quelle Führender Schweizerischer Dämmstoff-Hersteller

Tabelle 2.6-5 Schätzung der Umsatzanteile für die verschiedenen Anwendungsbereiche

Bereiche, in welchen das Unternehmen DS1-Dämmstoffe verarbeitet	Anteile in Umsatz % (nominelle Fr)	
	1976-80	2000
Systembau		7%
Hinterlüftete Fassade	20%	17%
Kompaktfassade		10%
Zweischalenmauerwerk	30%	3%
Schrägdach	25%	19%
Flachdach	5%	13%
Dachboden	6%	2%
Kellerdecke	2%	3%
Subtotal Wärmedämmung	**88%**	**75%**
Diverse Nichtwärmedämmung (Tram, Brand-, Schallschutz etc)	12%	25%
Total	100%	100%

Quelle Führender Schweizerischer Dämmstoff-Hersteller

Die gesamte Markt der Isoliergläser war während der letzten drei Dekaden in etwa konstant und betrug 2.6 bis 2.9 Mio. m^2 pro Jahr. Das erscheint im Vergleich zu den Fassaden als viel. Es ist jedoch zu bedenken, dass die Erneuerungsraten im Glas- und Fensterbereich über das Ganze gesehen wesentlich höher sind als bei den Fassaden, weshalb dieser Wert plausibel erscheint. Bzgl. dem Gesamtinvestitionsvolumen (Neubau und Umbau/Erneuerung) haben die EFH und die MFH je einen Anteil von rund 35%. Die Abschätzung zur Aufteilung auf die Fenstertypen ist in Tabelle 2.6-6 widergegeben. Für das Total aller Gebäudekategorien schätzt Immo_Mmonitoring gegenüber dem Neubau höhere Anteile für Kunststofffenster im Umbau/Erneuerungsbereich.

Tabelle 2.6-6 Investitionsanteile der verschiedene Fenstertypen bei EFH und MFH (Neubau und Erneuerung) in %

	Holz	Holz / Metall	Kunststoff	Metall	**Summe**
EFH	52	17	29	2	**100**
MFH	34	27	38	1	**100**

Quelle Immo-Mmonitoring 2001, Teil 3 (Baumarkt), (Wuest und Partner, 2000)**Fazit**

In diesem Kapitel konnten die Grundsteine für die Definition einer plausiblen und in sich stimmigen Referenzentwicklung für die nächsten zehn Jahre gelegt werden (Kapitel 5), auch wenn die wünschenswerte Tiefe der Analyse bis zur Fertigstellung dieses Berichts noch nicht erreicht werden konnte. Die dafür notwendige Gesamtintegration der Neubau- und Umbauinvestitionen, der in diesem Projekt erhobenen Kosten, der Ergebnisse der empirischen Studie zum Erneuerungsverhalten (Jakob et al., 2002) möglichst in ein Modell sollte anschliessend an dieses Projekt in einem nächsten Schritt erfolgen.

3 Die Charakterisierung der heutigen Neubautätigkeit

Die heutige Neubautätigkeit wirft unter energiewirtschaftlichen Gesichtspunkten eine Reihe von Fragen auf, die zum Teil durch Befragungen und statistische Auswertungen, zum Teil aber nur durch Schätzungen von Fachleuten beantwortet werden können. Zu diesen Fragen zählen folgende:

- Wie gross ist die übliche Abrissrate von Wohngebäuden bzw. von Wohnungen, und wie gross die durchschnittliche Wohnungsgrösse dieser Gruppe?
- Wie gross ist der Flächen- und Wohnungszuwachs in bestehenden Gebäuden infolge Modernisierungs- und Dachausbaumassnahmen?
- Wie ist der wärmetechnische Zustand heutiger Neubauten in Wohngebäuden?

Dieses Kapitel versucht diese Fragen zu beantworten, um eine Ausgangsbasis für die weiteren Analysen und Annahmen in Kap. 6.1 zu legen.

3.1 Neubau und Ersatzneubau

Der Abriss von Wohnungen betrug in der Periode 1985 – 1999 etwa 1650 Wohnungen pro Jahr, d. h. knapp ein Promille des heutigen Gebäudebestandes von vor 1970. Diese Abrissrate war in den 1990er Jahren rückläufig, sie dürfte aber infolge des zunehmend überalterten Gebäudebestandes (ein Promille würde eine durchschnittliche Lebensdauer der Wohngebäude von 1000 Jahren bedeuten) sich in Zukunft deutlich erhöhen (vgl. Kap.I 1).

Der Neubestand der Wohnungen entsteht nicht nur durch Neubauten, sondern auch durch Umbauten und Dachausbauten in bestehenden Wohnungsgebäuden. Dies waren in den vergangenen 15 Jahren durchschnittlich 4000 neue Wohnungen pro Jahr, allerdings mit deutlich rückläufigem Trend seit Mitte der 1990er Jahre (1998 und 1999 jeweils etwa 2800 neue Wohnungen). Man wird davon ausgehen müssen, dass in Zukunft dieses Potential eher vermindert sein dürfte (vgl. Kap.I 1), weil die Möglichkeiten der Wohnungsvergrösserungen und Dachausbauten abnehmen.

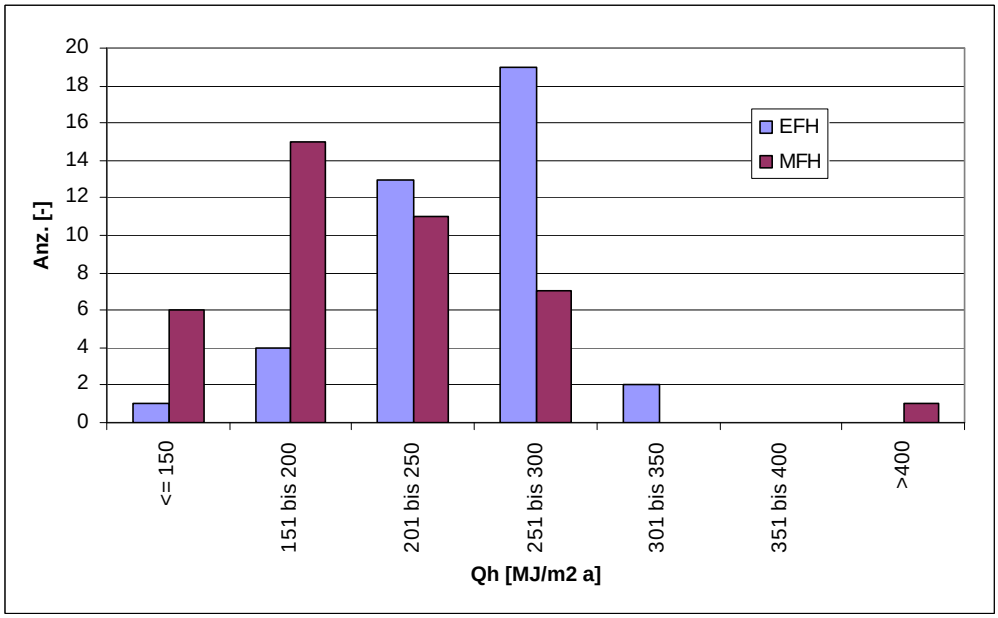
Insgesamt entstanden im Jahre 2000 5.79 Mio m^2 Energiebezugsflächen, davon 59 % in Ein- und Zweifamilienhäusern. Gegenüber dem Bestand bedeutet dies eine Verschiebung zu den Ein- und Zweifamilienhäusern. Dies ist konsistent mit der Beobachtung, dass das Neuinvestitionsvolumen der MFH in den 1990er Jahren abnahm, bei den EFH jedoch konstant bliebt. Die durchschnittliche Wohnungsgrösse des Gebäudebestands betrug im Jahre 2000 etwa 121 m^2, wobei die durchschnittliche Grösse der zwischen 1995 und 2000 erbauten Wohnungen nach den vorliegenden statistischen Angaben bei 160 m^2 EBF je Wohnung lag. Die jährlichen Anstiege der EBF betrug durchschnittlich 1.1 m^2/a bei Einfamilienhäusern und 0.5 m^2/a bei Mehrfamilienhäusern in den 80er Jahren. Dieser Zuwachs verminderte sich in der zweiten Hälfte der 90er Jahre auf 0.43 m^2/a für alle neu gebauten Wohnungen, d.h. um fast die Hälfte.

3.1.1 Energetische und bautechnische Charakterisierung auf Gebäudeebene

Zunächst wird die heutige Neubauweise auf Gebäudeebene beschrieben und anschliessend auf Bauteilebene.

Die Anforderung an den Heizwärmebedarf für Neubauten in der Schweiz liegt nach der „alten" Berechnungsnorm SIA 380/1 bei 330 MJ/m^2a für EFH und bei 300 MJ/m^2a für MFH . Dieser Wert wurde in der Periode 1993-2001 für eine Auswahl von Gebäuden für die Regionen Zürich und

Bern weitgehend eingehalten (vgl. Abbildung 3.1-1). Interessant ist, dass infolge des günstigeren Verhältnisses von Gebäudehüllen- zu Energiebezugsflächen bei Mehrfamilienhäusern das Maximum bei 150-200 MJ/m²a mit einem Anteil von 37.5% in der Stichprobe liegt, d.h. zwischen einem verbesserten Zielwert des heutigen Baustandards und dem Minergiestandard. Immerhin erreichten etwa 2.5% der Einfamilienhäuser und 15% der Mehrfamilienhäuser 150 MJ/m²a.



Quelle Energienachweise SIA 380/1 in den Regionen Zürich, Aargau und Bern (106Bauten). Erhebung CEPE.

Abbildung 3.1-1 Heizwärmebedarf von Neubauten von Ein- und Mehrfamilienhäusern in der Periode 1993-2001 (n=106)

Dem Umstand, dass der Energiebedarf nebst der energietechnischen Bauweise auch sehr stark von der Gebäudeform abhängt, wurde schon in der bisher in vielen Kantonen gültigen Musterverordnung (MuKEn) und in der neuen Berechnungsnorm SIA 380/1 Rechnung getragen, indem der Grenz- und auch der Zielwert von der Gebäudehüllenziffer A/EBF abhängt. A ist dabei die „beheizte" Fläche gegen aussen, unbeheizte Räume oder Erdreich, wobei für die beiden letztgenannten Korrekturfaktoren zur Anwendung kommen (vgl. Tabelle 3.1-1).

$H_g = H_{go} + \Delta H_g * (A/EBF)$

Tabelle 3.1-1 Grenzwerte für den Heizwärmebedarf pro Jahr von Neubauten

	H_{go}	ΔH_g
MFH	80	90
EFH	90	90

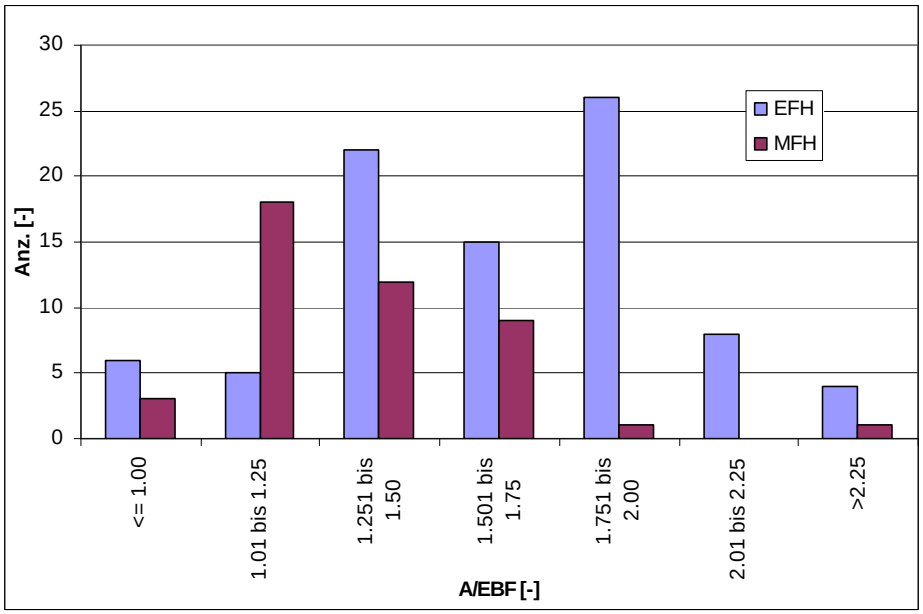
Quelle SIA Dokumentation D 1070, Thermische Energie im Hochbau, Leitfaden zur Anwendung der Norm 380/1

Die neue Norm SIA 380/1 wurde im April 2001 in Kraft gesetzt und die alte Version war nur noch bis Ende 2001 gültig. Die Zielwerte dieser neuen Norm liegen 60% tiefer und entsprechen dem Absenkpfad SIA für das Jahr 2020. Aus den obigen Grenzwerten ergeben sich die Anforderungen, die für typische A/EBF-Werte in Tabelle 3.1-2 aufgeführt sind.

Tabelle 3.1-2 Grenzwerte nach der neuen Berechnungsnorm 380/1 in Abhängigkeit der Gebäudehüllzahl, in MJ/m²a.

A/EBF	MFH	EFH
1	170	180
1.5	215	225
2	260	270

Da der Energiebedarf eines Gebäudes nicht unwesentlich vom Verhältnis der Gebäudehüllenfläche zur Energiebezugsfläche, der Gebäudehüllenziffer, abhängig ist, wurden 168 Neubauten in dieser Hinsicht ausgewertet. Das Maximum liegt für Mehrfamilienhäuser im Bereich 1.0 bis 1.25 mit 41%; der Wert über 2.0 ist praktisch eine Ausnahme (vgl. Abbildung 3.1-2). Die Einfamilienhäuser haben ein Doppelmaximum bei 1.25 bis 1.5 mit 26% und bei 1.75 bis 2.0 mit 30%. Bei den tiefen A/EBF handelt es sich mit grosser Wahrscheinlichkeit um Reiheneinfamilienhäuser, ein freistehendes EFH mit einem solch tiefen A/EBF ist aus geometrischen Gründen kaum möglich. Die Reiheneinfamilienhäuser scheinen in der Stichprobe eher übervertreten zu sein.



Quelle Energienachweise SIA 380/1 in den Regionen ZH, AG, BE (106 Bauten); Auswertung für Ökokredite der Luzerner Kantonalbank in der Region Luzern (18 Bauten): Minergieagentur Bern (44 Bauten)

Abbildung 3.1-2 Verteilung der Gebäudehüllenziffer A (bezogen auf die Energiebezugsfläche) für Neubauten der Periode 1993-2001 für Einfamilien- und Mehrfamilienhäuser (n=168)

Die Ergebnisse der obigen Auswertung werden ergänzt durch eine Erhebung von Wüest & Partner (2000) im Auftrag des Bundesamtes für Energie, die durchschnittlichen Energiekennzahlen für Neubauten (Raumheizung **und** Warmwasser) zu 13 Kantonen vorlegt. Die mittlere Energiekennzahl Wärme (Raumheizung und Warmwasser) beträgt im untersuchten Sample 393 MJ/m²a. Unter den 13 untersuchten Kantonen bestehen zum Teil grosse Unterschiede. Der Bereich erstreckt sich von 307 bis 555 MJ/m²a (Wüest&Partner, 2000), wobei sich 8 Kantone innerhalb einer Abweichung von plus/minus 10 Prozent bewegen.

Die Einfamilienhäuser weisen einen tieferen Wert von 390 MJ/ m²a als die Mehrfamilienhäuser mit 419 MJ/m²a auf. Dieses Resultat zeigt die positive Auswirkung der höheren gesetzlichen Auflagen, wonach die mittlere Energiekennzahl der Neubauten gegenüber den Altbauten praktisch halbiert werden konnte (Wüest&Partner, 2000). Berücksichtigt man den Energiebedarf für Wärmwasser zwischen 50 und 90 MJ/m²a und Jahresnutzungsgrade zwischen etwa 88% und 93% (HEL bzw. Gas-Brennwertkessel zzgl. Verteilverluste), so variieren die Ergebnisse des Heizwärmebedarfs zwischen 190 MJ/m²a und 450 MJ/m²a.

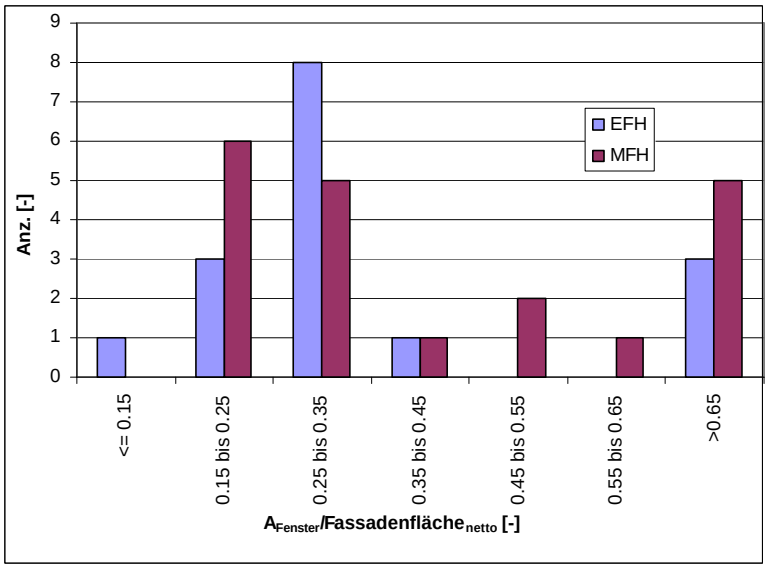
Zum Zweck der Energiemodellierung und der Fortschreibung der Entwicklung im Gebäudebestand ist es hilfreich, die empirisch erhobenen EKZ auf der Ebene des Heizwärmebedarfs zu interpretieren und dabei die festgestellte bzw. vermutete Segmentierung der Neubauweise aufzunehmen. Dabei gilt es, möglichst viele Annahmen empirisch abzustützen. Bekannt ist der Durchschnitt der EKZ, woraus der Heizwärmebedarf abgeschätzt werden kann (siehe oben). Weiter liegen Schätzungen über den Anteil der Mineregiegebäude vor. Sie liegen 2001 bei den EFH zwischen 5% und 8%, Tendenz steigend. Der Anteil war auch in den fünf Jahren davor steigend, weshalb der Durchschnitt für diese Fünfjahresperiode tiefer liegen muss. Eine Annahme über das Qh der „schlecht" gebauten bzw. geplanten Gebäude ergänzt die Betrachtung, deren Resultat in Tabelle 3.1-3 dargestellt ist.

Tabelle 3.1-3 Mögliche Interpretation der gemessenen EKZ auf Nutzenergieebene (Heizwärmebedarf) für Ein- und Mehrfamilienhausneubauten

		Heizwärmebedarf Qh(MJ/m2a)				Anteile (%)		
		Durchschnitt	Minergie	MuKEn	schlecht	Minergie	MuKEn	schlecht
EFH	1996-00	300	150	280	400	4%	75%	21%
	2001-05	280	140	270	380	8%	73%	19%
	2006-10	260	130	260	370	15%	67%	18%
MFH	1996-00	270	120	240	360	1%	73%	26%
	2001-05	255	120	230	360	3%	75%	22%
	2006-10	240	120	230	350	10%	73%	18%

Quelle Darstellung CEPE

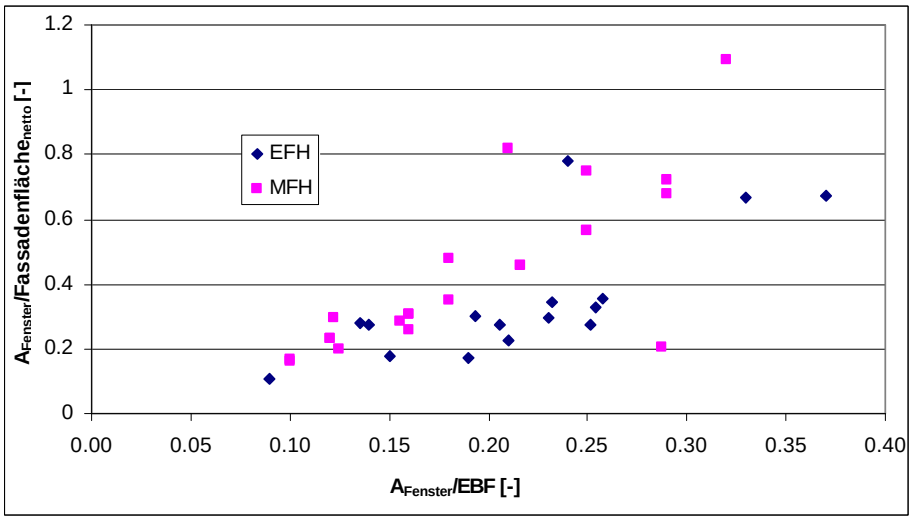
Ein weiterer Einfluss auf den Heizwärmebedarf ist das Verhältnis Fenster-zu-Fassadenfläche. Die hier netto bezeichnete Fassadenfläche umfasst nur die opaken Anteile, also nicht die Fensterflächen. Nach den Auswertungen des CEPE sind die Fensterflächenanteile der Gebäude auf zwei Häufigkeitsbereiche konzentriert, zum einen zwischen 15% und 30% und zum andern bei über 60% (vgl. Abbildung 3.1-2). Dies gilt insbesondere für Einfamilienhäuser mit entweder konventionellen oder stark geöffneten Fassaden („Solarenergiehäuser"). Allerdings ist die Gesamtzahl der auswertbaren Objekte relativ gering und damit die Aussagen zur Verteilung mit Vorbehalt zu verstehen.



Quelle Energienachweise SIA 380/1 in den Regionen Zürich, Aargau und Bern (106 Bauten). Erhebung CEPE.

Abbildung 3.1-2 Verhältnis Fensterfläche zu Fassadenfläche bei Neubauten von Ein- und Mehrfamilienhäusern in der Periode 1993-2001

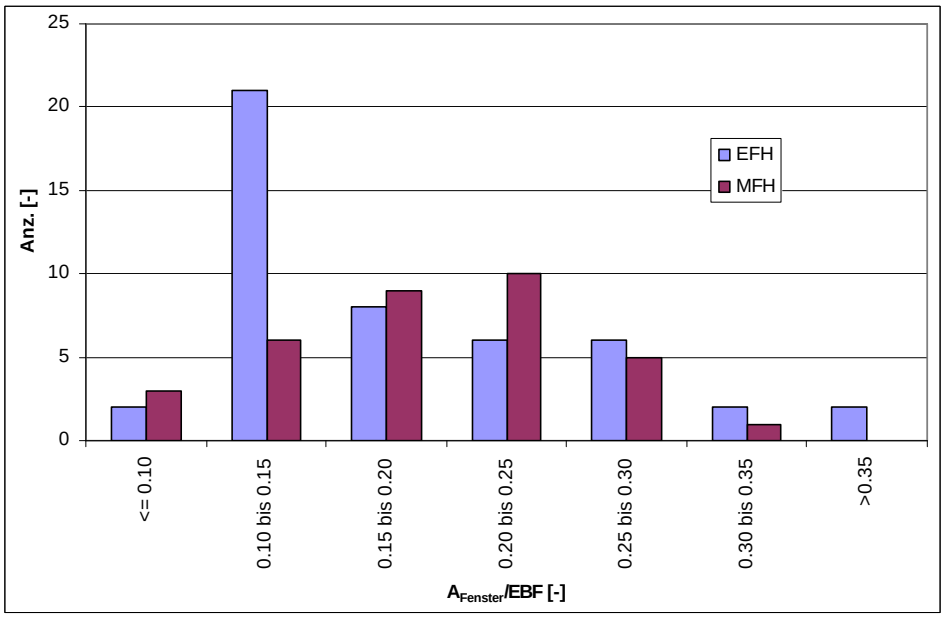
Zwischen dem Anteil der Fensterfläche bezogen auf die Energiebezugsfläche und dem Fensterflächenanteil bezogen auf die Fassadenfläche besteht verständlicherweise ein Zusammenhang (vgl. Abbildung 3.1-3). Dieser ist hilfreich bei der Variation der Fensterflächen im Bottom-up Ansatz des Neubaus (vgl. Kapitel 4.2.8 Und Kapitel 1.1). Die im bottom-up Ansatz betrachteten Neubauten (Kapitel 1.1) stehen in etwa im Mittelfeld der dargestellten Gebäude, d.h. bei einem Fensterflächen-/EBF-Verhältnis von 0.2 und einem Fenster-/Fassadenverhältnis von etwa 0.3. Damit handelt es sich beim Referenz-Wohngebäude im Kapitel 1.1 weder um ein sehr geschlossenes noch um ein sehr geöffnetes Haus.



Quelle Energienachweise SIA 380/1 in den Regionen Zürich, Aargau und Bern . Erhebung CEPE.

Abbildung 3.1-3 Verhältnis Fensterfläche zu Fassadenfläche in Abhängigkeit des Verhältnisses Fensterfläche/EBF (n=34)

Bei einer Auswertung der Relation Fenster- zur Energiebezugsfläche mit einem grösseren verfügbaren Sample fällt auf, dass die Einfamilienhäuser im Durchschnitt etwas mehr geschlossener sind als die Mehrfamilienhäuser (vgl. Abbildung 3.1-4): zwei Drittel der Einfamilienhäuser hatten einen Wert bis 0.2. während nur 53% der Mehrfamilienhäuser diese eher geschlossene Bauweise auswiesen.



Quelle Energienachweise SIA 380/1 in den Regionen Zürich, Aargau und Bern (106 Bauten). Erhebung CEPE.

Abbildung 3.1-4 Verteilung des Verhältnisses von Fenster- zu beheizter Wohnfläche der Neubauten zwischen 1993-2001 für Ein- und Mehrfamilienhäuser

3.1.2 Bauteile und bauliche Varianten

Nebst der Betrachtung auf Gebäudeebene lässt sich die heutige Neubauweise auch auf Ebene der einzelnen Bauteile einfangen. Die heute angewendeten energie- und bauchtechnischen Kennwerte (Dämmstärken bzw. U-Werte, g-Werte etc.) stützten sich auf Angaben der Fassadenfirmen (Hinterlüftete Fassaden, Kompaktfassaden), Dachunternehmen, Fensterhersteller und Glaslieferanten. Um die Einheitspreise der verschiedenen Neubauweisen gesamtschweizerisch gewichten zu können, wurden die Unternehmen zusätzlich zu den technischen Kennwerte in einzelnen Bereichen zu den Häufigkeiten der ausgeführten Neubauvarianten befragt.

a) Fassaden

Im Bereich der hinterlüfteten Fassaden wird heute laut Angaben der Unternehmen durchgängig mindestens 12 cm wärmegedämmt, teilweise routinemässig 14 oder 15 cm. Ausser einem Platteau nach Mitte der 80er Jahre ist ein Trend zu höheren Dämmstärken seit den Mitte der 70er Jahre angegeben (vgl. auch Abbildung 2.4-2). Auch bei den Kompaktfassaden sind laut den heute 10 cm bis 12 cm Dämmstärke Standard, wie die spezialisierten Fassadenunternehmen, die sogenannten Systemhalter bestätigen.

b) Dächer

Es ist zu erwarten, dass auch im Neubau die Grenzkosten unterschiedlich sind je nachdem, ob die Dachschräge oder der Estrichboden gedämmt wird. Deshalb wurden die SVDW-Unternehmen nach den Dachausbauvarianten befragt.

Tabelle 3.1-4 Häufigkeit der Dachausbauvarianten bei EFH- und MFH-Neubauten. Anzahl Nennungen, Basis 12 Unternehmen

	EFH				MFH			
Dachausbauvarianten	sehr häufig	häufig	verbreitet	wenig	sehr häufig	häufig	verbreitet	wenig
Dachraum wird zu Wohnzwecken ausgebaut	4	3	2	2	3	3	4	1
Dachraum wird zu späterem Ausbau vorbereitet	1	2	6	2	1	1	3	6
kalter Dachraum	2	1	3	4	-	-	4	6

Quelle CEPE-Umfrage bei SVDW-Mitgliedunternehmen, 2001

Ein kalter Dachraum, evtl. für einen späteren Ausbau vorbereitet, ist bei den MFH zwar auch zu beobachten, weitaus häufiger wird der Dachraum jedoch zu Wohnzwecken ausgebaut (vgl. Tabelle 3.1-4). Wird der Dachraum für einen späteren Ausbau vorbereitet, ist damit zu rechnen, dass die Dachschräge und nicht der Estrichboden gedämmt wird, schätzungsweise zu über 80%. Bei den EFH ist ein kalter Dachraum etwas häufiger als bei den MFH, aber auch hier überwiegt wohl die Dämmung der Dachschräge gegenüber dem Estrichboden mit schätzungsweise zwei Drittel zu einem Drittel. Am häufigsten werden die Wärmedämmung auf den Sparren und diejenige zwischen den Sparren genannt. Die Varianten, die bzgl. der Sparren zwei Bereiche umfassen (auf und zwischen bzw. zwischen und unter den Sparren), sind markant weniger häufig (vgl. Tabelle 3.1-5).

Tabelle 3.1-5 Häufigkeit von Ausführungs- und Wärmedämmvarianten bei Neubauten mit Schrägdach. Anzahl Nennungen, total 12 Unternehmen.

	EFH				MFH			
Varianten	sehr häufig	häufig	verbreitet	wenig	sehr häufig	häufig	verbreitet	wenig
Wärmedämmung nur auf den Sparren	1	3	1	6	-	3	3	5
Wärmedämmung auf und zwischen den Sparren	1	-	1	8	1	-	1	7
Wärmedämmung nur zwischen den Sparren	2	6	1	1	2	3	4	2
Wärmedämmung nur zwischen und unter den Sparren	-	1	5	3	-	1	4	5
Dämmung des Dachbodens bzw. der obersten Decke	-	1	2	6	-	2	1	6

Quelle CEPE-Umfrage bei SVDW-Mitgliedunternehmen, 2001

Die typische mittlere Dämmstärken beträgt rund 14 cm, kann aber durchaus auch mehr (16 cm oder 18 cm) betragen, unter Umständen auch nur 12 cm (vgl. Tabelle 3.1-6). Weniger als 12 cm sind laut Angaben der Unternehmen eher selten, nicht zuletzt weil damit der Grenzwert in der Bauteilbetrachtung unter Berücksichtigung der Inhomognität (Sparren bzw. Lattung) kaum mehr eingehalten werden kann bzw. eine vergleichsweise günstige Wärmeschutzmassnahme nicht genutzt wird, um den Systemnachweis einzuhalten. Bei der Zwischensparrendämmung ist eine geringere Dämmstärke u.U. sogar mit Mehrkosten verbunden.

Tabelle 3.1-6 Häufigkeit der Dämmstärken bei Neubauten mit Steildächern. Anzahl Nennungen, Total 12 Unternehmen.

	EFH				MFH			
	sehr häufig	häufig	Verbreitet	wenig	sehr häufig	häufig	verbreitet	wenig
8 cm - 10 cm	-	-	-	6	-	-	1	5
10 cm - 14 cm	4	2	3	2	5	2	3	1
14 cm - 18 cm	2	3	1	3	1	4	1	3
> 18 cm	-	-	1	4	-	-	1	6

Quelle CEPE-Umfrage bei SVDW-Mitgliedunternehmen, 2001.

Zu Flachdachneubauten haben nur zwei Unternehmen Angaben gemacht; die übliche Dämmstärke scheint sich auch hier bei rund 14 cm zu bewegen.

c) Fenster

Bei der Erhebung von Fensterpreisen (siehe Kapitel 4.3) wurden Glas-U-Werte, Rahmenmaterialien und deren U-Werte abgefragt.

Zu über 90% des Marktes werden heute zweifach verglaste Fenster mit einem U-Wert von 1.1 W/m²K nachgefragt. In der Westschweiz werden teilweise noch Fenster mit einem U-Wert von 1.3 W/m²K eingebaut. Andererseits werden insbesondere für Minergie-Bauten bessere Gläser, insbesondere Dreifach-Verglasungen eingesetzt. Im MINERGIE-Fenster-Modulvertrag wurden ein U-Wert der Verglasung (inkl. Rahmen) unter 1.3 W/mK und ein g-Wert für Fenster und Sonnenschutz zusammen von unter 0.15 festgelegt. Bereits vorgesehen ist, dass im Jahr 2003 diese Werte noch verschärft und durch Anforderungen an den Einbau der Fenster in die Fensterleibung sowie an die Dämmung der Storenkästen ergänzt werden. Der Gesamtanteil dieser Fenster beträgt – bei steigender Tendenz – im Moment aber noch nicht mehr als rund 5%.

Laut übereinstimmenden Angaben der Fensterhersteller und der Glasanbieter werden immer noch die Gläser mit Alu-Abstandshalter am meisten nachgefragt. Dies ist einigermassen erstaunlich, denn die Edelstahl- oder Kunststoff-Abstandshalter wären unter engergetischen Gesichtspunkten eigentlich wirtschaftlicher (ein geringer Mehrpreis macht – vor allem bei tiefen Glas-U-Werten - eine Energieeinsparung von bis zu 15% möglich, vgl. Kap. 4.3.7).

Bei den Rahmen ist beim Holz ein 54 mm starker Holz-Rahmen sehr verbreitet. Einige Unternehmen arbeiten mit erhöhten Rahmenstärken, z.B. 58 mm oder mehr. Aufgedoppelte Dämmungen, Verbundrahmen mit Dämmkern etc. sind bei immer mehr Unternehmen im Angebot zu finden, bilden aber bzgl. der Verkäufe eine Minderheit. Beim Kunststoffrahmen bilden die stahlarmierten Rahmen immer noch eine grosse Mehrheit, wenn auch namhafte Fensterhersteller mit GFK-armierten Rahmen durchaus signifikante Anteile erzielen.

Die häufigsten Werte der U-Werte für Fensterrahmen liegen bei 1.4 bis 1.6 W/m²K (vgl. Tabelle 3.1-7)

Tabelle 3.1-7 Referenz-Rahmen-U-Werte der befragten Unternehmen

Rahmen-U-Wert	Anzahl Unternehmen	
W/m²K	Holz / Holz-Metall	Kunststoff
>1.6	2	3
1.6	14	4
1.5	18	2
1.4	15	3
<1.4	4	1

Quelle CEPE-Umfrage bei Fensterherstellern, 2001

Für die Grenzkostenbetrachtung werden aufgrund dieser Erkenntnisse aus den Umfragen die Werte gemäss Tabelle 3.1-8 angenommen.

Tabelle 3.1-8 Technische Kennwerte bei heute eingebauten Fenstern, Annahmen für die Referenzwerte der Grenzkostenbetrachtung

	Glas-U-Wert W/m²K	Rahmen-U-Wert W/m²K	Abstandshalter W/mK
Holz, Holz-Metall	1.1	1.4 - 1.6	0.07
Kunststoff	1.1	1.5 - 1.7	0.07

4 Kosten und Nutzen von Energieeffizienzinvestitionen im Wohngebäudebereich

Dieses Kapitel fasst die gesamten Kostendaten, die empirisch durch Erhebungen gesammelt und verarbeitet wurden (vgl. Kap. 4.3und 1.1), die Dynamisierung der Kosten für die kommenden 30 Jahre (vgl. Kap. 4.4.4) sowie die monetären Nutzen von Wärmeschutzinvestitionen zusammen (vgl. Kap. 4.6). Diese Kostenangaben sind die Basis zu den in Kap. 6 ausgewiesenen Grenzkostenkurven.

4.1 Methodisches Vorgehen zur Kostenermittlung und zu den Wirtschaftlichkeitsrechnungen

Bei der Ermittlung von Kosten sei zunächst darauf hingewiesen, dass in dieser Analyse auf drei Ebenen zwischen Kosten unterschieden werden muss; diese sind substantiell unterschiedlich und sollten - trotz des gleichen Wortes "Kosten" - nicht verwechselt werden:

- Auf der Ebene der technischen und baulichen Massnahmen werden zunächst die Kosten in *einzelwirtschaftlicher Form* als Investitionskosten und wo nötig als Kapital- und Betriebskosten ausgewiesen. Diese Kosten und die mit der Investition verbundenen Nutzen interessieren den Gebäudebesitzer oder Bauherren, die Bauwirtschaft und die Planer. Sie sind in Kap. 4.2 bis 4.42 auf heutiger Preisbasis für heute bzw. für die kommenden drei Jahrzehnte in Kap. 4.5 ausgewiesen.
- Auf der Energiesystemebene werden die betriebswirtschaftlichen Investitionskosten auf Kapitalkosten *aus energiewirtschaftlicher Sicht* umgerechnet, d.h. ohne Risikoprämien und Gewinne sowie ohne Steuern. Die Verzinsung wurde deshalb mit 3% angenommen. Diese Kostenbetrachtung erfolgt als Grenzkostenbetrachtung in Kap. 6.1 bis 6.4.
- Schliesslich wird versucht, die Energiesystemkosten *aus Sicht der Wohlfahrtsökonomie* durch die monetäre Bewertung von Co-Benefits und durch die vermiedenen externen Kosten durch energiebedingte Emissionen zu ergänzen; durch die gegenseitige Verrechnung von Kosten und Nutzen können auch negative Nettokosten, d.h. per Saldo ein Nutzen der betrachteten Investitionsmassnahmen entstehen (vg. Kap. 6.5).

4.1.1 Annahmen zur Kostenermittlung und zu energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen

Als wichtige Rahmenbedingungen sind für die Ermittlung der Kosten der Kapitalmarktzinssatz anzusehen und zur Ermittlung des energetischen Nutzens die Brennstoffpreise, insbesondere für Heizöl und Erdgas.

- Für Ein- und Zweifamilienhausbesitzer und –Bauherren wird von einem Zinssatz von 3.5% ausgegangen, für Mehrfamilienhäuser von einem Zinssatz von 5.5%, jeweils in realen Werten, d.h. ohne Annahme einer Inflationsrate.
- Die Brennstoffpreisentwicklung der kommenden 30 Jahre hängt von vielen Faktoren ab. Es wird daher im folgenden erläutert, warum eine leicht steigende Preistendenz auf den Erdöl- und Erdgasmärkten zu erwarten ist.

Neben der Entwicklung von Energiepreisen sind energie- und klimapolitische Rahmenbedingungen für die Kostenschätzungen indirekt wichtig, weil sie über Baustandards, Verbrauchskennzeichnungspflicht oder Forschung und Entwicklung Einfluss auf die Diffusionsgeschwindigkeit neuer Techniken des Wärmeschutzes und ihre Kostendegression über Lern- und Skaleneffekte haben.

a) Energiepreis-Entwicklung 2030 (als Referenzszenario)

Das Design von Preisperspektiven in einem Land startet i.a. von Annahmen über die Entwicklungen auf den internationalen Energiemärkten, wobei Erdöl als der Preisführer für die Periode bis 2030 unterstellt wird. Die Kohle wird zwar auch als relativ unabhängig von den Entwicklungen auf dem Weltölmarkt erachtet, hat aber wegen des CO_2–Problems keine grossen Chancen, den Welthandel auszudehnen, schon gar nicht aus Handlings- und Emissionsgründen im Raumwärmebereich.

Im folgenden werden zu den Importpreisen für die Schweiz (vgl. Tabelle 4.1-1) und die durchschnittlichen Handelspreise für einzelne Verbrauchergruppen und Bezugsmengen (vgl. Tabelle 4.1-2) einige Hinweise gegeben, welche Annahmen den Entwicklungen im einzelnen unterstellt wurden.

- Quellen dieser Schätzungen sind IEPE, 1999 und 2000; IEA 2000; Anhörungen der Enquête-Kommission 2000; Prognos 2001 (bzgl Kohle).
- Die Annahme, dass die Erdgasimportpreise zwischen 1999 und 2015 mit knapp 2 %/a langsamer zunehmen als die Erdölpreise auf den Weltmärkten (+ 3.7 %) unterstellt, dass die Rekonzentration der Welterdölförderung infolge der wachsenden Erdölnachfrage, insbesondere durch die asiatischen und südamerikanischen Schwellenländer weiter schnell fortschreitet, nachdem in fast allen übrigen Förderregionen der mid-depletion point der Erdölforderung überschritten wurde (Nordamerika, Europa) oder in diesem Jahrzehnt überschritten werden dürfte (Südamerika).
- Es werden keine dramatischen Erhöhungen der Erdgasnachfrage in Europa angenommen, d.h. die Europäer lassen sich bei der Substitution der Kohle in der Stromerzeugung und der Erdgasnutzung als Kraftstoff im Strassenverkehr Zeit; auch die Brennstoffzellendiffusion kommt in den verschiedenen Anwendungsfeldern langsamer als man heute suggeriert.
- Die Mehrwertsteuer wird nur moderat angehoben.

Die Autoren halten die untere Preis-Variante aus verschiedenen Gründen für wahrscheinlicher, insbesondere infolge einer geringeren Energienachfrage vieler Industriestaaten infolge einer Klimaschutzpolitik, die in diesem Jahrzehnt durch beschleunigte Energieeffizienz zu greifen beginnt und die Weltenergie-Referenznachfrageschätzungen von heute obsolet machen dürfte. Man könnte die obere Preis-Variante auch als ein Substitut für die Wirkungen der Treibhaugas-Emissionszertifikate verstehen, zumal die Zertifikate bei kleinen Verbrauchern wie Steuern wirken. Die Preise der oberen Variante werden als Preise für die Jahre 2015 bis 2025 in dieser Arbeit unterstellt.

Die hier angenommenen Preissteigerungen sind im Zeitraum 1998-2015 um etwa einen Prozentpunkt pro Jahr höher als in den Preisannahmen von Prognos im Rahmen der Analysen zu den Initiativen „Strom ohne Atom“ und „Moratorium Plus“ (2001), wo die Energiepreise erst nach 2015 deutlicher ansteigen.

Die *Entwicklung der Inlandspreise* erfolgte anhand folgender Annahmen:

- Die Verarbeitung des Rohöls, die Vertriebskosten für Mineralölprodukte und Erdgas bleiben real konstant, allerdings erhöhen sich die Verteilungskosten für Erdgas infolge der weiteren Netzausdehnung etwas. Die Erdgaspreise bilden sich aber nicht an den Möglichkeiten der Preissteigerungsmöglichkeiten, die das Heizöl eröffnet.

Tabelle 4.1-1 Entwicklung der Importpreise für Primärenergieträger (ohne Abgaben und Steuern) in zwei Varianten, 1999 bis 2015

Obere Preisvariante in Preisen von 1999	1999	2005	2010	2015
Rohöl fob in $/b	17.84	27	30	32
Rohöl Einfuhrpreise, cif CHF/m3	157.05	240	265	280
Erdgas, Importpreis CHF/GJ	4.58	2.90	6.50	7.20
Steinkohle, Importpreis CHF/t	69	92	103	112
Untere Preisvariante in Preisen von 1999	1999	2005	2010	2015
Rohöl fob in$/b	17.84	22	24	25
Rohöl Einfuhrpreise, cif CHF/m3	157.05	195	210	220
Erdgas, Importpreis CHF/GJ	4358	5.30	5.70	6.10
Steinkohle, Importpreis CHF/t	2.41	80.00	82.00	86.00

Quellen dieser Schätzungen sind: IEPE (2000), IEA (2000), Enquête (2000), und Prognos (2001) bzgl. Kohle

- Die Entwicklung der Mineralölsteuer bei den fossilen Brennstoffen ist leicht steigend.
- Die Mehrwertsteuer erhöht sich in den 5-Jahresschritten jeweils um etwa einen Prozentpunkt (2005: 9.1 %; 2010: 10.1 %; 2015: 11 %).
- Die Gaspreise bei den kleinen Gasnutzern folgen der Entwicklung der Heizölpreise nicht in einem relativ festen Preisabstand, sondern etwas langsamer.

Es sei nochmals betont, das CO_2-Abgaben oder Preise für CO_2-Emissionszertifikate in diesen Preisen der Referenz-Entwicklung aus Gründen der Transparenz noch nicht aufgenommen wurden.

b) Energie- und Baupolitik im Referenz-Szenario

Im Bereich der Energie- und Baupolitik wird von folgenden Annahmen (als Referenz-Entwicklung) ausgegangen:

- Die SIA-Empfehlung 380/1 tritt als Rechtsetzungsauftrag an die Kantone in Kraft gemäss Energiegesetz. Die Sanierung von Gebäuden erfolgt wie in den 90er Jahren. Die Kantone fördern in unterschiedlichem Ausmass den Minergiestandard.
- Nach 2010 erfolgt eine weitere Verschärfung der Neubauvorschriften.
- Bei Erneuerungen von Fassaden und Dächern gibt es keine weiteren generellen Auflagen nach 2010.
- Gemäss EnG/Rechtsetzungsauftrag an die Kantone gibt es eine Bewilligungspflicht für neue elektrische Widerstandsheizungen und keine Förderung des Ersatzes von Widerstandsheizungen durch Elektro-Wärmepumpen.
- Die SIA 380/4 regelt die Installation und den Betrieb von Lüftungsanlagen bis 2010, bevor eine neue mit höheren Effizienzanforderungen verbindlich gemacht wird

Tabelle 4.1-2 Untere Preisvariante der Endenergieträger nach einzelnen Verbrauchergruppen in der Schweiz, 1999 - 2015

Untere Preisvariante	1999	2005	2010	2015	1999-2015	1999-2010
					% pro Jahr	
Reale Preisbasis (1999)						
Grosshandelspreise (ohne MWSt)						
Heizöl leicht (CHF/1000 l) [1]	225	310	335	350	2.8	3.7
Heizöl leicht (CHF/1000 l)	150	220	240	245	3.1	4.4
Erdgas (Industrie) (Rp/kWh) [2]	2.8	3.05	3.2	3.4	1.2	1.2
Erdgas (Kraftwerke) (Rp/kWh)	2.1	2.55	2.7	2.85	1.9	2.3
Steinkohle (Kraftwerke) CHF/tSKW)	71	77	79	80	0.75	1.0
Strom (Mittelspannung (Rp/kWh) [3]	14.4	12.0	5)	5)	-	-
Strom (Höchstspannung) (Rp/kWh)						
Haushalte (mit MWSt.)						
Heizöl leicht (Rp/l)	30.7	40.0	43	45.0	2.4	3.1
Erdgas (Rp/kWh)	5.34	5.8	6.1	6.3	1.0	1.2
Strom (Rp/kWh) [4]	19.6	18.5	5)	5)	-	-
Benzin unverbleit (Rp/l)	120.1	132	140	148	1.3	1.4
Diesel (Rp/l)	123.5	135	143	152	1.3	1.34

[1] gewichteter Durchschnitt [2] 11.6 GWh/a [3] 15 GWh/a
[4] Typ III mit Jahresverbrauch von 4500 kWh [5] zu berechnen

Quellen: BFE (2000); IEA (2000); BFS (2000b); OZD (2000); CEPE eigene Annahmen und Berechnungen.

4.1.2 Kosten- und Wirtschaftlichkeitsrechnungen sowie Grenzkostenbetrachtungen aus Sicht der Hauseigentümer, der Immobilienwirtschaft und der Gesamtwirtschaft

Kosten- und Wirtschaftlichkeitsberechnungen bei Erneuerung von Gebäuden oder zusätzlichen Investitionen für Wärmeschutz beim Neubau sind nicht unabhängig vom Investorstandpunkt, sei es der private Bauherr für den Eigenbedarf, der keinen speziellen rechtlichen Regeln für die Kostenermittlung und ihrer Finanzierung unterliegt, seien es private Investoren oder Immobiliengesellschaften, die Abschreibungen und Mietzinsanrechnungen nur nach bestimmten Regeln machen dürfen. Ausserdem unterscheiden sich die Re-Finanzierungsmöglichkeiten von Investitionen über die Mieterträge, die Bewertung von Wertsteigerungen durch Wärmeschutzmassnahmen und steuerliche Aspekte zwischen Neubau und Gebäudeerneuerung. Diese Unterschiede wurden im folgenden bei der Darstellung der Kostenrechnungen und Grenzkostenbetrachtung nicht weiter beachtet. Sie beeinflussen aber die Bewertung des Nutzens von Wärmeschutz- und Energieeffizienz-Investitionen im Detail und müssen daher zielgruppenspezifischen Informationen vorbehalten bleiben.

Hinzu kommt die gesamtwirtschaftliche Perspektive mit geringeren Zinssätzen und ohne Berücksichtigung von Steuern und Subventionen. Auch führen unterschiedliche Methoden der Kosten- und Nutzenberechnung bei den Wirtschaftlichkeitsrechnungen zu unterschiedlichen Kosten- und Nutzenbewertungen (IWU, 2001), die auch von den jeweiligen Investoren und ihrer Nutzeneinschätzung abhängen (z.B. Belz/Egger 2000); in diesem Bericht wurde zur Ermittlung der Kosten die dynamische Methode der Annuitätenrechnung gewählt (vgl. Kap. 4.2 bis 4.4).

a) Investitionskosten und Festlegung des Erneuerungsanteils sowie Definition der Grenzkosten

Bei der *Festlegung der Investitionskosten und des Erneuerungsanteils* durch Wärmeschutz sind folgende Dinge zu beachten:

- Allfällige Instandsetzungskosten gehören i.a. nicht zu den umlagefähigen Modernisierungskosten und werden von den Gesamtkosten der Wärmeschutzinvestition abgezogen.
- Gleiches gilt auch für die "Ohnehin"-Kosten, die auch bei einer Instandsetzung angefallen wären (z.B. für Gerüstaufbau und -miete, die Baustelleneinrichtung oder die Neueindeckung der Dachflächen) und soweit sie für die Wärmeschutzinvestition nicht höher ausfallen würden. Andernfalls wurde die Differenz (z.B. für ein breiteres Gerüst) in Rechnung gestellt.

Ob und in welchem Umfang Instandsetzungskosten berücksichtigt werden müssen, hängt auch vom Erhaltungszustand des Wohngebäudes ab, lässt sich aber nicht einfach vom Baualter des Gebäudes ableiten. In der Literatur findet man gewisse Anhaltspunkte für die Erneuerungsanteile an den Gesamtinvestitionen (vgl. Tabelle 4.1-3). Bei der Dämmung von Dachboden und Kellerdecke gehen die Quellen von gleichen Anteilen der Erneuerung an der Gesamtinvestition aus (100% gelten als Erneuerung, siehe Tabelle 4.1-3), aber beim Fensterersatz gibt es erhebliche Unterschiede. Dies mag darauf zurückzuführen sein, dass man bei diesen Erneuerungen auch unterscheiden muss: Werden z.B. morsche Einscheiben-Fenster durch Wärmeschutzfenster ersetzt, dürfen die um die fiktiven Instandsetzungskosten reduzierten Gesamtkosten mieterhöhend angesetzt werden. Werden dagegen gut erhaltene Wärmeschutzfenster oder eine alte, oft überdimensionierte Heizanlage ausgewechselt, sind die Gesamtkosten nicht auf die Mietzinsen umwälzbar.

Tabelle 4.1-3 Erfahrungswerte des Erneuerungsanteils an der Gesamtinvestition

Wärmeschutzmasnahme	Erneuerungsanteil in % und Literaturquelle		
	IWU	Thermie-Altbau	Schleswig-Holstein
Wärmedämmverbundsystem	30	50	50
Fensteraustausch	25	66	10
Dachbodendämmung	100	100	100
Dämmung der Dachschräge	25	k.A.	15
Kellerdeckendämmung	100	100	100

Quelle: IWU 2001

Aufgrund von Mietgerichtsurteilen besteht in der Schweiz die Möglichkeit, maximal bis zu 70% von Investitionen in die Gebäudehülle auf die Mieten zu überwälzen, die übrigen 30% werden als Instandsetzungskosten betrachtet und sollten aus Rückstellungen der laufenden Mieteinnahmen finanziert werden.

In diesem Bericht wird jeweils so vorgegangen, dass eine *Referenzinvestition* definiert wird, ab der die jeweiligen Zusatzkosten einer energetisch weitergehenden Wärmeschutzinvestition angerechnet werden oder ab der die sogenannte Grenzkostenkurve berechnet wird. Bei der Referenzinvestition kann es sich um energetisch neutrale (z.B. Fassadenanstrich) oder energetisch wirksame (z.B. Fassadendämmung mit einer bestimmten Referenzdämmstärke) Investitionen handeln. Es wird im folgenden zwischen zwei Ansätzen zur Berechnung der Grenzkosten unterschieden, die für verschiedene Anwendungsfelder typisch sind:

- Durchschnittskostenansatz oder durchschnittliche Grenzkosten, typisch für die einzelwirtschaftliche Sichtweise, sowie
- Grenzkosten oder reine Grenzkosten, typisch für die energie- oder gesamtwirtschaftliche Sichtweise.

Beim Ansatz der *"durchschnittlichen Grenzkosten"* werden die Zusatzkosten (jeder Effizienzstufe) gegenüber der Referenz-Investition in Beziehung gesetzt mit dem gegenüber dem Referenzfall gewonnenen Energieeffizienzgewinn, also typischerweise dem verminderten Heizwärmebedarf. Diese durchschnittlichen Grenzkosten werden in aller Regel für die einzelwirtschaftliche Bewertung verwendet (vgl. Kap.4.2 bis 4.5), ganz im Sinne eines Planers, Bauherrn oder einer Investorin, welche verschiede Projektvarianten (in diesem Fall solche zunehmender Energieeffizienz) mit einer Referenzvariante vergleichen. Wegen der einzelwirtschaftlichen Sichtweise enthalten diese Kosten auch Steuern sowie eventuell zu berücksichtigende Subventionen (letztere wurden in diesem Bericht nicht behandelt):

$$Durchschnittliche\ Grenzkosten = \frac{K_i - K_0}{E_i - E_0}\ [CHF/GJ]$$

K = *Kosten*

E = *Energiebedarf des Gebäudes oder Energieverbrauch der Anlagen im Referenzfall (E_0) bzw. für das i-te Effizienzniveau*

Index $_0$ bezieht sich auf die Referenzinvestition

Index $_i$ bezieht sich auf das i-te energetische Effizienzniveau, i=1 bis n

Im Gegensatz zur oben beschriebenen einzelwirtschaftlichen Sichtweise werden die zusätzlichen Kosten ("*Grenzkosten*" oder *reine Grenzkosten*) in der energiewirtschaftlichen Sichtweise als diejenigen Differenzkosten bezeichnet, die bei jeder weitergehenden Wärmeschutzmassnahme gegenüber einer vorangegangenen entstehen; es werden also z.B. die Zusatzkosten zwischen 12 cm und 15 cm und dann zwischen 15 cm und 20 cm jeweils auf die zusätzlichen vermiedenen Energieverluste bezogen (vgl. Kap.5 und 6). Diese Grenzkosten werden aus der gesamtwirtschaftlichen Sicht gesehen, d.h., der Zinssatz ist um die Risiko- und Gewinnkomponente vermindert, und Steuern sowie Subventionen werden prinzipiell nicht berücksichtigt. Der Realzinssatz wird in Orientierung an den Realzinssätzen langfristiger öffentlicher Anleihen mit 3% angenommen.

$$Reine\ Grenzkosten = \frac{K_i - K_{i-1}}{E_i - E_{i-1}} [CHF/GJ]$$

K = *Kosten*

E = *Energiebedarf oder –verbrauch*

Index $_i$ *bezieht sich auf das i-te energetische Effizienznivau, i=1 bis n*

Die Kosten beziehen sich in beiden Fällen auf den gleichen Zeitraum wie die Energieeinsparungen, typischerweise auf ein Jahr. Sie können in beiden Fällen nach verschiedenen Methoden bestimmt werden, z.B. nach der Annuitätenmethode oder nach der Kapitalwertmethode (siehe folgende Unterkapitel). Die beiden beschriebenen Typen von Grenzkosten können sowohl auf der Ebene der Nutzenergie (Wärmebedarf des Gebäudes) wie auch auf Ebene der Endenergie (Energieverbrauch der Anlagen, die den Wärmebedarf decken) berechnet werden.

b) Der annuitätische Gewinn bzw. die Kosten der eingesparten Wärmeenergie zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit einer Wärmeschutzinvestition

Nach gängiger Praxis müssen sich die Wärmeschutz- oder Energieeffizienz-Investitionen an dem Nutzen der eingesparten Energiekosten messen. Rentabel ist eine Investitionsmassnahme nach dieser Bewertungspraxis dann, wenn die gewünschte Energiedienstleistung (ein angenehm temperiertes Gebäude) durch sie nicht teurer erbracht wird als durch den alternativen Energiebezug ohne Durchführung der Massnahme (einschliesslich Zins und Abschreibung für das eingesetzte Kapital).

Diese Betrachtungsweise ist allerdings für die meisten Investitionsmassnahmen und -fälle zu eng, weil auch meistens weitere *nicht-energierelvante Begleitnutzen (Co-Benefits*) mit der Investition verbunden sind (z.B. geringerer Lärm in Dachwohnungen oder belüfteten Wohnungen, verbesserte Einbruchsicherheit oder Innenraumluftqualität, angenehmere Raumtemperaturen in sommerlichen Hitzeperioden, verbesserte Vermietbarkeit des Gebäudes, verbesserte Bonität und Wertsteigerungspotenziale der Immobilie; vgl Kap.4.6).

Bei der *Annuitätenmethode* müssen zunächst die gesamten Investitionskosten der Energieeinsparmassnahme über den Nutzungszeitraum ermittelt werden (vgl. auch SIA 480.20). Zu den Investitionskosten I_{eff} werden alle Kosten für Planung, Baustellenerrichtung, Anschaffung, Baugerüst und Installation eines Systems gezählt, die ausschliesslich als Mehrkosten für den Zweck der Energieeinsparung entstehen. Um sie für die Wärmedämmung eines zuvor nicht gedämmten Gebäudes zu ermitteln, müssen von den insgesamt anfallenden Investitionskosten einer Gesamtmassnahme I_{ges} die Ersatzkosten ohne die Energieeinsparmassnahme (also z.B. ohne Wärmedämmung oder einer Wärmedämmung mit der heute üblichen Referenzdämmstärke) I_o abgezogen werden und ein eventuell bestehender Restwert I_R (z. B. der Restwert des zu entfernenden Verputzes) dazu addiert werden:

$$I_{eff} = I_{ges} - I_o + I_R \qquad \text{(Gl. 4.1)}$$

Die Ermittlung der Investitionskosten der Energieeinsparmassnahme (I_{eff}) wird benötigt, um mittels der Annuitätenmethode den Kapitalwert dieser Investition in gleichbleibende Kapitalkosten (eine Annuität) umzurechnen, d.h. mit Hilfe des Annuitätenfaktors a (Berücksichtigung des geforderten Zinssatzes und der erwarteten Nutzungsdauer der Massnahme).

In den nachstehenden Kosten- und Wirtschaftlichkeitsanalysen wird mit einem *realen Zinssatz* gerechnet; dies ist schon deshalb zweckmässig, weil über einen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten Annahmen zur allgemeinen Inflationsentwicklung hochspekulativ sein dürften. Bei seiner Wahl des zugrunde gelegten Wertes wurde unterschieden zwischen:

- Vollständige Eigenfinanzierung der Investition: der Kalkulationszinssatz sollte den Verzicht auf eine entgangene Alternativanlage (als risikofreie Kapitalanlage) widerspiegeln. Diese wurde hier implizit mit etwas mehr als 3 % für private Hausbesitzer und 5 % für Wohnungsbaugesellschaften unterstellt.
- Eine Mischfinanzierung der Investition: Der Kalkulationszinssatz muss die von den Eigenkapitalgebern geforderte Verzinsung und die durch die anteilige Fremdfinanzierung verursachte Zinsbelastung widerspiegeln, z.B. das gewogene arithmetische Mittel als Eigen- und Fremdkapitalzinssatz, hier mit 5.5 % für Immobilienunternehmen und mit 3% bis 3.5 % für Eigenheimbesitzer und private Einzelgebäudebesitzer und Wohnbaugesellschaften unterstellt. Mit diesen Zinssätzen wurden auch die Berechnungen in diesem Bericht durchgeführt.

Neben den Investitionskosten für Energieeinsparmassnahmen I_{eff} können prinzipiell auch Kosten für Wartung und Hilfsenergie anfallen (z.B. Komfortlüftung, Heizanlage). Im Bereich der reinen Wärmeschutzinvestitionen gibt es solche Unterhaltskosten bei den Fassadensystemen zu berücksichtigen, die für eine verputzte Fassade unterschiedlicher sind als für eine hinterlüftete Fassade. Für diese Zusatzkosten muss unter Zuhilfenahme des Kalkulationszinssatzes ein Barwert bzw. ein Gegenwartswert ermittelt werden, der anschliessend mit dem Annuitätenfaktor multipliziert und in annuitätische Zusatzkosten umgelegt wird. Der Barwert Z kennzeichnet denjenigen Betrag, den der Gebäudeeigner auf die Bank legen müsste, um damit (einschliesslich Zinsen und Zinseszinsen) in jedem Jahr der Nutzungsdauer die Wartungs- und sonstigen Betriebskosten bezahlen zu können. Die gesamten annuitätischen Kosten K der Energiesparmassnahme (oder des Massnahmenpaketes) belaufen sich demnach auf

$$K = I_{eff} \cdot a + Z \cdot a \qquad \text{(Gl .4.2)}$$

Zur Ermittlung der annuitätischen Energiekosteneinsparung E wird in gleicher Weise wie bei den Betriebskosten der Investition vorgegangen: zunächst wird die Wärmekosteneinsparung anhand der nicht erforderlichen Wärmemengen multipliziert mit dem Wärmepreis über die Zeit der Nutzungsperiode ermittelt. Diese Energiekosteneinsparung E entspricht anschaulich dem Betrag, den der Gebäudebesitzer heute auf die Bank legen müsste, um damit (einschliesslich Zinsen und Zinseszinsen) in jedem Jahr der Nutzungsdauer sämtliche Energiekosten bezahlen zu können, die ohne die Energieeinsparinvestition entstanden wären.

E muss anschliessend durch Multiplikation mit dem Annuitätenfaktor in die annuitätische Energiekosteneinsparung B_e umgerechnet werden. Solange von konstanten Wärmepreisen über die Nutzungsperiode ausgegangen wird, ist das Ergebnis von B_e gleich dem Produkt aus jährlicher Energieeinsparung und dem unterstellten Wärmepreis. Geht man von Brennstoffpreissteigerungen von einigen %/Jahr aus und rechnet dann mit Mittelwertfaktoren von z.B. 1.6 (wie z.B. u.a. auch Bürgi&Raaflaub in ihrer Minergie-Gebäude-Untersuchung), erhöht sich der Nutzen deutlich.

Im vorliegenden Bericht werden zunächst die Kosten K pro Bauteil berechnet (und als Bruttokosten der Wärmeschutzmassnahmen bezeichnet) und dargestellt. Anschliessend werden diese den annuitätischen Energiekosteneinsparung B_e gegenüber gestellt, wobei auch die durch die Wärmeschutzmassnahmen möglichen geringeren Investitionen (Neubaufall) bzw. niedrigeren Erneuerungskosten von Wärmeerzeugung und -verteilung berücksichtigt sind (es sind dies die langfristigen Kosten der Wärmeerzeugung und -verteilung).

Der Wärmepreis setzt sich also aus zwei Komponenten zusammen: Energiekomponente: Energiepreis der Heizenergie (Öl, Gas, Strom, Holz, je das langfristigee Mittel) dividiert durch den Jahresnutzungsgrad. Anlagenkomponente: kurz- oder längerfristiger (Erneuerung) Kapitalkostenanteil, welcher bei den Anlagen und bei der Verteilung vermieden werden kann, weil die Anlagen aufgrund des Wärmeschutzes kleiner dimensioniert werden könnnen

Eine Energiespar-Investition ist dann als wirtschaftlich anzusehen, wenn die annuitätischen Energiebereitstellungskosteneinsparungen B_e grösser sind als die Summe aus den annuitätischen Kapital- und Zusatzkosten ($a \cdot I_{eff} + a \cdot Z$). Der auf diese Weise ermittelte annuitätische Gewinn P müsste dann grösser als Null sein. Auf der Basis des annuitätischen Gewinns lassen sich dann für bestimmte Arten von Wärmeschutz- und Effizienz-Investitionen wirtschaftlich optimale Dämmstärken oder wirtschaftlich optimale Investitionskombinationen auswählen. Diese zeichnen sich i.a. durch sehr flache Gewinn-Optima als Funktion des Wärmebedarfs aus, wie auch die Ergebnisse in Kap.4.3 und Kap. 4.4 zeigen.

In den nachfolgenden Kapiteln zeigt sich, dass bei der (unrealistischen) Annahme eines konstanten Wärmepreises viele der heute empfohlenen Massnahmen nicht wirtschaftlich wären und dass auch die Begleitnutzen B_{Co} einigen Wärmeschutzmassnahmen mit herangezogen werden müssen, um bei manchen Investitionen zu einem positiven Gewinnergebnis zu kommen

$$\mathbf{P = B_e - a \cdot (I_{eff} + Z) + B_{Co}} \qquad \textbf{(Gl. 4.3)}$$

Die Wirtschaftlichkeit am annuitätischen Gewinn oder den Kosten der eingesparten Wärmeenergie festzumachen, eignet sich insbesondere dann, wenn die Energiekosteneinsparungen und die Begleitnutzen vom Investor tatsächlich realisiert werden können. Dies gilt in aller Regel im selbst genutzten Wohnungsbau, also im wesentlichen für die Ein- und Zweifamilienhäuser.

Die hier beschriebene Methode der annuitätischen Kosten- und Wirtschaftlichkeitsbestimmung wird in diesem Bericht angewandt; sie ist die einfachste dynamische und sehr transparente Methode. Die angemessenere, aber sehr komplexe und nur fallweise durchzuführende Kapitalwertmethode, die im folgenden Unterkapitel beschrieben ist, konnte hier aus Gründen der Übersichtlichkeit und angesichts des begrenzten Projektbudgets nicht angewandt werden.

c) Die Kapitalwertbetrachtung im Mietwohnungsbau als die angemessene Methode

Für den Mietwohnungsbau muss eine aussagekräftige Wirtschaftlichkeitsbetrachtung anstelle der Energie- bzw. Wärmekosteneinsparungen mögliche Mieterhöhungen, unterschiedliche Finanzierungsmöglichkeiten, eventuelle Subventionen und steuerliche Aspekte der energetischen Erneuerung berücksichtigen. Aufgrund der Komplexität rechtlicher Regelungen für Bestands- und Erneuerungsinvestitionen (Metron 1997), die zudem nach Kantonen auch unterschiedlich sein können, lässt sich die Frage auch der Wirtschaftlichkeit bestimmter Wärmeschutzmassnahmen nicht pauschal beantworten, sondern es bedarf jeweils der individuellen Bewertung nach zwei möglichen Verfahren: der Mehrertrags- oder Gesamtertragsrechnung, die beide auf der Kapitalwertmethode beruhen. Hierbei werden alle Zahlungen auf der Einzahlungs- und Auszahlungsseite, die nach dem Investitionszeitpunkt anfallen, mit dem Kalkulationszinssatz abgezinst. Man erhält auf diese Weise *die Barwerte der Aus- und Einzahlungsreihen*, von dem die Anfangsinvestition abgezogen wird. Ist der berechnete Kapitalwert der Investition grösser Null, ist die Investition vorteilhaft. Bei mehreren Investitionsalternativen ist die Option mit dem grössten Barwert aus Rentabilitätsgründen vorzuziehen. Für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit einer energetischen Erneuerungs-

investition reicht es aus, die Mehrertragsberechnung zu machen, d.h., den Mehrertrag vollständig zur Finanzierung der Investition heranzuziehen und das Ergebnis mit möglichen Investitionsalternativen zu vergleichen (vgl. Naegeli/Wengler 1997; Integrated Fiancial Business Consulting, 1998).

Die *Auszahlungsreihen* setzen sich aus dem eingesetzten Kapital, den Zins- und Abschreibungszahlungen, den Steuerzahlungen und den Zahlungen für Verwaltung und Instandhaltung zusammen:

- Es wird häufig davon ausgegangen, dass ein wesentlicher Anteil der zusätzlichen Kosten für die Energieeinsparinvestitionen fremdfinanziert werden. Bei der Berechnung des Kapitalwertes entspricht die Anfangsauszahlung I_o dem eingesetzten Eigenkapital.
- Der Zinssatz sollte für erstrangig abgesicherte Hypothekendarlehen gewählt werden. Die Abschreibung sollte so gewählt werden, dass die Darlehen nach Ablauf des Betrachtungszeitraums zurückgezahlt sind. Finanzierungen über öffentliche Fördermittel sollten mit berücksichtigt werden.
- Die mit der Erneuerung verbundenen Steuerzahlungen ergeben sich aus zusätzlich möglichen Mieteinnahmen und Absetzungsmöglichkeiten von der Steuer: Absetzbar sind: die Erhaltungsaufwendungen, die Abschreibungen der nachträglichen Herstellungskosten, die Finanzierungsnebenkosten und die Zinszahlungen. Abzugsfähig können bei Liegenschaften im Privatvermögen nach § 30 Abs.2 des Steuergesetzes vom 8. Juni 1997 die Unterhaltskosten, die Versicherungsprämien und die Kosten der Verwaltung durch Dritte sein. Den Unterhaltskosten sind Investitionen gleichgestellt, die dem Energiesparen und dem Umweltschutz dienen. Nicht abzugsfähig sind dagegen wertsteigernde Aufwendungen.

  Die *Abgrenzung zwischen abzugsfähigen Ausgaben und nicht abzugsfähigen Aufwendungen für bauliche Energiesparmassnahmen* erfolgt nach folgenden Regeln:

  i) Voll als ordentliche Unterhaltungskosten abzugsfähig sind Aufwendungen für den Ersatz von bereits bestehenden Anlagen und Einrichtungen, sofern der nach dem heutigen Geldwert bemessene Neuwert der alten, ersetzten Anlagen oder Einrichtungen ungefähr den Kosten der neuen Investition entsprechen.

  ii) Aufwendungen für Massnahmen zur rationellen Energieanwendung und zur Nutzung erneuerbarer Energien sind in den ersten fünf Jahren nach Anschaffung der Liegenschaft zu 50 % und danach zu 100°% abzugsfähig. Derartige Aufwendungen sind beispielsweise die Isolation von Dach, Keller oder Fassaden, die Errichtung eines unbeheizten Windfangs, der Einbau von thermostatischen Heizkörperventilen oder von Wärmeverbrauchsmessern für die einzelnen Bezüger in bestehende Heizanlagen, die Rückgewinnung von Wärme aus Abwasser und Luft, aber auch die Kosten für energietechnische Analysen und Energiekonzepte.

  iii) Erfolgt der Ersatz von veralteten Einrichtungen und die erstmalige Anbringung von neuen Bauteilen oder Installationen (z.B. Wärmedämmung) im Zuge einer Gesamtrenovierung, oder übersteigen die Kosten der Ersatzbeschaffung den nach heutigem Geldwert bemessenen Neuwert der alten, ersetzten Anlage wesentlich, so werden die entstehenden Gesamtkosten nach den vorstehend in i) und ii) genannten Grundsätzen aufgeteilt, d.h., es gibt als Restwert eine nicht von den Steuern abzugsfähige, wertvermehrende Investitionssumme.

  Der *Abzug für die Unterhalts- und Verwaltungskosten* bemisst sich bei vorwiegend Wohnzwecken dienenden Liegenschaften des Privatvermögens entweder aufgrund der

tatsächlichen Aufwendungen in der Bemesseungsperiode oder aufgrund einer Pauschale. Diese Pauschale wird in Prozent des jeweiligen pro Jahr deklarierten Bruttoertrages der Liegenschaft berechnet und beträgt unabhängig vom Gebäudealter 20 Prozent. Aufwendungen für bauliche Wärmeschutzmassnahmen können nicht nebst dem Pauschalabzug geltend gemacht werden.

Bei den *Einzahlungsreihen* ist zwischen Neubau und Gebäudeerneuerung zu unterscheiden.

- Im *Neubaufall* kann der Mietertrag so festgelegt werden, dass die gesamten Kapitalkosten (Investitionen und Abschreibung) re-finanziert werden können, sofern der Mietermarkt solche Mietpreise zulässt. Angesichts der Tatsache, dass sich die Mehrinvestitionen im Bereich von weniger als 10% (Minergie) bis 15% bewegen und ausserdem mit höherem Komfort und geringeren Nebenkosten geworben werden kann, kann mindestens für städtische und Agglomerationsgebiete von der Akzeptanz dieser Mietpreise ausgegangen werden (Neubauten werden eher von zahlungskräftigeren Mietern belegt).
- Im *Erneuerungsfall* gilt grundsätzlich, dass der überwälzbare Anteil einer Gesamtinvestition um so höher ist, je mehr die Investition einen Mehrwert oder Mehrnutzen erzeugt und je weniger die Investition einer Instandsetzung gleichzusetzen ist. Bei einer Gesamterneuerung können nach heute praktizierter Rechtsauslegung bis maximal 70% überwälzt werden. Die von den Mietgerichten noch zu klärende Frage ist, ob der Anteil der Investitionen, die über das energetisch übliche hinausgehen (also bei der Fassade z.B. über 12cm), zu 100% auf die Mieten überwälzt werden können.

Man beachte, dass die eingesparten Energiekosten für den Investor nicht in der Einzahlungsreihe erscheinen. Sie kommen dem Investor nur indirekt zugute, indem mit niedrigeren Nebenkosten bzw. einer niedrigeren Bruttomiete geworben werden kann. In mehreren Studien und politischen Vorstössen wurde auf dieses Investor-Nutzerdilemma hingewiesen (so u.a. in Metron, 1998, Econcept 2002a, Econcept 2002b).

4.1.3 Grenzen und Sensitivitäten der Kosten- und Wirtschaftlichkeitsberechnungen

Viel zu wenig Aufmerksamkeit wird i.a. den Grenzen der Kosten- und Wirtschaftlichkeitsberechnungen geschenkt. Deshalb sei im folgenden auf einige zentrale Aspekte hingewiesen, die letztlich belegen, dass die quantitativen Ergebnisse dieser ökonomischen Methoden qualitativ interpretiert werden müssen, um nicht Fehlentscheidungen aufgrund mechanistischer Zahlengläubigkeit zu treffen.

a) Annahmen zu den Zinssätzen im Grenzkostenprojekt und Sensitivität der Annuität gegenüber Zinssatz und Lebensdauer

In diesem Bericht gelangt die Annuitätenmethode zur Anwendung, wobei mit realen monetären Flüssen gearbeitet wird. Bei der Festlegung der realen Zinssätze ist zwischen den verschiedenen Betrachtungsebenen (einzel- oder gesamtwirtschaftlich) und zwischen den typischen Investorengruppen zu unterscheiden. Die Zinssätze richten sich für private Investoren nach den langfristigen Rendite-Möglichkeiten anderer Anlageformen mit vergleichbarem Risikoprofil und Zeithorizont, typischerweise langfristige Bundesobligationen (private Besitzer) bzw. nach den langfristigen Erträgen, wie sie im Wertpapierbereich möglich wären (Investoren). In Tabelle 4.1-4 sind die in diesem Bericht verwendeten Zinssätze zusammen-gefasst.

Da bauliche Energieeffizienzmassnahmen extrem investitionskosten-intensiv sind, kommt dem Annuitätenfaktor, mit dem die Investitionen in Jahreskosten umgerechnet und mit dem Energieeffizienzgewinn in Beziehung gesetzt werden, eine grosse Bedeutung zu. Die Sensiti-

vität des Annuitätenfaktors hinsichtlich der Annahmen zu Zinssatz und Nutzungsdauer kann in den meisten Fällen mehr oder weniger direkt auf die Grenzkosten übertragen werden, da die Betriebskosten meist sehr gering sind oder nicht von der Energieeffizienz abhängen.

Tabelle 4.1-4 Annahmen zu den verwendeten Realzinssätzen im Grenzkostenprojekt

	Volkswirtschaft	Private Besitzer von EFH (selbstbewohnt) oder kleinen MFH (evtl. selbstbewohnt), oder Genossenschaften	Renditeorientierte Immobilenunternehmen, instutionelle Investoren
Realzinssatz	3%	3.5%	5.5%

Quelle Annahmen CEPE

Abbildung 4.1-1 zeigt, dass sich der Annuitätenfaktor

- bei hohen Lebensdauern (mehr als 40 bis 50 Jahre) asymptotisch dem Zinssatz annähert; der Anteil der Abschreibung wird dann sehr klein und die Kapitalkosten werden von den jährlich zu entrichtenden Zinszahlungen dominiert;
- bei geringen Lebensdauern (weniger als 20 Jahre) rasch anwächst; weil der Anteil der Abschreibung der Investition sichtbar an Einfluss gewinnt.

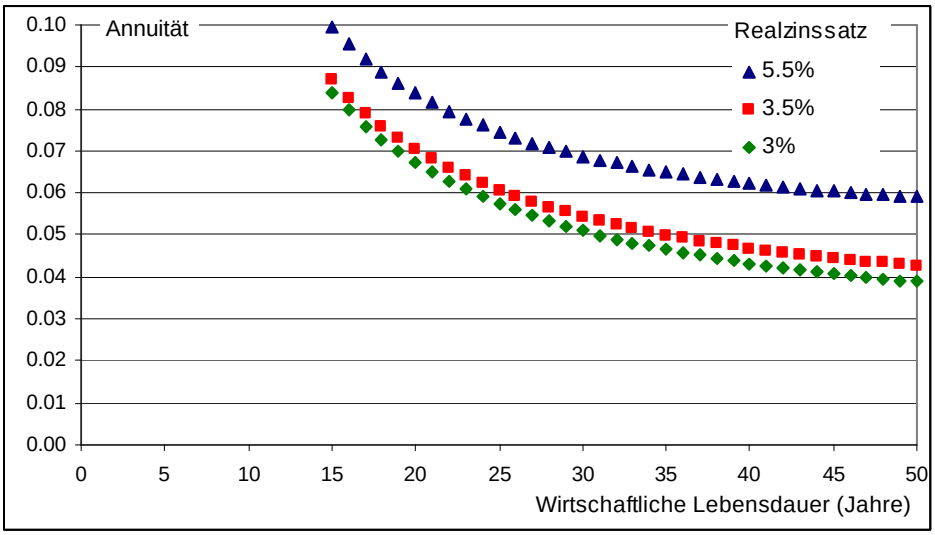


Abbildung 4.1-1 Annuitätsfaktor in Abhängigkeit des Zinssatzes und der wirtschaftlichen Lebensdauer

In Abbildung 4.1-2 wird der Einfluss der Annahme zum Zinssatz aufgezeigt, indem die Annuität bei gegebener Lebensdauer für die Zinssätze 3.5% (EFH) und 5.5% (EFH) mit der Annuität von 3% (gesamtwirtschaftlicher Blickwinkel) verglichen wird. Zwischen 3% und 3.5% besteht kein grosser Unterschied. Der Zinssatz von 5.5% verursacht jedoch *eine deutliche Kostensteigerung, besonders bei langen Lebensdauern*. Bei 15 Jahren ist der 5.5%-Annuitätenfaktor knapp 20% höher als derjenige von 3%, bei 35 Jahren sind es bereits 40% und bei 50 Jahren sind es über 50%. Diese Zusammenhänge gilt es zu beachten, wenn die Ergebnisse der Grenzkosten-analysen in den Kap. 4.2 bis 4.5 sachgemäss bewertet werden sollen: *die Wahl der Zinssätze bei langen Nutzungszeiten ist hochsensitiv auf das Ergebnis, insbesondere bei Abzug des Nutzens.*

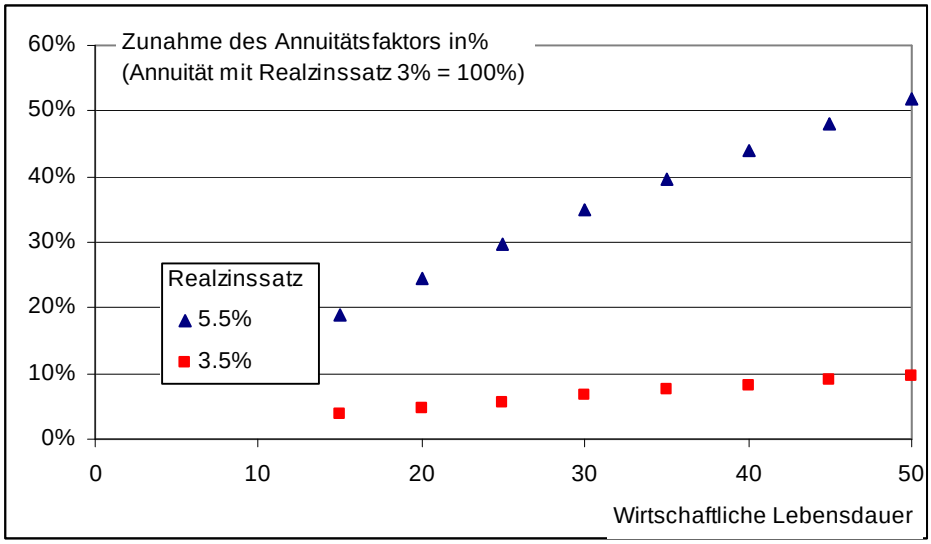


Abbildung 4.1-2 Zunahme der Annuitätsfaktoren in % im Vergleich zum Annuitätsfaktor mit dem Realzinssatz von 3%

In Wirtschaftlichkeitsrechnungen richtet sich die Abschreibung und die Annahme der wirtschaftlichen Lebensdauer nicht immer nach der technischen Nutzungdauer der Investitionen. Wird die wirtschaftliche Lebensdauer z.B. wegen steuerlicher Abschreibungspraxis kürzer als zu erwarten angenommen, steigen die rechnerischen Kapitalkosten und damit die Energieeffizienzgrenzkosten. In Abbildung 4.1-3 wird die Sensitivität des Annuitätsfaktors hinsichtlich der Annahme zur wirtschaftlichen Lebensdauer für die Referenzpunkte 15, 25, 35 und 50 Jahre aufgezeigt. Wird zum Beispiel eine Fassadeninvestition auf 35 Jahre abgeschrieben, obwohl sie eigentlich eine Lebensdauer von 50 oder mehr Jahren hat, werden die Grenzkosten um 10% (Realzins 5.5%) bzw. um ca. 20% (Realzins 3.5%) überschätzt.

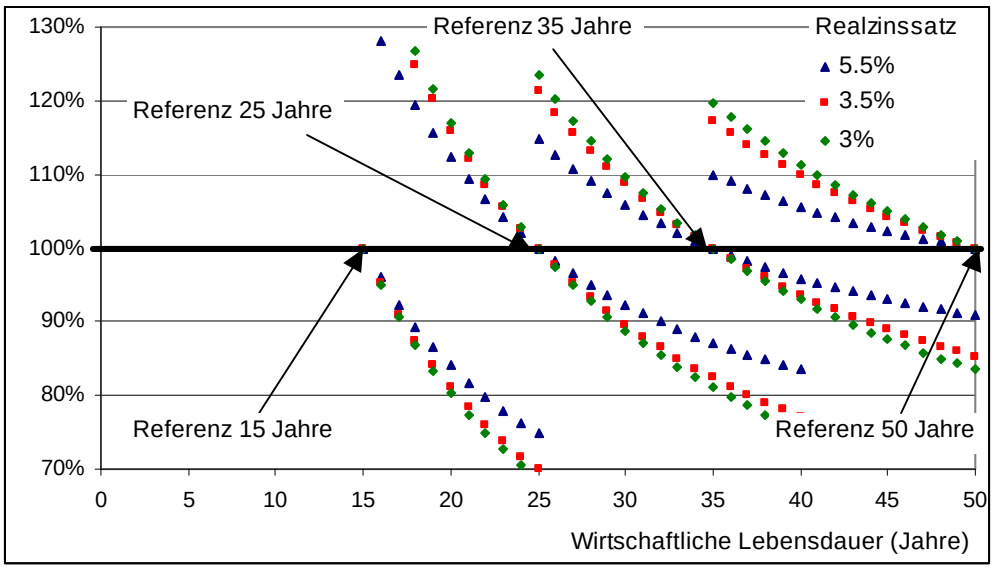


Abbildung 4.1-3 Sensitivität des Annuitätsfaktors hinsichtlich der Annahme der wirtschaftlichen Lebensdauer (100%=Annuitätsfaktor der jeweiligen Referenzlebensdauer)

b) Grenzen der Kosten- und Wirtschaftlichkeitsberechnungen

Bei den nachfolgenden Ergebnissen der Grenzkosten und Wirtschaftlichkeitsberechnungen sollte auch beachtet werden, dass auch dynamische Kosten- und Wirtschaftlichkeitsrechnungen zur Beurteilung von Energieeffizienzmassnahmen Grenzen haben, weil sie von bestimmten Annahmen ökonomischer und energiewirtschaftlicher Rahmenbedingungen ausgehen und manche Investitionsentscheidungen auch durch nicht ökonomische Sachverhalte, sondern durch Präferenzen der Investoren oder beratenden Planer und Handwerker beeinflusst werden können:

- Die Unsicherheiten betreffen nicht zuletzt die Annahmen zur Entwicklung der Energiepreise oder zu den realen Zinssätzen (siehe oben), so dass die annuitätischen Gewinne bzw. Nettokosten qualitativ interpretiert und die Ergebnisse bzgl. ihrer Sensitivität bewertet werden müssen.
- Die ermittelten Rentabilitäten sagen noch nicht unbedingt etwas über ihre Realisierbarkeit aus; denn fehlende Überwälzungmöglichkeiten zur Refinanzierung der Investitionen aufgrund des Mietrechts (Graf/Sager, 1998), aufgrund von Finanzengpässen der Investoren, tradierten Entscheidungsmustern einer speziellen Gruppe von Gebäudebesitzern, von Komfort- oder Imagegründe sowie Wertsteigerungspotenzialen oder Vermietbarkeitserwartungen mögen die Entscheidungen mit beeinflussen (s.u.).
- Selbst wenn die Begleitnutzen (vgl. Kap. 4.6) in eine erweiterte Wirtschaftlichkeitsberechnung miteinbezogen werden, hat die aus einzelwirtschaftlicher Sicht ermittelte Rentabilität der betrachteten Investition aus wohlfahrtsökonomischer Sicht die Grenze einer Partialbetrachtung, da die mit der Investition vermiedenen externen Kosten nicht berücksichtigt werden. Da diese durchaus zwischen 3 und 10 Rp/vermiedene kWh liegen können, zeigt sich die Begrenzung der einzelwirtschaftlichen Bewertung überdeutlich, die den für die Volkswirtschaft langfristigen Nutzen um einen Faktor zwei unterschätzen kann (vgl. auch Kap. 4.7).

4.2 Methodik und Grundlagen zur Bestimmung des energetischen Nutzens der Energieeffizienz-Investitionen

Die energetische Wirkung der Energie-Effizienzinvestitionen kann zunächst auf Ebene der einzelnen Bauteile bestimmt werden, um so Hinweise zur Paketbildung der zu treffenden Investitionen in den einzelnen Bereichen zu erhalten. Zur abschliessenden Beurteilung der spezifischen Kosten der Energieeffizienz muss die energetische Wirkung jedoch im Kontext des gesamten Gebäudes gesehen werden:

Die verschiedenen baulichen Massnahmen können sich gegenseitig beeinflussen. Dies gilt insbesondere für das Bauteil Fenster, wo die Wärmegewinne erst im Gebäudekontext beurteilt werden können. Das gilt im besonderen Mass für hoch effiziente Gebäude (Stichwort Ausnutzungsgrad freie Wärme).

Nicht-homogene Bauteile und Randphänomene können Störungen des flächenbasierten Transmissionsverlusts (Wärmebrücken) verursachen, welche bei der Berechnung mit punkt- oder linienförmige Zuschläge berücksichtigt werden. Diese Zuschläge sind relativ gesehen umso bedeutungsvoller – und damit für die Grenzkostenbetrachtung von Relevanz, je energieeffizienter die betrachteten Bauteile sind.

Das neue Berechnungsverfahren der SIA-Norm 380/1 trägt diesen Umständen Rechnung, indem die Energiebilanzen monatlich berechnet werden und die Wärmebrücken nicht mehr pauschal behandelt, sondern mittels Rechenwerten berücksichtig werden. In diesem Zusammenhang veröffentlicht das Bundesamt für Energie (BFE) eine neue Version des Wärmebrückenatlas (zu erscheinen September 2002.). Im Rahmen eines EU-Forschungsprogramms, an dem auch die EMPA beteiligt war, wurde EUROKOBRA, eine entsprechende Software entwickelt, die bei der EMPA erhältlich ist.

Im einzelnen kommen in den späteren Kapiteln der Grenzkostenberechnungen energie- und bauphysikalische Grundlagen zur Anwendung.

4.2.1 Aussenwärmedämmung mittels hinterlüfteter Fassaden

Die energetische Wirkung wird gemäss Richtlinien des SFHF ermittelt, wobei zwischen Holz-, Holz-Metall und Metall-Unterkonstruktionen unterschieden wird.

4.2.2 Aussenwärmedämmung mit Kompaktfassaden

Im Erneuerungsfall und ab höheren Dämmstärken auch im Neubaufall ist die energetische Wirkung der mechanischen Befestigungen, der Dübel, zu berücksichtigen (Tabelle 4.2-1).

Der Einfluss der Thermodübel in Funktion des abnehmenden U-Wertes bleibt in etwa konstant, solange gleichviel Dübel/m^2 verwendet werden; die Unterschiede der Differenzen in der Tabelle sind auf Rundungsphänomene zurückzuführen.

Tabelle 4.2-1 U-Werte ohne bzw. mit Berücksichtigung der Wärmebrücken durch Kompaktfassadenbefestigungen (Fallbeispiel Thermodübel)

		10 cm	12 cm	14 cm	16 cm	18 cm	20 cm
Ytong-SuperTherm 17.5	Theoretisch, ohne WB	0.25	0.22	0.19	0.17	0.16	0.14
	Gemäss SIA 180, 6 TD/m²	0.26	0.23	0.21	0.19	0.17	0.16
Backsteinwand 32 cm	Theoretisch, ohne WB	0.27	0.23	0.20	0.18	0.17	0.15
	Gemäss SIA 180, 6 TD/m²	0.28	0.25	0.22	0.20	0.18	0.17
WB: Wärmbrücken, TD: Thermodübel							

Quelle: Flumroc-Docu2001/2002

4.2.3 Fensterleibungen

Die energietechnischen Beschreibungen des Fensters hat den Fensterrahmen zur Systemgrenze, ohne Berücksichtigung der Einbausituation. Andererseits berücksichtigt der flächenbasierte U-Wert der Wand bzw. der Aussenwärmedämmung ungedämmte oder schwächer gedämmte Leibungen nicht. Deshalb sind – insbesondere bei hohen Dämm stärken – folgende Zuschläge zu berücksichtigen.

Tabelle 4.2-2 Lineare Wärmebrückenverluste Psi W/mK für unterschiedliche Einbausituationen mit üblichem Fensteranschlag innen

	Mauerwerk/Anschlag: Backstein Lambda 0.43 W/mK			Mauerwerk/Anschlag: Stahlbeton		
	Dämmung Fensterleibung					
	4 cm	2 cm	0 cm	4 cm	2 cm	0 cm
U-Wert Wand W/m²K	**Psi W/(mK)**	Psi W/(mK)	Psi W/(mK)	Psi W/(mK)	Psi W/(mK)	Psi W/(mK)
0.4	**0.09**	0.11	0.18	0.15	0..20	0.56
0.3	**0.10**	0.13	0.20	0.16	0.22	0.60
0.2	**0.12**	0.15	0.23	0.18	0.24	0.63
0.15	**0.13**	0.16	0.25	0.19	0.26	0.66
0.13	**0.14**	0.17	0.26	0.20	0.27	0.67

Wie aus Tabelle 4.2-2 ersichtlich ist, hat der Lambda-Wert der Wand einen grossen Einfluss auf die linearen Psi-Werte; bei zunehmender Dämmstärke **steigt** der lineare Wärmeverlust. Das bedeutet, dass die Wirkung der Wärmedämmung (über die ganze Fassadenfläche gemittelt) weniger stark ist, als es aufgrund der Dämmstärke zu erwarten wäre. Dies gilt besonders, wenn die Leibung gar nicht oder mit nur 2 cm gedämmt ist. Besonders gross sind die linearen Wärmeverlustwerte, wenn eine Leibung aus Stahlbeton nicht gedämmt wird. Die Situation der linearen Wärmeverluste kann verbessert werden, wenn zwischen Mauerwerkanschlag und Fensterrahmen eine 10 oder 20 mm dicke PU- oder Holzfaserplatte angebracht wird oder wenn verbesserte, d.h. gedämmte Fensterrahmen zur Anwendung kommen. Die dann anzunehmenden linearen Psi-Werte sind in Tabelle 4.2-3 aufgeführt.

Tabelle 4.2-3 Lineare Wärmebrückenverluste Psi (W/mK) für unterschiedliche Einbausituationen mit üblichem Fensteranschlag innen, mit PU oder Holzfaserplatte zwischen Anschlag und Fensterrahmen oder mit verbesserten Fensterrahmen-U-Werte

	Mauerwerk/Anschlag: Backstein Lambda 0.43 W/mK			Mauerwerk/Anschlag: Stahlbeton Lambda 2.0 bis 2.5W/mK		
	Dämmung Fensterleibung					
	4 cm	2 cm	0 cm	4 cm	2 cm	0 cm
U-Wert Wand W/m²K	**Psi W/(mK)**	Psi W/(mK)	Psi W/(mK)	Psi W/(mK)	Psi W/(mK)	Psi W/(mK)
0.4	**0.07**	0.09	0.16	0.11	0.17	0.48
0.3	**0.09**	0.11	0.18	0.13	0.18	0.54
0.2	**0.11**	0.13	0.21	0.14	0.21	0.58
0.15	**0.12**	0.14	0.22	0.16	0.22	0.60
0.13	**0.12**	0.15	0.23	0.17	0.24	0.62

Die in Tabelle 4.2-2 und Tabelle 4.2-3 fett gedruckten Werte treffen auch auf den Neubaufall zu. Besonders bei Konstruktionen aus hoch wärmeleitenden Materialen (Beton oder Stahlbeton) schlagen die linearen Verluste der Leibungen markant zu Buche, dies umso mehr, je stärker die angrenzende Fläche gedämmt ist.

Tabelle 4.2-4 Lineare Wärmebrückenverluste Psi in W/mK beim Anschlag des Fensters bündig Aussenkante Mauerwerks, WD mindestens 4 cm über den Fensterrahmen gezogen

	U-Wert Fensterrahmen		
	1.44 W/m²K	1.1 W/m²K	0.8 W/m²K
U-Wert Wand W/m²K	Psi W/(mK)	Psi W/(mK)	Psi W/(mK)
0.4	0.07	0.05	0.04
0.3	0.08	0.06	0.05
0.2	0.09	0.07	0.06
0.15	0.10	0.08	0.07
0.12	0.11	0.09	0.08

Quellen: SIA Doku 0170, PM Th. Frank, EMPA, Berechnungen mit Eurokobra (CEPE)

Anhand der typischen Werte für die Länge Leibungen pro Fassadenfläche kann die energetische Bedeutung dieser linearen Zuschläge auf die Fläche umgerechnet werden (siehe Tabelle 4.2-5). Damit kann die relative Bedeutung der linearen Wärmeverluste für die verschiedenen Situationen abgeschätzt werden.

Tabelle 4.2-5 Gewichtete U-Werte W/m²K von Fassadenaussenwärmedämmungen unter Berücksichtigung der Dämmstärke der Fensterleibungen

Dämmstärke cm	Ohne Fensterleibung		Leibungslänge / Fassadenfläche					
	Theoretischer U –Wert der Fassade ohne Thermodübel	U –Wert der Fassade unter Berücksichtigung der Thermodübel	0.15 m/m²			0.45 m/m²		
			Dämmstärke Leibung			Dämmstärke Leibung		
			4 cm	2 cm	0 cm	4 cm	2 cm	0 cm
10	0.27	0.28	0.30	0.30	0.31	0.33	0.34	0.37
14	0.20	0.22	0.24	0.24	0.25	0.27	0.29	0.32
20	0.15	0.17	0.19	0.19		0.23	0.24	
30	0.11	0.12	0.14			0.18		
Annahme zur U-Wert Berechnung: Dämmstoff mit Lambda=0.035 W/mK								

Quellen: SIA Doku 0170, Berechnungen mit Eurokobra (CEPE)

Wie aus der Tabelle 4.2-5 ersichtlich ist, kann der Einfluss der schwach oder nicht gedämmten Leibung die Wirkung einer Aussenwärmedämmung erheblich schwächen. Der Effekt wird umso bedeutungsvoller, je besser die Wand gedämmt ist.

Tabelle 4.2-6 Gewichtete U-Werte W/m²K von Fassadenaussenwärmedämmungen bei Berücksichtigung des Fensteranschlags aussen (WD mind. 4 cm über Fensterrahmen gezogen)

Dämmstärke cm	Ohne Berücksichtigung Fensterleibung		Anschlusslänge / Fassadenfläche			
			0.15 m/m²		0.45 m/m²	
	Theoretischer U –Wert der Fassade ohne Thermodübel	U –Wert der Fassade unter Berücksichtigung der Thermodübel	U-Wert-Fensterrahmen			
			1.44	0.8	1.44	0.8
			Resultierender gewichteter U-Wert			
12	0.28	0.30	0.31	0.31	0.34	0.32
18	0.20	0.21	0.22	0.22	0.25	0.24
24	0.15	0.17	0.18	0.18	0.21	0.20
30	0.12	0.13	0.15	0.14	0.18	0.17

Quellen: SIA Doku 0170, Berechnungen mit Eurokobra (CEPE)

Auch beim Fensteranschlag aussen am Mauerwerk können die linearen WB-Zuschläge merklich ins Gewicht fallen, wenn die Anschlusslängen pro Fassadenfläche hohe Werte annehmen. So ist bei einer Anschlusslänge von 0.45m/m² der resultierende U-Wert bei einer Dämmstärke von 30 cm nur 0.18 W/m²K statt 0.13 W/m²K, wenn die Anschlusszuschläge nicht berücksichtigt worden wären. Es ist bei grossen Fensterflächen im Neubau also darauf zu achten, dass die Fensterflächeneinteilung so gewählt wird, dass möglichst wenig Anschlusslaufmeter entstehen.

4.2.4 Balkonplatten

Bei einem Teil des Gebäudebestandes vor allem aus der Bauperioden 1960 bis 1975 (z.T. auch früher oder später) wurde die Balkonplatte durchgehend betoniert. Dies ist ebenfalls mittels linearer Wärmebrückenverluste zu berücksichtigen.

Tabelle 4.2-7 Lineare Wärmebrückenverluste einer Platte in Wand mit Aussenwärmedämmung

	Psi W/mK
Durchgehend betoniert mit Baustahlkorbeinlage	0.7
Mit gedämmter Baustahlkorbeinlage (d>= 4 cm)	0.5
Durchgehend betoniert mit Edelstahlkorbeinlage	0.5
Mit gedämmter Edelstahlkorbeinlage (d>= 4 cm)	0.3
Mit gedämmter Edelstahlkorbeinlage (d>= 8 cm)	0.2

Quellen: SIA Doku 0170, Berechnungen mit Eurokobra (CEPE)

Nur die untersten zwei Konstruktionen der Tabelle 4.2-7 halten den Grenzwert des Bauteilnachweises ein. Die oberen Werte sind möglich, wenn der Grenzwert des Gebäudes mittels Systemnachweis eingehalten wird.

In folgenden Situationen ist dieser WB-Zuschlag von Bedeutung:

- Neubau: Im Referenzfall ist damit zu rechnen, dass ein Teil der Neubauten solche Konstruktionen enthält (kontrollierte WB). Um die tiefen Energiebedarfe, insbesondere den Passivhausstandard zu erreichen, sind Konstruktionen gemäss Tabelle 4.2-7 zu vermeiden (Grundsatz des wärmebrückenfreien Konstruierens).
- Erneuerung bzgl. erreichbares Energieeffizienzniveau: Konstruktionen der Art wie in Tabelle 4.2-7 aufgeführt – insbesondere die obersten –, tragen dazu bei, dass bestehende Gebäude sehr häufig nicht auf die beim Neubau möglichen sehr tiefen Energiebedarf gebracht werden können.

Erneuerung, Grenzkostenansatz: Im Gegensatz zu den Fensterleibungen ist der lineare Wärmebrückenverluste nicht (kaum) zunehmend mit der Dämmstärke der Aussenwärmedämmung. Bei einer Differenzbetrachtung – und das ist der Grenzkostenansatz – entsteht deshalb bzgl. der Höhe der spezifischen Effizienzkosten kein Fehler, wenn die Bedeutung der Betonplatten wegen ungenügender Datengrundlagen nicht absolut richtig eingeschätzt wird (hingegen kann sich die Grenzkostenkurve parallel zur x-Achse der Energieeffizienz verschieben). Die Balkonwärmebrücken könnte auch durch wärmetechnische oder konstruktive Massnahmen vermindert oder durch den Ersatz von Balkonen vermieden werden, siehe dazu die Kosten- und Nutzenbetrachtungen im Kapitel 4.3.10.

Abschätzung der energetischen Bedeutung sowie der Bedeutung für den Grenzkostenansatz: Der Pretest einer Umfrage bei Gebäudebesitzern und Liegenschaftsverwaltungen zum Erneuerungsverhalten ergab folgende Gebäudeanteile mit Balkon: MFH 72%, EFH 56%. (Jakob et al. 2002). Für die gesamtschweizerische Hochrechnung werden Balkonlängen pro Fassadenfläche wie folgt geschätzt (Tabelle 4.2-8):

Tabelle 4.2-8 Geschätzte spezifische Balkonlängen und auf die Fläche umgelegter linearer Wärmeverlust

	Balkonlänge / Fassadenfläche$_{netto}$ [m/m²]	Zuschlag zum U-Wert bei durchgehender Betonierung der Balkonplatte bei Umlegung auf die Fassadenfläche
Durchlaufende Balkone	0.1 bis 0.3	0.07 bis 0.21 W/m²K
Einzelbalkone	0.03 bis 0.1	0.02 bis 0.07 W/m²K

Quelle Annahmen und Berechnungen mit Eurokobra (CEPE)

Die Werte in Tabelle 4.2-8 sind mit den typischen U-Werten der Aussenwärmedämmungen zu vergleichen, die im Referenzfall rund 0.3 W/m²K betragen. Der minimal erreichbare durchschnittliche U-Wert kann also markant höher liegen, z.B. 0.33 W/m²K statt 0.12 W/m²K bei 30 cm Wärmedämmung im schlechtesten Fall.

4.2.5 Anschluss Flachdach

Siehe dazu die Ausführungen direkt im in Kapiteln 4.3.8h) und 4.3.8i).

4.2.6 Natürlicher Luftwechsel und Lüftungsanlagen

Um den Energieeffizienz-Gewinn der Lüftungsanlagen zu bestimmen, sind zunächst **Referenzsituationen** und deren thermisch wirksamen Luftströme zu definieren. Der Luftwechsel eines Gebäudes wird im wesentlichen von folgenden beiden Faktoren bestimmt:

- Lüftungsverhalten der BewohnerInnen, individuell verschieden und abhängig von den internen Quellen der Luftqualitätsbeeinträchtigung (Gerüche, Feuchtigkeit – u.a. abhängig von der Personenbelegung, dem Dusch- und Kochverhalten –, sowie Wohngifte aus Möbeln, Baumaterialien etc.)
- Qualität der Gebäudehülle (Dichtheit), Gebäudeform (Höhe) und Lage (Wind)

Der Luftwechsel weist von Gebäude zu Gebäude eine sehr hohe Varianz auf. Die untere Grenze der Lufterneuerungsraten wird meistens vom erstgenannten Punkt bestimmt (ist das Gebäude für das Wohlbefinden oder das Empfinden zu dicht, wird im allgemeinen verstärkt gelüftet, sei das mittels Stosslüftung oder Kippfenster bzw. es sollte verstärkt gelüftet werden). Die Dimensionierung der Lüftung, sei diese natürlich oder mechanisch, sollte sich an diesem erstgenannten Punkt orientieren. Die obere Grenze wird von der Qualität der Gebäudehülle bestimmt (es sei denn, es handelt sich um sehr dichte, meistens neue Gebäude) und kann sehr hohe Luftwechselraten umfassen.

Leider gibt es für die Schweiz keine statistisch repräsentative Messkampagnen über die Luftwechsel von Wohngebäuden, weder für Neubauten noch für den Gebäudebestand und weder für Gebäude mit Lüftungsanlagen noch für solche ohne Lüftungsanlagen.

Beim Neubau folgen wir bei der Definition des Referenzfalls **nicht** vollumfänglich dem relativ tiefen Wert der neuen Version der Berechnungsnorm 380/1, denn dieser Wert bezieht sich lediglich auf das lufthygienische Minimum und auf die wünschbare Dichtheit des Gebäudes. In der Realität ist damit zu rechnen, dass der Lüftungsverlust nicht zuletzt aufgrund des Lüftungsverhaltens der Bewohner und der realen Bauausführung höher liegt. Diese Annahme deckt sich auch mit einem groben Quervergleich mit der Energiekennzahluntersuchung in 13 Kantonen; setzt man an allen Stellen des Energienachweises die von den Unternehmen genannten Dämmstärken bzw. die Fensterqualitäten sowie den tiefen Luftwechsel nach der neuen Norm ein, ist das Ergebnis zu tief im Vergleich zur Energiekennzahluntersuchung. Nebst dem Warmwasser, dem Wärmeschutz (Dämmstärken, Ausführung etc.), den realen Nutzungsgraden der Heizanlagen und der unbekannten Gebäudehüllziffer ist der reale Luftwechsel mit grosser Wahrscheinlichkeit ein markanter Mitgrund für die festgestellte Streuung und die Abweichung vom erwarteten Wert anhand des Energienachweises [1].

[1] Eine genaueren Zusammenhang zwischen der Bauweise, dem Nutzerverhalten und dem Energiebedarf der Gebäude wird möglicherweise eine derzeit anlaufende Untersuchung des BFE liefern, welche als Folge der EKZ-Erhebung von Neubauten (Wüest und Partner, 2000) initiiert wurde.

Der Luftwechsel für Neubauten ist tiefer anzusetzen als in der alten Version der Berechnungsnorm 380/1, denn es ist heute von einer tieferen Personenbelegung auszugehen; der Luftwechselbedarf hängt ja nicht zuletzt von der Personenbelegung ab. Wird pro Person ein Minimum von 20 m^3/h/Person veranschlagt, ergibt sich bei einer Personenbelegung von 30 m^2_{EBF}/Person ein minimaler durchschnittlicher Volumenstrom von 0.67 (m^3/h)/ m^2_{EBF}. Rein aus dem Bedürfnis der BewohnerInnen (und unabhängig von der Dichtheit der Gebäudehülle) kann der Volumenstrom aber auch gut das Doppelte betragen und bei Rauchern gar das Drei- oder Mehrfache. Laut Expertenschätzung beträgt der Luftwechsel neuer Gebäude 10 bis 40 (m^3/h)/Person, was bei der Personenbelegung der EFH von 60 m^2/Person (SIA $380/1_{2001}$) einem Volumenstrom von 0.17 bis 0.67 (m^3/h)/m^2_{EBF} und bei MFH bei 40 m^2/Person einem solchen von 0.25 bis 1.0 (m^3/h)/m^2_{EBF}.entspricht.

Beim Gebäudebestand ist der Referenzfall noch schwieriger zu definieren, denn die heutigen Lufterneuerungsraten bzw. -volumenströme im Gebäudebestand weisen eine noch höhere Varianz auf als Neubauten. Laut Expertenschätzungen betragen die Luftwechsel von alten EFH mit alten Fenstern 1/h bis 20/h, solche von EFH mit ersetzten Fenstern 0.3/h bis 2/h. Ein Hinweis zur möglichen Streubreite ergibt auch eine europäische Messkampagne bei Bürogebäuden mit natürlichem Luftwechsel, d.h. ohne Lüftung (obwohl natürlich Bürogebäude nicht eins zu eins auf Wohngebäude übertragen werden können, ergibt dies trotzdem einen nützlichen Hinweis): Bei einem Mittel von 0.5/h waren 20% der Gebäude über 1/h und 20% unter 0.2/h.

Tabelle 4.2-9 Luftwechsel und thermisch wirksame Volumenströme für die verschiedenen Referenzfälle (ohne Lüftungsanlage)

	Thermisch wirksamer Volumenstrom (m^3/h) / m^2_{EBF}		Luftwechsel 1 / h	
	tief	hoch	tief	hoch
Neubau EFH	0.8	1.0	0.35	0.45
Neubau MFH	0.8	1.12	0.35	0.5
Bestehende EFH, alte Fenster	1.1	1.8	0.5	0.8
Bestehende EFH, neue Fenster(nach 1990)	0.9	1.3	0.4	0.6
Bestehende MFH, alte Fenster	1.3	2.2	0.6	1.0
Bestehende MFH, neue Fenster (nach 1990)	1.1	1.6	0.5	0.7
Raumhöhe brutto 2.7 m bis 2.8 m, $Volumen_{netto}/Volumen_{brutto}$=0.8				

Quelle HTA Luzern, LESO-PB, EPFL, Annahmen CEPE

Wir gehen im Grenzkostenprojekt von den Ansätzen gemäss Tabelle 4.2-9 aus. Hierbei handelt es sich mangels verfügbarer empirisch abgestützter Werte um Schätzwerte. Die angegebene Spannbreite deckt dabei nur einen kleinen Teil der möglichen Streubreite ab, vermutlich nur rund die Hälfte bis zwei Drittel der Gebäude dürfte in die angegebenen Bereiche fallen. Die Verteilung gegen oben dürfte sehr langschwänzig sein.

Tabelle 4.2-10 Heizwärmebedarf (MJ/m²a) aufgrund des Lüftungswärmeverlusts Q_V

	tief	hoch
Neubau EFH	80	103
Neubau MFH	80	115
Bestehende EFH, alte Fenster	111	184
Bestehende EFH, neue Fenster(nach 1990)	89	138
Bestehende MFH, alte Fenster	133	230
Bestehende MFH, neue Fenster (nach 1990)	111	161

Quelle Berechnungen CEPE gemäss Annahmen in Tabelle 4.2-9, HGT=3717

Durch den Einsatz einer Komfortlüftung können die Lüftungswärmeverluste reduziert werden. Dies senkt den Heizwärmebedarf gemäss SIA-Norm 380/1. Der für den Nachweis massgebende thermisch wirksame Aussenluft-Volumenstrom (V_{th}) berechnet sich für Lüftungen mit WRG (u.a. auch Komfortlüftungen) nach folgender Formel:

$V_{th} = 0.12\ (m^3/h)/m^2 + V_m/EBF \cdot (1 - eta_{WRG}) \cdot b/168$ neue, dichte Fenster

$V_{th} = 0.3\ (m^3/h)/m^2 + V_m/EBF \cdot (1 - eta_{WRG}) \cdot b/168$ alte, undichte Fenster

mit

V_m mittlere geförderte Luftmenge in m^3/h,

eta_{WRG} Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung

b Betriebsstunden in h/Woche

EBF Energiebezugsfläche

Die Konstante von 0,12 $(m^3/h)/m^2$ in der obigen Formel steht für den „Aussenluft-Volumenstrom aufgrund der Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle" und drückt aus, dass in der Realität nicht 100% des Aussenluftwechsels über die Lüftungsanlage läuft. Die Gebäude sind nicht zu 100% winddicht und ein Teil des Luftwechsels entsteht ganz natürlich durch das beim Ein- und Ausgehen von Personen durch die Türen. In bestehenden Gebäuden ist diese Grundkonstante höher anzunehmen. Die HTA Luzern schätzt den Wert bei Gebäuden mit alten, undichten Fenstern auf 0.3 $(m^3/h)/m^2$ [HTA Luzern 2001].

Im Neubaufall kann der thermisch wirksame Aussenluft-Volumenstrom durch den Einsatz eines Luft-Erd-Registers (LER) reduziert werden. Der Anteil des thermisch wirksamen Volumenstroms, der über die Lüftungsanlage und damit über das LER läuft, wird um 20% reduziert. Die Berechnungsformel lautet in diesem Fall:

$V_{th} = 0.12\ m^3/m^2 h + V_m/EBF \cdot (1 - eta_{WRG})\ 0.8 \cdot b/168.$

Bei Abluftanlagen und automatischer Fensterlüftung lautet die Formel für den thermisch wirksamen Aussenluft-Volumenstrom wie folgt:

$V_{th} = V_m/EBF \cdot b/168$ neue, dichte Fenster

$V_{th} = 0.2\ m^3/m^2 h + V_m/EBF \cdot b/168$ alte, undichte Fenster

Für den Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung gelten folgende Standardwerte: Komfortlüftung mit Gegenstrom- oder Rotor-Wärmetauscher 80%; Kreislauf-Verbundsystem 60%; Komfortlüftung mit Kreuzstrom-Wärmetauscher und Komfortlüftung mit Wärmepumpe 55%, Einzelraum-Komfortlüftung 50%.

Die mittlere geförderte Luftmenge V_m ist von der Anzahl der zu lüftenden Zimmer, vom Anlagetyp und von den Betriebstunden abhängig. Das Minergie-Themenblatt Lüftungen empfiehlt die mittleren Aussenluftvolumenströme V_m gemäss Tabelle 4.2-11.

Tabelle 4.2-11 Aussenluft-Volumenströme pro Zimmer m^3/h

	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Mittel	eta $_{WRG}$
Komfortlüftung zentral, mit WRG				30	0.80
Komfortlüftung pro Wg, mit WRG *	20	30	45	26	0.80
Komfortlüftung mit WRG und WP	25	40	50	33	0.55
Einzelraum-Komfortlüftung	20	30	45	26	0.50
Abluftanlage ohne WP				40	
Abluftanlage mit Wärmepumpe				40	
Automatische Fensterlüftung				50	

Quelle HTA Luzern

Mit der Annahme, dass EFH rund 5 1/2 Zimmer bei einer EBF von 170 m^2 aufweisen und MFH im Mittel 3 bis 4 Zimmer-Wohnungen bei einer mittleren EBF von 97 m^2, lassen sich die zu fördernden Luftmengen (Vm) pro EBF sowie thermisch wirksamen Aussenluftvolumenströme Vth pro EBF berechnen – dies unter Berücksichtigung der WRG-Wirkungsgrade in Tabelle 4.2-11 – und mit den Standardwerten der alten bzw. neuen SIA-Berechnungsmethode 380/1 vergleichen. Diese Standardwerte gelten für den Fall, in dem keine Lüftungsanlage eingebaut wird und dient als Referenz für die Grenzkostenbetrachtung.

Es fällt auf, dass die Aussenluftströme der sogenannten Komfortlüftungsanlagen (mit Zu- **und** Abluft) vergleichbare bzw. leicht höhere Aussenluftströme aufweisen als im Referenzfall ohne Lüftung (berechnet nach alter bzw. neuer SIA-Berechnungsmethode). Die thermisch wirksamen Aussenluftströme liegen jedoch mehrheitlich leicht bzw. markant tiefer, vor allem wenn das Gebäude dicht ist und neue Fenster zur Anwendung kommen. Die Einzelraum-Komfortanlagen vermögen den thermisch wirksamen Aussenluftstrom jedoch nur im Fall von neuen, dichten Fenstern unter den Standardwert der neuen SIA-Berechnungsmethode zu senken.

Die Abluftanlagen hingegen weisen aufgrund der grösseren geförderten Luftmengen V_m auch grössere thermisch wirksame Aussenluftströme V_{th} auf als die SIA 380/1 Standardwerte. Vor allem die Anlagen ohne WP bringen energetisch nur dann eine Verbesserung, wenn die Gebäude oder das Lüftungsverhalten der Bewohner im Referenzfall markant schlechter wären als in den Standardwerten vorgegeben. Bei der Abluftanlage mit WP kann die Bilanz wieder positiv ausfallen, je nachdem wie gross der Nutzungsgrad der Abluft-WP ist und wie die eingesetzte Elektrizität der Abluft-WP gewichtet bzw. welcher Energieträger zur Warmwasser- bzw. zur Raumwärmeerzeugung eingesetzt wird. Eine Abluftwärmepumpe vermag in Wohnbauten 100% der Wassererwärmung zu decken. Eine positive Bilanz wird zum Beispiel erreicht, wenn die Abluft-WP einen Elektroboiler ersetzt oder die Raumwärme und das Warmwasser ohnehin durch eine WP erzeugt wird.

Tabelle 4.2-12 Aussenluft-Volumenströme und thermisch wirksame Aussenluft-Volumenströme für verschiedene Lüftungsanlagetypen und Anwendungen

$(m^3/h) / m^2_{EBF}$	Aussenluft-Volumenstrom pro m^2 EBF		Thermisch wirksamer Aussenluftvolumenstrom pro m^2 EBF			
	EFH	3-4 Zi	EFH		3-4 Zi	
			alte Fenster	neue Fenster	alte Fenster	neue Fenster
Komfortlüftung zentral, mit WRG		1.1			0.5	0.3
Komfortlüftung pro Wg, mit WRG	0.8	0.9	0.6	0.3	0.6	0.3
Komfortlüftung mit WRG und WP	1.1	1.2				
Einzelraum-Komfortlüftung	0.8	0.9	0.7	0.5	0.7	0.5
Abluftanlage ohne WP	1.3	1.4	1.5	1.3	1.5	1.3
Abluftanlage mit Wärmepumpe	1.3	1.4	1.5	1.3	1.5	1.3
Automatische Fensterlüftung	1.6	1.8		1.6		1.6
Zum Vergleich: ohne Lüftung nach SIA $380/1_{1988}$ *			0.9		1.1	
Zum Vergleich: ohne Lüftung SIA $380/1_{2001}$(lufthygienisches Min.)				0.7		0.7

* Durchschnittlicher Luftwechsel EFH 0.4 /h, MHF 0.5/h,
Annahmen für Umrechnung: Bruttohöhe=2.7m, $Volumen_{netto}/Volumen_{brutto}$ =0.8

Quelle: H. Huber, HTA Luzern, SIA 380/1 (1988), SIA D0170

Gegenüber den Referenzfällen gemäss Tabelle 4.2-9 ergeben sich für die verschiedenen Lüftungssysteme die spezifischen Heizwärmebedarfsreduktionen gemäss Tabelle 4.2-13. Im Fall der Gebäudeerneuerung ist die Reduktion zusätzlich davon abhängig, ob mit dem Einbau der Lüftungsanlage gleichzeitig die Gebäudehülle dichter gemacht wird, insbesondere bei den Fenster.

Tabelle 4.2-13 Heizwärmebedarfsreduktion durch Lüftungsanlagen bei verschiedenen Referenzfällen und Massnahmekombinationen MJ/m^2a, gemessen am Referenzwert „tief“ gemäss Tabelle 4.2-9.

Ausgangslage	Neubau EFH	Neubau MFH	Bestehende EFH, alte Fenster		Bestehende EFH, neue Fenster (nach 1990)	Bestehende MFH, alte Fenster		Bestehende MFH, neue Fenster (nach 1990)
gleichzeitige Massnahme	-	-	keine	neue Fenster	-	keine	neue Fenster	-
Komfortlüftung zentral, mit WRG		48				82	100	78
Komfortlüftung pro Wg, mit WRG	51	50	52	81	59	84	103	81
Einzelraum-Komfortlüftung	25	24	36	55	33	58	77	55

Quelle: Berechnungen CEPE anhand der Grundlagen aus den obigen Tabellen

Es fällt auf, dass die Energieeffizienz, d.h. die durch die Lüftungsanlage ermöglichte Heizwärmebedarfsreduktion, bei Neubauten markant kleiner ist als bei bestehenden Gebäuden. Dies rührt daher, dass die Neubauten luftdichter gebaut werden als der Gebäudebestand in der Vergangenheit gebaut wurde, der Referenzwert also tiefer ist. Die erreichte Heizwärmebedarfsreduktion sagt denn auch nicht direkt etwas über den noch verbleibenden Lüftungs-Heizwärmebedarf (Lüftungswärmeverlust Qv) aus; dazu sind die Werte aus Tabelle 4.2-13 bzw. Tabelle 4.2-14 von denjenigen in Tabelle 4.2-10 zu subtrahieren. Selbstverständlich ist das erreichte absolute Level, also der verbleibende Lüftungswärmeverlust, bei den Neubauten am tiefsten.

Am grössten ist die Energieeffizienz in den Fällen, bei denen gleichzeitig die Fenster ausgewechselt werden. Analytisch betrachtet müsste in diesen Fällen eigentlich ein Teil der Energieeffizienz der Massnahme „Fensterwechsel" zugeschrieben werden. Die Allokation der Energieeffizienz kann umgangen werden, wenn Fensterwechsel plus Lüftungsanlage als Paket betrachtet werden.

Bei Gebäuden mit höherem Referenzwert (mit „hoch" beschriftete Spalten der Tabelle 4.2-9) ist damit zu rechnen, dass der Anteil des thermisch wirksamen Volumenstroms, der nicht über die Lüftungsanlage läuft, etwas höher ist als bei den Gebäuden mit dem tiefen Referenzwert (mit „tief" beschriftete Spalten der Tabelle 4.2-9). Wir gehen jedoch davon aus, dass beim Einbau einer Lüftungsanlage auch die auffälligsten und markantesten Undichtheiten beim Gebäude behoben würden (z.B. Estrichluken, Kellertüren etc.) und dass das Lüftungsverhalten der Bewohner sich anpassen würde, weil die Luft durch die Lüftungsanlage besser wird. Wir nehmen an, dass der Volumenstrom der Lufterneuerung, der nicht über die Anlage fliesst, bei neuen Gebäuden um rund 0.1 $(m^3/h)/m^2_{EBF}$, beim Gebäudebestand mit neuen bzw. ersetzten Fenstern um rund 0.15 $(m^3/h)/m^2_{EBF}$ und beim Gebäudebestand mit alten Fenstern um rund 0.3 $(m^3/h)/m^2_{EBF}$ höher liegt. Die sich daraus ergebende Energieeffizienz, d.h. die durch die Lüftungsanlage ermöglichte Heizwärmebedarfsreduktion, ist in Tabelle 4.2-14 dargestellt. Ist der Volumenstrom, der nicht über die Anlage fliesst, grösser als hier angenommen oder werden die Anlagen in den Gebäuden mit hohem Referenzwert mit grösserem Volumenstrom „gefahren", so erhöht sich der thermisch wirksame Volumenstrom und der Effizienzgewinn nimmt ab, fällt also tiefer aus als in Tabelle 4.2-14. dargestellt.

Tabelle 4.2-14 Heizwärmebedarfsreduktion durch Lüftungsanlagen bei verschiedenen Referenzfällen und Massnahmekombinationen MJ/m²a, gemessen am Referenzwert „hoch" gemäss Tabelle 4.2-9.

Ausgangslage	Neubau EFH	Neubau MFH	Bestehende EFH, alte Fenster		Bestehende EFH, neue Fenster (nach 1990)	Bestehende MFH, alte Fenster		Bestehende MFH, neue Fenster (nach 1990)
gleichzeitige Massnahme	-	-	keine	neue Fenster	-	keine	neue Fenster	-
Komfortlüftung zentral, mit WRG		71				148	185	112
Komfortlüftung pro Wg, mit WRG	63	74	95	142	92	150	187	114
Einzelraum-Komfortlüftung	37	47	79	116	66	124	161	88

Quelle: Berechnungen CEPE anhand der Grundlagen aus den obigen Tabellen

Der Vergleich von Tabelle 4.2-13 mit Tabelle 4.2-14 zeigt die sehr grosse Sensitivität der Definition des Referenzfalls (und in geringerem Mass die Annahme zum Grundluftwechsel) auf. Die Reduktion des Heizwärmebedarfs, der durch den Einbau einer Lüftungsanlage zu erzielen ist, kann sich bei einem hohen Ausgangswert um knapp die Hälfte erhöhen oder gar verdoppeln. Entsprechend tiefer werden die rechnerischen Grenzkosten ausfallen, die gleichen Investitionskosten vorausgesetzt.

In die Betrachtung auf Ebene Endenergie ist der Elektrizitätsverbrauch der Lüftungsanlagen miteinzubeziehen. Dieser beträgt je nach Anlage und Leistungsstufe 0.2 bis 0.6 Wh/m^3. Die Werte für den Elektrizitätsverbrauch gelten nur für Ventilatorantriebe mit Gleichstrom- oder EC-Motoren. Bei Wechselstrom-Motoren sind die Werte zu verdoppeln. Wird in der Zuluft ein Pollenfilter verwendet (zweite Filterstufe), ist der Elektrizitätsverbrauch um 0,05 Wh/m^3 zu erhöhen. Eine allfällige Luftbefeuchtung und Raumkühlung erhöht den Energieverbrauch und ist separat auszuweisen. Auf dem Markt finden sich diverse Lüftungsgeräte mit integriertem Elektroheizregister. Der Energieverbrauch der Elektroheizung berechnet sich anhand folgender Standardwerte: Betriebszeit 3000 h/a; spezifischer Stromverbrauch 5 Wh/m^3.

4.2.7 Fenster

Die energetische Performance eines Fensters hängt von mehreren Faktoren ab; Faktoren, die zum einen die technischen Eigenschaften des Fensters betreffen und zum andern die Einbausituation im Gebäude, sowie die Verhältnisse der energetischen Flüsse im Gesamtgebäude.

Technische Eigenschaften des Fensters

- U-Wert des Gesamtfensters, eine Funktion der U-Werte von Glas und Rahmen, des Psi-Wertes sowie den Fenstermassen (Glas- bzw. Rahmenanteile, Glasrandlänge)
- g-Wert (Gesamtenergiedurchlass)

Einbausituation

- Anschlagart und -ort
- Verschattung
- Luftdichtheit

Verhältnisse der energetischen Flüsse im Gebäude

- Verhältnis der gesamten Verluste des Gebäudes zu den energetischen Gewinnen aus Fenstern, Elektrogeräten und Personen, siehe dazu die Ausführungen im nachfolgenden Unterkapitel sowie die Tabelle 4.2-20.

Je nach technischen Eigenschaften und Situation weist ein Fenster einen mehr oder weniger grossen Verlust auf oder kann sogar zu einem Gewinnfaktor werden.

a) Wärmeverlust des Fensters (ohne Lüftungsverluste)

Der Wärmeverlust eines Fensters (exkl. Lüftungsverluste) ergibt sich aus den Fenstermassen und den energetischen Kennwerten Fenster- und Flügelrahmen, der Verglasungen sowie dem Glasrandverbund (Abstandhalter). Der U-Wert der Verglasung hängt von der Anzahl Beschichtungen und deren Qualität sowie von der Gasfüllung zwischen den Gläsern ab. Der energetische Kennwert des Glasrandverbundes, der sogenannten lineare Verlustkoeffizient, wird stark von der Wärmeleitfähigkeit des eingesetzten Abstandhalters bestimmt; aber auch die Geometrie des Fensters hat – über die Länge des Glasrandes pro Fenstergesamtfläche – einen Einfluss. Der U-Wert des Rahmens ergibt sich aus den Wärmeleitfähigkeitswerten der eingesetzten Materialien, der Rahmendicke sowie dem Konstruktionsaufbau des Rahmens (relevant insbesondere beim Kunststoff- und Metallfenster).

Der U-Wert des Gesamtfensters ergibt sich aus den einzelnen Einflussfaktoren wie folgt:

$$U_W = \frac{U_g \cdot A_g + U_F \cdot A_F + \psi \cdot L_g}{A_W}$$

U_W = *Wärmedurchgangskoeffizient Fenster (W=Window), W/m²K*

U_g = *Wärmedurchgangskoeffizient in Scheibenmitte (G=Glazing), W/m²K*

A_g = *Glasfläche, m²*

U_F = *Wärmedurchgangskoeffizient des Fensterrahmens (F=Frame). W/m²K*

A_F = *Rahmenfläche, m²*

Ψ = *Linearer Wärmedurchgangskoeffizient des Glasrandes, W/mK*

L_g = *Glasrandlänge, m*

A_W = *Gesamte Fensterfläche, m²*

Wie die nachfolgende Tabelle 4.2-15 zeigt, hat der U-Wert des Glases wie erwartet den grössten Einfluss auf den Gesamtfenster-U-Wert (rund 50%). Der Einfluss des Rahmens und des Glasrandverbundes sind jedoch beide nicht zu unterschätzen, tragen sie doch ebenfalls mit 20% bis 30% zum Gesamtfenster-U-Wert bei. Und obwohl der Glasrandverbund im untenstehenden Beispiel ebenfalls von 0.07 auf 0.05 verbessert angenommen wurde, steigt dessen relative Bedeutung; was zeigt, dass dem Glasrandverbund eine durchaus gebührende Aufmerksamkeit zu schenken ist.

Tabelle 4.2-15 Beitrag der einzelnen Fensterkomponenten zum Gesamt-U-Wert U_W des Fensters für ein Standardholzfenster und ein Fenster in Passivhausqualität (Masse: 1.3m * 1.3 m, Rahmenbreite 7 cm, 2flügelig)

	Standard Holzfenster Ug=1.1, U_F=1.5, Psi=0.07		Passivhaus-Fenster Ug=0.5, U_F=0.8, Psi=0.07	
	W/m2K	%	W/m2K	%
Glas	0.78	52%	0.35	45%
Rahmen	0.44	29%	0.23	30%
Glasrand	0.28	19%	0.20	25%
Gesamt	1.49	100%	0.79	100%

Quelle Berechnungen CEPE

Je besser die U-Werte des Glases und des Rahmens sind, desto wichtiger wird der relative Einfluss des Glasrandverbundes, wie auch untenstehende Tabelle 4.2-16 zeigt[1]. Anhand der gleichen Tabelle lässt sich auch nachvollziehen, dass eine Verbesserung des Glas-U-Wertes zwar eine markante Verbesserung des Fenster-U-Wertes ergibt, dass jedoch auch der Rahmen mitbetrachtet werden muss, insbesondere um die Anforderungen des Passivhausstandards erfüllen zu können (U-Wert des Gesamtfensters kleiner oder gleich 0.8 W/m²K im eingebauten Zustand).

[1] Der Psi-Wert des Glasrandverbundes seinerseits hängt genau genommen ausser von den Materialeigenschaften zusätzlich von der Geometrie des Fensters und vom U-Wert des Rahmens und des Glases ab. Dieser Einfluss kann aber bei dieser exemplarischen Betrachtung vernachlässigt werden.

Tabelle 4.2-16 U-Wert des Gesamtfensters (W/m2K) in Abhängigkeit des Glas-Wertes, des Rahmen-U-Wertes und des Psi-Wertes des Glasrandverbundes (Masse: 1.3m * 1.3 m, Rahmenbreite 7 cm, 2flügelig)

U-Wert Glas (W/m²K)			1.3		1.1		0.7		0.5	
Psi-Wert Glasrandverbund (W/mK)			0.07	0.05	0.07	0.05	0.07	0.05	0.07	0.05
Kunststoff rahmen (W/m²K)	Standard	1.6	1.67	1.59	1.52	1.44	1.24	1.16	1.10	1.02
	verbessert	1.4	1.61	1.53	1.47	1.39	1.18	1.10	1.04	0.96
	Bestwert	1.0	1.52	1.44	1.38	1.30	1.09	1.02	0.95	0.87
Holz- / Holz-Metall-Rahmen (W/m²K)	Standard	1.5	1.64	1.56	1.49	1.42	1.21	1.13	1.07	0.99
	verbessert	1.2	1.55	1.47	1.41	1.33	1.12	1.04	0.98	0.90
	stark verbessert	0.8	1.43	1.35	1.29	1.21	1.01	0.93	0.87	0.79
	Bestwert	0.73	1.41	1.33	1.27	1.19	0.99	0.91	0.84	0.77

Quelle: Berechnungen CEPE

b) Energiebilanz des Fensters für verschiedene Einbausituationen (ohne Lüftungsverluste)

Die Kenntnis der Energiebilanz des Fensters verglichen mit derjenigen der Wand ist nützlich um zu beurteilen, ob und bei welchen Orientierungen und bei welcher Fensterqualität eine Vergrösserung der Fensterflächen einen energetischen Effizienzgewinn für das Gebäude bewirken kann.

Tabelle 4.2-17 Energiebilanz (Fensterfläche 1.7 m²) unterschiedlicher Fensterqualitäten bei verschiedenen Einbausituationen (MJ/$m^2_{Fenster}$a), ohne Berücksichtigung der linearen Verluste der Fensterleibungen. Werte in fett: am Markt weit verbreitete Fenstertypen

U_w		Beschattungsfaktor=0.9 f_g= 0.91 bis 0.94				Beschattungsfaktor=0.7 f_g 0.93 bis 0.95				Beschattungsfaktor=0.5 f_g 0.96 bis 0.97			
		Süd	Ost	West	Nord	Süd	Ost	West	Nord	Süd	Ost	West	Nord
1.52	**Referenzfenster, g=0.65**	**151**	**-126**	**-107**	**-309**	**24**	**-198**	**-183**	**-345**	**-113**	**-276**	**-264**	**-383**
1.52	**Referenzfenster, g=0.57**	**82**	**-165**	**-148**	**-328**	**-34**	**-231**	**-217**	**-361**	**-157**	**-300**	**-291**	**-395**
1.24	**Dreifachglas U_g=0.7**	**122**	**-104**	**-89**	**-253**	**15**	**-164**	**-152**	**-282**	**-97**	**-227**	**-218**	**-313**
1.10	**3fach-WS, U_g=0.5, g=0.42**	**73**	**-112**	**-99**	**-234**	**-16**	**-162**	**-152**	**-259**	**-108**	**-214**	**-207**	**-284**
1.10	3fach-WS, Ug=0.5, g=0.5	146	-71	-56	-214	44	-128	-117	-242	-64	-189	-181	-272
1.31	U_{Rahmen} 0.8, Glas Referenz	145	-101	-84	-263	30	-165	-152	-294	-91	-234	-224	-328
1.03	U_{Rahmen} 0.8, 3fach-WS, U_g=0.7	184	-39	-24	-187	80	-98	-86	-216	-31	-161	-152	-247
0.89	*PH-Fenster_ogW (g=0.42)*	164	-19	-6	-139	77	-68	-58	-163	-14	-119	-112	-189
0.80	PH-Fenster (g=0.5)	235	21	36	-120	136	-35	-23	-147	30	-95	-86	-177

Quelle Berechnungen CEPE mittels Entech, Monatsmethode, Fensteranteil A_{Fe}/EBF=0.2 (50% Süd, je 16 bzw. 17% für Ost/West bzw. Nord), Rahmenanteil 30%, Wärmedämmung äquival. Minergie (rund 20cm), interne Wärmegewinne und Lüftungsverluste gemäss Standardnutzung EFH, Gewinn/Verlust<0.6

Die Energiebilanz der Fenster ändert sich je nach den Verhältnissen der Verluste und Gewinne im Gebäude, weshalb nicht allein die Tabelle 4.2-17 als Massstab genommen werden darf. Nebst dem Verschattungsfaktor beeinflusst der Ausnutzungsfaktor der Wärmegewinne die Energiebilanz eines Fensters. Dieser geht bei zunehmend besseren Fenstern, ceteris paribus, leicht zurück, womit die Energiebilanz leicht verschlechtert wird, was in der Tabelle 4.2-17 berücksichtigt ist. Der Ausnutzungsfaktor verändert sich jedoch ebenfalls (leicht), wenn die Fensterflächen markant verändert werden, weshalb die Werte in Tabelle 4.2-17 und Tabelle 4.2-19) nicht direkt die Auswirkungen einer Fensterflächenveränderung herangezogen werden dürfen, siehe dazu auch das nachfolgende Unterkapitel 4.2.8.

Für Gebäude mit höheren Bruttoverlusten (heutige Bauweise bei Wand, Dach etc.) verbessert sich die spezifische Energiebilanz der Fenster gegenüber Tabelle 4.2-17 leicht (allerdings nur leicht, denn fg kann ja höchstens den Wert 1 annehmen, siehe dazu die Tabelle C.1-1 im Anhang); bei stark verbessertem Wärmeschutz, z.B. bei Passivhäusern verschlechtert sie sich, da das Verhältnis Verluste zu Bruttogewinne abnimmt und fg zunimmt. Die Energiebilanz für eine Passivhaus-äquivalente Gebäudehülle und einer Komfortlüftung mit WRG ist in Tabelle C.1-2 im Anhang aufgeführt.

Die Energiebilanz der Fenster reagiert deutlich auf den Glasanteil bzw. Rahmenanteil des Fensters, wie der Vergleich der Tabelle 4.2-17 mit *Tabelle C.1-3* im Anhang zeigt. Bei mehreren Situationen ist die Energiebilanz des Fensters besser als diejenige der Wand, vor allem bei Südlagen. Noch besser wird die Fensterenergiebilanz für grossflächige Fenster, welche sowohl einen hohen Glasanteil als auch einen tieferen Gesamtfenster-U-Wert aufweisen (bei gleichen Materialkennwerten), siehe Tabelle 4.2-18 für ein Gebäude mit einer Gebäudehülle mit Minergiequalität (U-Wert 0.2, Qh ca. 100 MJ/m²a). Aufgrund des höheren Ausnutzungsgrads der freien Wärme würde die Energiebilanz des Fensters bei einer Gebäudehülle von heutiger Bauqualität (U-Wert 0.3) noch besser ausfallen, vor allem gegen Süden und bei relativ unverschatteten Lagen, siehe Tabelle C.1-4 im Anhang.

Tabelle 4.2-18 Energiebilanz (MJ/$m^2_{Fenster}$a) **grossflächiger Fenster (5 m²) mit hohem Glasanteil von 85%** für unterschiedliche Fensterqualitäten bei verschiedenen Einbausituationen, ohne Berücksichtigung der linearen Verluste der Fensterleibungen

		Beschattungsfaktor=0.9 fg= 0.81 bis 0.87				Beschattungsfaktor =0.7 fg 0.85 bis 0.90				Beschattungsfaktor =0.5 fg 0.89 bis 0.93			
U_w		Süd	Ost	West	Nord	Süd	Ost	West	Nord	Süd	Ost	West	Nord
1.28	**Referenzfenster, g=0.65**	285	-17	4	-216	167	-84	-66	-249	26	-163	-150	-288
1.28	**Referenzfenster, g=0.57**	223	-52	-33	-233	109	-116	-101	-265	-22	-190	-179	-301
0.94	**Dreifachglas Ug=0.7**	271	22	39	-142	169	-35	-21	-170	50	-102	-92	-203
0.77	**3fach-WS, Ug=0.5, g=0.42**	231	23	37	-113	141	-27	-16	-138	41	-84	-75	-166
0.77	3fach-WS, Ug=0.5, g=0.5	299	62	78	-95	202	7	20	-121	90	-56	-46	-153
1.17	U_{Rahmen} 0.8, Glas Referenz	250	-22	-3	-202	139	-85	-70	-232	10	-158	-146	-268
0.83	U_{Rahmen} 0.8, 3fach-WS, Ug=0.7	298	52	69	-110	198	-4	10	-137	82	-70	-59	-170
0.66	*PH-Fenster_ogW (g=0.42)*	259	54	68	-81	172	5	16	-106	73	-51	-43	-133
0.66	PH-Fenster (g=0.5)	325	91	107	-63	231	38	51	-89	121	-24	-14	-120

Quelle Berechnungen CEPE mittels Entech, Monatsmethode, Fensteranteil A_{Fe}/EBF=0.2 (50% Süd, je 16 bzw. 17% für Ost/West bzw. Nord), Rahmenanteil 15%, **Wärmedämmung Gebäudehülle äquival. Minergie** (rund 20cm), interne Wärmegewinne und Lüftungsverluste gemäss Standardnutzung EFH

Zu vergleichen ist die Energiebilanz der Fenster gemäss Tabelle 4.2-17 und Tabelle 4.2-18 mit derjenigen der Wand gemäss Tabelle 4.2-19. Ist die Energiebilanz des Fensters grösser als diejenige der Wand, so bringt die Vergrösserung der Fensterflächen einen Effizienzgewinn.

Tabelle 4.2-19 Energiebilanz von Aussenwänden für unterschiedliche Dämmstärken ($MJ/m^2_{Wand}a$) ohne Berücksichtigung der linearen Verluste der Fensterleibungen

Dämmstärke (cm)	U-Wert (W/m^2K)	Energiebilanz ($MJ/m^2_{Wand}.a$)
10 - 12	0.28	-90
16	0.20	-64
30	0.14	-45

Aus der Übersicht der Energiebilanzen der Fenster (Tabelle 4.2-17) und der Aussenwand (Tabelle 4.2-19) können folgende Schlüsse gezogen werden:

- In unverschatteter oder nur teilverschatteter Südlage (Verschattungsfaktor≥0.7) ist die Bilanz für die meisten Fenstertypen sehr positiv oder nur leicht negativ, jedenfalls weniger negativ als diejenige der Passivhauswand. Besonders die grossflächigen Fenster können als eigentliche Energielieferanten bezeichnet werden.
- Dazu genügt in unverschatteter oder nur teilverschatteter Südlage (Verschattungsfaktor≥0.7) ein zweifachverglastes Wärmeschutzfenster, denn die Energiebilanz kann gegenüber diesem Fenstertyp nur in wenigen Fällen verbessert werden: in wesentlichem Mass durch ein Passivhausfenster (also mit guter Rahmenqualität und g-Wert=0.5 oder moderat durch ein Dreifach-Fenster mit einer Verglasung mit g-Wert ≥0.5.
- Bei Ost- und Westlage lassen sich mit heute weit am Markt verbreiteten erhältlichen Fenstern (3fach-Wärmeschutz mit „normalem" g-Wert) Energiebilanzen erzielen, welche besser sind als selbst die Passivhauswand, sofern die Verschattung nicht unter 70% fällt.
- Auch bei kleinen Fenstern kann in Ost oder Westlage eine absolut positive Bilanz erreicht werden, wenn nebst guten Gläsern beste Rahmen und ein g-Wert von nicht unter 0.5 zum Einsatz kommen (Passivhausanforderung) und die Lage mehr oder weniger beschattungsfrei ist, Verschattungsfaktor≥0.7). Beim Vergleich zur Wand genügt ein konventioneller Rahmen und ein Glas mit tiefem U-Wert und hohem g-Wert, damit die Energiebilanz besser ist als bei der Wand mit 16 cm WD.
- Auch in Ost- oder Westlage ist der Effizienzgewinn gegenüber dem Referenzfenster (bei Verschattungsfaktoren ≥0.7) eher gering, wenn nur das Glas allein verbessert wird und gleichzeitig nicht auf den g-Wert geachtet wird. Nur eine gleichzeitige Verbesserung des Rahmens und das Insistieren auf einen g-Wert von 0.5 vermag die Energiebilanz deutlich zu verbessern
- Je grösser die Verschattung bzw. je tiefer das Produkt aller Reduktionsfaktoren, desto wichtiger wird eine Verbesserung der U-Werte für eine Verbesserung der Gesamtbilanz und desto unwichtiger der g-Wert. Aber selbst für diese tiefen Reduktionsfaktoren hat ein grösserer g-Wert bei gleichem U-Wert noch einen Verbesserungseffekt.
- Gegen Norden weisen die Fenster bei der kleinen Fensterfläche in allen Fällen eine Negativbilanz aus, welche schlechter ist als diejenige der Wand gemäss heutigem Neubaustandard. Der Unterschied wird umso deutlicher, je besser die Wand gedämmt ist.

- Bei der grossen Fensterfläche ist die Energiebilanz des besten Fensters selbst gegen Norden noch ungefähr gleich derjenigen der Wand mit 16 cm Dämmung.
- Ein Anreiz aus energetischer Sicht, verbesserte Rahmen und **insbesondere weniger grössere statt viele kleinere Fenster einzusetzen** entsteht dadurch, dass **damit der U-Wert des Gesamtfensters verbessert wird**, ohne dass der g-Wert verschlechtert wird (wenn das gleiche Glas eingesetzt wird) und es kann eine Verbesserung bei allen Orientierungen und Verschattungslagen festgestellt werden.
- Und als letztes die an sich triviale Feststellung, dass eine Verlagerung der Fensterflächen von Nord nach den übrigen Orientierungen und eine solche von Ost/West nach Süd eine Verbesserung der Energiebilanz mit sich zieht.
- Last but not least ist zu betonen, dass die Energiebilanz der Fenster sehr sensitiv auf die Verschattung reagiert. Die Energiebilanz geht nicht proportional zur Verschattung zurück, sondern stark überproportional, denn der Verschattungsfaktor wirkt auf die Gewinne und damit auf den einen Term einer Differenz und nicht auf die Differenz selbst.

In diesen Betrachtungen nicht berücksichtigt ist, dass eine Vergrösserung der Fensterflächen möglicherweise eine Erhöhung der Leibungslängen pro m² Wand nach sich ziehen kann (die absolute Leibungslänge kann zwar architektonisch beeinflusst werden, aber die Wandfläche wird auf jeden Fall immer kleiner und tendenziell steigt die Leibungslänge in Funktion des Fensterflächenanteils, siehe Abbildung 2.2-2.). Wichtig ist dieser Effekt vor allem bei einer Differenzbetrachtung von energieeffizienten zu sehr energieeffizienten Wänden oder bei der absoluten Bestimmung des Heizwärmebedarfs beim Passivhausfenster; an der Stelle, an der es um die Grössenordnungen der Energiebilanz von Fenster verglichen mit Wand geht, kann er jedoch vernachlässigt werden.

Fazit: Solange die gesamten Wärmegewinne die Verluste nicht wesentlich übersteigen (das Gewinn-/Verlust-Verhältnis also deutlich unter 1 bleibt) und die Verschattung nicht 25% und mehr beträgt, wirkt sich eine Vergrösserung der Fensterflächen Richtung Süd, Ost und West positiv auf die Energiebilanz aus, wenn die Fensterqualität adäquat zur Wärmedämmung der Wand ausgewählt wird. Auch beim Passivhaus bestehen also kaum architektonischen Einschränkungen, solange die Fenster nicht zu mehr als 25% verschattet sind und Fenster gemäss Passivhausanforderungen zur Anwendung kommen.

Insbesondere beim Neubau besteht damit ein grosser architektonischer Spielraum, das Gebäude energetisch zu beeinflussen.

Selbstverständlich ist der energetische Nutzen zusätzlicher Fensterflächen umso grösser, je mehr die Orientierung in Richtung Süden ausgerichtet ist.

Wird das Verhältnis der Gewinne zu den Verlusten grösser als 1, so geht der energetische Grenznutzen zusätzlicher Fensterflächen (mit positiver Bilanz) langsam zurück, d.h. die zusätzliche energetische Verbesserung, die auf der Ebene des Gesamtgebäudes erreicht werden kann, wird immer kleiner, siehe dazu das folgende Kapitel 4.2.8.

Eine energetische Verschlechterung bei der Vergrösserung der Fensterflächen tritt dann ein, wenn die Verschattung 50% überschreitet oder Fensterqualitäten zur Anwendung kommen, welche nicht dem Dämmstandard der Wand entsprechen. Mit andern Worten ist dies dann der Fall, wenn die Energiebilanz des Fensters gemäss Tabelle 4.2-17 kleiner ist als die Energiebilanz der Wand gemäss Tabelle 4.2-19.

c) Veränderung der Energiebilanz des Fensters mit Einbezug der Lüftungsverluste

Wie die Ausführungen zum Luftwechsel ohne bzw. mit Lüftungsanlagen gezeigt haben, kann der Luftwechsel je nach betrachtetem Fall stark variieren (Tabelle 4.2-9, Kapitel 4.2.6, S. 70). Ein Teil dieser Variation ist auf die Unterschiede beim Fenster, wie mit oder ohne (Gummi-) dichtung, Art der Abdichtung zwischen Fensterrahmen und Leibung bzw. Wand, zurückzuführen. Zu unterscheiden ist zwischen Neubau und Erneuerung.

Um bauphysikalische Risiken und unerwünschte Effekte auszuschliessen, unterscheiden wir beim Neubau zwei Fälle:

- Wenn keine Lüftungsanlage miteingebaut wird, ist von einem etwas höheren Luftwechsel auszugehen. Häufig wird im Neubau beim Fenster ein Teil der Gummidichtung entfernt (ein Fenster pro Raum, obere horizontale Fuge) oder es wird auf eine andere Art für eine minimale Luftzufuhr gesorgt (z.B. durch Lüftungsschlitze, kontrollierte Luftzufuhr in Bad und WC, evtl. in der Küche) beziehungsweise die BewohnerInnen sorgen für einen genügenden Luftwechsel.
- Wird eine Lüftungsanlage eingebaut, können und sollen die Fenster dichter eingebaut werden damit der Anteil der Luftmenge, welcher nicht über die Lüftungsanlage gewechselt wird, möglichst klein wird.

In beiden Fällen werden die energetischen Effekte beim Thema Luftwechsel und Lüftung behandelt.

Im Gebäudebestand sind die Unterschiede bei den Luftwechseln noch grösser als im Neubau. Sehr hohe Luftwechsel können durch den Einbau von neuen Fenstern tatsächlich stark reduziert werden und dem Fenster ist ein zusätzlicher energetischer Effekt zuzuschreiben. Allerdings sollte der Luftwechsel nicht zu stark reduziert werden, denn die Risiken für bauphysikalisch bedingte Schäden und andere mit dem Feuchtigkeitshaushalt zusammenhängende Schäden sind im Gebäudebestand noch grösser als im Neubaufall. Ob ein Fensterwechsel angebracht ist und in welcher Form ist situativ von einer Fachperson zu entscheiden.

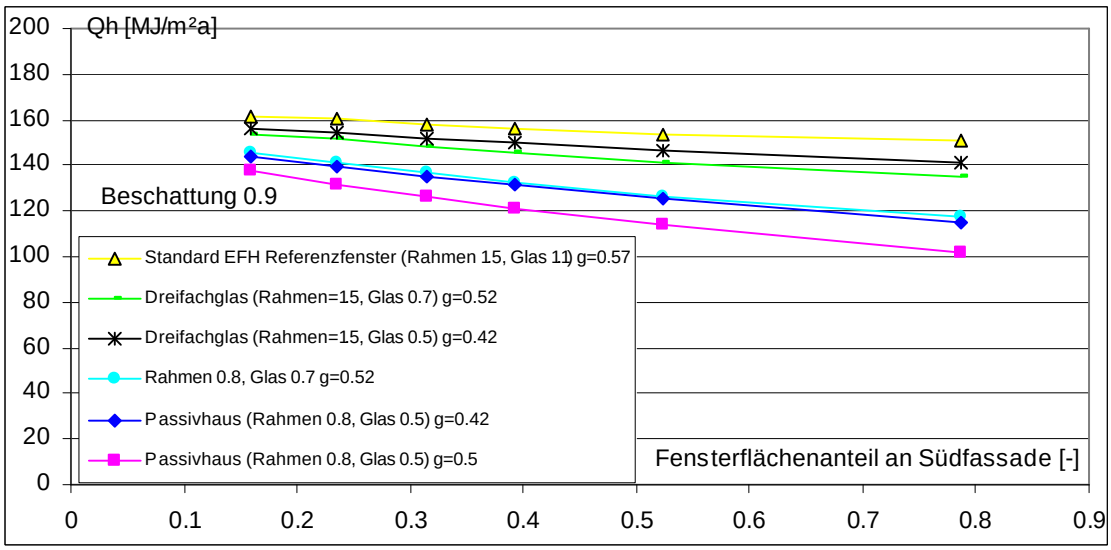
Um den zusätzlichen energetischen Effizienzgewinn pro m²-Fensterwechsel abzuschätzen, sind Annahmen über die spezifische Fensterfläche pro EBF und die Luftwechselreduktion zu treffen. Eicher und Pauli gehen in ihrer Abschätzung (Erb et al., 2001) der Lüftungsverluste bei Fenstern von rund 1200 MJ/m^2_{Fe}a bei EV-Fenstern und von über 600 MJ/m^2_{Fe}a bei DV-Fenstern aus, was mehr als den Transmissionsverlusten entspricht. Bei einem Fensterflächenanteil von 0.15 bis 0.2 m^2_{Fe}/m^2_{EBF} ergeben diese Verluste 180 bis 240 MJ/m^2_{EBF}a (EV) bzw. 90 bis 120 MJ/m^2_{EBF}a (DV). Zu vergleichen sind diese Werte auch mit Tabelle 4.2-10. Kann der Energieverlust durch Luftwechsel beim Fensterersatz auf 90 bis 140 MJ/m^2_{EBF}a (EFH) bzw. auf 110 bis 160 MJ/m^2_{EBF}a (MFH) gesenkt werden, ergibt sich ein markanter energetischer Effizienzgewinn beim Ersatz der alten EV- bzw. DV-Fenster. Beim Unterschied zwischen alten und neuen Fenstern gemäss Tabelle 4.2-10 erhält man einen Effizienzgewinn zwischen minimal 20 MJ/$m2_{EBF}$a und maximal 90 MJ/$m2_{EBF}$a (EFH) bzw. zwischen minimal 20 MJ/$m2_{EBF}$a und maximal 120 MJ/$m2_{EBF}$a (MFH). Diese Effizienzgewinne sind den Kosten eines Fensterersatzes gegenüber zu stellen.

4.2.8 Heizwärmebedarf in Funktion der Fensterflächenanteile

Mit der Erhöhung der Fensterflächenanteile verbessert oder verschlechtert sich die Energiebilanz des Gebäudes je nach Fensterqualität, Orientierung, Verschattung und der Grössenordnung der energetischen Gewinne und Verluste (siehe dazu auch das vorherige Unterkapitel). Wird die Fensterfläche nur wenig verändert, genügt es, die Energiebilanz der Fenster bzw. der Wand zu betrachten. Wird die Fensterfläche jedoch massiv verändert, so beeinflusst

dies das Verhältnis Gewinne zu Verluste u.U. so stark, so dass sich auch der Gewinnfaktor der freien Wärme verändert. Der Gewinnfaktor nimmt ab bei Fenstern und Einbausituationen mit positiver Energiebilanz, d.h. die Reduktion des Heizwärmebedarfs ist in diesen Fällen unterproportional zur Vergrösserung der Fensterflächen. Mit andern Worten: der energetische Grenznutzen nimmt ab und damit nehmen die Grenzkosten zu.

Die Annahme bei den Sensitivitätsrechnungen von Abbildung 4.2-1 bis Abbildung 4.2-4 ist, dass die Fläche pro Fenster **nicht** ändert in Funktion des zunehmenden Fensterflächenanteils und damit auch nicht die U-Werte sowie die Glasanteile pro Fenster. Aufgezeigt wird also der Effekt von mehr Fenstern der gleichen Fläche. [Eine Sensitivitätsrechnung, bei der gleichzeitig realistische Annahmen über die zunehmende Fläche pro Fenster und entsprechend höhere Glasanteile und tiefere U-Werte in Funktion des zunehmendem Fensterflächenanteils. getroffen werden, ist noch ausstehend.]



Quelle Berechnungen CEPE mit Entech 380/1

Abbildung 4.2-1 Der Heizwärmebedarf Qh in Abhängigkeit der Fensteranteile an der **Südfassade** für verschiedene Fensterqualitäten. Ausgangslage ist ein Einfamilienhaus mit **Wand-U-Wert** von **0.2 W/m²K, energetisch wirksamen Luftwechsel** von **0.4** und einer **Beschattung** von **0.9.**

Die Abbildung 4.1-1 bis 4.1-4 zeigen aber auch, dass die Möglichkeiten, den Heizwärmebedarf Qh durch die Vergrösserung der Fensterflächen zu beeinflussen, beschränkt sind. Bei einem Gebäude mit Wänden mit Minergiequalität (Annahme: U-Wert=0.2W/m²K) sind es im günstigsten Fall (geringe Verschattung, Passivhausfenster mit g-Wert=0.5) rund 40 MJ/m²a, wenn der Fensterflächenanteil von 15% auf 80% verbessert wird (siehe Abbildung 3.1-1). Auch wenn besondere bauliche Massnahmen getroffen werden, um den Ausnutzungsfaktor der freien Wärme nicht wesentlich absinken zu lassen (und die Steigung der Graphiken anhand der Steigung mit tiefen Fensterflächenanteilen extrapoliert würde), wären es „nur" 60 MJ/m²a.

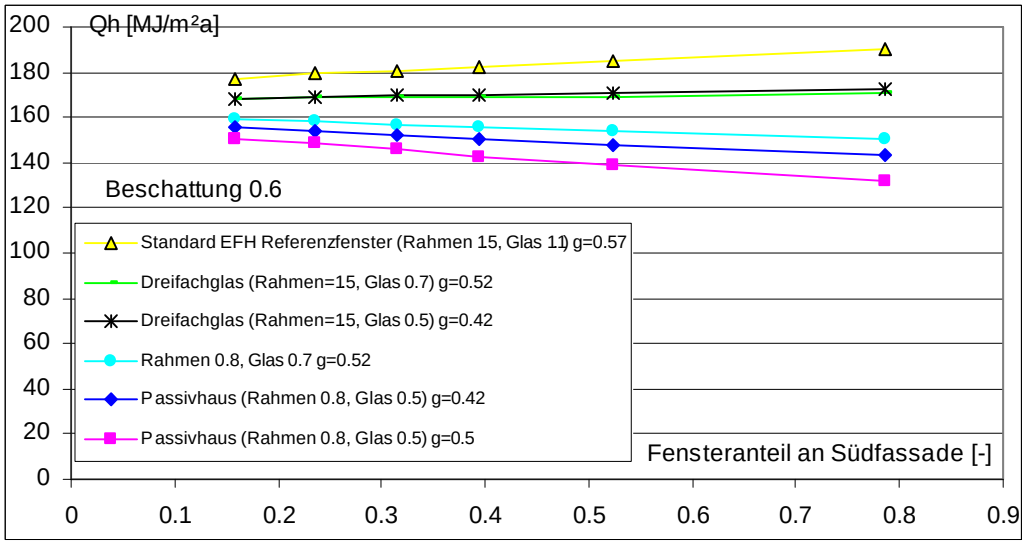
Zwei Vorbehalte müssen für die Betrachtungen in diesem Unterkapitel gemacht werden:

- Diese Betrachtungen gelten für Klimadaten, wie sie für das Mittelland typisch sind (gerechnet wurde mit Zürich SMA). Für Regionen mit höherem winterlichen Sonnenanteil (weniger Hochnebellagen) sieht die Fensterenergiebilanz grundsätzlich positiver aus (u.U. ist in

diesen Lagen aber auch die nächtliche Abstrahlung grösser, denn der Energieverlust wird nicht nur durch die Umgebungstemperatur, sondern auch durch die Strahlungstemperatur bestimmt und diese ist bei unbedecktem Himmel wesentlich tiefer (z.B. –20°C bei 0°C Umgebungstemperatur); dieser Effekt wird von üblichen Energiebedarfsprogrammen jedoch vernachlässigt).

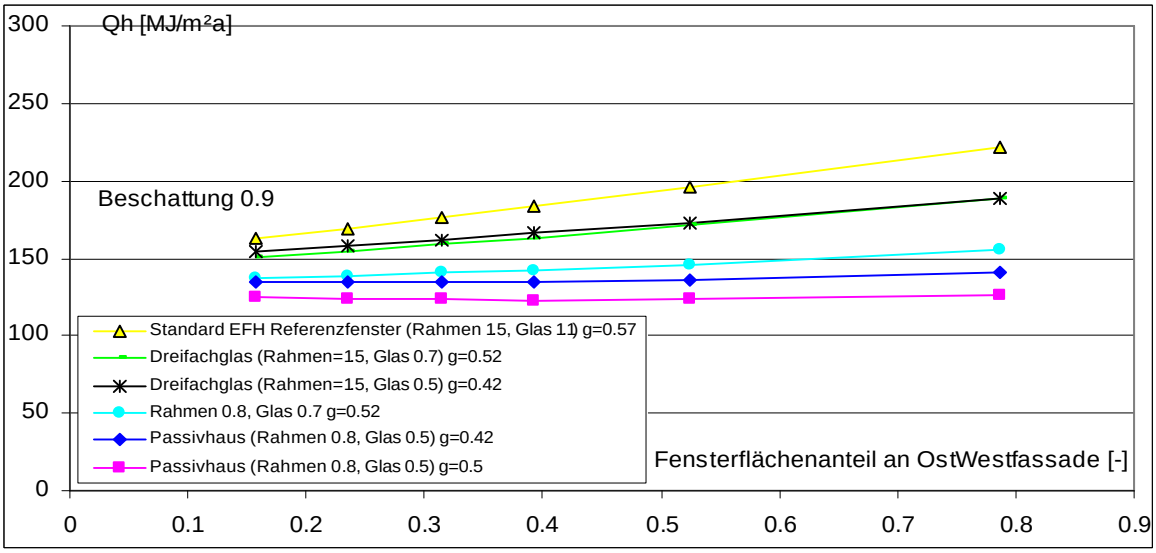
- Bei hohen Fensterflächenanteilen ist es zur präzisen Bestimmung des Heizwärmebedarfs angezeigt, mit einem dynamischen Heizwärmebedarfsprogramm und evtl. mit einem Multizonenmodell zu rechnen. Diese Programme werden den hohen und wechselnden Energiegewinn-, -verlust- und -speicherleistungen im Gebäude besser gerecht, womit u.a. das Risiko für Überhitzung besser eruiert werden. Erfahrene Architekten und Experten sind z.B. der Ansicht, dass beinahe vollverglaste Südseite grosse Räume gegen Süden und möglichst geöffnete Türen zu den übrigen Räumen bedingen.

Trotz dieser Vorbehalte bleibt die Feststellung gültig, dass eine weitgehende Reduktion des Heizwärmebedarfs (auf Niedrigenergie- oder Passivhausniveau) nur möglich ist, wenn gleichzeitig die Transmissionsverluste der Gebäudehülle und möglichst die Lüftungsverluste reduziert werden.



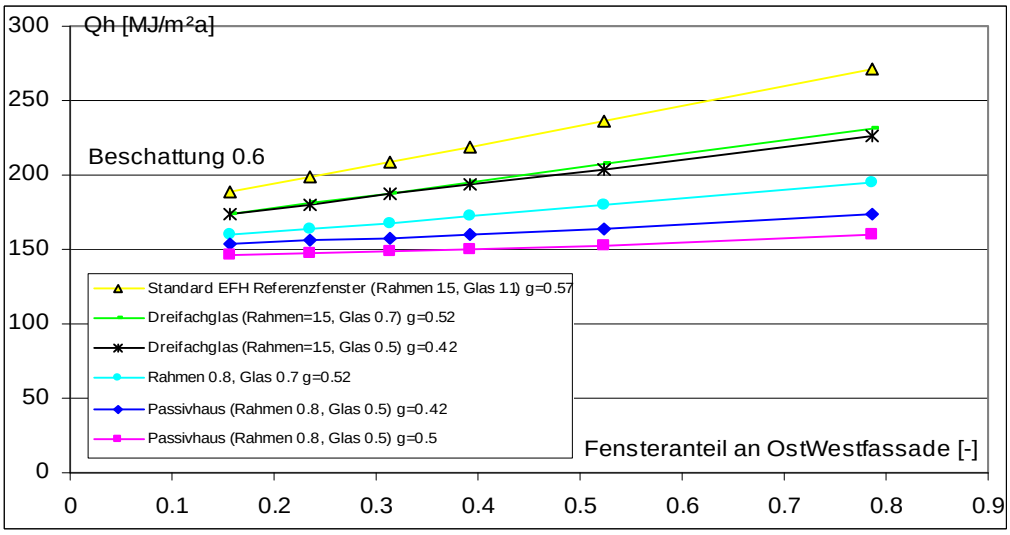
Quelle Berechnungen CEPE mit Entech 380/1

Abbildung 4.2-2 Der Heizwärmebedarf Qh in Abhängigkeit der Fensteranteile an der **Südfassade** für verschiedene Fensterqualitäten. Ausgangslage ist ein Einfamilienhaus mit **Wand-U-Wert** von **0.2 W/m²K, energetisch wirksamen Luftwechsel** von **0.4** und einer **Beschattung** von **0.6.**



Quelle Berechnungen CEPE mit Entech 380/1

Abbildung 4.2-3 Der Heizwärmebedarf Qh in Abhängigkeit der Fensteranteile an **Ost- und Westfassade** für verschiedene Fensterqualitäten. Ausgangslage ist ein Einfamilienhaus mit **Wand-U-Wert** von **0.2 W/m²K, energetisch wirksamen Luftwechsel** von **0.4** und einer **Beschattung** von **0.9.**



Quelle Berechnungen CEPE mit Entech 380/1

Abbildung 4.2-4 Der Heizwärmebedarf Qh in Abhängigkeit der Fensteranteile an der **Ost- und Westfassade** für verschiedene Fensterqualitäten. Ausgangslage ist ein Einfamilienhaus mit **Wand-U-Wert** von **0.2 W/m²K, energetisch wirksamen Luftwechsel** von **0.4** und einer **Beschattung** von **0.6.**

Weitere Berechnungen mit Passivhauswandqualität sind im Anhang zu finden. Die grundsätzlichen Schlussfolgerungen sind die selben.

Fazit: Das Element „Fensterflächenoptimierung“ der Solararchitektur und die Wärmegewinnmaximierungsstrategien der 1980er und früheren 1990er Jahre können zwar nach wie vor eingesetzt und es können auch sehr tiefe Heizwärmebedarfe erreicht werden, aber nur kombiniert mit einer Transmissions- und Lüftungsverluststrategie (oder mit einer solchen allein) wird der Schritt zum Passivhaus ermöglicht.

Und last but not least ein wichtiger Hinweis für die Praxis: Der Fensterflächenanteil und die Fensterqualität sollte insbesondere im Hinblick auf den Komfort gewählt werden. Grosse Zweifach-Wärmeschutz-Fensterflächen bringen im Süden zwar energetische Verbesserungen, verschlechtern aber gegenüber einer Wand den Komfort, da die Oberflächentemperatur nachts wesentlich tiefer liegen.

4.2.9 Methodische Hinweise zur Bestimmung der energetischen Wirkung von Energieeffizienz-Massnahmen im Gebäudekontext

Bei der Aggregation der oben beschriebenen Einzelmassnahmen auf (Bauteile) auf das gesamte Gebäude treten bzgl. der energetischen Wirkung Abweichungen auf. Zu beachten sind:

- Die linearen Wärmeverluste zwischen angrenzenden Bauteilen, insbesondere bei der Fensterleibung, im Bereich Sockel/Kellerdecken und Anschluss Dach/Wand, sind zu berücksichtigen. Diese Interaktionen sind in den obigen Unterkapiteln dargestellt und werden auch so bei der Berechnung der Grenzkosten der einzelnen Elemente miteinbezogen.
- Die Reduktion des Transmissionsverlustes oder die Erhöhung/Verminderung der solaren Gewinne hat einen indirekten Einfluss auf den gesamten Energiebedarf des Gebäudes, denn der Ausnutzungsgrad der freien Gewinne fg ist abhängig vom Verhältnis Transmissions- und Lüftungsverluste zur Summe der freien Bruttowärmegewinne (solar, Elektro, Personen). Deshalb muss zur abschliessenden Beurteilung der energetischen Wirkung der Massnahmen ein bauphysikalisches Gebäudesimulationsprogramm verwendet werden, wie dies auch beim Neubau gesetzlich vorgeschrieben ist.

Wo nicht anders vermerkt, gelangte das Programm Entech zur Anwendung, wobei mit der Monatsmethode gerechnet wurde. Es wurde die Version nach dem „alten" SIA 380/1 1988 verwendet, hauptsächlich aus folgenden Gründen:

- Vergleichbarkeit mit bisher berechneten oder gemessenen Gebäuden.
- Hoher Bedarf an Parametern beim „neuen" Berechnungsverfahren SIA 380/1 2001. Schon beim „alten" Verfahren ist es schwierig, die benötigen Parameter beizubringen, um eine gewisse Repräsentativität der heutigen Neubauten sowie des bestehenden Gebäudeparks beizubringen.
- Die in dieser Studie gemachten Einzelbetrachtungen können ohnehin nicht direkt auf ein konkretes Einzelobjekt angewendet werden, da hierfür zum einen die tatsächlichen Kosten und zum andern die energierelevanten Kennwerte für den konkreten Einzelfall bestimmt werden müssen.

Aufgrund der hohen möglichen Anzahl ist es auch nicht möglich, für alle Massnahmekombinationen (n-te Massnahmen am Bauteil i, jeweils bei jeder der N*I Gesamtgebäudesituationen) die energetische Wirkung im Gebäudekontext zu berechnen. Für die Beurteilung der energetischen Wirkung sowie der Grenzkosten wird deshalb eine ceteris paribus Abschätzung vorgenommen. Direkte Interaktionen – etwa zwischen angrenzenden Bauteilen (Fenster/Fassade, Sockel/Keller, Flachdach/Fassade, Fenster/Lüftung/Luftdichtheit etc) – werden jedoch direkt bei den einzelnen Bauteilen behandelt.

Es wird im folgenden eine Abschätzung gemacht, die aufzeigt, welche Abweichungen bei einer ceteris paribus Abschätzung auftreten können.

Der Gewinnfaktor fg wird in dem bisher gültigen und auch im für diesen Bericht verwendeten Heizwärmebedarfsberechnungsprogramm (Entech) wie folgt angenähert[1]:

[1] Nach der neuen Berechnungsnorm des Heizenergiebedarfs (SIA 380/1 2001) werden die bauphysikalischen Vorgänge, insbesondere die Speicherungs- und Wiederabgabedynamik realitätsnaher erfasst, indem die Energiespeicherfähigkeit der Gebäudemasse mittels einer Zeitkonstanten. Mittels der hier aufgeführten Annäherung wird der Gewinnfaktor eher unterschätzt.

$fg = 1\text{-}0.3^{*}(fw/tv) = 1\text{-}\ 0.3^{*}\ (Q_I+Q_S)/(Q_T+Q_V)$

wobei fw = Freie Wärme interne Wärme (Qi) durch Elektrogeräte und Personen sowie Solarstrahlung (Qs)

tv = Totale Verluste durch Transmission (Q_T) und Lüftung (Q_L)

Die Elektrowärme wird dabei nicht zu 100%, sondern nur zu 70% der freien Wärme angerechnet.

Die Haupteinflussfaktoren für das Verhältnis freie Wärme zu Verluste sind auf der Seite der Gewinne die Abwärme der Elektrogeräte (70% von 50 MJ/m²a bis 100 MJ/m²a) sowie die Solargewinne (70 MJ/m²a bis 100 MJ/m²a) und auf der Seite der Verluste die Qualität der Gebäudehülle (170 MJ/m²a bis 200 MJ/m²a bei Gebäuden nach dem heutigen Neubaustandard bis zu 100 MJ/m2a für das Passivhaus) und die Lüftungsverluste (120 MJ/m2a). Die Abwärme der Personen spielt eine eher untergeordnete Rolle (20 MJ/m²a bis 30 MJ/m²a).

Typische Werte für das Verhältnis freie Wärme zu Verluste sind in der Tabelle 4.2-20 aufgeführt. Selbst bei sehr gut gedämmten und mit Lüftungsanlagen ausgestatteten Wohngebäuden übersteigen die Gewinne die Verluste nur selten.

Tabelle 4.2-20 Abhängigkeit des Ausnutzungsgrades des Gewinnfaktors fg in Abhängigkeit des Verhältnisses der freien Wärme (brutto) zur Summe der Transmissions- und Lüftungsverluste

	Freie Wärme / Verluste	Gewinnfaktor fg nach SIA 380/1 1988	Ausnutzungsgrad η_g (mit Fg=0.9, tau=50 h)	Ausnutzungsgrad η_g (mit Fg=0.9, tau>=200 h)
bestehende Gebäude, energetisch nicht erneuert	0.3	0.91	0.9	0.9
Verbesserte Gebäudehülle	0.5	0.85	0.86	0.9
Stark verbesserte Gebäudehülle	0.7	0.79	0.77	0.86
Passivhaus, A/EBF=1.5	1.1	0.67	-	0.85
Passivhaus, A/EBF=1.2 bis 1.5	1.0 bis 1.1	0.67 - 0.7	-	0.8 – 0.85
Passivhaus, hoher Fensteranteil (A_F/EBF=0.4), davon 50% Süd, alle als Passivhausfenster (U-Wert$_{Fenster}$=0.8, g-Wert=0.5)	1.3	0.61	-	0.7

Quelle SIA Doku 0170, Berechnungen CEPE

Konsequenz für die Grenzkosten, die auf der Ebene der einzelnen Bauteile berechnet wurden:

- Die energetische Wirkung der Massnahmen zur Reduktion der Transmissions- und Lüftungsverluste wird in der Durchschnittsbetrachtung leicht überschätzt (und zwar desto stärker, je mehr die Wärmeschutzmassnahmen das Verhältnis Freie Wärme zu Verluste verändern), weil als indirekte Folge der Gewinnfaktor verringert wird. Diese Überschätzung liegt bei rund 15% bis 30% (von der heutigen Bauweise bis zum Passivhausäquivalent, siehe Tabelle 4.2-20, mit einem Zahlenbeispiel für den „Extremfall eines Gebäudes mit hohem Fensterflächenanteil, das vom heutigen Baustandard zum Passivhaus verändert wird“): Bei Bruttoverlusten vor den Massnahmen von 395 MJ/m²a verringert sich die Wirkung von energetischen Massnahmen von rund 190 MJ/m²a auf netto 134 MJ/m²a, weil die Netto-

wärmegewinne von 216 MJ/m²a auf 158 MJ/m²a zurückgehen, dies weil sich der Gewinnfaktor von 0.88 auf 0.68 verringert. Die energetische Wirkung der Wärmeschutzmassnahmen wird also um rund 30% überschätzt. Dieses Phänomen kommt jedoch vor allem dann voll zum Tragen, wenn alle Massnahmen gleichzeitig durchgeführt werden; bei einer ceteris paribus Untersuchung wird das Verhältnis Freie Wärme zu Verluste weit weniger beeinflusst. Eine solche ceteris paribus Untersuchung der Grenzkosten (Durchschnittskostenansatz) ist für die Einzelbeurteilung und im Hinblick auf die grenzkostenoptimierte Paketbildung also durchaus zulässig. Die reinen Grenzkosten sind von der Überschätzung noch weniger betroffen, weil sie das G/V-Verhältnis weniger beeinflussen.

Tabelle 4.2-21 Energieflüsse an zwei Gebäuden, die bis auf die Fensterflächenanteile und deren Orientierung identisch sind

	Beispiel 1, $A_{Fenster}$/EBF=0.16, Alle Orientierungen 25%					Beispiel 2 $A_{Fenster}$/EBF =0.35 Süd 50%, Nord 10%, Ost/West 20%				
	Bruttoverlust MJ/m²a	Freie Wärme MJ/m²a	fg	Wärmegewinn MJ/m²a	Qh MJ/m²a	Bruttoverlust MJ/m²a	Freie Wärme MJ/m²a	fg	Wärmegewinn MJ/m²a	Qh MJ/m²a
Grenzwert	320	134	0.95	127	193	395	245	0.88	216	179
Passivhaus	152	129	0.80	103	48	203	234	0.68	158	45
Energetische Wirkung	169			24	145	192			58	134
Unterschied der energetischen Wirkung zwischen den Ebenen Bruttoverlust und Qh					14 %					30 %

Quelle: Berechnungen CEPE mit Programm Entech nach Monatsmethode

- Sinken die Wärmegewinne, z.B. Elektrowärme im Sinne paralleler Massnahmen oder wegen effizienterer Geräte, so erhöht sich der Gewinnfaktor wieder und die Einzelberechnungen zu den Grenzkosten im Durchschnittskostenansatz werden wieder genauer.
- Die integrierten Betrachtungen auf Gebäudeebene sowie die Grenzkostenkurven werden mittels Paketbildung und mittels eines gebäudephysikalischen Heizwärmebedarfsprogramms vorgenommen (wo nicht anders erwähnt: Entech nach Monatsmethode).
- Es bleibt zu betonen, dass für energetische Betrachtungen, die auf den **absoluten** Bedarf von Gebäuden von Niedrigenergie oder Passivhäusern abzielen (und also nicht auf den **Unterschied** zwischen heutigem energetischen Standard und z.B. dem Passivhaus), ein Berechnungsverfahren basierend auf der heute gültigen Norm (SIA 380/1 2001) oder ein dynamisches Simulationsprogramm, z.B. HELIOS, angewendet werden sollte.

4.2.10 Berechnung des Wärmeleistungsbedarfs

Die spezifischen Wärmekosten, welche den Grenzkosten gegenüber gestellt werden, werden u.a. von der Grösse (Leistung) der Heizanlage bestimmt. Der spezifische Heizleistungsbedarf ist dabei in Funktion der energetischen Qualität der Gebäudehülle und des Heizungsverteilungssystems zu bestimmen.

Die zur Zeit noch gültige Norm SIA 384/2 zur Berechnung des Heizleistungsbedarfs anhand des Jahreswärmebedarfs stammt aus dem Jahr 1982. Das Berechnungsverfahren ergibt selbst für den Referenzfall (SIA 380/1 wird erfüllt) eine (leichte) Überdimensionierung, welche bei einigen Anlagetypen (z.B. Wärmepumpen) zu erhöhten Investitionskosten führt. Sie trägt dem Aspekt, dass ein bestimmter jährlicher Heizwärmebedarf auf verschiedene Weise realisiert werden kann, nur annäherungsweise Rechnung. Die Annäherung wird jedoch umso ungenügender, je tiefer der Heizleistungs- bzw. der Heizwärmebedarf ist. Nicht zuletzt aus diesem Grund, wird die Norm zurzeit überarbeitet (Schlussversion der entsprechenden CEN-Norm ist in Vernehmlassung).

In Übereinstimmung mit A. Binz von der FHBB (Binz et al., 2002) wird der Heizleistungsbedarf deshalb anhand der Transmissions- und Lüftungsverluste berechnet. Ausgangspunkt für die Berechnung des Heizleistungsbedarfs ist der spezifische Wärmeverlust H in W/K pro m² EBF. Er setzt sich aus den Komponenten „spezifische Transmissionsverluste“ und „spezifische Lüftungswärmeverluste“ (mit Berücksichtigung der Wärmerückgewinnung) zusammen; vereinfacht dargestellt ergibt sich:

$$H = \frac{\sum_i b_i \cdot A_i \cdot U_i + \dot{V} \cdot \frac{c_a \cdot r_a}{3600}}{EBF} \qquad [W/m^2_{EBF}K]$$

mit

A_i = *Fläche des Bauteils i gegen aussen bzw. gegen unbeheizt*

U_i = *U-Wert des Bauteils i in* W/m^2K

b_i = *Reduktionsfaktor des Bauteils i gemäss SIA 380/1*

$\dot{V}$ = *thermisch wirksamer Volumenstrom in* m^3/h

$c_a \cdot r_a$ = *Spezifische Wärme der Luft in* J/m^3K

Zur Illustration werden in Tabelle 4.2-22 für verschiedene typische Fälle die Komponenten des Transmissionsverlustes am spezifischen Wärmeverlust *H* dargestellt. Ein durchschnittlicher U-Wert der opaken Gebäudehülle von 0.3 W/m²K und ein Fenster-U-Wert von 1.5 W/m²K entspricht dabei in etwa der heutigen Neubauweise und ein solcher von 0.15 W/m²K für die opaken Bauteile bzw. von 0.8 W/m²K für die Fenster entsprechen dem Passivhausstandard.

Tabelle 4.2-22 Spezifischer Wärmeverlust H, Komponente Transmissionsverlust, in W/m²K (gerundete Werte)

Fensteranteil m² Fenster / m^2_{EBF}	Durchschnittlicher U-Wert opake Gebäudehülle $W/m^2_{OpHülle}K$	Durchschnittlicher Fenster-U-Wert $W/m^2_{Fenster}K$	A/EBF 1.5 $W/m^2_{EBF}K$	A/EBF 2 $W/m^2_{EBF}K$
0.12	0.3	1.5	0.6	0.7
	0.2	1.1	0.4	0.5
	0.15	0.8	0.3	0.4
0.18	0.3	1.5	0.7	0.8
	0.2	1.1	0.5	0.5
	0.15	0.8	0.3	0.4

Quelle Berechnungen CEPE in Anlehnung an Binz 2001

Um den totalen spezifischen Leistungsbedarf *H* in W/m²K zu erhalten, sind den Werten in Tabelle 4.2-22 die spezifischen Lüftungsverluste zu addieren. Diese betragen 0,4 $W/m^2_{EBF}K$ für einen thermisch wirksamen Luftwechsel von 1.2 $(m^3/h)/m^2_{EBF}$ (Referenzluftwechsel MFH , entsprechend 0.5/h bei einer lichten Raumhöhe von rund 2.5m) und 0.1 W/m²K bei einem wirksamen Luftwechsel von 0.3 $(m^3/h)/m^2_{EBF}$ (Komfortlüftung mit WRG). *H* liegt bei einem Passivhaus typischerweise 0,4 $W/m^2_{EBF}K$ und sollte diesen Wert nicht wesentlich überschreiten, weil nicht wesentlich höhere Wärmemengen mittels Luftheizung zugeführt werden können (entscheidend ist der Netto-Leistungsbedarf nach Abzug der freien internen Wärmeleistungen, siehe nachfolgende Betrachtungen).

Unter Berücksichtigung der relevanten Temperaturdifferenz und der anrechenbaren internen Wärmeleistungen von Elektrizität und Personen ergibt sich daraus in erster Näherung der Heizleistungsbedarf q_h

$$q_h = H \cdot (T_i - T_a) - q_i \qquad [W/m^2_{EBF}]$$

mit

Ti = Innentemperatur

Ta = Aussentemperatur beim Auslegungspunkt gemäss SIA 382/4(typischerweise –8°C für das Mittelland)

qi = Abwärmeleistung aus Elektrizität und Personen gemäss SIA 380/1 oder gemäss tatsächlicher Personenbelegung

Für die häufigkeitsrelevanten typischen Fälle des Mittellandes kann von einer Temperaturdifferenz von 28 K ausgegangen werden. Damit ergibt sich ein Bruttoleistungsbedarf $H \cdot (T_i - T_a)$ gemäss Tabelle 4.2-23.

Tabelle 4.2-23 Bruttoleistungsbedarf (qh vor Anrechnung der freien internen Wärmeleistungen) für ein A/EBF von 1.5, in W/m²

Fensteranteil m² Fenster / m² EBF	Durchschnittlicher U-Wert opake Gebäudehülle W/m²$_{OpHülle}$K	Durchschnittlicher Fenster-U-Wert W/m²$_{Fenster}$K	Thermisch relevanter Luftwechsel 1.2 (m³/h)/m² EBF	Thermisch relevanter Luftwechsel 0.3 (m³/h)/m² EBF
			qh (W/m²)	qh (W/m²)
0.12	0.3	1.5	27	19
	0.2	1.1	22	14
	0.15	0.8	19	11
0.18	0.3	1.5	30	22
	0.2	1.1	24	16
	0.15	0.8	21	12

Die einzelnen Beiträge der internen Abwärmeleistung qi sind in Tabelle 4.2-24 und Tabelle 4.2-25 dargestellt:

Tabelle 4.2-24 Durch Personen abgegebene Wärmeleistung gemäss SIA Norm 380/1

	SIA 380/1 (1988)		SIA 380/1 (2001)	
	m²/Person	W/m²	m²/Person	W/m²
EFH	50	0.8	60	0.7
MFH	30	1.3	40	1.0

Quelle SIA 380/1 (1988), SIA-Doku 0170

Der Vorschlag zu Minergie-P schlägt für die Berechnung der freien Wärme-Elektrizität eine verminderte EKZ_e von 60 MJ/m²a vor.

Tabelle 4.2-25 Freie Wärmeleistung Elektrizität (Reduktionsfaktor Elekrizität=0.7)

	MJ/m²a	W/m²
EFH	80	1.8
MFH	100	2.2
Vorschlag Minergie-P	60	1.3

Damit ergeben sich für das EFH interne freie Wärmeleistungen von 2.0 W/m² EBF bis 2.6 W/m² EBF und für das MFH von 2.3 W/m² EBF bis 3.5 W/m² EBF. Zum Vergleich: Der deutsche Passivhausstandard setzt für Wohnbauten generell 2.1 W/m² EBFi voraus (jeweils brutto, vor dem Ausnützungsfaktor der freien Wärme).

Diese Werte der freien Leistung (Tabelle 4.2-24 und Tabelle 4.2-25) sind von denjenigen der Tabelle 4.2-23 zu subtrahieren, um den Nettowärmeleistungsbedarf in W/m²K zu erhalten. Als Fallbeispiel wurde dies für die im nachfolgenden Kapitel 4.3 betrachteten Neubauten durchgeführt (siehe Tabelle 4.2-26). Beim Leistungsbedarf für WW wurden von den Bedarfswerten 90

MJ/m²a für MFH und 60 MJ/m²a für EFH ausgegangen und angenommen, dass die Warmwasseraufbereitung höchstens zwölf Stunden pro Tag gleichzeitig mit der Raumwärmeerzeugung erfolgen soll.

Tabelle 4.2-26 Wärmeleistungsbedarf für Raumwärme (W/m² und kW) sowie für Raumwärme + Warmwasser (kW) in Funktion des Heizwärmebedarfs Qh

	MFH				EFH			
	Qh	Wärmeleistungsbedarf			Qh	Wärmeleistungsbedarf		
		Raumwärme		RW+WW		Raumwärme		RW+WW
	MJ/m²a	W/m²	kW	kW	MJ/m²a	W/m²	kW	kW
a) ca. Grenzwert	207	25	18	22	246	28	7	8
b) ca. Zielwert	182	23	16	21	207	25	6	7
c) ca. Minergie-heute	145	19	14	18	165	21	5	6
d) ca. Minergie-GHa	66	12	8	12	84	13	3	4
e) ca. Passivhaus	36	8	6	10	48	9	2	3
Gemäss SIA 380/1 (1988) Minergie-heute: Entspricht ca. dem durchschnittlichen Qh der heutigen Minergie-Gebäude Minergie-Gha: Minergie wird mit Massnahmen an Gebäudehülle allein erreicht (Oel/Gas)								

Quelle Gebäudedaten gemäss Kapitel 4.3 (HBT), Qh-Berechnungen mit Entech (Monatsmethode) und Wärmeleistungsbedarf gemäss obigen Ausführungen (CEPE)

Zu beachten ist, dass ein bestimmter Heizwärmebedarf (Qh) mittels verschiedener baulicher Möglichkeiten erreicht werden kann, woraus dann unterschiedliche spezifische Wärmeleistungsbedarfe resultieren. Bei höheren Fensterflächenanteilen steigt der Wärmeleistungsbedarf bei gleichem Wärmeenergiebedarf (bei höheren Fensterflächenanteilen erhöht sich der Wärmeleistungsbedarf immer, weil Fenster höhere Transmissionsverluste aufweisen als Wände gemäss heutigem Baustandard, der Wärmeenergiebedarf jedoch bleibt in der gleichen Grössenordnung oder wird gar kleiner).

Am grundsätzlichen Sachverhalt, dass der Wärmeleistungsbedarf bei sinkenden Qh reduziert wird, ändert sich jedoch nichts, insbesondere wenn so markante Qh-Verbesserungen betrachtet werden wie es hier der Fall ist, denn die angestrebten Qh-Verbesserungen lassen sich nur erreichen, wenn auch die Fenster (insbesondere auf der Verlustseite) markant verbessert werden. Die Rechnungen zeigen jedoch, dass der Wärmeleistungsbedarf weit weniger als proportional zurückgeht.

Fazit: Das beschriebene Verfahren eignet sich gut, um den Wärme**leistungs**bedarf für die Heizwärmebedarfe aufgrund der zu untersuchenden Energieeffizienzmassnahmen an Gebäudehülle und bzgl. des Lüftungsverlustes zu berechnen. Damit lassen sich in einem zweiten Schritt die möglichen Minderkosten auf Seite Wärmeerzeugung und –verteilung abschätzen.

4.2.11 Passivhaus

Das Erstellen von Wohnneubauten, die den deutschen Passivhausstandard oder ähnliche energetische Anforderungen erfüllen, stellt hohe Ansprüche an die (energetische) Planung (und an die Bauausführung, nota bene), siehe dazu die Übersicht für das deutsche Passivhaus in Abbildung 4.2-5.

Passivhäuser sind Gebäude, deren Jahresheizwärmebedarf so gering ist, dass auf ein gesondertes aktives Heizsystem verzichtet werden kann: Die Restwärmezufuhr ist allein über die ohnehin erforderliche Zuluft möglich. Dafür muss der (tatsächliche) Energiekennwert Heizwärme kleiner oder gleich 15 kWh/(m²a) sein (Kilowattstunden je Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche und Jahr); dann sind in Mitteleuropa auch am kältesten Tag die Heizlasten so gering, dass eine gesonderte Wärmeverteilung und ein gesondertes Wärmeabgabesystem nicht erforderlich sind.

Die Realisierung von Passivhäusern stellt hohe Ansprüche an die verwendeten Komponenten:

- Bei der Dämmung: U-Werte unter 0,15 W/(m²K).
- Bei Bezug auf das Aussenmass, wärmebrückenfreie Ausführung.
- Durch Drucktest nachgewiesene, ausgezeichnete Luftdichtheit. Der Drucktestkennwert n_{L50} bei 50 Pa Über- bzw. Unterdruck darf 0,6 h^{-1} nicht überschreiten.
- Verglasungen mit U_g-Werten unter 0,8 W/(m²K) bei hohem Energiedurchlassgrad (≥50%), so dass auch im Winter Netto-Wärmegewinne möglich sind.
- Fenster mit U_W-Werten unter 0,8 W/(m²K) (nach der Europäischen Fensternorm [EN 10077])
- Höchsteffiziente Lüftungswärmerückgewinnung (≥75%) bei niedrigem Stromverbrauch
- Niedrige Wärmeverluste bei der Brauchwasserbereitung und -verteilung
- Hocheffiziente Nutzung von elektrischem Haushaltsstrom.

Die blosse Zusammenstellung Passivhaus geeigneter Einzelkomponenten reicht allerdings noch nicht aus, um ein Gebäude zum Passivhaus zu machen: Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile. Die Wechselwirkungen zwischen den Komponenten machen eine integrale Planung notwendig, mit welcher der Passivhausstandard erst erreicht werden kann:

Passivhausstandard, das bedeutet: Ein Energiekennwert Heizwärme nicht grösser als 15 kWh/(m 2 a) und ein Primärenergie-Kennwert für die Summe aller Anwendungen (Heizung, Warmwasser und Haushaltsstrom) nicht grösser als 120 kWh/(m²a).

Quelle: Passivhaus Vorprojektierung 99

Abbildung 4.2-5 Anforderungen zur Erfüllung des deutschen Passivhausstandards

Zwischen dem deutschen Passivhausstandard und dem schweizerischen Vorschlag Minergie-P bestehen zahlreiche Unterschiede, einerseits seitens der Anforderungen und andererseits seitens der Berechnungsverfahren. Dies wird in einer derzeit an der FHBB laufenden Untersuchung detailliert aufgezeigt, weshalb an dieser Stelle nicht der ganze Diskurs wiedergegeben, sondern auf Binz 2001 sowie den zu erwartenden Schlussbericht verwiesen wird. Die wichtigsten Gemeinsamkeiten und Unterschiede sind nachfolgend zusammengefasst.

Zunächst die Gemeinsamkeiten zwischen deutschem Passivhausstandard und dem Vorschlag Minergie-P: Auf der planerischen Ebene ist je eine Vorgabe für folgende Grössen zu erfüllen.

- Tiefer jährlicher spezifischer Heizwärmebedarf (kWh/m²a bzw. MJ/m²a) ≤15 kWh/m^2_{EBFi}a (deutscher Passivhausstandard) bzw. ≤20% des Grenzwertes Hg nach SIA 380/1, 2001, siehe auch Tabelle 4.2-27. Bei einem Vergleich dieser Werte sind die unterschiedlichen Definitionen zu beachten, siehe weiter unten.

- Hohe Luftdichtigkeit der Gebäudehülle: n_{L50} ≤0,6 h^{-1}.

- Tiefer spezifischer maximaler Wärmeleistungsbedarf (W/m²): Der Vorschlag zu Minergie-P sieht vor, einen Grenzwert von 10 W/m² festzulegen. Der deutsche Passivhausstandard macht keine explizite Vorgabe zum Wert, verlangt aber als zentrale Forderung, dass der Restwärmebedarf über die Zuluft der Lüftungsanlage an die Räume abgegeben wird[1]. Dies bedingt ebenfalls einen Wert um 10 W/m².

Die Unterschiede zwischen deutschem Passivhausstandard und dem Vorschlag Minergie-P gestalten sich wie folgt:

- Minergie-P stellt eine weitere Anforderungen auf Ebene Endenergie für Wärme (Raumwärme und Warmwasser): E_{gew} ≤ 30 kWh/m²a.

- Das Verfahren zur Berechung des Heizwärmebedarfs unterscheidet sich in einigen Punkten: Die EBF bezieht sich gemäss schweizerischer Norm auf die Aussenmasse und gemäss deutscher Norm auf die Innenmasse. Gleiches gilt für Berechnung der linearen Wärmeverluste. Ausserdem sind weitere Randbedingungen und das Berechnungsverfahren in einzelnen Punkten unterschiedlich.

Tabelle 4.2-27 Anforderungen an den spezifischen Heizwärmebedarf für den deutschen Passivhausstandard und den Minergie-P-Vorschlag.

Deutscher Passivhausstandard:	Vorschlag Minergie P (=20% des SIA-Grenzwertes Hg)	
	EFH (A/EBF z.B. = 2)	MFH (A/EBF z.B. = 1.5)
15 kWh/m²a = 54 MJ/m^2_{EBFi}a	54 MJ/m^2_{EBFa}a	43 MJ/m^2_{EBFa}a
Deutsche Berechnungsart (EBF und spezifische lineare Wärmeverluste auf Innenmass bezogen)	Nach neuer Norm SIA 380/1 (EBF und spezifische lineare Wärmeverluste auf Innenmass bezogen)	

Quelle: nach Binz et al, 2002

Die Wahl des Berechnungsverfahrens kann markant unterschiedliche Werte ergeben. Tabelle 4.2-28 zeigt eine Auswahl auf (Binz et al., 2002).

[1] Wenn der Luftwechsel nicht erhöht wird, die Strömungsgeschwindigkeiten unterhalb dem von der Akustik her gegebenen Werte bleiben (ca. 1 m/s) und die Einblastemperaturen einen vom Komfort her gegebenen Wert (ca. 70°C) nicht überschreiten soll, ergibt sich bei einem Gebäude, das die übrigen Passivhaus-Bedingungen erfüllt, in etwa ein Wärmeleistungsbedarf von 10 W/m·K.

Tabelle 4.2-28 Unterschiede des spezifischen Heizwärmebedarfs anhand unterschiedlicher Berechnungsverfahren für je ein gleiches EFH und MFH.

	EFH	MFH
Passivhausstandard gemäss PHH-Vorprojekt 99	54	54
SIA 380/1, 1988	32	22 – 25
SIA 380/1, 2001	29	25 –28
SIA 380/1, nach Randbedingung Minergie	36	32 – 36

Quelle: nach Binz et al., 2002

Die Anforderung an den Heizwärmebedarf ist bei Minergie-P demzufolge etwas weniger stringent als beim deutschen Passivhausstandard.

Unabhängig vom Berechnungsverfahren stellen sich auf der planerischen Ebene eine Reihe von Anforderungen, welche beachtet werden müssen, um den deutschen Passivhausstandard oder den daran orientierten Minergie-P Vorschlag erreichen zu können.

4.3 Kosten und energetische Nutzen von Energieeffizienzinvestitionen mit Kostenstand 2000 unter technischem Blickwinkel

Als erstes werden kurz die wesentlichen Faktoren beschrieben, welche die Kosten in Abhängigkeit zunehmender Energieeffizienz bestimmen. Anschliessend wird auf die qualitative Wirkung von architektonischen Massnahmen auf die Zusatzkosten der energetisch verbesserten Neubauweise eingegangen.

In den folgenden Kapiteln werden die spezifischen Kosten (pro m oder pro m^2) der Bauteile in Funktion der energetischen Effizienz beschrieben.

4.3.1 Determinanten der Kosten in Abhängigkeit der energetischen Effizienz, Unterschiede zwischen Neubau und Erneuerung und Methodisches zur Datenerhebung

Folgende Determinanten bestimmen die Kosten der baulichen Investitionen in Funktion zunehmender Energieeffizienz.

- Erhöhung der spezifischen Kosten (pro m^2 Fassaden- oder Dachfläche, pro m Anschlusslänge etc.) bei zunehmender energetischer Qualität. Beispiel: Kosten der Aussenwärmedämmung von Fassaden nehmen mit zunehmender Dämmstärke zu.
- Veränderung der Basisgrössen, worauf sich die spezifischen Kosten beziehen, insbesondere veränderte Flächen- und Längenanteile. Beispiel: Je höher der Fensterflächenanteil in Neubauten, desto geringer die Längen und damit die Kosten von Leibungsanschlüssen und (teuren) Fensterbänken, weil die verglasten Flächen bis zum Boden reichen.
- Zusätzliche Elemente bei hohem Wärmedämmstandard wie der Einbau einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung.
- Kosteneinsparmöglichkeiten bei zunehmender energetischer Qualität der Gebäudehülle, insbesondere bei den Investitionen in Wärmeerzeugung und Verteilung (v.a. bei MFH). Beispiel: Bei der Reduktion des Qh auf die Hälfte können die Kosten der Wärmeverteilung bei Neubauten um 30% bis 40% reduziert werden.
- Zusätzliche Abbrucharbeiten, um Wärmedämmungen anbringen und Wärmebrücken unterbrechen zu können (z.B. bei Balkonen).

Diese Aufzählung der Kosteneinflüsse deutet darauf hin, dass im Grundsatz eine Wärmedämminvestition in Bezug zu setzen ist zu einem bestimmten Gebäudetyp und eine systemare systematische Kostenbewertung notwendig wäre. Von diesem Bewertungsgrundsatz muss aber in vielen Fällen wegen des hohen Datenaufwandes Abstand genommen werden.

a) Grundsätzliche Unterschiede zwischen Neubau und Erneuerung

Im Gebäudebestand muss von einer bestehenden bautechnischen und architektonischen Situation ausgegangen werden (kleinere Planungsfreiheit).

Kritische Bereiche, insbesondere das Beheben von Wärmebrücken und die vollständige Erstellung der Luftdichtigkeit bedingen eine zum Teil hohe Eingriffstiefe und sind häufig mit Baumeisterarbeiten bzw. Abbrüchen verbunden (Balkonabbrüche, Abbruch der Flachdachdämmung) und können bzw. werden, auch aus Kostengründen, nur teilweise oder gar nur selten verwirklicht (z.B. Vergrösserung der Fensteröffnungen).

Bauabläufe sind von vielen Randbedingungen abhängig, die zum Teil nicht oder nur schwierig beeinflusst werden können.

b) Einfluss der Bauabläufe auf die Kosten

Im Erneuerungsbereich sind die Kosten der energetischen Erneuerung auch von den Bauabläufen abhängig:

- Im Total ist der Einbau eines Fensters plus die Innenerneuerung kostengünstiger, wenn beide Arbeiten gleichzeitig ausgeführt wird.

- Der Anschluss der Fassade insbesondere an das Steildach ist wesentlich kostengünstiger, wenn die Wärmedämmung an Fassade und Dach gleichzeitig durchgeführt werden (20 Fr/m versus 120 Fr/m), was im EFH bei der Umlegung auf den Overall-Fassadenpreis (m^2-Preis inkl. alle Anschlüsse) eine Verteuerung um 60 Fr/m^2 bedeuten kann.

c) Methodik der Kostenermittlung

Die Herausforderung der Ermittlung der Grenzkosten zunehmender Energie-Effizienz beim Neubauen und Erneuern besteht darin, dass die interessierenden Bauleistungen eher selten ausgeführt werden bzw. entsprechende Kosten- und Energieeffizienzdaten nicht zur Verfügung stehen. Das gilt für die energetische Erneuerung von bestehenden Gebäuden noch mehr als für Neubauten. Besonders im Erneuerungsbereich konnten demzufolge nicht ausgeführte Projekte in Zusammenarbeit mit Immobilienfirmen ausgewertet werden, sondern die Kosten der interessierenden Bauleistungen waren mittels spezialisierter Anfragen direkt bei den bauleistungserbringenden Unternehmen zu erheben.

Umfangreiche Vorabklärungen und die Erhebungen selbst haben gezeigt, dass die Bauleistungen und deren energetische Wirkung nicht für die Vielfalt der bestehenden Gebäude erhoben werden muss, sondern dass mit einem kanonischen, d.h. typisierenden Ansatz gearbeitet werden kann. Bzgl. der spezifischen Preise von wärmetechnischen Massnahmen an der Gebäudehülle und insbesondere deren Preissteigerungen bei zunehmender energetischer Effizienz brauchte nur zwischen einigen wenigen verschiedenen Konstruktionstypen und Gebäudesubstanzzuständen zu unterschieden werden. Denn die Preise variieren ebenso so deutlich mit der Ausführungsart und mit den Bauabläufen. Die Kosten und Nutzen energieeffizienten Bauens und Erneuerns können demzufolge anhand relativ weniger spezifischer Preise bzw. Kosten, der Berechnung derer energetischen Wirkung und der anschliessenden Hochrechnung auf der Basis der Gebäudegeometrien und der energetischen Typologisierung aufgespannt werden. Dies bedeutet:

Die Preise der energie-effizienten Bauleistungen und insbesondere deren Unterschiede bei zunehmender Energieeffizienz hängen relativ wenig vom Konstruktionstyp und von der Gebäudesubstanz ab. So bestimmt beispielsweise der Zustand der bestehenden Wand den Preis einer Aussenwärmedämmung nur in geringem Masse oder der Preis des Montierens von Fenstern unterschiedlicher Qualität wird nicht von der Gebäudesubstanz beeinflusst. Im Einzelfall mag die Gebäudesubstanz oder die Konstruktionsart die Vorgehensweise mitbestimmen (z.B. ob das Dach von unten oder von oben gedämmt wird). Entscheidender ist, ob diese Massnahmen für die jeweiligen Gebäude in den verschiedenen Zuständen bauphysikalisch und energetisch sinnvoll sowie wirtschaftlich vertretbar sind.

Bei der energetischen Wirkung einer bestimmten Massnahme muss jedoch weiter differenziert werden, denn eine gleiche Massnahme (z.B. 12 cm Aussenwärmedämmung) kann je nach Ausgangslage eine unterschiedliche energetische Wirkung haben.

Es kommt demzufolge das folgende analytische, dreistufige Verfahren zur Anwendung.

Schritt 1 Der Gebäudepark wird energetisch und architektonisch typologisiert.

Schritt 2 Die Preise werden elementweise und als spezifische Grösse erhoben, entweder pro m^2, pro m oder pro Stück.

Schritt 3 Die Bauleistungen werden entsprechend sowie unter Berücksichtigung der Bauabläufe bzw. der architektonischen Pakete zugeordnet. Die Kosten werden anhand der architektonischen Merkmale (Längen, Flächen etc.) berechnet und mit der energetischen Wirkung in Beziehung gesetzt.

Schritt 1 wurde in Kapitel 3 behandelt. Die nachfolgenden Überlegungen in diesem Kap. 4.3 behandeln Schritt 2, während Schritt 3 im Kapitel 4.3 für den Neubau und im Kapitel 6 für die Gebäudeerneuerung behandelt wird**.**

4.3.2 Methodische Hinweise zur Kostenermittlung im Bereich Wand und Fassade

Im Neubau und bei der energetischen Gebäudeerneuerung wird zwischen den folgenden zwei bzw. drei technischen Möglichkeiten unterschieden:

- Verputzte Aussenwärmedämmung (Kompaktfassade) mit Polystyrol oder Mineralwolle
- Hinterlüftete Fassade mit Mineralwolle
- Holzsystembau

Folgende Preis- bzw. Kostenelemente sind in die energetische Grenzkostenbetrachtung miteinzubeziehen, wobei unterschieden wird zwischen

- Flächenbasierten Elementen (vgl. Tabelle 4.3-1)
- Längenbasierten Elementen: Die linien- bzw. längenbasierten Elemente umfassen Anschlüsse an Fenster (Leibungen, Fensterbänke, Stürze); Anschlüsse an Sockel bzw. eigentliche Perimeterdämmung sowie Anschlüsse an Flach- bzw. Steildach.

Tabelle 4.3-1 Flächenbasierte Preis- bzw. Kostenelemente für verschiedene Fassadentypen

Elemente	**Kompaktfassade**	**Hinterlüftete Fassade**
Gerüstkosten	Gerüstkosten (dämmstärkenabhängig)	
Vorbereitungsarbeiten	Waschen/Tiefengrund., evtl. Putz ausbessern (Erneuerung)	Ausreissversuche (Erneuerung)
Wärmedämmung	Wärmedämmung, inkl. verlegen (Arbeitsanteil)	
Befestigungsmaterial	Montagematerial (Kleber / Mörtel, Dübel)	Unterkonstruktion (Holz, Holz-Metall, Metall)
Fassadenhaut	Armierung, Putz, Anstrich	Bekleidung

Diese Elemente weisen unterschiedliche Kosten für den Neubau bzw. die Erneuerung auf, bei letzterer sind die Kosten zusätzlich vom Bauablauf abhängig.

a) Methodik der Kostenermittlung

Das Vorgehen zur Erhebung von Preiselementen berücksichtigte auch den Einfluss der Grössenstruktur der bauleistungserbringenden Unternehmen und war auf den Organisationsgrad in Verbänden oder Fachvereinigungen angewiesen.

Kompaktfassaden: Die Kompaktfassaden werden von grösseren spezialisierten Fassadenfirmen, aber vor allem auch von vielen kleinen Gipserunternehmen appliziert. Sie alle beziehen die Produkte von den sogenannten **Systemhaltern.** Diese stellen sicher, dass die verwendeten Produkte (Mörtel/Kleber, Dämmstoff, mechanisches Befestigungsmaterial, Armierungsgitter, Putz etc.) technologisch zusammenpassen. Da sie ausserdem die applizierenden Firmen, also ihre Kunden, zusätzlich technisch und preislich beraten, kommt den Systemhaltern im Bereich der Kompaktfassaden eine entscheidende Bedeutung zu. Sie sind als grössere Unternehmen ausserdem besser in der Lage, auch etwas aufwendigere Anfragen zu beantworten. Eine Auswahl von Systemhaltern und von Fassadenfirmen wurde also für die Preisanfragen gewählt, wobei die Fassadenfirmen solche sind, welche auch im Bereich der hinterlüfteten Fassaden tätig sind, so dass beide Fassadensysteme aus einem gleichen Ansatz beurteilt wurden.

Hinterlüftete Fassaden: Die Unternehmen, welche hinterlüftete Fassaden verlegen, sind zu einem grossen Teil im Schweizerischen Fachverband für Hinterlüftete Fassaden, dem SFHF, organisiert, teilweise auch im SVDW (ursprünglich vom Dach her kommend). Der SFHF konnte für eine Umfrage (Vollerhebung) im Bereich der hinterlüfteten Fassaden gewonnen werden (und im Sinne einer Lastenverteilung wurde der SVDW für den Dachbereich ausgewählt).

Bei beiden Umfragen ging es darum, nicht nur Preise von heute üblichen Bauleistungen (Dämmstärken) zu erheben, sondern auch von solchen, von denen die Preise nicht routinemässig bekannt sind. Aus diesem Grund wurden die Preisfragebogen relativ detailliert gestaltet, um den Ausfüllenden eine Richtschnur zu bieten und sicherzustellen, dass die Preise systematisch und reflektiert angegeben werden können.

b) Zusätzliche Gerüstkosten

Im Neubaufall werden beim Gerüst nur die von der höheren Dämmstärke verursachten Mehrkosten (gegenüber der Referenzdämmstärke) miteingerechnet. Diese werden z.B. durch entsprechende Konsolen oder einen zusätzlichen Arbeitsgang verursacht und betragen 3 CHF/m² bis 5 CHF/m² bei 20 cm bzw. 5 CHF/m² bis 10 CHF/m² bei 30 cm Dämmstärke.

4.3.3 Kompaktfassaden

Die reinen Flächenpreise von Kompaktfassaden gleichen sich bei hohen Dämmstärken zwischen Neubau und Erneuerung an, weil im Neubaufall ebenfalls gedübelt werden muss, sobald zweilagig gearbeitet wird (meistens ab 20 cm vgl. Abbildung 4.3-1). Neben den Gesamtinvestitionskosten sowie deren Kostenstruktur wurden aus der Erhebung folgende Einzelangaben bekannt:

- Die Kosten für die Leibungsdämmungen sind (bei gleicher Dämmstärke und gleicher Leibungstiefe) bei Neubau und Erneuerung grundsätzlich gleich. Beim Neubau besteht jedoch die Möglichkeit, das Fenster an der Aussenkante des Mauerwerks oder des Wandelements (beim Systembau) anzuschlagen, so dass die Leibungstiefe aussen wesentlich reduziert werden kann. Ein grosser Unterschied besteht jedoch zwischen der in der Erneuerung häufigen 0 cm Dämmung (rund 25 CHF/m²) und der 2 cm oder mehr Dämmung (rund 40 CHF/m²).

- Fensterbänke: Im Neubau und teilweise auch im Erneuerungsfall kommen entweder gedämmte Fensterbänke oder sogenannte Unterschiebe-Fensterbänke z.B. aus Alu zur Anwendung. Deren Preise variieren in Funktion der Dämmstärke der Aussenwärmedämmung der Fassade. Bei einer Zunahme der Fassadendämmstärke von z.B. 10 cm ergibt sich ein Mehrpreis von 5 bis 10 CHF/m, dies bei einem Preisniveau von 170 bis über 200 CHF/m für gedämmte Fensterbänke und 70 bis 90 CHF/m für Metallfensterbänke.
- Im Erneuerungsfall wird bei erhöhten Dämmstärken entweder das Abtrennen der bestehenden Fensterbank oder das Aussparen der Wärmedämmung mit abschliessender Metallfensterbank notwendig, wobei der Preis letzterer wiederum von der Dämmstärke der Fassade abhängt (Mehrpreise von ca. 10 CHF/m pro 10 cm zusätzlicher Dämmstärke).
- Bei Gebäudeerneuerungen kommt die Vorbereitung des Untergrunds hinzu. Dazu gehört meistens das Waschen und eine Tiefengrundierung (10 CHF/m² bis 15 CHF/m²), evtl. müssen Ausgleichputze appliziert werden (20 CHF/m²) und unter Umständen müssen zuerst alte Putze entfernt werden (25 CHF/m²).

Insgesamt ergaben sich leicht progressiv zunehmende Investitionskosten, insbesondere bei Dämmstärken grösser 16 cm (vgl. Tabelle 4.3-2). Unterstellt man als Referenz 12 cm Dämmstärke, so lassen sich von diesem Wärmedämmstandard für weitere Verbesserungen die Grenzkosten bezogen auf die jeweils zusätzlich eingesparte Energie errechnen.

Diese Ergebnisse müssen mit zwei Vorbehalten interpretiert werden:

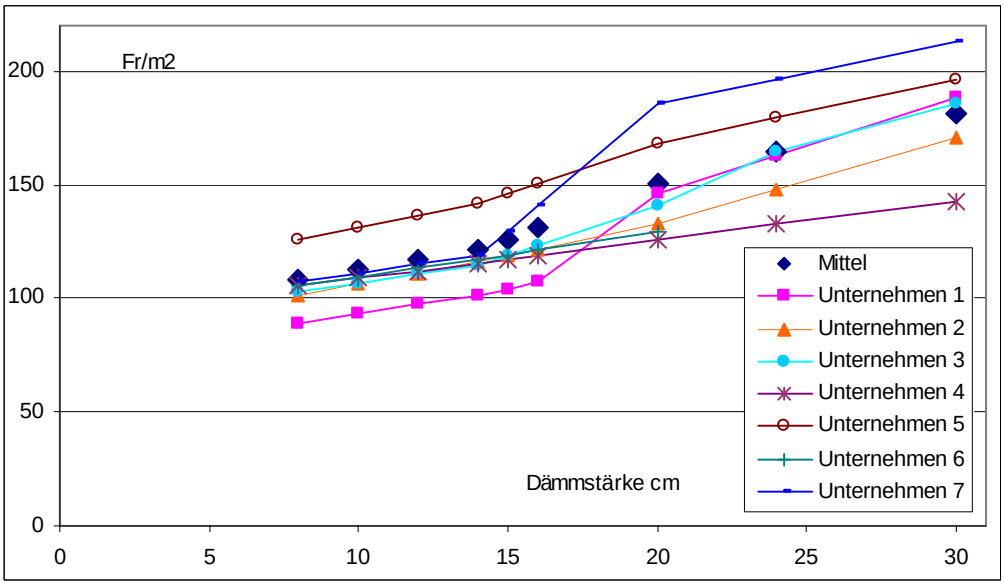
- Da die Nutzungszeit etwa 40 bis 50 Jahre beträgt und die Energiepreise für Heizöl, Erdgas oder andere Endenergieträger mit Sicherheit in dieser Zeitperiode zunehmen werden, sollten die angegebenen Grenzkosten nicht mit den heutigen Wärmekosten von vielleicht 6 bis 8 Rp/kWh_{NE} verglichen werden. Ein solcher Vergleich würde den Nutzen der Wärmedämmung oberhalb der Referenzstärke unterschätzen.
- Die Investitionskosten werden auch in Zukunft eher rückläufig sein für die gleiche Dämmstärke, so wie dies auch in den letzten 20 Jahren aufgrund von Rationalisierungen und verbesserten Dämmeigenschaften möglich war. Deshalb werden die Grenzkosten für gleiche Dämmstärken in Zukunft rückläufig sein (vgl. Kapitel 4.4.4).

Fasst man beide Effekte zusammen, so bedeutet dies, dass heute noch unwirtschaftliche Dämmstärken (ohne Berücksichtigung externer Kosten) in fünf oder zehn Jahren wirtschaftlich sein könnten. Diese Überlegungen gelten auch für alle übrigen folgenden Kostenangaben.

Die quantitativen Ergebnisse nachfolgend im einzelnen:

a) Polystyrol Neubau

Ausgehend von der Darstellung der Erhebungsergebnisse (Abbildung 4.3-1 und Abbildung 4.3-2) werden die Grenzkosten der eingesparten Nutzenergie berechnet (Tabelle 4.3-2). Nachfolgend wird der Einfluss von verlängerten spezifischen Leibungslängen aufgezeigt.

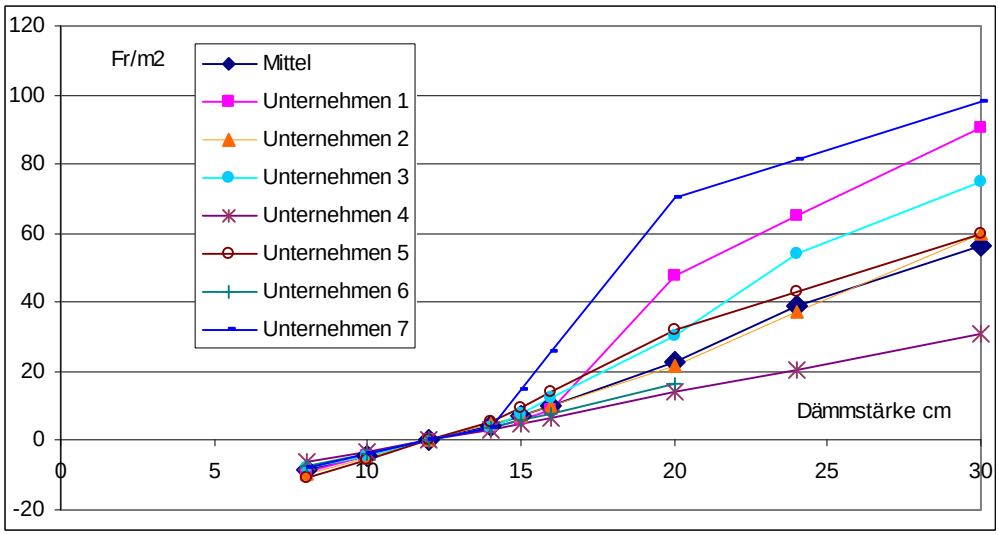


Quelle Erhebung CEPE

Abbildung 4.3-1 Investitionskosten von Kompaktfassaden (Aussenwärmedämmungen mit Polystyrol) für einen 4FH-Neubau, Kosten inkl. Anschlüsse an Fenster (0.45m/m²) und Schrägdach. CHF/m²

Laut den an der Erhebung teilnehmenden Fassadenfirmen ist das Niveau der spezifischen Kosten für Ein- und Mehrfamilienhäuser identisch. Möglicherweise werden bei grossen Aufträgen etwas höhere Rabatte gewährt. Die Preise sind mehr von den architektonischen Formen (Länge der Ecken und Kanten sowie der Anschlüsse an Fenster, Dach, Sockel sowie andere fremde Bauteile) und der Materialwahl abhängig.

Die folgenden Abbildungen reflektieren weitgehend die Antworten der Fassadenunternehmen. Die Erhebungsbogen wurden in den überaus meisten Fällen sehr vollständig ausgefüllt oder konnten durch Rücksprachen komplettiert werden. An einigen wenigen Stellen mussten wegen fehlender Angaben Annahmen getroffen werden, wobei sich diese an den Kostenelementen der übrigen Unternehmen orientierten. Das Preisniveau variiert von Unternehmen zu Unternehmen. Diese Preisunterschiede sind einerseits regional begründet, laut Aussagen der Unternehmen aber auch durch Qualitätsunterschiede. Je optimaler die Abstimmung der einzelnen Komponenten (Kleber, Einbettungsmasse, Putz, Armierungsgitter, Farbe) und je besser die dienstleisterische Unterstützung der applizierenden Kleinunternehmen durch die Systemhalter, desto länger die Lebensdauer der Fassaden.



Quelle Erhebung CEPE

Abbildung 4.3-2 Investitionsmehrkosten von Kompaktfassaden (Aussenwärmedämmungen mit Polystyrol) gegenüber der Referenzdämmstärke von 12 cm für einen 4FH-Neubau, Kosten inkl. Anschlüsse an Fenster (0.45m/m²) und Schrägdach. CHF/m²

Zwischen 8 cm und rund 16 cm ist die Steigung der Kosten in Funktion der Dämmstärke beinahe identisch für alle Fassadenfirmen. Die aufgrund der Primärangaben berechneten Mehrpreise beginnen ab 20 cm Dämmstärke wesentlich stärker zu streuen. Dies liegt zu einem grossen Teil darin begründet, dass der Markt dieser Dämmstärke noch ein sehr kleines Volumen aufweist und die Preisbildung der Unternehmen und der Marktmechanismus des One-Price-for-one-good seine Wirkung noch nicht entfalten konnte. Insbesondere Unternehmen Nr. 1 und Nr. 7 scheinen noch nicht viel Erfahrung mit Dämmstärken von 20 cm und 30 cm zu haben, weshalb sie nicht in die Mittelwertbildung miteinbezogen werden.

Aufgrund der Mehrinvestitionskosten gegenüber der Referenzdämmstärke 12 cm und dem Effizienzgewinn (Heizwärmebedarfsreduktion) werden darauf die Grenzkosten der verstärkten Wärmedämmung berechnet, und zwar für den Mittelwert der Unternehmen sowie für den festgestellten Best Practice (Unternehmen Nr. 4), siehe Tabelle 4.3-2 und Abbildung 4.3-3.

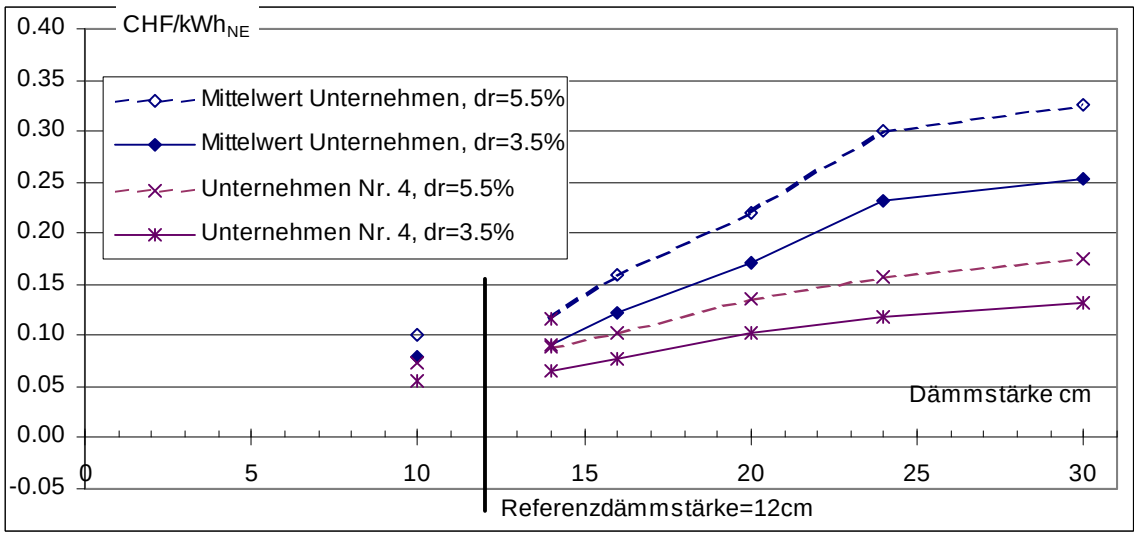
Diese Grenzkosten sind nicht direkt mit dem Energiepreis der Heizungen zu vergleichen, sondern mit dem sogenannten Wärmepreis, der auch die Investitionskosten (bzw. mindestens einen Teil davon) für die Wärmeerzeugung und –verteilung enthält (weitere Vorbemerkungen zum Wärmepreis zu Beginn des Kapitels).

Tabelle 4.3-2 Investitions-, Investitionsmehrkosten, Effizienzgewinn und Grenzkosten (Durchschnittkostenansatz) gegenüber Referenzdämmstärke 12 cm für Aussenwärmedämmungen bei Neubauten (Kompaktfassade mit Polystyrol) inkl. Anschlüsse an Fenster (0.45m/m²) und Schrägdach.

Dämmstärke	U-Wert	Nutzenergie-gewinn gegen-über Referenz	Investitionskosten Mittelwert	Investitionskosten Bestwert	Grenzkosten der eingesparten Energie [1] (Durchschnittskostenansatz) Mittelwert Unternehmen dr=0.055	Mittelwert Unternehmen dr=0.035	Best Practice dr=0.055	Best Practice dr=0.035
cm	W/m²K	kWh/m²$_{Wand}$a	Fr/m²$_{Wand}$	Fr/m²$_{Wand}$	CHF/kWh$_{NE}$	CHF/kWh$_{NE}$	CHF/kWh$_{NE}$	CHF/kWh$_{NE}$
10	0.31	-3	112	109	0.10	0.08	0.07	0.06
12	0.28	0	117	112				
14	0.25	2	121	115	0.12	0.09	0.09	0.07
16	0.23	4	127	119	0.16	0.12	0.10	0.08
20	0.20	6	140	126	0.22	0.17	0.14	0.10
24	0.18	8	156	133	0.30	0.23	0.16	0.12
30	0.15	11	174	143	0.33	0.25	0.18	0.13

[1] Annahmen für Kapitalkostenermittlung 40 Jahre Nutzungszeit, 3.5% bzw. 5.5 % Realverzinsung

Quelle Erhebungen und Berechnungen CEPE



Quelle Erhebungen und Berechnungen CEPE

Abbildung 4.3-3 Grenzkosten der eingesparten Nutzenergie (Durchschnittskostenansatz) in Abhängigkeit der Dämmstärke, für Aussenwärmedämmungen bei Neubauten (Kompaktfassade mit Polystyrol) inkl. Anschlüsse an Fenster (0.45 m/m²) und Schrägdach.

Folgende Feststellungen können anhand dieser Berechnungen gemacht werden

- Die Grenzkosten (im Durchschnittskostenansatz) nehmen zunächst (bis ca. 16 cm) beinahe linear zu. Der Anstieg beginnt dann ab ca. 20 cm abzuflachen.
- Die Grenzkosten reagieren wie erwartet sensitiv auf den angenommenen Realzinssatz, siehe dazu auch die Sensitivitätsbetrachtungen im Kapitel 4.1.2 a).
- Bei den berechneten bzw. dargestellten Grenzkosten handelt es sich um Bruttogrenzkosten, d.h. die Minderkosten aufgrund der eingesparten Wärmekosten sind davon nicht abgezogen. Diese Wärmekosten betragen im Neubau je nach Energiepreis (Durchschnitt über die nächsten 40 Jahre, gemäss Lebensdauer der Wanddämmung) und Wärmeerzeugungssystem 8 Rp/kWh$_{NE}$ bis 11 Rp/kWh$_{NE}$. Legt man den Mittelwert der Unternehmen und den tieferen Zinssatz zugrunde, sind rund 16 bis 18 cm im Bereich der Wirtschaftlichkeit. Beim Best Practice, dem Unternehmen mit dem geringsten Kostenanstieg, sind beim EFH 30 cm beinahe wirtschaftlich, beim MFH rund 25 cm (die vermiedenen Wärmekosten sind beim EFH etwas geringer und die Grenzkosten aufgrund des höheren Zinssatzes höher).
- Die Grenzkosten reagieren sehr sensitiv auf die Mehrinvestitionskosten. Während beim Mittelwert der Unternehmen die Grenzkosten (im Durchschnittskostenansatz) von 4 cm zusätzlicher Dämmstärke 12 Rp/kWh$_{NE}$ bzw. 16 Rp/kWh$_{NE}$ betragen, sind es beim Unternehmen mit dem geringsten Kostenanstieg nur 6 Rp/kWh$_{NE}$ bzw. 8 Rp/kWh$_{NE}$, also rund die Hälfte. Bis zur Dämmstärke 30 cm akzentuiert sich der Unterschied gar noch etwas. Dabei ist zu betonen, dass das Unternehmen mit dem geringsten Kostenanstieg nicht etwa durch ein allgemein hohes Kostenniveau bei der Referenzdämmstärke auffällt, was evtl. einen geringeren Anstieg teilweise erklärt hätte.
- Aus dieser Gegenüberstellung lässt sich auch ein Benchmark ableiten, wieviel denn die Mehrkosten betragen dürften, damit die Effizienzinvestitionen im Wirtschaftlichkeitsbereich bzw. knapp darüber liegen. 12 bis 14 CHF/m^2 dürften sie bei Dämmstärke 20 cm betragen und rund 25 bis 30 CHF/m^2 bei 30 cm.

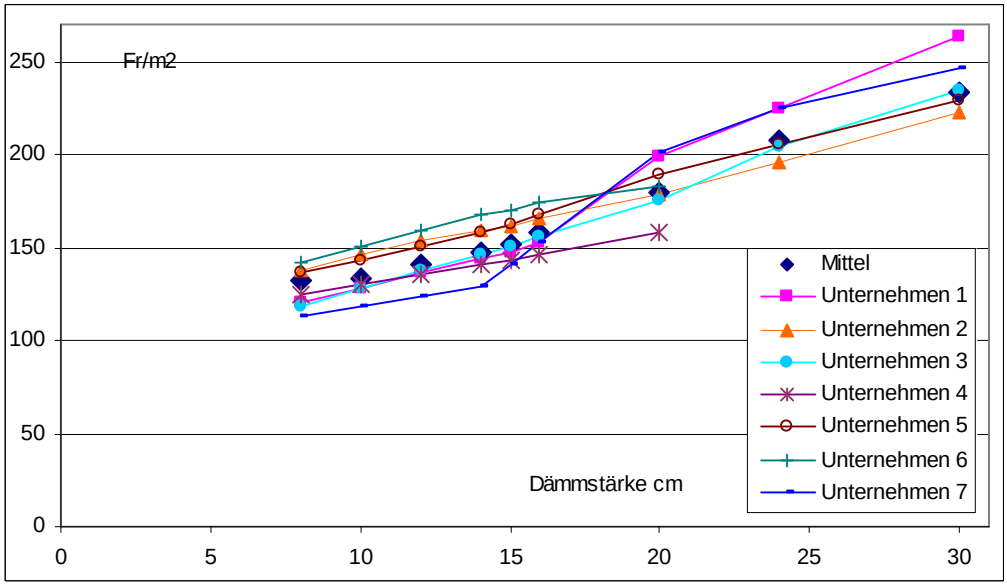
b) Mineralwolle Neubau

Kompaktfassaden lassen sich auch mit dem Dämmmaterial Mineralwolle erstellen. Das absolute Kostenniveau ist etwas höher als beim Dämmstoff Polystyrol, wird aber trotzdem gewählt, unter anderem wegen der höheren Diffusionseigenschaften und wegen der mechanischen Festigkeit.

Die Mehrinvestitionen der Steinwolle- und der Polystyrol-Kompaktfassade sind im Verlauf zunehmender Dämmstärken sehr ähnlich, wie der Vergleich von Abbildung 4.3-2 mit Abbildung 4.3-5 zeigt. Auch hier ist eine relativ grosse Streuung festzustellen. Die Unternehmen Nr. 1 und Nr. 7 werden wiederum aus den oben genannten Gründen von der Mittelwertbildung ausgeklammert.

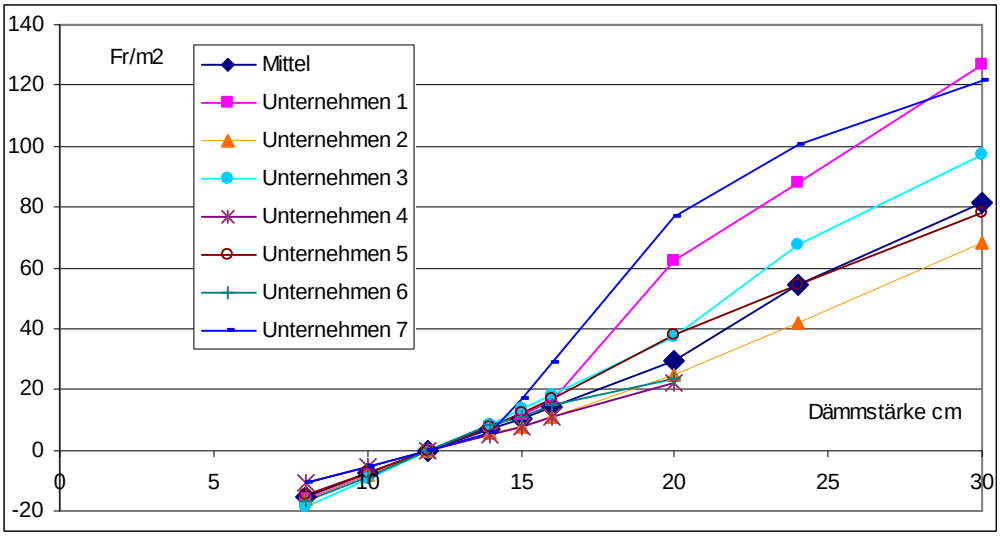
Die Mehrkosten in Funktion zunehmender Dämmstärke liegen rund 30% höher als beim Polystyrol. Aufgrund der besseren mechanischen Eigenschaften ist diese Variante jedoch weniger empfindlich gegen Beschädigungen und es kann mit einer allgemein höheren Lebensdauer gerechnet werden. Die Grenzkosten, welche ja auf einer Lebensdauerbetrachtung basieren, liegen demzufolge noch ca. 15% bis 20% höher wenn kein wegfallender Unterhalt eingerechnet wird. Wenn wegfallende Unterhaltskosten von ca. 10 bis 20 CHF/m^2 eingerechnet werden, sind die Grenzkosten leicht tiefer oder höchstens ca. 10% höher.

Für die verarbeitenden Unternehmen ist es ausserdem ein Vorteil, dass der Dämmstoffpreis nicht so sensitiv auf den Preis der fossilen Energie reagiert (was beim Polystyrol deshalb stark der Fall ist, weil Erdöl der Ausgangsrohstoff desselben ist).



Quelle Erhebung CEPE

Abbildung 4.3-4 Investitionskosten von Kompaktfassaden (Aussenwärmedämmungen mit Steinwolle) für einen 4FH-Neubau, Kosten inkl. Anschlüsse an Fenster (0.45m/m²) und Schrägdach. CHF/m²

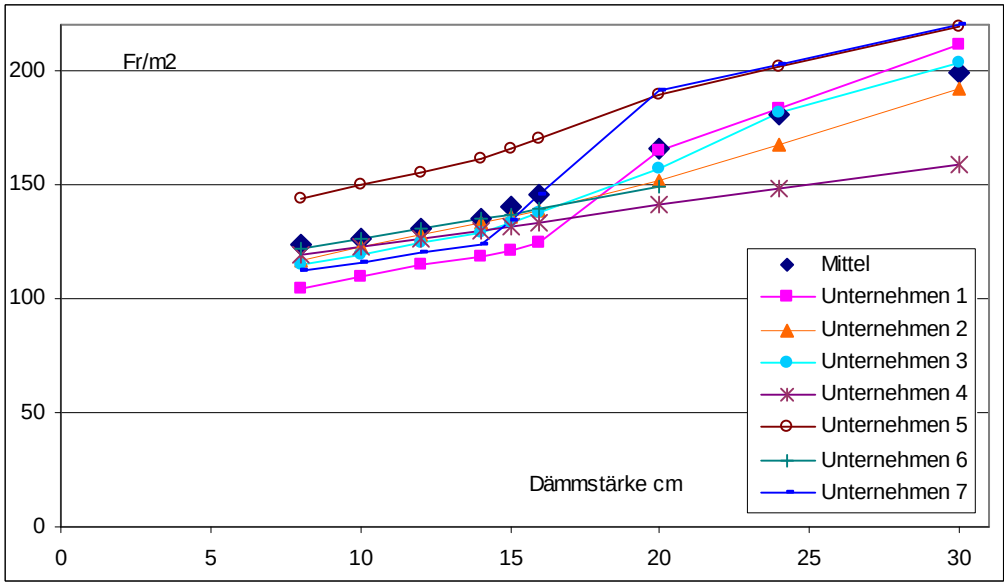


Quelle Erhebung CEPE

Abbildung 4.3-5 Investitionsmehrkosten von Kompaktfassaden (Steinwolle) gegenüber der Referenzdämmstärke von 12 cm für einen 4FH-Neubau, Kosten inkl. Anschlüsse an Fenster (0.45m/m²) und Schrägdach. CHF/m²

c) Einfluss der architektonischen Formen auf die Kosten von Aussenwärmedämmungen

Die spezifische Anschlusslänge (m Anschlusslänge pro m² Fassadenfläche) hat einen Einfluss auf die Kosten der Fassadenaussenwärmedämmung, wie der Vergleich von Abbildung 4.3-1 mit Abbildung 4.3-6 zeigt. Längere Anschlüsse wirken sich jedoch vor allem auf das absolute Niveau der Kosten aus und weniger auf die Steigung der Kosten in Funktion der Dämmstärke.

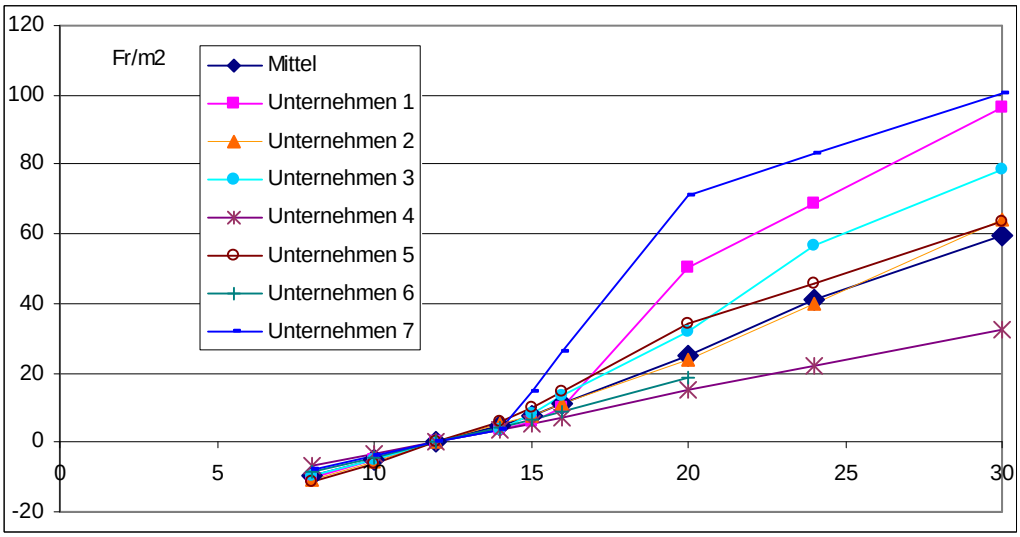


Quelle Erhebung CEPE

Abbildung 4.3-6 Investitionskosten von Kompaktfassaden (Aussenwärmedämmungen mit Polystyrol) für einen 4FH-Neubau bei gesamthaft längeren Fensteranschlüssen (0.7 m/m²). Kosten inkl. alle Anschlüsse an Fenster, Dach. CHF/m²

Im Gegensatz zum absoluten Niveau der Investitionskosten unterscheiden sich die Mehrkosten gegenüber der Referenz jedoch kaum für unterschiedliche Anschlusslängen. Dies geht aus dem Vergleich der Abbildung 4.3-2 mit Abbildung 4.3-7 hervor. Dasselbe gilt auch für die Kompaktfassaden mit Steinwolle.

Die Grenzkosten einer Fassadenaussenwärmedämmung als Kompaktfassade sind bei der untersuchten Anschlusslänge 0.65 m/m² ca. 10% höher als bei 0.45 m/m², wie der Vergleich zwischen Tabelle 4.3-2 und Tabelle 4.3-3 zeigt, zum einen wegen der linearen Kostenzuschläge und zum anderen wegen der etwas höheren linearen Wärmeverluste.



Quelle Erhebung CEPE

Abbildung 4.3-7 Investitionsmehrkosten von Kompaktfassaden (Aussenwärmedämmungen mit Steinwolle) gegenüber der Referenzdämmstärke von 12 cm für einen 4FH-Neubau bei gesamthaft längeren Fensteranschlüssen (0.7 m/m²), Kosten inkl. Anschlüsse an Fenster (0.65m/m²) und Schrägdach. CHF/m²

Tabelle 4.3-3 Investitions- und Grenzkosten für Aussenwärmedämmungen bei Neubauten (Kompaktfassade mit Polystyrol) bei gesamthaft längeren Fensteranschlüssen (0.65 m/m²). Kosten inkl. alle Anschlüsse an Fenster, Dach. CHF/m²

Dämmstärke	U-Wert	Nutzenergie-gewinn gegen-über Referenz	Investitionskosten Mittelwert	Investitionskosten Best Practice	Grenzkosten der eingesparten Energie [1] (Durchschnittskostenansatz) Mittelwert Unternehmen dr=0.055	Mittelwert Unternehmen dr=0.035	Best Practice dr=0.055	Best Practice dr=0.035
cm	W/m²K	kWh/m²$_{Wand}$a	Fr/m²$_{Wand}$	Fr/m²$_{Wand}$	CHF/kWh$_{NE}$	CHF/kWh$_{NE}$	CHF/kWh$_{NE}$	CHF/kWh$_{NE}$
10	0.33	-3.3	128	123	0.10	0.07	0.07	0.05
12	0.30		133	126				
14	0.27	2.2	137	130	0.13	0.10	0.10	0.07
16	0.25	3.7	144	133	0.18	0.14	0.12	0.09
20	0.23	5.8	158	141	0.27	0.20	0.16	0.12
24	0.20	8.5	175	148	0.31	0.23	0.16	0.12
30	0.18	10.3	193	159	0.37	0.28	0.20	0.15

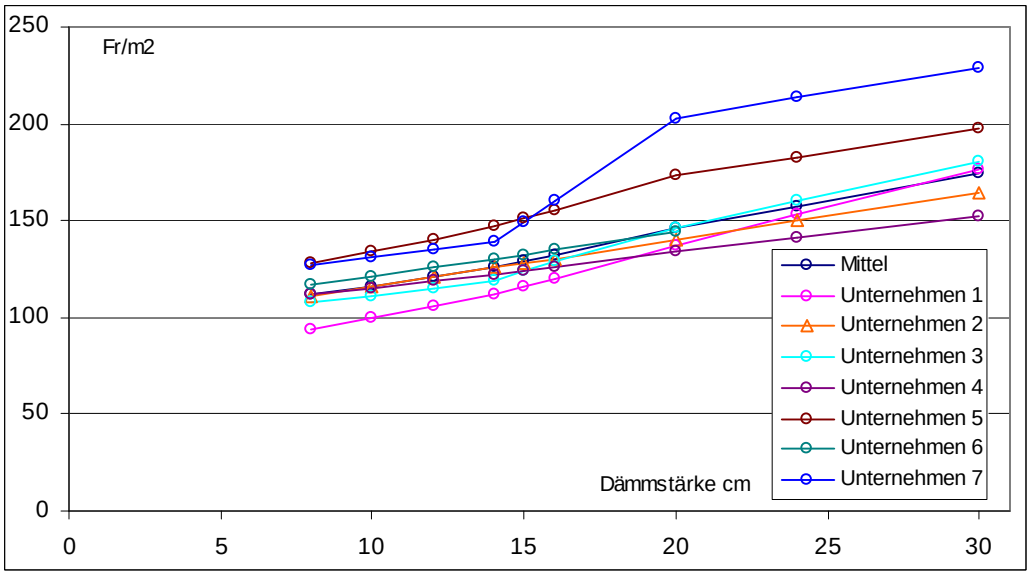
[1] Annahmen für Kapitalkostenermittlung 40 Jahre Nutzungszeit, 3.5% bzw. 5.5 % Realverzinsung

Quelle Erhebungen und Berechnungen CEPE

d) Fassadenerneuerung im Gebäudebestand

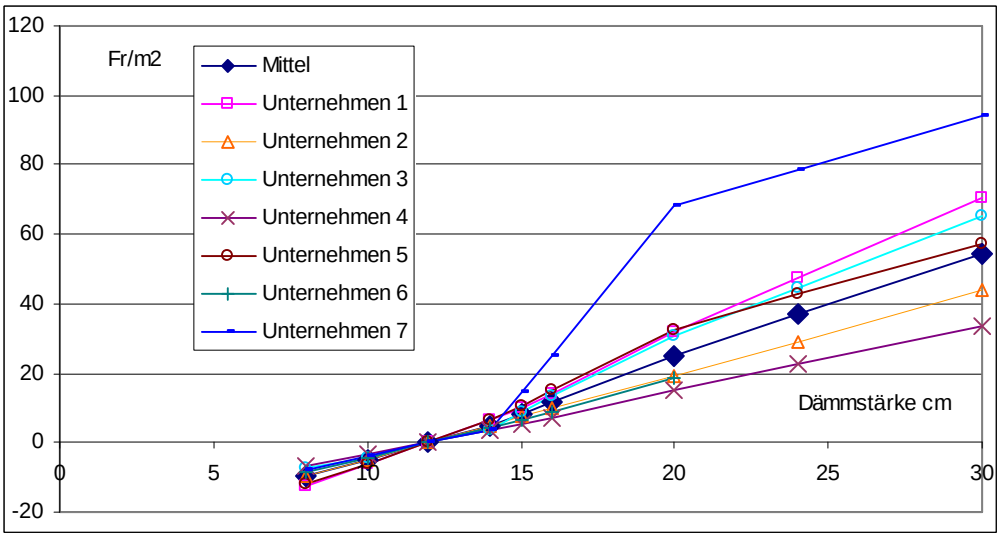
Das allgemeine Kostenniveau ist in der Erneuerung höher als im Neubau, zum einen wegen der Vorbereitungsarbeiten und zum anderen wegen der Notwendigkeit, die Dämmplatten zusätzlich zum Kleben zu dübeln. Diese Unterschiede sind jedoch gering. Beim Vergleich der Mehrkosten gegenüber der Referenzdämmstärke zwischen Neubau (Abbildung 4.3-2) und Erneuerung (Abbildung 4.3-9) fällt auf, dass der Anstieg ab rund 20 cm sogar etwas weniger stark ausfällt, u.a. deshalb, weil ab dieser Dämmstärke dann auch im Neubau zusätzlich mechanisch befestigt werden muss (dübeln)., während bei der Erneuerung dies auch bei der Referenzdämmstärke erforderlich ist.

Im Fall des Gebäudebestandes sind die Investitionskosten nicht nur mit der Referenzdämmstärke zu vergleichen, sondern auch mit den Kosten des Referenzfalls „Instandsetzung", welche eine Putzerneuerung (falls nötig) und einen Neuanstrich umfasst (keine Wärmedämmung) . Diese Kosten betragen inkl. Gerüst 30 CHF/m² bis 40 CHF/m². Dabei ist anzumerken, dass die Sensitivität dieser Annahme auf die Grenzkosten klein ist, denn es wird die Differenz zu einem Kostenlevel gebildet, das 120 CHF/m² und höher liegt. Die rund 10 CHF/m² Unsicherheit beim Referenzfall wirken sich bei den Grenzkosten also nur zu ca. 10% aus.



Quelle Erhebung CEPE

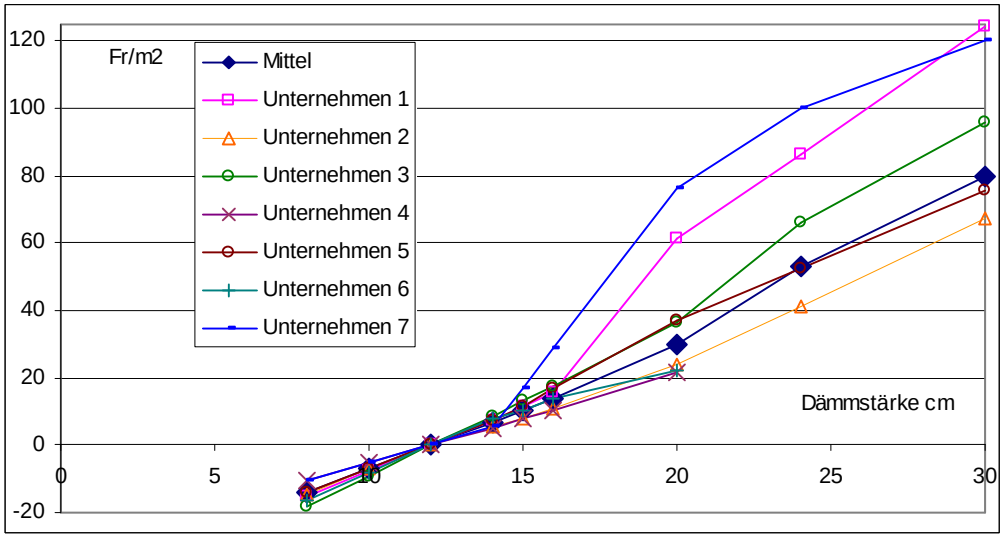
Abbildung 4.3-8 Investitionskosten von Kompaktfassaden (Aussenwärmedämmungen mit Polystyrol) für eine MFH-Erneuerung, Kosten inkl. Gerüst und inkl. Anschlüsse an Fenster (0.33m/m²) und Schrägdach. CHF/m²



Quelle Erhebung CEPE

Abbildung 4.3-9 Investitionsmehrkosten von Kompaktfassaden (Aussenwärmedämmungen mit Polystyrol) gegenüber der Referenzdämmstärke von 12 cm für eine MFH-Erneuerung, Kosten inkl. Anschlüsse an Fenster (0.33m/m²) und Schrägdach. CHF/m²

Nebst dem Dämmstoff Polystyrol wird die Kompaktfassade auch mit Mineralwolle (davon bis jetzt zum überwiegenden Teil Steinwolle) realisiert, siehe die Investitionskostenangaben der Unternehmen dazu in Abbildung 4.3-1.



Quelle Erhebung CEPE

Abbildung 4.3-10 Investitionsmehrkosten von Kompaktfassaden (Aussenwärmedämmungen mit Mineralwolle) gegenüber der Referenzdämmstärke 12cm für eine MFH-Erneuerung, Kosten inkl. Anschlüsse an Fenster (0.33m/m²) und Schrägdach. CHF/m²

Wie beim Neubau reagieren die Grenzkosten sensitiv auf die selben zwei Parameter: Realzinssatz (siehe Tabelle 4.3-4) und Kostenanstieg in Funktion der Dämmstärke. Werden wie im Neubaufall die Best-Practice statt der Durchschnittswerte der Unternehmen als Basis genommen, reduzieren sich die Grenzkosten gemäss Tabelle 4.3-3 um mehr als einen Drittel, denn der Kostenanstieg des Bestwertes ist um diesen Wert geringer, wie aus Abbildung 4.3-9 abgelesen werden kann.

Eine energetische Erneuerung kann auch anstelle einer Fassadeninstandsetzung mit nur Putzausbesserung oder Fassadenanstrich treten. In diesem Fall entfalten die ersten 10 cm Wärmedämmung eine sehr grosse energetische Wirkung, was sich in relativ tiefen Grenzkosten ausdrückt, siehe Tabelle 4.3-5.

Im Durchschnittskostenansatz steigen die spezifischen Energie-Effizienzkosten in Funktion weitergehender Dämmstärken kaum an, wenn die Kosten gegenüber der Referenz „Erneuerung ohne Wärmedämmung", also gegenüber der Instandsetzung der Fassade gerechnet werden, siehe dazu die Tabelle 4.3-5. Der sehr viel flachere Anstieg der Durchschnittskosten ist ebenfalls auf den vergleichsweise sehr grossen Effizienzgewinn des ersten Schritts zurückzuführen. Dies aus arithmetischen Gründen, denn die dazukommenden Beiträge seitens der Kosten und des Effizienzgewinns vermögen den Durchschnittswert nicht mehr stark zu verändern.

Dies zeigt gleichzeitig die Senstivität auf, welcher die Durchschnittskosten bzgl. der Annahme des Referenzfalles unterliegen. Gegenüber der Referenzdämmstärke von 12 cm betragen die Durchschnittskosten einer 20 cm Dämmung rund 16 Rp/kWh und gegenüber der Instandsetzung nur 7 Rp/kWh (Realzins 3.5%).

Tabelle 4.3-4 Investitions- und Grenzkosten gegenüber Referenzdämmstärke 12 cm für Aussenwärmedämmungen bei Erneuerungen (Kompaktfassade mit Polystyrol). Kosten inkl. Dämmung Fensterleibung 4 cm und Anschluss an Schrägdach. CHF/m²

Dämmstärke	Differenz Investitionskosten	Differenz Investitionskosten gegenüber Referenz	Differenz Nutzenergie gegenüber Referenz	Grenzkosten der eingesparten Nutzenergie [1] (Durchschnittskostenansatz)	
cm	CHF/m²Wand	CHF/m^2_{Wand}	kWh/m^2_{Wand}.a	dr=0.055 CHF/kWh_{NE}	dr=0.035 CHF/kWh_{NE}
10	116	5.0	3.3	0.10	0.07
12 (Ref)	121	0.0			
14	126	4.9	2.4	0.13	0.09
16	132	11	4.3	0.16	0.12
20	146	25	7.1	0.22	0.16
24	157	36	8.8	0.26	0.19
30	174	53	10.7	0.31	0.233

[1] Annahmen für Kapitalkostenermittlung 40 Jahre Nutzungszeit, 3.5% bzw. 5.5 % Realverzinsung

Quelle Erhebungen und Berechnungen CEPE

Tabelle 4.3-5 Investitions- und Grenzkosten für Aussenwärmedämmungen bei Erneuerungen (Kompaktfassade mit Polystyrol) . Referenz = Instandsetzung, Ausgangs-U-Wert$_{Fläche}$=1.1 W/m^{2}K. (Bauperiode bis ca. 1975). Kosten inkl. Dämmung Fensterleibung 4 cm und Anschluss an Schrägdach.

Dämmstärke	Investitions-kosten	Differenz Investitionskosten gegenüberReferenz	Differenz Nutzenergie gegenüber Referenz	Grenzkosten der eingesparten Nutzenergie 1) (Durchschnittskostenansatz)	
				dr=0.055	dr=0.035
cm	CHF/m2Wand	CHF/m2Wand	kWh/m2Wand.a	CHF/kWhNE	CHF/kWhNE
0 (Ref)	30				
10	116	86	67	0.080	0.060
12	121	91	70	0.081	0.061
14	126	96	72	0.083	0.062
16	132	102	74	0.086	0.065
20	146	116	77	0.094	0.070
24	157	127	79	0.101	0.076
30	174	144	81	0.111	0.084

1) Annahmen für Kapitalkostenermittlung 40 Jahre Nutzungszeit, 3.5% bzw. 5.5% Realverzinsung

Quelle Erhebungen und Berechnungen CEPE

Die Grenzkosten (im Durchschnittskostenansatz) einer energetischen Erneuerung gegenüber einer Instandsetzung hängen auch vom energetischen Ausgangszustand der Fassade ab. Ist der energetische Ausgangszustand „schlechter", der U-Wert der Flächenelemente also tiefer als für Tabelle 4.3-6 angenommen, wird der Effizienzgewinn grösser und ausserdem sinken die Grenzkosten.

Ist der Ausgangszustand hingegen besser (z.B. Flächen-U-Wert 0.6 W/m^{2}K statt 1.1 W/m^{2}K), z.B. bei Gebäuden der Bauperioden nach 1975, so wirkt sich das auf den Effizienzgewinn bei einer gleichen Dämmstärke (z.B. 10 cm) wie folgt aus:

- Muss die bestehende Wärmedämmung abgebrochen werden, so wird der Unterschied zwischen dem Zustand vor der Erneuerung (z.B. bestehende WD mit 4 cm) und nach der Erneuerung kleiner als beim schlechteren Ausgangszustand. Die Grenzkosten erhöhen sich dadurch, wie aus dem Vergleich von Tabelle 4.3-6 (Fall A) mit Tabelle 4.3-5 ersichtlich wird.
- Kann die bestehende Wärmedämmung mitgenutzt werden, z.B. in einem Zweischalenmauerwerk, ist der erwähnte Effekt nicht so stark und die Grenzkosten liegen entsprechend tiefer, wie der Vergleich von Fall B mit Fall A zeigt (Tabelle 4.3-6). Aber auch in diesem Fall liegen die Grenzkosten noch etwas höher als in Tabelle 4.3-5 mit dem schlechteren Ausgangswert.

Tabelle 4.3-6 Investitions- und Grenzkosten für Aussenwärmedämmungen bei Erneuerungen (Kompaktfassade mit Polystyrol) . Referenz = Instandsetzung, Ausgangs-U-Wert$_{Fläche}$=0.6 W/m²K (ca. Bauperiode 1975-1985). Kosten inkl. Dämmung Fensterleibung 4 cm und Anschluss an Schrägdach.

			A: Bestehende Dämmung wird abgebrochen				B: Bestehende Dämmung wird genutzt		
Dämmstärke	Investitionskosten	Psi Leibung	U-Wert Fläche (ohne Leibung)	U-Wert Fläche inkl. Leibung	Grenzkosten der eingesparten Nutzenergie (Durchschnittskostenansatz) dr=0.055	dr=0.035	U-Wert Fläche inkl. Leibung	Grenzkosten der eingesparten Nutzenergie (Durchschnittskostenansatz dr=0.055	dr=0.035
cm	CHF/m²$_{Wand}$	W/mK	W/m²K	W/m²K	CHF/kWh$_{NE}$	CHF/kWh$_{NE}$	W/m²K	CHF/kWh$_{NE}$	CHF/kWh$_{NE}$
0 (Ref)	35	0.08	0.60	0.63					
10	116	0.1	0.29	0.33	0.18	0.13	0.63	0.15	0.11
12	121	0.11	0.25	0.29	0.17	0.12	0.26	0.15	0.11
14	126	0.12	0.22	0.26	0.17	0.12	0.24	0.15	0.11
16	132	0.12	0.20	0.24	0.17	0.12	0.22	0.15	0.11
20	146	0.13	0.16	0.21	0.18	0.13	0.21	0.17	0.12
24	157	0.14	0.14	0.19	0.19	0.14	0.19	0.18	0.13
30	174	0.15	0.11	0.17	0.21	0.15	0.17	0.20	0.15

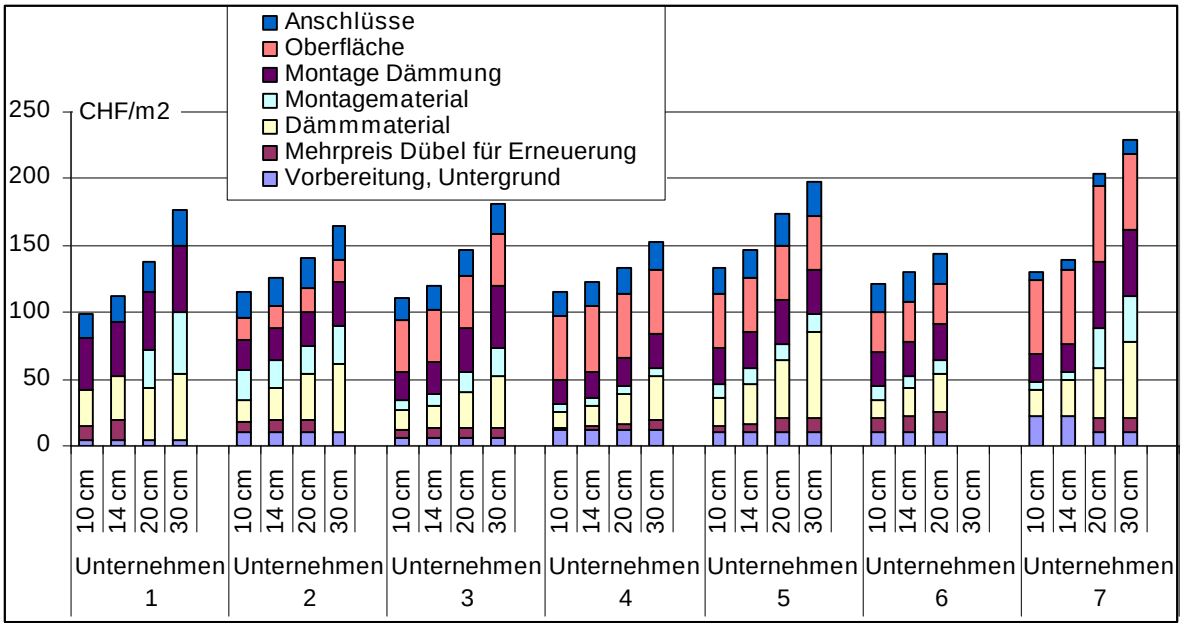
Quelle Erhebungen und Berechnungen CEPE

Bei einer noch besseren Ausgangslage, z.B. bei einem Flächen-U-Wert von 0.5 W/m²K, betragen die Grenzkosten von 10 cm gegenüber der Instandsetzung 0.14 CHF/kWh$_{NE}$ (dr=5.5%) bzw. 0.10 CHF/kWh$_{NE}$ (dr=3.5%), wenn die bestehende Wärmedämmung nicht abgebrochen werden muss. Muss sie abgebrochen werden, sind die Grenzkosten natürlich höher, denn dann dienen die ersten (z.B. 5) cm dazu, den Effekt der alten Wärmedämmung wiederherzustellen. Die Grenzkosten liegen dann bei 0.14 CHF/kWh$_{NE}$ (dr=5.5%) bzw. 0.10 CHF/kWh$_{NE}$ (dr=3.5%).

Auffallend ist auch hier, im Fall der Grenzkostenbetrachtung (Durchschnittskostenansatz) gegenüber der Instandsetzung bei besserer Ausgangslage, dass der Anstieg der Durchschnittskosten in Funktion zunehmender Dämmstärke sehr flach verläuft. Es ist sogar so, dass die spezifischen Kosten der Energieeffizienz bei 12 cm bis 16 cm leicht tiefer sind als bei 10 cm (wenn die bestehende Wärmedämmung abgebrochen werden muss).

e) Kostenstruktur von Kompaktfassaden

Die Kenntnis der Kostenstruktur ist hilfreich für das Verstehen des Anstiegs der Mehrkosten bei grösseren Dämmstärken sowie im Hinblick auf die Überlegungen zur Dynamisierung von Kosten und Technik, siehe Kapitel 4.5. Eine Zusammenstellung der Kostenstruktur ist in Abbildung 4.3-11 dargestellt



Quelle Erhebung CEPE

Abbildung 4.3-11 Kostenstukrur der Investitionskosten von MFH-Erneuerungen mittels Kompaktfassaden mit Polystyrol, Anschlüsse 0.33 m/m². CHF/m²

Mehrkosten werden nicht nur vom zusätzlichen Dämmmaterial verursacht, sondern auch vom zusätzlichen Verlegeaufwand, d.h. wegen des höheren Arbeitseinsatzes aufgrund des aufwendigeren handlings. So sind zum Beispiel bei 10 cm Dämmstärke 6 Platten in einem Paket, während es bei 30 cm nur noch ein Drittel davon ist. Dieser Arbeitsmehraufwand nimmt mit einem Sprung zu, sobald zweilagig verarbeitet werden muss. Weitere Punkte mit Kostenanstieg bei zunehmender Dämmstärke: Konsolen für Gerüste, Montagematerial (längere Dübel). Auch die Kosten der Anschlüsse nehmen graduell mit der Dämmstärke zu.

4.3.4 Hinterlüftete Fassaden

Die hinterlüftete Fassade besteht aus folgenden Elementen:

- Unterkonstruktion
- Dämmstoff
- Bekleidung durch vorgehängte Fassadenelemente.

Im Bereich der hinterlüfteten Fassaden ist die Konstruktionsvielfalt gross und die Preise der einzelnen Elemente können sich gegenseitig beeinflussen. Es ging also zunächst darum, allfällige Preisunterschiede zwischen diesen verschiedenen Konstruktions- und Bauweisen durch eine Erhebung aufzuzeigen, um zu entscheiden, in welcher Differenzierung die Preise dargestellt werden müssen und inwieweit sie zusammengefasst betrachtet werden können.

Folgende gegenseitige Beeinflussungen können auftreten, insbesondere hinsichtlich unterschiedlicher Dämmstärken: Die Bekleidung bestimmt die Preise der Unterkonstruktion über die Art (Gewicht, Material) und die Fläche der einzelnen Bekleidungselemente. Während der

Einfluss von Art und Fläche durchaus für den Wohnungsbau relevant ist, spielt das Gewicht im Wohnungsbau kaum eine Rolle, da kaum Schwerlastfassaden (z.B. Natur- oder Kunststeine) zur Anwendung kommen. Höchstens bei Zweischalenmauerwerken ist bei markanten Dämmstärken evtl. mit Zusatzkosten zu rechnen, wenn die Statik eine Abstützung der Last der Bekleidung auf die innere Schale erfordert und entsprechende Konsolen gesetzt werden müssen.

Die Preis- bzw. Kostenunterschiede sind nicht nur für die gesamtschweizerische Gewichtung der Grenzkosten wesentlich, sondern auch, weil es – aus konstruktiven, bautechnischen oder preislichen Gründen - in Abhängigkeit der Dämmstärke Verschiebungen geben kann, siehe Tabelle 4.3-7. So sind bei Wandstärken bis 16 cm die Holzunterkonstruktionen am häufigsten eingesetzt (ca. 40 %), während bei Dämmstärken über 20 cm die Metall- oder Holz-/Metall-unterkonstruktionen dominieren (ca. 80 %).

Tabelle 4.3-7 Häufigkeit der Unterkonstruktionstypen (UK-Typ) in Abhängigkeit der Dämmstärke, in %.

Befragtes Unternehmen	Dämmstärke	Unterkonstruktionstyp				Total
		Holz	Holz-Metall	Metall	Andere	
Unternehmen HF3 (Marktschätzung in % der m² Fassadenfläche)	Bis 16 cm	40	35	20	5	100
	16 cm bis 20 cm	5	45	45	5	100
	20 cm bis 30 cm	5	10	80	5	100
Unternehmen HF7	Bis 16 cm	50	35	15	-	100
	16 cm bis 20 cm	-	70	30	-	100
	20 cm bis 30 cm	-	90	10	-	100
Unternehmen HF11 (Spezielles UK-Unternehmen)	Bis 16 cm	25	30	40	5	100
	16 cm bis 20 cm	15	35	45	5	100
	20 cm bis 30 cm	5	30	60	5	100

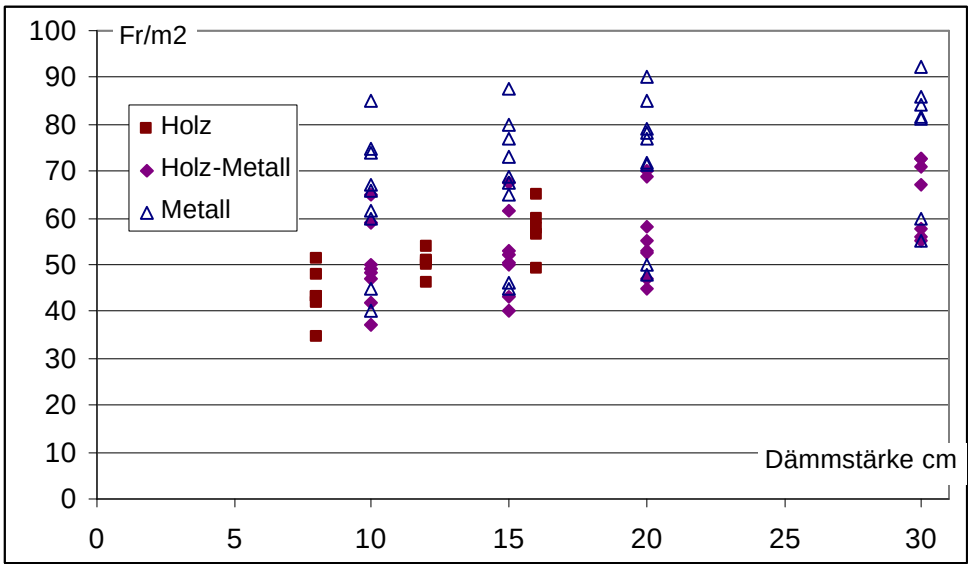
Quelle CEPE-Umfrage bei SFHF und weiteren Unternehmen.

a) Unterkonstruktion (UK)

Die Unternehmen differenzieren teilweise die Preise für Unterkonstruktionen für verschiedene Bekleidungselemente. Diese Preisunterschiede sind allerdings gering und verändern sich mit etwa 15CHF/m² zwischen 8 cm und 30 cm Dämmstärke (vgl. Abbildung 4.3-12). Die Unterschiede innerhalb eines Unternehmens betragen für Holz-UK und Holz-Metall-UK 2 CHF/m² bis 7 CHF/m² und sind von einer Ausnahme abgesehen konstant für alle Dämmstärken. Die UK sind (mit einer Ausnahme) für grossflächige Elemente leicht kostengünstiger und noch etwas kostengünstiger für Verputzelemente. Für reine Metall-UK differenzieren die Unternehmen etwas stärker zwischen den verschiedenen Bekleidungselementtypen (2 CHF/m² bis 7 CHF/m²) und die Unterschiede nehmen auch etwas stärker zu bei zunehmenden Dämmstärken.

Bedeutender sind die Preisunterschiede zwischen den verschiedenen UK-Typen, sowohl was das absolute Niveau wie die Preissteigerung bei zunehmenden Dämmstärken betrifft (siehe Abbildung 4.3-12). Diese unterschiedliche Preissteigerung motiviert auch den oben be-

schriebenen Wechsel der verwendeten UK bei unterschiedlichen Dämmstärken (vgl.Tabelle 4.3-7).



Quelle CEPE-Umfrage bei SFHF-und weiteren Unternehmen.

Abbildung 4.3-12 Preise für Unterkonstruktionen für hinterlüftete Fassaden

Als Besonderheiten zu vermerken sind Zweischalenmauerwerke und Hochhäuser. Die äussere Schale eines bestehenden Zweischalenmauerwerkes ist zum Teil (ca. 50% der Fälle) nicht in der Lage, die statische (horizontale) Last einer nachträglichen angebrachten hinterlüfteten Fassade aufzunehmen. In diesen Fällen muss diese mit einer zusätzlichen Konsole auf die innere Schale übertragen werden, was mit entsprechenden Mehrkosten von ca. 5 bis 30 CHF/m² verbunden ist (vgl.Tabelle 4.3-8). Bei Hochhäusern ab ca. 8 Stockwerken (22 m) erlauben die feuerpolizeilichen Vorschriften keine Holz- oder Holz-Metallkonstruktionen mehr.

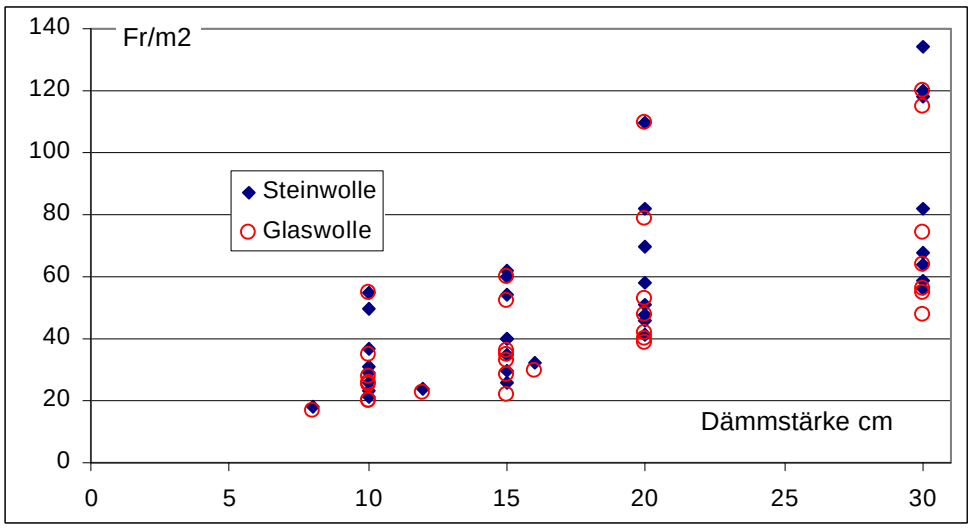
Tabelle 4.3-8: Zuschläge für hinterlüftete Fassaden bei energetischen Erneuerungen von Zweischalenmauerwerken und Hochhäusern, CHF/m²

	Dämmstärke in cm	Zweischalenmauerwerke	Hochhäuser
Unternehmen HF 3	generell	30	k.A.
Unternehmen HF 6	10	4 - 6	10 - 12
	15	6 - 10	14 - 16
	20	10 - 15	18 - 20
	30	15 - 20	26
Unternehmen HF 7	10	8 - 15	15
	15	10 - 15	15
	20	12 - 15	15
	30	15	15

Quelle CEPE-Umfrage bei SFHF- und weiteren Unternehmen

b) Dämmstoff und Montage

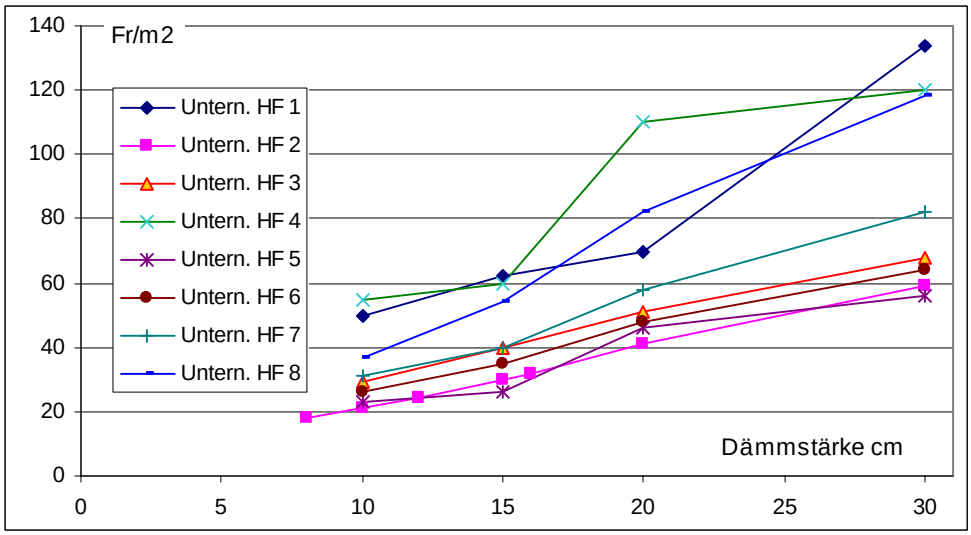
Die Gesamtkosten der Aussenwärmedämmmung steigen wegen des zusätzlich benötigten Materials und wegen der steigenden Arbeitskosten als Funktion der Dämmstärke an. Zunehmende Dämmstärken bedeuten aufwendigeres Handling bei der Verarbeitung/Montage. Während bei 12 cm 5 Platten in einem Paket gebündelt zur Verarbeitungsstelle an der Fassade gebracht werden können, sind es bei 20 cm nur noch drei Platten und bei 30 cm nur noch zwei Platten. Ab 18 cm bis 22 cm, manchmal schon bei tieferen Dämmstärken, wird die Wärmedämmung ausserdem meistens zweilagig verarbeitet, was mit einem weiteren Anstieg der Arbeitskosten verbunden ist.



Quelle CEPE-Erhebung bei SFHF- und weiteren Unternehmen

Abbildung 4.3-13: Hinterlüftete Fassaden: Preise von Dämmstoff inkl. Montage in Abhängigkeit der Dämmstärke für Stein- und Glaswolle

Die beiden Dämmstoffe, die hauptsächlich im Bereich der hinterlüfteten Fassaden zur Anwendung kommen, sind Steinwolle und Glaswolle. Die beiden liegen vielleicht 10-15 % auseinander, wie Abbildung 4.3-13 zeigt. Die Wahl des Dämmstoffs hängt nebst des Preises oder der technischen Eigenschaften auch von den traditionellen Handelsbeziehungen und Vorlieben der installierenden Unternehmen ab. Der Unterschied der angegebenen Preise je m² hinterlüftete Fassade sind auch unter Berücksichtigung der Art des Dämmmaterials mit 15 CHF/m² bei 10 cm Dämmstärke und gut 60 CHF/m² bei 30 cm Dämmstärke sehr unterschiedlich, d.h $\pm$ 20 bis 30 % Preisvariation vom Durchschnittspreis. Diese Unterschiede deuten sowohl auf einen relativ intransparenten Markt als auch auf regionale Preisunterschiede hin. Bei den hohen Dämmstärken (>20 cm) handelt es sich möglicherweise auch um Preise für Pioniermärkte oder "Angstzuschläge" seitens der Verarbeiter.



Quelle CEPE-Erhebung bei SFHF- und weiteren Unternehmen

Abbildung 4.3-14 Hinterlüftete Fassaden: Flächenpreise (ohne Anschlüsse) von Dämmstoff inkl. Montage in Abhängigkeit der Dämmstärke für verschieden Unternehmen

c) Fassadenbekleidung

Die wesentlichen Bekleidungsmaterialien im Wohnungsbau (Neubau und Erneuerung) sowie ihre Kosten sind in Tabelle 4.3-9 zusammengestellt.

Am preisgünstigsten erweist sich mit 80 CHF/m² die kleinformatige Faserzementfassade sowie bei einigen Unternehmen die Aluminiumelemente, teilweise auch die Keramik- und die Putzelemente. Die drei letztgenannten variieren im Vergleich zu den Faserzementfassaden ganz erheblich. Keramikbekleidungen variieren von 45 CHF/m² bis 240 CHF/m², Verputzelemente und Metall-Bekleidungen von 80 CHF/m² bis 140 CHF/m², was nicht zuletzt auf bestimmte Oberflächeneffekte und Gestaltungen zurückzuführen sein dürfte, die auf der teuren Seite nicht für Wohngebäude, sondern für Geschäftshäuser gültig sein dürften.

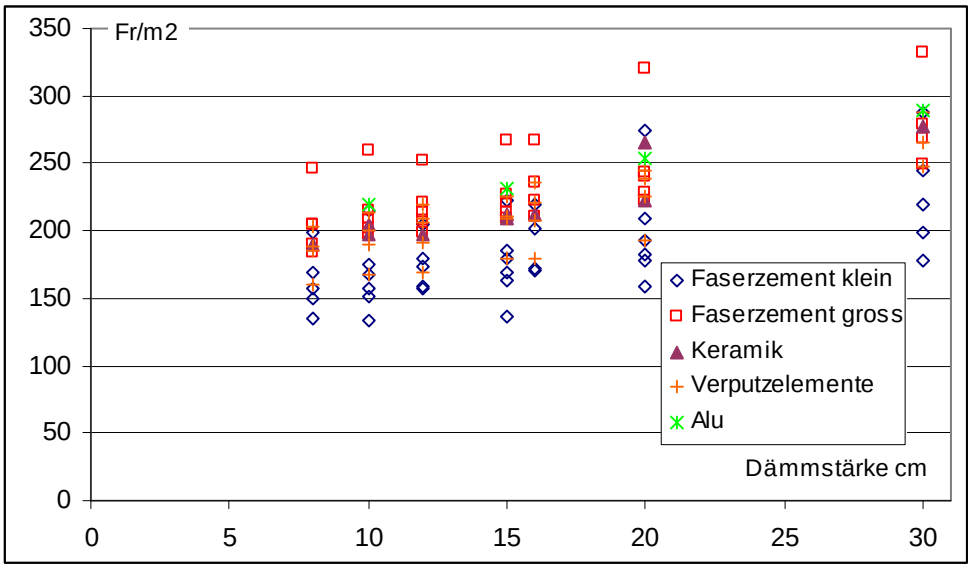
Tabelle 4.3-9 Preise von Bekleidungen von hinterlüfteten Fassaden, angegeben als reine Flächenpreise. CHF/m²

	Faserzement klein	Faserzement gross	Keramik	Verputzelemente	Alu
Unternehmen HF 1			45 - 240		
Unternehmen HF 2	90	130	130	100	
Unternehmen HF 3	90	140	110	140	80
Unternehmen HF 4	95	140	85	80	110
Unternehmen HF 5	70	130	140	140	80
Unternehmen HF 6	75	130	130	130	
Unternehmen HF 7	95	130	165		140
Unternehmen HF 8				117	

Quelle CEPE-Umfrage bei SFHF-Mitgliedfirmen.

d) Gesamte Flächenpreise

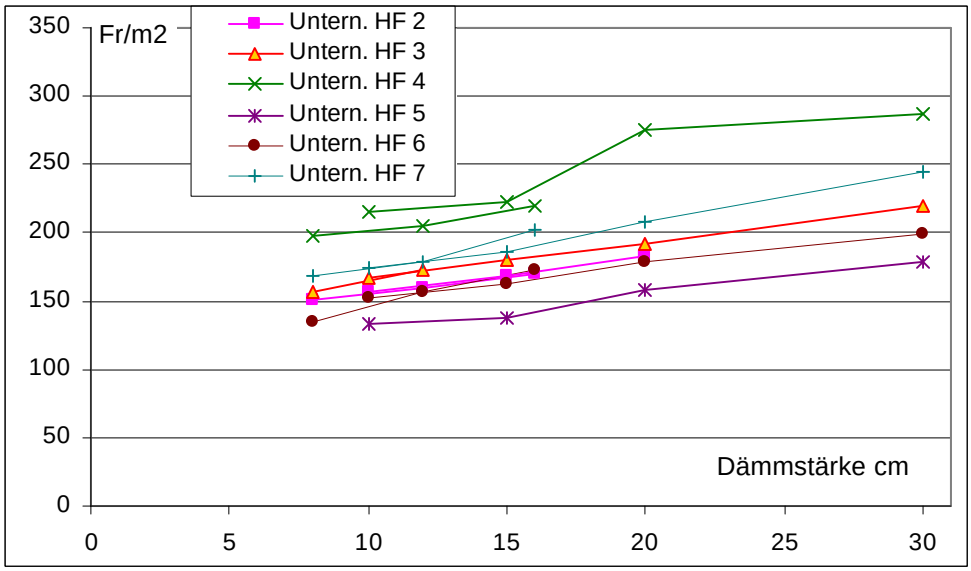
Die obigen Kostenelemente (Dämmstoff inkl. Montage, Unterkonstruktion, Fassadenbekleidung) zusammengefasst, ergeben Flächenpreise gemäss Abbildung 4.3-15, in der alle Bekleidungsmaterialen dargestellt sind.



Quelle CEPE-Umfrage bei SFHF- und anderen Unternehmen.

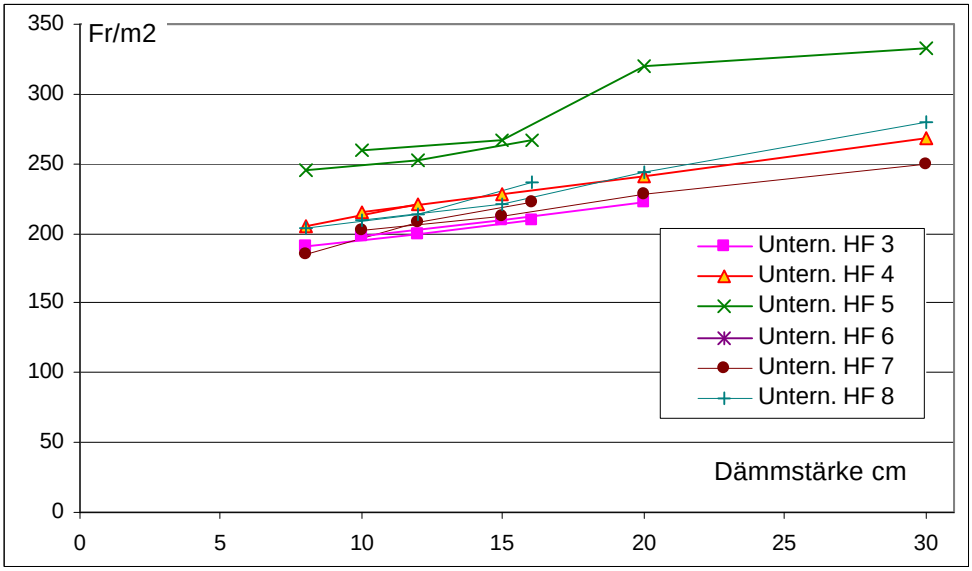
Abbildung 4.3-15 Gesamte Flächenpreise (ohne Anschlüsse) für die häufigsten Typen der hinterlüfteten Fassaden. Dämmstärken 8 cm, 12 cm, 16 cm: Holz-UK. Dämmstärken 10 cm, 15 cm, 20 cm, 30 cm: Holz-Metall-UK.

Auf Niveau der gesamten Flächenpreise sind die verschiedenen Fassadenbekleidungen ablesbar, dies trotz der festgestellten Streuungen bei den einzelnen Kostenelementen, welche die systematischen Unterschiede nicht vollständig überlagern. Zum Teil hat sich die Streuung der einzelnen Elemente jedoch wieder kompensiert. Trotz der Gesamtstreuung ist ein Trend in Funktion der Dämmstärke ablesbar.



Quelle CEPE-Umfrage bei SFHF- und anderen Unternehmen, Holz- und Holz-Metall-UK

Abbildung 4.3-16 Gesamte Flächenpreise (ohne Anschlüsse) von kleinformatigen Faserzementfassaden. Dämmstärken 8 cm, 12 cm, 16 cm: Holz-UK. Dämmstärken 10 cm, 15 cm, 20 cm, 30 cm: Holz-Metall-UK.



Quelle CEPE-Umfrage bei SFHF- und anderen Unternehmen, Holz- und Holz-Metall-UK

Abbildung 4.3-17 Gesamte Flächenpreise (ohne Anschlüsse) von grossformatigen Faserzementfassaden. Dämmstärken 8 cm, 12 cm, 16 cm: Holz-UK. Dämmstärken 10 cm, 15 cm, 20 cm, 30 cm: Holz-Metall-UK.

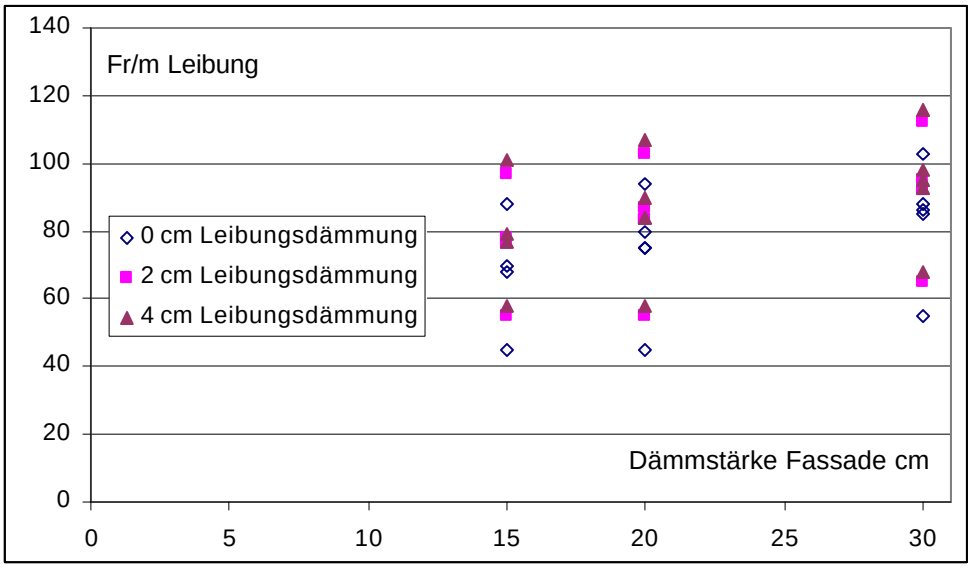
e) Längenbasierte Preise

Längenbasierte Preiselemente können die gesamten Investitionskosten auch etwas beeinflussen und sind zu verzeichnen für zusätzliche Kanten und Ecken von architektonischen

Formen wie z.B. Balkonnischen, Anschlüsse an Fenster bzw. Dämmung von Fensterleibungen und –stürzen, Anschlüsse an fremde Bauteile, insbesondere Steil- und Flachdach, aber auch Balkone und Dämmung des Sockels.

Im Fall der hinterlüfteten Fassaden sind z.B. die Leibungsanschlüsse zum einen von der Dämmstärke der Leibung abhängig, und zum andern auch von der Dämmstärke der Fassade und gleichzeitig vom Bekleidungsmaterial. Letzteres ist durch den Materialmehrverbrauch begründet (je höher die Dämmstärke in der Fläche, desto mehr Bekleidungsmaterial wird bei der Leibung benötigt). Dies gilt auch wenn die Dämmstärke der Leibung 0 cm ist, denn der Anschluss muss trotzdem ausgeführt werden.

Die Preise der Leibungsdämmung werden pro laufenden Meter angegeben und beginnen ab einer Dämmstärke von 15 cm bis 20 cm in Funktion der Dämmstärke anzusteigen (vgl. Abbildung 4.3-18). Die Preise der Leibungsanschlüsse unterscheiden sich laut Firmenangaben entweder nicht zwischen klein- und grossformatigem Faserzement oder in umgekehrtem Sinn verglichen mit den Flächenpreisen: die Anschlüsse sind bei grossformatigen Elementen etwas kostengünstiger als bei kleinformatigen. Andere Materialien sind manchmal kostengünstiger, manchmal höher (Verputz-Elemente), oder sie liegen preislich generell höher (Keramik/Feinsteinzeug).



Quelle CEPE-Umfrage bei SFHF- und weiteren Unternehmen.

Abbildung 4.3-18 Längenbasierte Preise von Leibungsdämmungen in Abhängigkeit der Dämmstärke der hinterlüfteten Fassade am Beispiel der kleinformatigen Faserzementelemente

Zum Einfluss dieser Preise der Leibungsanschlüsse auf die Kosten der gesamten Aussenwärmedämmung mittels hinterlüfteter Fassaden sind folgende Überlegungen zu machen: Das Verhältnis Leibungslänge zu Fassadenfläche wird durch das Verhältnis Fensterfläche zu Fassadenfläche (nicht linear) bestimmt und liegt typischerweise bei 0.2 m Leibungslänge pro m² Fassadenfläche bis 0.6 m/m², (vgl. Kapitel 2 bzw. 3). Bei einem mittleren Leibungspreis von 80 CHF/m bei 15 cm Fassadendämmstärke bis 95 CHF/m bei 30 cm Fassadendämmstärke ergeben sich umgerechnet auf den Flächenpreis Zuschläge von knapp 20 CHF/m² bei geringen Fensterflächenanteilen bis zu 50 CHF/m² bei hohen Fensterflächenanteilen (vgl. Tabelle 4.3-10).

Tabelle 4.3-10 Auf die Fläche umgerechnete Preise der Leibungsdämmung, CHF/m²

Fensterfläche/Fassadenfläche* m²/m²	Leibungslänge/Fassadenfläche* m/m²	Dämmstärke		
		15 cm	20 cm	30 cm
		Typischer Leibungspreis		
		80 Fr/m	85 Fr/m	95 Fr/m
0.06	0.2	16	17	19
0.12	0.4	32	34	38
0.24	0.6	48	51	57
* Gesamte Fläche (Aussenwärmedämmung inkl. Fensterfläche)				

Quelle Berechnungen CEPE

f) Kostenstruktur und gesamte Preise inkl. Anschlüsse

Nach der getrennten Erfassung der Kostenelemente für wärmegedämmte vorgehängte Fassaden werden nunmehr für einige häufig verarbeitete Kombinationen der Gesamtpreis als Funktion von der Dämmstärke dargestellt.

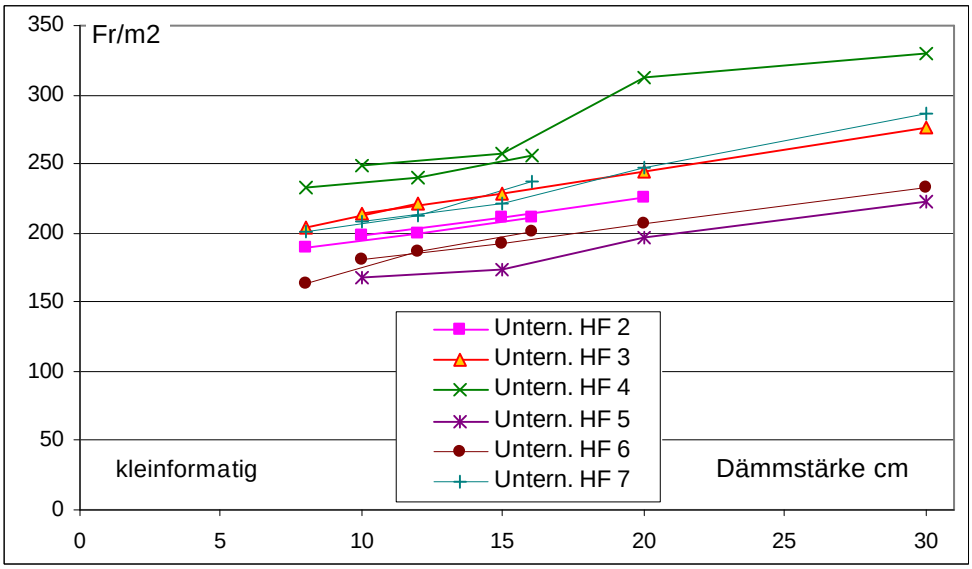
Tabelle 4.3-11 Kostenstruktur der hinterlüfteten Fassaden am Beispiel der kleinformatigen Faserzementfassade bei 0.45 m/m²,CHF/m²

Dämmstärke	12 cm	20 cm	30 cm
Gerüst, Vorbereitung	20	23	27
Dämmmaterial	23	39	55
Montage Dämmmaterial	15	25	33
UK	52	58	67
Fensterleibungen	37	40	44
Bekleidung (Fläche)	53	53	53
Bekleidung, Montage	34	34	34
Total	234	272	313

Quelle Berechnungen CEPE

Aus diesen Ergebnissen zu den totalen Preisen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

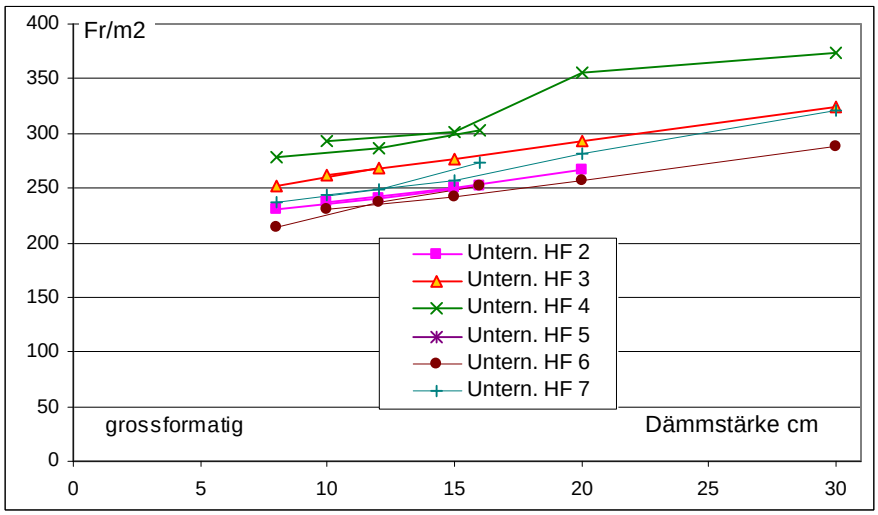
Für kleinformatige Faserzementfassaden sind die Preise mit 160 bis 200 CHF/m² bei 10 cm Dämmstärke und gut 220 bis 280 CHF/m² bei 30 cm am günstigsten (vgl Abbildung 4.3-19).



Quelle CEPE-Umfrage bei SFHF- und weiteren Unternehmen

Abbildung 4.3-19 Gesamte Investitionskosten von hinterlüfteten Fassaden mit kleinformatigen Elementen, inkl. Anschlüsse 0.45m/m²

Die Kosten der grossformatigen Faserzementfassaden sind durchgehend über die Dämmstärken um ca. 60 CHF/m² höher als jene für die kleinformatigen Fassadenelemente (vgl. Abbildung 4.3-20).

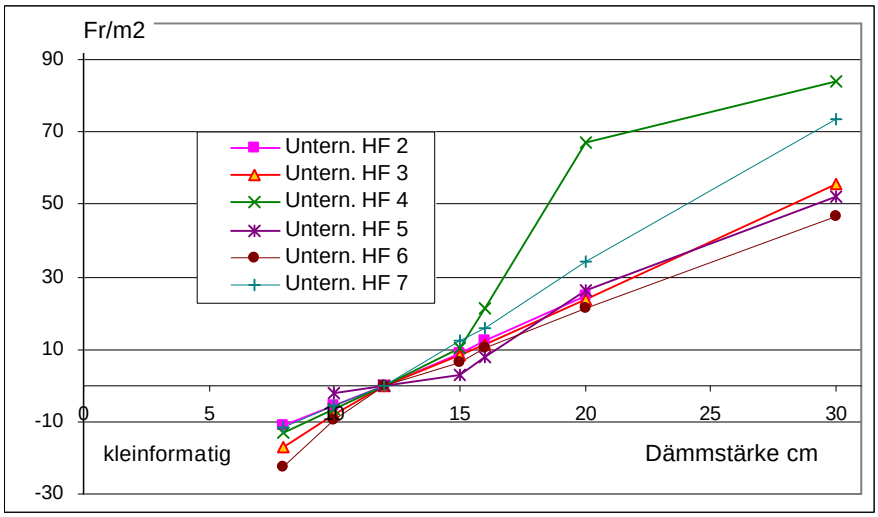


Quelle CEPE-Umfrage bei SFHF- und weiteren Unternehmen

Abbildung 4.3-20 Gesamte Investitionskosten von hinterlüfteten Fassaden mit grossformatigen Elementen, inkl. Anschlüsse 0.45m/m²

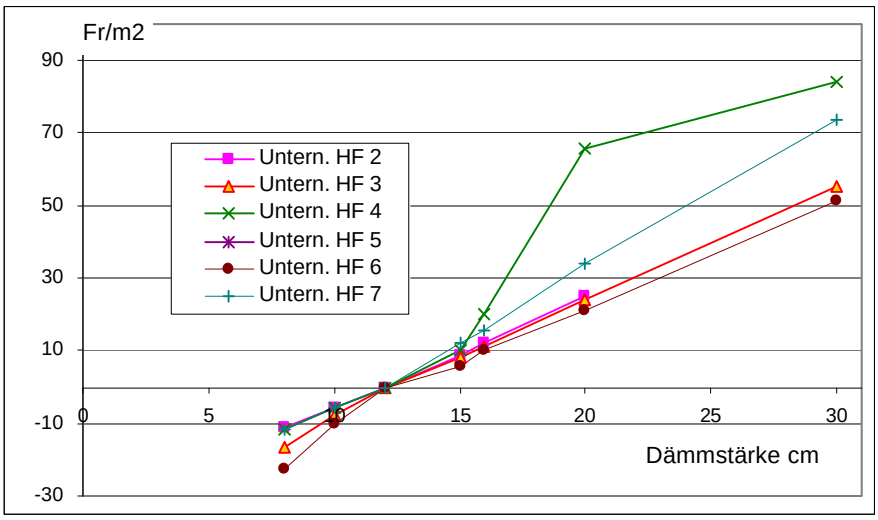
Die kleinformatigen Faserzementelemente sind als kostengünstigste Variante der hinterlüfteten Fassaden um etwa 40 bis 90 CHF/m² teurer als die Kompaktfassade. Der Kostenunterschied bleibt über den gesamten Dämmstärkenbereich beinahe konstant, nimmt aber bei

hohen Dämmstärken tendenziell eher ab. Die Mehrkosten gegenüber der Referenzdämmstärke liegen also eher etwas unter denjenigen der Kompaktfassade, wie die Gegenüberstellung von Abbildung 4.3-21 mit Abbildung 4.3-2 (S. 103) aufzeigt. Dasselbe gilt für die grossformatige Faserzementfassade (Abbildung 4.3-22) sowie die Keramikfassade (Abbildung 4.3-23) und für die hier nicht abgebildeten Fassaden mit hinterlüfteten Verputzelementen.



Quelle CEPE-Umfrage bei SFHF- und weiteren Unternehmen

Abbildung 4.3-21 Mehrinvestitionskosten der kleinformatigen Faserzementfassade gegenüber der Referenzdämmstärke 12 cm



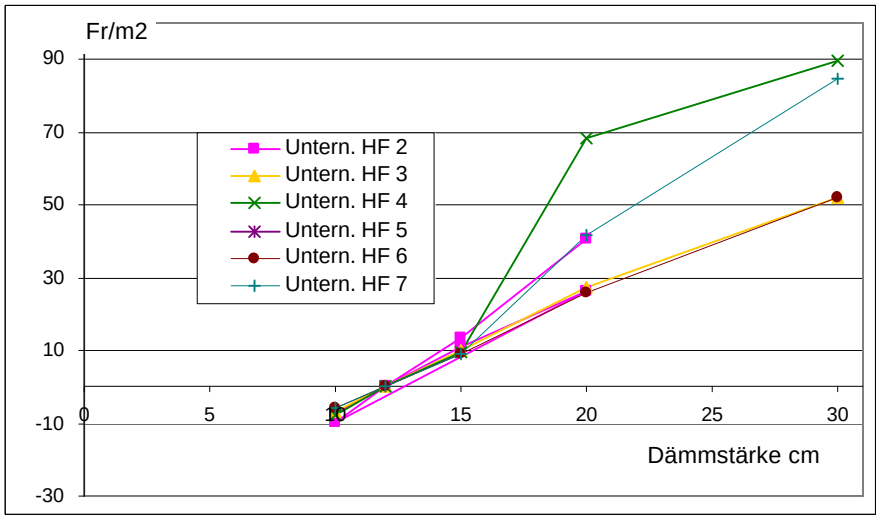
Quelle CEPE-Umfrage bei SFHF- und weiteren Unternehmen

Abbildung 4.3-22 Mehrinvestitionskosten der grossformatigen Faserzementfassade gegenüber der Referenzdämmstärke 12 cm

In einzelnen Bereichen können die Angaben der Firmen beträchtlich abweichen. Diese Abweichungen in den einzelnen Preiselementen heben sich aber teilweise wieder gegenseitig

auf, weil der Ursprung dieser Unterschiede (auch) in den unterschiedlichen Kalkulationsmodellen liegt, welche die Unternehmen anwenden (stärkere oder weniger starke Differenzierung in längen- und flächenbasierte Elemente).

In den Mehr(investitions-)kosten unterscheiden sich die grossformatigen Faserzementfassaden kaum von den kleinformatigen. Auch die Keramikfassaden sind bzgl. der Mehrinvestitionskosten gegenüber der Referenzdämmstärke vergleichbar mit den Faserzementfassaden. Die Mehrkosten liegen gar noch etwas tiefer, was damit zu tun hat, dass die Kosten der Metall-UK in der Referenz zwar höher liegen, aber in Funktion der Dämmstärke nicht so stark zunehmen.



Quelle CEPE-Umfrage bei SFHF- und weiteren Unternehmen

Abbildung 4.3-23 Mehrinvestitionskosten der Keramikfassade gegenüber der Referenzdämmstärke 12 cm

g) Vergleich der hinterlüfteten Fassade mit der Kompaktfassade und Grenzkostenberechnung

Als Fazit lässt sich ziehen, dass die Investitionskosten der hinterlüfteten Fassaden zwar ein höheres Niveau aufweisen, dass die Mehrkosten in Funktion zunehmender Dämmstärken aber eher weniger stark ansteigen als bei den Kompaktfassaden. Die Grenzkosten gegenüber einer Referenzdämmstärke von 10 cm bis 12 cm sind demzufolge bei hinterlüfteten Fassaden in der gleichen Grössenordnung wie bei der Kompaktfassade (solange Unterkonstruktionen mit geringen Wärmebrücken zur Anwendung kommen, also z.B. Holz oder Holz-Metall).

Für folgende Fälle sind die Grenzkosten des energie-effizienten Bauens bzw. Erneuerns mittels hinterlüfteter Fassade mit derjenigen der Kompaktfassade vergleichbar, wenn im Referenzfall je der entsprechende Fassadentyp zugrunde gelegt wird, d.h. wenn die Mehrkosten der Kompaktfassade mit der Referenzkompaktfassade und die Mehrkosten der hinterlüfteten Fassaden mit der hinterlüfteten Referenzfassade verglichen werden:

- Neubau
- Referenzfall: energetische Erneuerung mit Referenzdämmstärke

Dies unter der Annahme, dass die Unterhaltskosten in diesen Fällen für die beiden Fassadentypen je unabhängig von der Dämmstärke sind und sich bei der Grenzkostenbetrachtung herauskürzen. Diese Annahme ist nicht zutreffend wenn die Unterhaltskosten in Funktion der Dämmstärke bei der Kompaktfassade zunehmen (z.B. stärkere Veralgung bei hohen Dämmstärken) und bei der hinterlüfteten Fassade nicht.

Gegenüber der Referenz „Instandsetzung" sind die Grenzkosten der hinterlüfteten Fassaden leicht höher als bei den Kompaktfassaden, denn in diesem Fall sind die Mehrkosten aufgrund des höheren Kostenniveaus höher, da sie mit der gleichen Referenz, nämlich der Instandsetzung verglichen werden (ca. 30 bis 40 CHF/m²). Für den abschliessenden Vergleich sind für die Berechnung der Grenzkosten (Durchschnittskostenansatz) nebst den Kapitalkosten die Unterhaltskosten miteinzubeziehen (Tabelle 4.3-12). Der vermiedene Unterhalt der hinterlüfteten Fassade wird erst in 25 Jahren das erste Mal als kostenwirksamer Unterschied relevant und ist deshalb auf den heutigen Zeitwert abzudiskontieren. Bei einer langfristigen Realverzinsung von 3% beträgt der Wert 16 CHF/m².

Tabelle 4.3-12 Unterhaltskosten (CHF/m²) bei Fassadeninstandsetzungen bzw. -erneuerungen

Referenzfall	Energetische Erneuerung	
Putzausbesserung und Fassadenanstrich	Kompaktfassade	Hinterlüftete Fassade
Jetzt + 35 Fr/m² alle 25 Jahre	35 Fr/m² alle 25 Jahre, das erste Mal in 25 Jahren	0 CHF/m²

Auch bei der hinterlüfteten Fassade steigen die Durchschnittskosten in Funktion grösserer Dämmstärken nur moderat an, wie Tabelle 4.3-13 zeigt.

Tabelle 4.3-13 Investitions- und Grenzkosten für hinterlüftete Fassaden bei Erneuerungen. Referenz = Instandsetzung, Ausgangs-U-Wert$_{Fläche}$=1.1 W/m²K. (Bauperiode bis ca. 1975). Kosten inkl. Dämmung Fensterleibung 4 cm und Anschlüsse.

Dämmstärke	Investitionskosten	Differenz Investitionskosten gegenüber Referenz	Differenz Nutzenergie gegenüber Referenz	Grenzkosten der eingesparten Nutzenergie [1] (Durchschnittskostenansatz)	
				dr=0.055	dr=0.035
cm	CHF/m²$_{Wand}$	CHF/m²$_{Wand}$	kWh/m²$_{Wand}$.a	CHF/kWh$_{NE}$	CHF/kWh$_{NE}$
0 (Ref)	51 *				
10	195	144	69	0.12	0.08
12	200	149	72	0.11	0.08
14	205	154	75	0.11	0.08
16	211	160	77	0.12	0.08
20	226	175	80	0.12	0.09
24	243	192	82	0.13	0.09
30	283	231	84	0.16	0.11

1) Annahmen für Kapitalkostenermittlung 50 Jahre Nutzungszeit, 3.5% bzw. 5.5% Realverzinsung
* inkl. Unterschied beim Unterhalt.

Quelle Erhebungen und Berechnungen CEPE

4.3.5 Holzsystembau (Neubau)

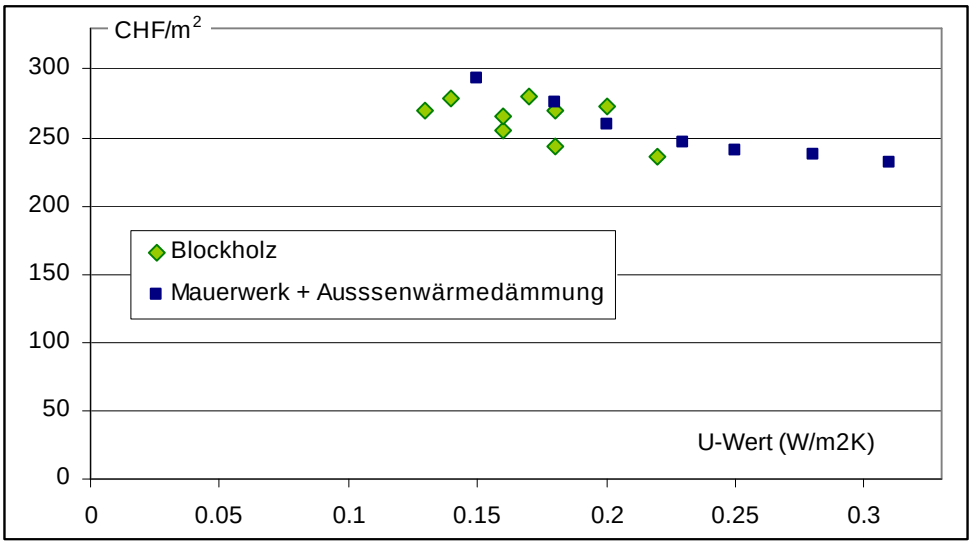
Im Neubau ist der Holzsystembau eine interessante Variante, sowohl kosten- als auch energieeffizient zu bauen. Der Holzsystembau weist gegenüber dem Mauerwerk folgende Vorteile auf:

- Geringe Gesamtstärke, vor allem auch bei guter Wärmedämmung, da die Funktion der Statik und der Wärmedämmung vom selben Bauelement übernommen werden kann.
- Kurze Bauzeiten (auf der Baustelle)
- Potential zum industriellen Bauen, mit den Vorteilen der tiefen Kosten und der gut möglichen Qualitätskontrolle, z.B. was die Luftdichtheit betrifft
- Rationalisierungspotential zwischen Planung und Fertigung (Daten vom planenden direkt zum fertigenden Unternehmen)
- Je nach Ausführung vorteilhafte bauphysikalische Eigenschaften (Feuchtigkeitshaushalt)

In der Abbildung 4.3-24 sind beispielhaft die Kosten von Aussenwänden von verschiedenen Typen der sogenannten Blockholzbauweise dargestellt. Im Vergleich zu einer weit verbreiteten konventionellen Bauweise (Mauerwerk 120 CHF/m² plus Aussenwärmedämmung gemäss Tabelle 4.3-2) fällt auf, dass

- die Blockholz-Aussenwand im Standard geringere U-Werte aufweist (0.22 W/m²K)
- der Kostenanstieg in Funktion grösserer Dämmstärken (geringerer U-Werte) eher weniger stark ist, in etwa im Bereich der Bestwerte der Aussenwand mit Aussenwärmedämmung (hier nicht dargestellt)

Die Grenzkosten der Energie-Effizienz der Blockholz-Bauweise sind demzufolge mindestens so tief wie diejenigen der konventionellen Bauweise, vgl. Tabelle 4.3-2, S. 104.



Quelle Holzbausystemproduzent, Annahmen CEPE (Oberflächenabschluss)

Abbildung 4.3-24 Investitionskosten von Blockholzwänden (inkl. Wärmedämmung und Oberfläche) im Vergleich zu konventionellem Mauerwerk mit Aussenwärmedämmung (Kompaktfassade)

Nicht berücksichtigt in der Abbildung 4.3-24 sind die Kostenvorteile aufgrund der geringeren Bautiefe der Wandelemente. Je nach anzusetzender Bewertung, d.h. je nach Knappheitsfaktor, müssen bei höheren Dämmstärken Mehrkosten für das Bauland oder Mindererträge aufgrund kleinerer Wohnfläche eingerechnet werden (bei gegebenem Bauland und Beschränkungen bei der Ausnützung bzw. den Grenzabständen). Bei einer Reduktion der Bautiefe der Aussenwand um beispielsweise 10 cm kann dies mit 40 bis 60 CHF/m^2_{Wand} zu Buche schlagen (auf der Ebene der Investitionskosten).

4.3.6 Verglasungen

Die Abhängigkeit der Preise von Fenstern hinsichtlich der energetischen Qualität ist einerseits durch die Glasqualität und andererseits durch die Rahmenqualität gegeben. Im Hinblick auf die Bewertung der Co-Benefits wurde ausserdem der schalltechnische Aspekt miteinbezogen.

Betrachtet man die Kostenstruktur der Fensterherstellung, beträgt der Kostenanteil der Gläser nur ca. 10% bis 15%. Da die energetische Qualität des Gesamtfensters aber sehr stark von der Glasqualität abhängt, wird der Zusammenhang zwischen Energieeffizienz und Preisen bzw. Kosten in einem ersten Schritt für die Isoliergläser und in einem zweiten Schritt für das Fenster als Gesamtsystem untersucht.

a) Isoliergläser

Anhand der Preise der Glashersteller bzw. –händler und –importeure lassen sich noch keine direkten Schlüsse auf die Kosten und Nutzen von Fenstern unterschiedlicher Qualität ziehen. Nichtsdestotrotz ist eine Darstellung dieser Preise von Interesse, denn sie stellen einen Kostenfaktor der Fensterhersteller dar.

Die in diesem Unterkapitel wiedergegebenen m^2-Kosten- bzw. m^2-Preisinformationen sind vor dem Hintergrund zu sehen, dass die m^2-Kosten bzw. m^2-Preise des Gesamtfensters 400 CHF/m^2 bis 600 CHF/m^2 betragen (inkl. Montage).

Die energetische Qualität der Gläser und auch der Preis der Gläser wird durch drei Merkmale bestimmt:

- U-Wert, flächiger Transmissionswärmeverlust, gemessen in W/m^2K
- g-Wert, Gesamtenergiedurchlasswert, gemessen in %
- ψ-Wert (Psi-Wert), gemessen in W/mK. Zu bemerken ist dabei, dass der exakte Wert erst bestimmt werden kann, wenn das Glas im Rahmen eingebaut ist, der Wert für eine bestimmte Fläche näherungsweise jedoch recht gut angegeben werden kann.

Die vergangene Entwicklung der Gläser hinsichtlich energetischer und wirtschaftlicher Effizienz ist beachtlich, siehe dazu z.B. Tabelle 4.4-10. Noch vor zwei bis drei Jahren war ein U-Wert von 1.3 W/m^2K üblich. Heute (2001/2002) kann ein U-Wert von 1.1 W/m^2K als Referenz betrachtet werden (bei einer Minderheit der Projekte werden möglicherweise immer noch Gläser mit 1.3 W/m^2K eingesetzt). Laut Glasherstellern ist die Nachfrage nach qualitativ hochstehenden Gläsern (solchen mit U-Wert von 0.7 W/m^2K oder 0.5 W/m^2K) in letzter Zeit steigend.

Relevant für die energetische Qualität einer Verglasung ist aber nicht nur der U-Wert, sondern auch der g-Wert, also der Gesamtenergiedurchlasswert, besonders für Fenster, die in Richtung mit einer Südkomponente montiert werden. Die heute auf dem Markt erhältlichen Gläser weisen Kennwerte gemäss Tabelle 4.3-14 auf.

Tabelle 4.3-14 Kennwerte der heute am Markt erhältlichen Isoliergläser

U-Wert	g-Wert Standard	Verbesserter* g-Wert
1.1 bis 1.3	57% bis 63%	70%
0.7	50% bis 52 %	59% (Extraweiss)
0.5	40-42%	50%
* verbessert hinsichtlich der winterlichen Situation		

Quelle Führende Schweizer Glashersteller

U-Werte von 0.7 W/m²K oder 0.5 W/m²K werden beim heutigen Stand der Technik mittels Dreifachverglasungen, welche zwei Beschichtungen aufweisen, erreicht. Mit zwei Beschichtungen ist üblicherweise eine Reduktion des g-Wertes (und des Lichttransmissionswertes) verbunden. Eine Reduktion des g-Wertes kann aber zu relativ geringen Mehrkosten vermieden werden, wenn für alle drei Gläser die optiwhite-Qualität (Extraweiss) verwendet wird. Dies ist allerdings mit einem Mehrpreis von 65% verbunden (Beispiel beim U-Wert von 0.7, Verbesserung von 51% auf 59%).

Tabelle 4.3-15 Preis von Wärmeschutzverglasungen für verschieden U- und g-Werte

	Unternehmen 1		Unternehmen 2		Unternehmen 3	
U-Wert W/m²K	g-Wert	Preis CHF/m2	g-Wert	Preis CHF/m2	g-Wert	Preis CHF/m2
1.3	57%	110				
1.1	54% - 65%	120	61%	90	63%	120
1.1			63%	100	70%	170
1.0	55%	130	61%	110		
1.0			63%	120		
0.7			45%	160	42%	220
0.7			49%	210	51%	230
0.7					59%	380
0.5			45%	200 – 260*	42%	240
0.5					50%	260
* höhere Lichtdurchlässigkeit						

Quelle führende schweizerische Isolierglashersteller (Erhebung CEPE)

Vergleichsweise kostengünstig ist eine energetische Verbesserung des Randverbundes. Der auf die Fläche umgelegte Zuschlag ist abhängig von der Fensterfläche und von der Fensterunterteilung. Je nachdem, ob es sich um ein-, zwei oder mehrflügelige Fenster handelt, beträgt die flächenspezifische Glasrandlänge bei kleinen Fenstern (<1m²) 4 m/m² bis zu über 10 m/m² und bei mittleren bis grossen Fenstern von 2 m/m² bis 3 m/m² bis zu rund 6 m/m², siehe Abbildung 4.3-25. Eines der Unternehmen gibt dafür einen Zuschlag von 1.5 CHF bis 2 CHF pro Meter Glasrand, was bei kleinen Fenstern einem auf die Fläche umgelegten Mehrpreis von 6 CHF/m² bis 16 CHF/m² und bei mittleren Fenstern einen Mehrpreis von 3 CHF/m² bis

12 CHF/m² entspricht. Es handelt sich also um relativ geringe Zuschläge, bei mittleren Flächen entspricht dies bezogen auf den Gesamtglaspreis 4% bis 12%. Ein anderes Unternehmen gibt für einen verbesserten Randverbund einen generellen Zuschlag von 10% des Preises für die Verglasung an. Verglichen mit dem Gesamtfensterpreis verursacht der verbesserte Glasverbund also einen Mehrpreis von weniger als 2%.

Der Grund, weshalb die verbesserten Glasrandverbunde sich am Markt nicht besser durchsetzen liegt darin begründet, dass die zwar bescheidenen Mehrkosten eben doch einen Konkurrenznachteil darstellen, solange die verbesserten Glasrandverbunde in der Devisierung nicht vorgegeben werden, sie also vom Markt, d.h. von den Architekten, privaten Bauherren und Immobilienfirmen, nicht verlangt werden.

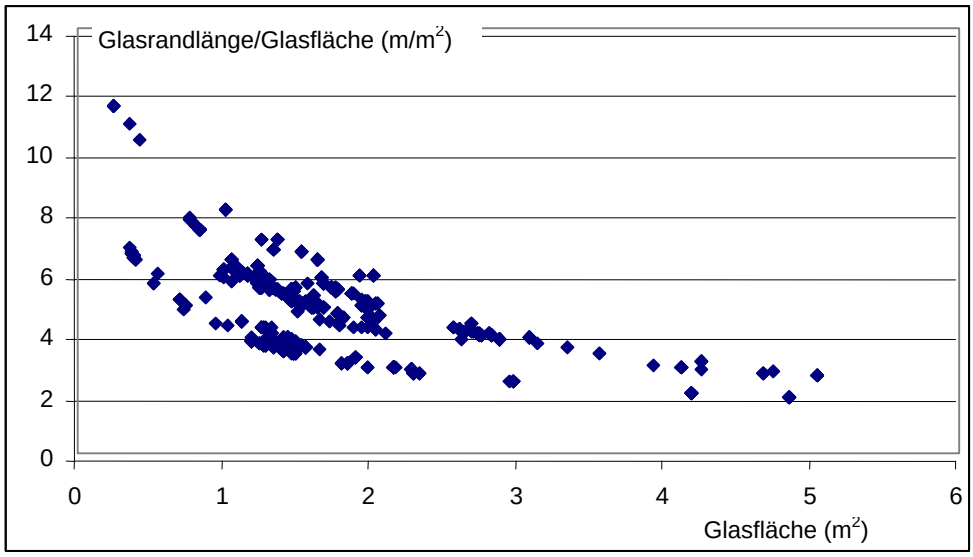


Abbildung 4.3-25 Spezifische Glasrandlänge (m Glasrand / m² Glasfläche) in Funktion der Glasfläche

Bezogen auf die gewonnene Energieeffizienz stellt die Verbesserung des Glasrandverbundes eine sehr attraktive Effizienzmassnahme dar. Der Effizienzgewinn des Materialwechsels des Glasabstandshalters vom heute üblichen Aluminium zum Edelstahl oder Kunststoff beträgt typischerweise 0.02 W/mK bis 0.03 W/mK. Beträgt das Verhältnis zwischen Glasrandlänge und Glasfläche 5 m/m², ist dies äquivalent zu einer Verbesserung des U-Wertes von beachtlichen 0.1 W/m²K bis 0.15 W/m²K. Bei einem Mehrpreis von 1.5 CHF/m und einer Annuität von 0.069 (dr=5.5%, 30 Jahre) bzw. 0.054 (dr=3.5%, 30 Jahre) ergeben sich spezifische Kosten des Effizienzgewinns von 3 Rp/kWh bis 5.5 Rp/kWh.

4.3.7 Das Fenster als Gesamtsystem

Das Fenster ist nicht nur in energetischer Hinsicht ein sehr wichtiges Bauteil, sondern auch wegen der vielfältigen Funktionen, die es wahrzunehmen hat (Tageslichtnutzung, Bezug zur Aussenwelt, Luftdichtigkeit, Witterungsschutz, Lärmschutz etc.). Einige dieser Attribute sind relevant für die im Kapitel 4.5 untersuchten nicht-energetischen Nutzen, die Co-Benefits.

Gemäss der Zielsetzung des Grenzkostenprojekts, auch empirisch abgestützte Grundlagen zu erarbeiten, wurde auch im Bereich Fenster eine umfangreiche Erhebung und Recherche durchgeführt, um den Zusammenhang zwischen Kosten, energetischen und weiteren Nutzen ergründen zu können.

a) Die Erhebung

Das Ziel der Erhebung war, die Preise in Funktion ihrer beiden hauptsächlichen Nutzenkomponenten, nämlich der

- energetischen Qualität (in drei bis vier Stufen der Glasqualität sowie in drei bis vier Stufen der energetischen Rahmenqualität) und der
- schalltechnischen Qualität (drei Stufen)

zu ermitteln, letzterer Punkt im Hinblick auf die Co-Benefits. Die Aussagen sollten einerseits repräsentativ für die Schweiz sein, andererseits auch die innovativen, aber heute schon verfügbaren Möglichkeiten des energie-effizienten Bauens und Erneuerns aufzeigen.

Gemäss dieser Ziele und ausgehend von der heutigen Marktstruktur wurde deshalb die Erhebung bei den folgenden drei Typen von Fensterherstellern erhoben:

- Grosse, führende Hersteller (zusammen ca. 15% bis 30% Marktanteil, je nach Fenstertyp). Anfragen bei den grössten Fensterherstellern mit dem Hinweis, dass die Anfrage im Zusammenhang mit einer Untersuchung (dem Grenzkostenprojekt) steht.
- Kleine und mittlere Fensterhersteller. Einholen von Richtofferten an rund 110 zufällig ausgewählte Fensterhersteller in der Schweiz, versandt durch das CEPE, durch Bürgi & Raaflaub, Bern sowie Jeker Blanckarts Architekten, Basel. Die Richtofferten wurden so realitätsnah wie möglich verfasst.
- Recherche nach innovativen Fensterherstellern mit Angeboten an wesentlich verbesserten Rahmenqualitäten bis hin zum Passivhausfenster: Dies betrifft sowohl grosse wie kleine Unternehmen. Preisanfragen mit dem Hinweis, dass die Anfrage im Zusammenhang mit einer Untersuchung (dem Grenzkostenprojekt) steht.
- Auswertung von Vergleichsofferten eines realisierten Passivhauses in der Schweiz.

Bei allen Unternehmen wurde nach **marktnahen** Richtpreisen gefragt.

Zunächst wurden die energetischen und schalltechnischen Kennwerte der heute am Markt erhältlichen Fenster recherchiert, wobei sowohl auf die Breite des Marktes wie auch auf die Spitze fokussiert wurde.

Tabelle 4.3-16 Charakterisierung der Glasqualität und deren Bedeutung im Fenstermarkt im Jahr 2000

U-Wert (W/m2K)	1.3	1.1	0.9 – 1.0	0.7	0.5	<=0.4
Anzahl Gläser	2	2	2, evtl. 3	3	3	3
Gasfüllung	Luft	Ar/Kr	Kr	Kr	Kr	Xe
Verbreitung, Bedeutung	Stark im Rückgang	Grosse Mehrheit	Selten (wenn energieeffizient, dann gleich 0.7 oder 0.5=	Bei energie-effizientem Bauen wie Minergie oder Passivhausstandard (0.5 für letzteren)		Sehr selten, da Edelgas selten und teuer

Quelle EMPA, Glas- und Fensterhersteller, Erhebung CEPE

Nach Möglichkeit wurde auch nach dem Mehrpreis für verbesserte (höhere, im Sinn des winterlichen Wärmeschutzes im Wohnungsbau) g-Werte gefragt. Das Thema des g-Wertes und dessen Einbezug scheint aber sowohl auf der Nachfrageseite (in den Ausschreibungen wird kaum nach einem verbesserten g-Wert verlangt) wie auch auf der Verkaufsseite (der g-Wert ist kaum ein Verkaufsargument) eine eher geringe Bedeutung zu haben. Es ist jedoch durchaus so, dass auch Gläser mit tiefem U-Wert (0.7 W/m²K bis 0.5 W/m²K) einen g-Wert von 0.5 und höher aufweisen können, siehe dazu auch das obige Unterkapitel und Tabelle 4.3-15).

U-Werte unter 0.5 haben bis jetzt noch kaum eine Bedeutung, da beim konventionellen Vorgehen (arbeiten mit Beschichtungen und Gasfüllungen) auf das Füllgas Xenon gewechselt werden müsste, das sehr selten und teuer ist. Weitere Verbesserungen können durch Folien zwischen den Gläsern (am Markt erhältlich) oder durch sogenannten Vakuum-Glaser (am Markt noch nicht erhältlich [?]) erzielt werden, siehe dazu weitere Ausführungen im Kapitel 4.4 zur Dynamisierung).

Um die einzelnen Unternehmen nicht über ein vertretbares Mass hinaus zu belasten, wurde nicht von allen Unternehmen die gesamte Variationsmöglichkeit an energetischen und schalltechnischen Qualitäten und Massen abgefragt. Zu diesem Zweck wurde ein sogenannter statischer Versuchsplan erstellt (unvollständig besetzt). Aus den grundsätzlich 36 Möglichkeiten wurden 22 ausgewählt (siehe Anhang A) und für jede dieser Kombinationen wurden Anfragen für Richtofferten an zwei bis sechs verschiedene Unternehmen geschickt (siehe ebenfalls Anhang A).

Für verschiedene Fenstergrössen (von 1 m² bis rund 6 m²), Ausführungen (Balkontüre, ein- bis dreiflügelig, Holz-, Holz-Metall und Kunststoffrahmen) und Einbausituationen (Neubau, Erneuerung) waren von den einzelnen Unternehmen jeweils Preise für unterschiedliche energetische und / oder schalltechnische Qualitäten anzugeben. Bei den kleinen und mittleren Unternehmen waren dies drei Ausführungsvarianten/-grössen und vier energetische / schalltechnische Qualitäten (also vier Felder der Matrix bzw. eine Zeile gemäss Tabelle A-1 im Anhang A), bei den grossen Unternehmen wurde möglichst die gesamte Vielfalt des Angebots erhoben. Indem pro Unternehmen nach mehreren energetischen / schalltechnischen Varianten gefragt wurde, sind aufgrund der erhobenen Daten Preisvergleiche und Grenzkostenbetrachtungen möglich (dies wäre nur bedingt der Fall, wenn pro Unternehmen nur jeweils eine energetische / schalltechnische Qualität abgefragt worden wäre).

Um die Richtofferten realistisch zu gestalten, wurden 11 Gebäudetypen (kleine bzw. grosse Neubauten bzw. Gebäude mit unterschiedlichem Baujahr) charakterisiert, jeder Gebäudetyp drei Fenstertypen/-grössen/Einbausituationen aufweisend. Erhoben wurden folgende Preise für Neubauten

b) Rücklauf

Von den 119 zufällig ausgewählten kleinen und mittleren Unternehmen beantworteten 46 (knapp 40%) die Richtpreisofferte, woraus 563 Gesamtpreise zu Fenstern resultierten. Einige davon betreffen Unternehmen, die sich als relativ gross herausgestellt hatten, weshalb bei diesen zusätzliche Anfragen gemacht wurden. Zusätzlich konnten 349 Gesamtpreise von 8 auf Innovation spezialisierten Unternehmen und von 5 grossen Unternehmen (mit teilweise ebenfalls innovativen Produkten) erhoben werden. Insgesamt ergibt dies 912 Gesamtfensterpreise von 60 Unternehmen. Davon sind 26 Unternehmen in der Lage, verbesserte bzw. gedämmte Holz- bzw. Holz-/Metallrahmen (20 Unternehmen, Rahmen-U-Wert<=1.3 W/m²K) bzw. Kunststoffrahmen (6 Unternehmen, Rahmen-U-Wert <=1.4 W/m²K) anzubieten

Von insgesamt konnten 913 Preisinformationen von Gesamtfenstern für Neubauten in die Auswertung miteinbezogen werden.

Dazu kommen für zahlreiche Mehrpreise für Abbrüche, Entsorgungen oder verschiedene Einbauvarianten bzw. –situationen (Montagekosten für Renovationsfenster, alleinigen Fensterersatz, Fensterersatz bei gleichzeitiger Aussenwärmedämmung, Fensterersatz gleichzeitig mit Innenerneuerung, Fensterersatz bei Gebäudetotalrenovation.

c) Beschreibende Statistik

Aufgrund der Erkenntnisse aus der Erhebung lassen sich folgende qualitative Feststellungen machen:

- Die Wärmeschutzverglasung mit einem U-Wert von 1.1 W/m²K ist in der Schweiz weitgehend Standard, vereinzelt kommen noch Glas-U-Werte von 1.3 W/m²K zum Einsatz
- Die Dynamik im Bereich der Rahmen war in den vergangenen Jahren weniger stark als bei den Verglasungen, aber:
- Es gibt in der Schweiz mittlerweile zahlreiche Fensterhersteller, die verbesserte Rahmen anbieten, und zwar im Bereich der Holz und Holz-Metall-Rahmen, wo mit Verbundmaterialien eine Verbesserung erreicht wird und auch im Bereich der Kunststoffrahmen, wo andere Armierungsmaterialien und/oder Schäume zum Einsatz kommen.
- Eine (noch) kleine Anzahl Unternehmen ist auch in der Lage, Fenster nach den hohen Anforderungen des Passivhausstandards anzubieten.

Der Preis eines Fensters hängt von verschiedenen Einflussfaktoren ab und einige der interessierenden Einflussfaktoren lassen sich wiederum auf weitere Grössen zurückführen. Nützlich ist demzufolge eine Charakterisierung des Samples bezüglich dieser Faktoren.

Der **Rahmenanteil** beeinflusst einerseits den U-Wert des Gesamtfensters (siehe Formel im Kapitel 4.2.7a) und andererseits die Herstellungskosten des Fensters. Mit zunehmender Fensterfläche nimmt der relative Rahmenanteil ab, ebenso mit abnehmender Flügelanzahl. Die Anzahl der Flügel hat ausserdem einen direkten Einfluss auf die Herstellungskosten.

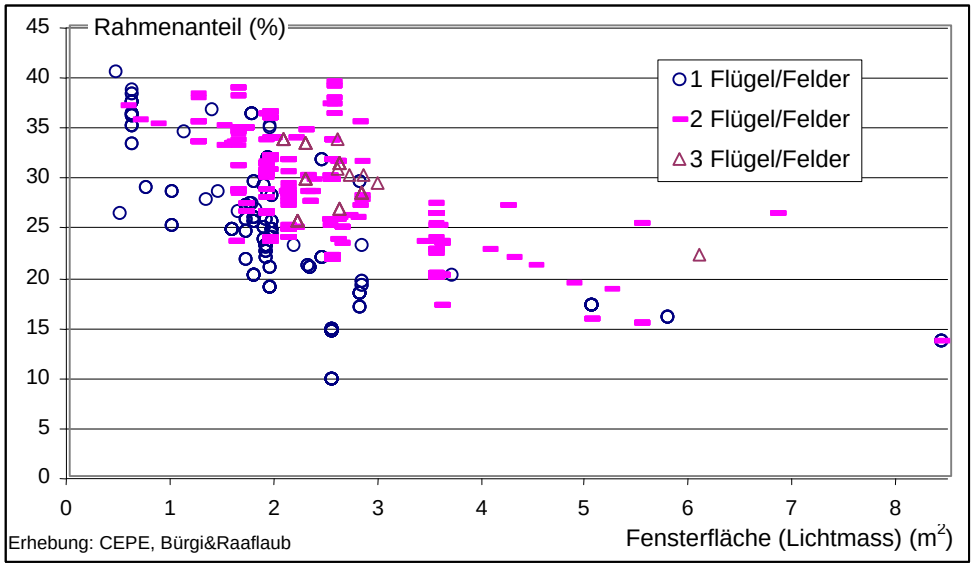


Abbildung 4.3-26 Rahmenanteil in Funktion der Fensterfläche und der Flügelanzahl

Die beeinflusst einerseits den U-Wert des Gesamtfensters (siehe Formel im Kapitel 4.2.7a) und andererseits über die Kosten des Abstandhalters die Herstellungskosten des Fensters. Mit zunehmender Fensterfläche nimmt die spezifische Glasrandlänge ab.

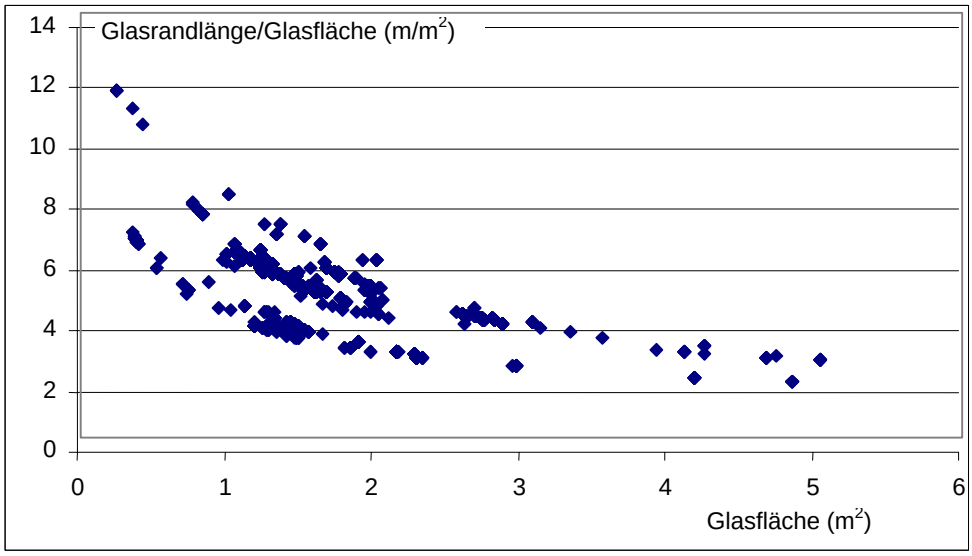


Abbildung 4.3-27 Spezifische Glasrandlänge (m Glasrand / m² Glasfläche) in Funktion der Glasfläche

Zunächst folgt eine Darstellung der spezifischen Fensterpreise in Funktion der energetischen Komponente des Nutzens, danach in Funktion der schalltechnischen Komponente.

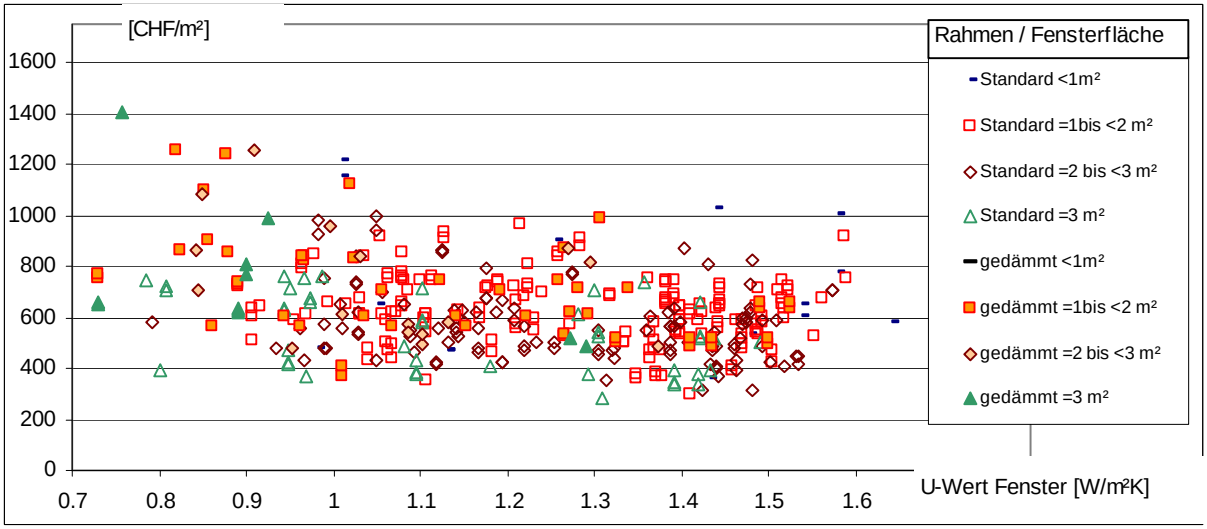


Abbildung 4.3-28 Spezifische Fensterpreise (CHF/m² , inkl. Montage) von Holzfenstern für verschiedene Fenstergrössen und Rahmenqualitäten (Standard / gedämmt) in Funktion des Fenster-U-Wertes

Das Preisniveau der Holzfenster liegt tiefer als dasjenige der Holz-Metallfenster, aber höher als dasjenige der Kunststoffenster. Ein Anstieg der Preise in Funktion abnehmenden U-Wertes als Mass der verbesserten energetischen Qualität ist bei allen drei Rahmenarten festzustellen. Zu vermuten ist ein Zusammenhang nach einem Potenzgesetz. Festzustellen ist auch, dass die spezifischen Preise in Funktion der zunehmenden Fensterfläche abnehmen. Ob ein bestimmter Fenster-U-Wert (bei gleicher Fläche) kostengünstiger mittels ungedämmtem (heutiger Standard) oder mittels gedämmtem Rahmen erreicht werden kann, ist jedoch nur aufgrund der Abbildungen nicht ersichtlich, dazu werden die statistischen Auswertungen mehr Aufschluss geben.

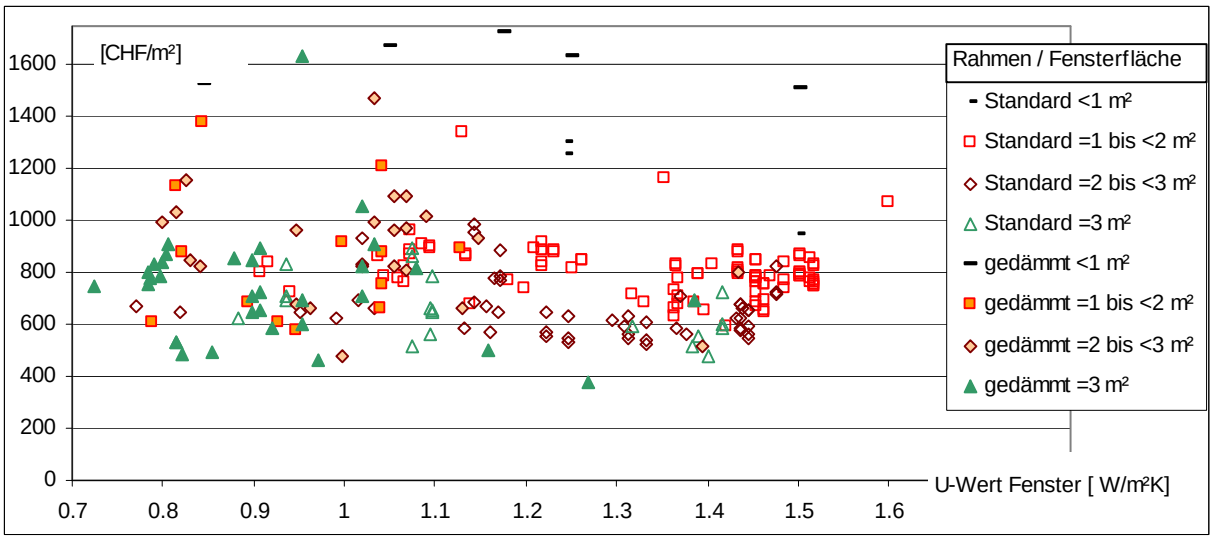


Abbildung 4.3-29 Fensterpreise (inkl. Montage) von Holz-Metallfenstern für verschiedene Fenstergrössen und Rahmenqualitäten (Standard / gedämmt) in Funktion des Fenster-U-Wertes

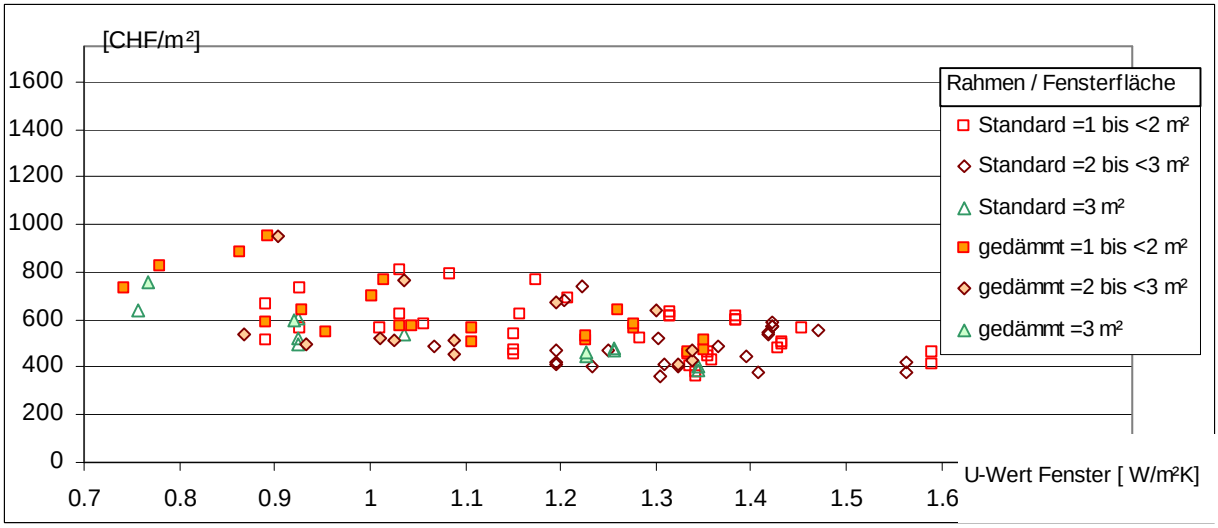


Abbildung 4.3-30 Fensterpreise (inkl. Montage) von Kunststoffenstern für verschiedene Fenstergrössen und Rahmenqualitäten (Standard / gedämmt) in Funktion des Fenster-U-Wertes

Der Zusammenhang zwischen energetischer Fensterqualität und Fenstergrösse lässt sich auch umgekehrt, gemäss Abbildung 4.3-31 (Beispiel für Holzrahmenfenster), darstellen. Es kann ein Zusammenhang mit der Fenstergrösse nach einem Potenzgesetz vermutet werden. Die anderen Rahmenarten verhalten sich ähnlich, siehe dazu den Anhang.

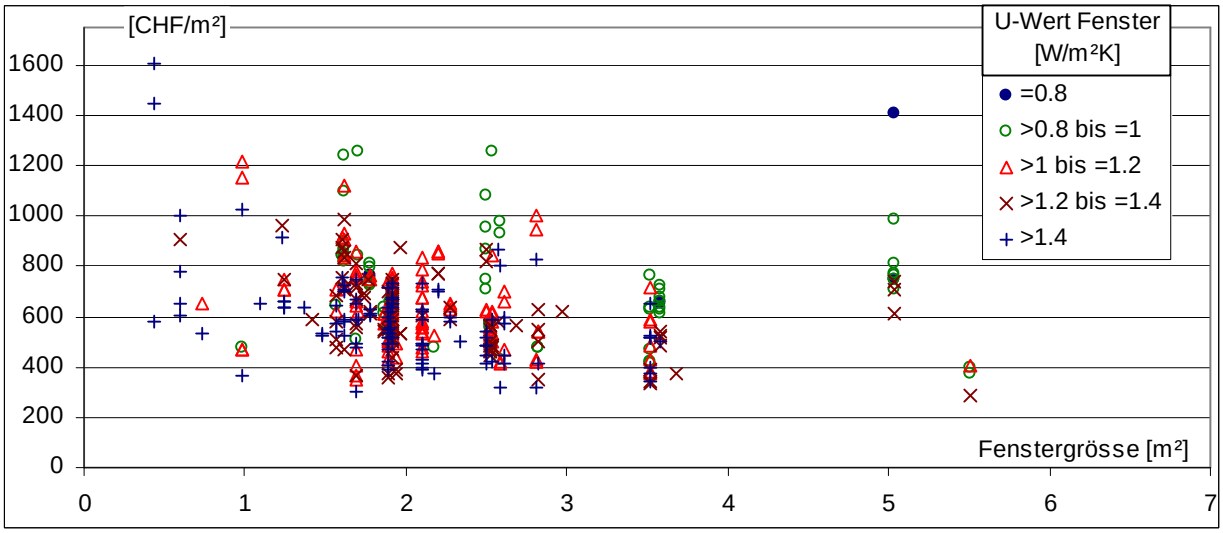


Abbildung 4.3-31 Spezifische Fensterpreise (CHF/m²) in Abhängigkeit ihrer Fenstergrösse für Fenster mit **Holzrahmen**, aufgeteilt nach Fenster-U-Wert-Klassen

Im folgenden interessiert die Frage, ob zwischen energetischer Qualität bzw. dem U-Wert des Fensters und der schalltechnischen Qualität ein Zusammenhang, im besten Fall ein Synergieeffekt besteht. Rein aufgrund der Abbildung 4.3-32 lässt sich ein solcher nicht feststellen; die Fenster weisen bei gegebenem U-Wert nicht systematisch tiefere Preise für erhöhte Schalldämmmasse auf.

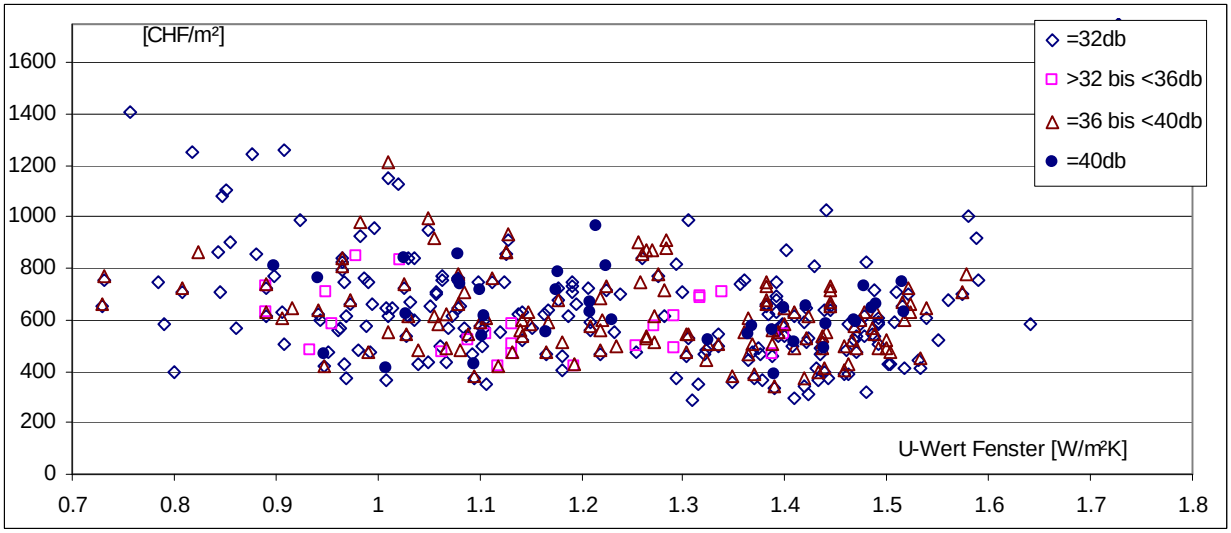


Abbildung 4.3-32 Spezifische Fensterpreise (CHF/m²)in Abhängigkeit der Fenster-U-Werte für Fenster mit **Holzrahmen**, aufgeteilt nach Schalldämm-Klassen.

Ebenfalls im Anhang ist die Abhängigkeit des Fensterpreises als Funktion des U-Wertes gruppiert nach den einzelnen Unternehmen ersichtlich, jeweils für Holz-, Holz-Metall- und Kunststoffenster.

d) Die Auswertung der Erhebung (deduktive Statistik)

Um die Fensterpreise als Funktion der interessierenden Einflussgrössen bzw. der Nutzenkomponenten quantifizieren zu können, ist die Erstellung eines statistischen Modells notwendig. Damit lässt sich der Fensterpreis als Funktion der Einflussfaktoren berechnen (vorhersagen) und es kann unterschieden werden zwischen dem systematischen Einfluss der energetisch relevanten Kennwerte, den übrigen Einflussfaktoren und der zufälligen Streuung. Bzgl. der Einflussfaktoren besteht eine gewisse Wahlmöglichkeit, weil diese untereinander teilweise „deterministisch" voneinander abhängen (der Fenster-U-Wert als Funktion des Glas-U-Wertes, des Rahmenanteils, der Glasrandlänge und des Abstandhalters (siehe Gleichung im Kapitel 4.2.7a)). Ausserdem besteht grundsätzlich die Wahlmöglichkeit, erstens mehr und detailliertere bzw. zweitens weniger und zusammenfassendere Einflussfaktoren mit einzubeziehen. Im ersten Fall weist das Modell eine höhere Präzision auf, dafür müssen mehr (technische) Details bekannt sein, um den Fensterpreis berechnen zu können. Im zweiten genügen weniger Angaben (nur der Gesamtfenster-U-Wert statt die einzelnen U-Werte sowie die Flächenanteile), dafür ist das Fenster weniger gut charakterisiert, was die Grenzkostenberechnungen erschwert . Im folgenden werden beide Ansätze verfolgt:

Die Ausgangshypothese ist, dass folgende Grössen (unabhängige Variablen) den Fensterpreis bestimmen (abhängige Variable):

- Fläche Glas
- U-Wert Glas
- Fläche Rahmen
- U-Wert Rahmen
- Länge Glasrand
- Qualität Abstandhalter

} oder

- Fläche Fenster
- U-Wert Gesamtfenster

- Rahmenmaterial (Holz, Holz-Metall, Kunststoff)
- Rahmen gedämmt (Code 1 bei gedämmten Rahmen oder Rahmen mit Verbundmaterialien (Holz, Holz-Metall) bzw. mit wärmetechnisch verbesserter Armierung (Kunststoffrahmen))
- Schalldämmass (dB)
- Anzahl Flügel
- Öffnungsmechnanismus (Code=1, falls Drehkipp-Fenster)
- Montage (Code=1, falls Montage im angegebenen Preis inbegriffen)
- Offerte Menge (Mengenrabatt)
- Absender (hat der Absender der Offerte einen Einfluss auf den Offertpreis?)

Grundsätzlich sind verschiedene Modellansätze möglich; als abhängige Variable kann z.B. entweder der spezifische Flächenpreis (CHF/m²) oder der absolute Fensterpreis (CHF) geschätzt werden. Die abhängige Variable kann linear bzw. nicht-linear in den erklärenden Variablen sein. Und das Modell kann bzgl. der erklärenden Variablen entweder additiv oder multiplikativ sein.

Auch aufgrund der Scatterplots (Abbildung 4.3-28 bis Abbildung 4.3-30) wurde bzgl. der energetischen Variablen eine Abhängigkeit nach einem Potenzgesetz oder einem Exponentialgesetz mit negativem Koeffizienten vermutet. Potenzgesetz und Exponentialgesetz stimmen numerisch gut überein, solange die x-Werte sich zwischen 0.5 und ca. 1.2 bewegen, wie es für die U-Werte der Fall ist. Bezüglich der Abhängigkeit von der Fensterfläche ist ein Skaleneffekt festzustellen (Abbildung 4.3-31). Vereinfacht dargestellt bedeutet dies einen Ansatz gemäss Gleichung m11 oder m12.

$$Preis_{Fenster} = C_1 \cdot e^{-a_1 \cdot U_g} \cdot e^{-b_1 \cdot U_f} \cdot A_g^{-c_1} \cdot A_f^{-d_1} \cdot F_i$$ Gleichung m_{11}

$$Preis_{Fenster} = C_2 + m_2 U_g^{-a_2} + n_2 U_f^{-b_2} + p_2 A_g^{-c_2} + q_2 A_f^{-d_2} + F_i$$ Gleichung m_{12}

$$Spez.Preis_{Fenster}\ (CHF/m^2) = C_3 + m_3 U_g^{-a_3} + n_3 U_f^{-b_3} + c_3 \cdot log(A_g) + d_3 \cdot log(A_f) + F_i$$ Gleichung m_{13}

U	U-Wert
A	Fläche
g	Glas
f	Rahmen (frame)
C	zu schätzender Proportionalitätsfaktor
a bis d	zu schätzende Koeffizienten

m, n, p, q zu schätzende Koeffizienten

Fi weitere Einflussfaktoren

Um einen linearen Regressionsansatz anwenden zu können, waren die Variablen demzufolge zu transformieren und zwar mittels Logarithmus, da die Exponenten unbekannt waren und insbesondere vermutet wurde, dass sie nicht –1 betragen. Damit ergibt sich als Konsequenz ein multiplikativer Ansatz (Gleichung m11). Eine Veränderung eines Einflussfaktors um x% bewirkt eine Preisänderung um x% oder um x^{-k}%, d.h. bei einem teureren Fenster, z.B. weil es flächenmässig grösser ist, wirkt sich eine Verbesserung des U-Wertes, ein zusätzlicher Flügel oder die Montage betragsmässig stärker auf den Fensterpreis aus als bei einem kostengünstigeren, kleineren Fenster, was durchaus plausibel ist. Im Gegensatz dazu würde bei einem linearen Modell gemäss Gleichung m12 eine Verbesserung des U-Wertes betragsmässig immer die gleiche Preisänderung ergeben, unabhängig davon, ob es sich um ein kleines oder ein grosses Fenster handelt. Dies wäre höchstens für Einflussfaktoren mit Fixkostencharakter plausibel, z.B. wenn die Montage für ein kleines und für ein grosses Fenster gleich teuer wäre. An dieser Stelle kann nicht auf alle Details des Vorgehens zur Modelletablierung eingegangen werden. Abschliessend lässt sich festhalten, dass ein Ansatz mit spezifischem Flächenpreis (ähnlich wie Gleichung m_{13}) und der Ansatz mit absoluten Fensterpreisen mit linearer Abhängigkeit der Variablen nicht zum Erfolg führte (die Residuen waren jeweils nicht normalverteilt).

Grundsätzlich wären weitere funktionale Formen denkbar, welche zum Beispiel mittels eines Translog Ansatzes zu bestimmen wären. Im Rahmen dieser Arbeiten war es jedoch nicht möglich, diesen Ansatz weiter zu verfolgen.

Bei der Modellspezifikation wurde grundsätzlich nach dem Ansatz **„general to specific"** vorgegangen, d.h. als Erstes wurden alle Variablen, von denen ein Erklärungsgehalt vermutet wurde, in das Modell mit einbezogen. Schritt für Schritt wurden darauf die nicht signifikanten Variabeln aus dem Modell entfernt.

Die Regressionsanalyse wurde **nicht** für die drei Fenstertypen Holz, Holz-Metall und Kunststoff separat durchgeführt, weil zum einen bzgl. der wichtigen interessierenden Variablen ein ähnliches Verhalten erwartet wurde und zum anderen die Datenmenge insbesondere für die Kunststoffenster eher klein geworden wäre. Den Unterschieden der Fenster mit unterschiedlichen Rahmenmaterialien kann man gerecht werden, indem mit entsprechenden Dummy-Variablen gearbeitet wird, welche bei Bedarf in Interaktion mit weiteren Variablen gebracht werden können. Der Nachteil der nicht-getrennten Analyse bei einem multiplikativen Modell ist, dass ein Faktor, der eigentlich bei allen Fenstern *absolut* gesprochen den gleichen Einfluss haben müsste, bei diesem Ansatz einen gleichen *prozentualen* Einfluss hat. Ein Drehkippverschluss z.B. ist so beim Holzmetallfenster aus dem Ansatz heraus teurer als beim Holzfenster.

Geprüft wurden nebst der oben aufgeführten Variablen folgende qualitative bzw. zählende (diskrete) Variablen:

- U_{Glas} < 0.9 bzw. Anzahl Gläser > 2: Gibt es einen Preissprung, sobald der Glas-U-Wert unter 0.9 W/m²K zu liegen kommt bzw. sobald drei Gläser eingesetzt werden?
- Fensterfläche < 0.7 m² bzw. Fensterfläche >6 m². Häufig beschreiben Regressionsmodelle einen bestimmten Zusammenhang nur innerhalb eines bestimmten Gültigkeitsbereichs. Mit dieser Variable wird geprüft, ob das Modell auch für sehr kleine bzw. sehr grosse Fenster anwendbar ist.
- Schalldämmass > 38 dB: Aufgrund der Gespräche mit Fenster- bzw. Glasherstellern lässt sich vermuten, dass eine Verbesserung des Schalldämmasses, die wesentlich über 36 dB

hinaus geht, nur durch kostenrelevante Zusatzmassnahmen (schwerere Gläser) erreicht werden; nur durch ein zusätzliches (drittes) Glas kann dies nicht erreicht werden.

- Rahmen gedämmt: Gibt es einen Preissprung, sobald die energetische Verbesserung des Rahmens durch eine neue Qualität von Massnahmen (d.h. nicht nur durch eine Erhöhung der Rahmenstärke) verbessert wird?

Geprüft wurden nicht nur einzelne Variablen, sondern auch **vermutete Interaktion**, insbesondere bei den qualitativen Variablen (den sogenannten Dummy- bzw. Codierungsvariablen), welche z.B. das Rahmenmaterial charakterisieren. Dabei geht es darum festzustellen, ob der Exponent bzgl. dem U-Wert des Rahmenmaterials oder der Fläche des Rahmens für die verschiedenen Rahmenmaterialien verschieden ist.

Geprüft wurden im Einzelnen folgende Interaktionen:

- U_{Glas} * Schalldämmass: Gibt es einen Synergieeffekt zwischen den Zielen Energieeffizienz und Schalldämmung?
- U_{Glas} * Anzahl Gläser: Ist der Verlauf des Preisanstiegs in Funktion des abnehmenden Glas-U-Wertes für Fenster mit zwei bzw. mit drei Gläsern verschieden, d.h. ist der Exponent bzgl. U_{Glas} ein anderer?
- U_{Rahmen} * Rahmenmaterial: Ist der Verlauf des Preisanstiegs in Funktion des abnehmenden Glas-U-Wertes für Fenster mit unterschiedlichem Rahmenmaterial (Holz, Holz-Metall, Kunststoff) verschieden?

Modellansatz 1 (technischer Approach)

Dieser Ansatz geht davon aus, dass die geometrischen Masse und die energietechnischen Kennwerte der einzelnen Fensterbestandteile (Glas, Rahmen, Abstandhalter) bekannt sind.

Folgende Feststellungen können anhand der statistischen Regressionsanalysen gemacht werden (siehe Tabelle 4.2-15):

- Das Regressionsmodell ist hoch signifikant (F-Statistik=264.4), weist einen hohen Erklärungsgehalt auf (Adjusted R^2>0.8 bei über 700 Freiheitsgraden) und die Regressionskoeffizienten (Schätzer) sind ebenfalls hoch signifikant (p Statisitik grösstenteils <0.0001, im „schlechtesten" Fall 0.015)
- Werden nur die Koeffizienten betrachtet, wirkt sich die Verbesserung der Rahmen-U-Werte leicht stärker verteuernd aus als die Verbesserung der Glas-U-Werte (28% statt 24% bei einer Verbesserung um 0.6 W/m^{2}K). Da der Glas-U-Wert aber flächengewichtet stärker in den Gesamtfenster-U-Wert einfliesst, ist eine Glas-U-Wert Verbesserung doch wesentlich kosteneffizienter.
- Das Schalldämmass als solches geht nicht signifikant in das Modell ein, auch nicht in Interaktion mit dem Glas-U-Wert. Eine angestrebte Verbesserung von mehr als 38 dB wirkt sich jedoch signifikant verteuernd aus. Die Interaktion zwischen der Variable 38 dB und dem U-Wert war nicht signifikant, d.h. es ist kein Synergieeffekt festzustellen (dies im Unterschied zum Modellansatz 2, siehe weiter unten).
- Es kann kein Kostensprung aufgrund des zusätzlich notwendigen Glases bei tiefen Glas-U-Werten festgestellt werden; der Kostenanstieg kann allein durch den Koeffizienten des Glas-U-Wertes erklärt werden. Die Verbesserung des Glas-U-Wertes scheint demzufolge ein gradueller Prozess zu sein (von 1.3 oder 1.1 über 0.9 zu 0.7 und 0.4: bessere Beschichtung, andere Gasfüllung, zusätzliches Glas mit Beschichtung mit „normaler" Gasfüllung, wieder bessere Gasfüllung etc)

- Das Kostenniveau der Holz-Metallfenster ist, ceteris paribus, rund 20% höher als dasjenige der Holzfenster (bei einem Rahmenanteil von 30%).
- Die Montage schlägt mit einem Preisanteil von 25% relativ markant zu Buche.
- Weitere Feststellungen: Kleine Fenster (<0.7 m²) erzeugen einen Preiszuschlag, die Anzahl Flügel geht mit 13% pro Flügel in den Preis ein, das feature des Drehkippmechanismus mit 15%.
- Die Qualität des Abstandhalters hat keinen signifikanten Einfluss auf den Fensterpreis, auch nicht in Interaktion mit dem Logarithmus der Glasrandlänge.

Tabelle 4.3-17 Übersicht über das statistische Regressionsmodell gemäss Ansatz 1

Erklärte Variable Log_{10} (Fensterpreis)				
Freiheitsgrade	Modell: 13	Störterm: 719		
Bestimmtheitsmass	R^2=0.8270	Adjusted R^2 =0.8239		
Modellstatistik			F-Statistik 264.44	p-Wert <0.0001
Erklärende Variablen	Schätzer	Standardfehler	t-Statistik	p Wert
C	3.277	0.029	112.4	<0.0001
Log_{10} (Fläche $_{Glas}$)	0.247	0.010	23.8	<0.0001
Log(Fläche$_{Rahmen}$)	0.123	0.015	8.1	<0.0001
Log(Fläche$_{Rahmen}$) Rahmen$_{Holz-Metall}$	-0.125	0.010	-12.55	<0.0001
F < 0.7 m²	0.149	0.023	6.51	<0.0001
U $_{Glas}$	-0.155	0.013	-12.1	<0.0001
U $_{Rahmen}$	-0.177	0.015	-11.7	<0.0001
U$_{Rahmen}$ * Rahmen$_{gedämmt}$			Nicht signifikant	
U$_{Rahmen}$ * Rahmen$_{KS}$	-0.017	0.007	-2.44	0.015
Rahmen$_{gedämmt}$			Nicht signifikant	
U$_{Rahmen}$ * Rahmen$_{gedämmt}$* Rahmen$_{KS}$	-0.044	0.013	-3.46	0.006
AnzGläser =3			Nicht signifikant	
dB > 38	0.050	0.008	6.03	<0.0001
Montage	0.097	0.011	8.82	<0.0001
drehkipp	0.060	0.007	8.28	<0.0001
Anzahl Flügel	0.053	0.008	7.01	<0.0001
Log_{10} (Menge)	-0.033	0.007	-5.06	<0.0001

Quelle Statistische Auswertung, CEPE

Modellansatz 2 (Architekten- bzw. Energie- und andere Planer- bzw. Bauherren-Approach)

Bei diesem Ansatz werden die Fensterpreise nach weniger technischen Details bestimmt als im Ansatz 1. Anhand dieses Modells lassen sich aufgrund grober Anhaltspunkte zur gewünschten

Fensterqualität die Preise bestimmen. Nicht der Glas- und der Rahmen-U-Wert sind das Mass für die Fensterqualität, sondern der gesamte Fenster-U-Wert. Dazu muss selbstverständlich der Fenstertyp bekannt sein (Rahmenmaterial) sowie die Fenstergrösse, Anzahl Flügel, Verschlussmechnanismus etc. Die Regressionsanalyse hat ausserdem gezeigt, dass die Tatsache, ob ein bestimmter Fenster-U-Wert mit konventionellem oder mit „gedämmtem" Rahmen (Verbundmaterialien, andere Armierung bei Kunststoffenstern etc.) erreicht wird, einen Einfluss auf den Fensterpreis hat.

Bei der Interpretation der Resultate der statistischen Analyse gemäss Tabelle 4.3-19 ist der Gültigkeitsbereich des Modells zu beachten. Insbesondere kann nicht jeder Fenster-U-Wert ohne Rahmendämmung erreicht werden. Ab einem Fenster-U-Wert kleiner als gemäss Tabelle 4.3-18 findet also ein technologischer Wechsel statt und die Dummy-Variablen „Rahmen gedämmt" sind auf 1 zu setzen.

Tabelle 4.3-18 Erreichbarer Fenster-U-Wert (W/m^2K) mit heute erhältlicher sehr guter Verglasung (Glas-U-Wert=0.5 W/m^2K)

	Holz oder Holz-Metall			Kunststoff		
Fensterfläche	1.7 m^2	3 m^2	5 m^2	1.7 m^2	3 m^2	5 m^2
Erreichbarer Fenster U-Wert bei Glas-U-Wert (0.5 W/m^2K)	1.0	0.8	0.7			

Tabelle 4.3-19 Übersicht über das statistische Regressionsmodell gemäss Ansatz 2

Erklärte Variable Log_{10} (Fensterpreis)				
Freiheitsgrade	Modell: 15	Störterm: 717		
Bestimmtheitsmass	R^2=0.849	Adjusted R^2 =0.846		
Modellstatistik			F-Statistik 269.08	p-Wert <0.0001
Erklärende Variablen	Schätzer	Standardfehler	t-Statistik	p-Wert
C	2.977	0.029	103.8	<0.0001
Log_{10} (Fensterfläche)	0.250	0.011	22.5	<0.0001
Fensterfläche < 0.7 m^2	0.114	0.023	5.0	<0.0001
Fensterfläche > 6 m^2	0.077	0.026	3.0	0.003
U-Wert Fenster	-0.253	0.016	-16.1	<0.0001
Rahmen gedämmt	0.032	0.008	3.9	<0.0001
$U\text{-}Wert_{Fenster}$ * $Rahmen_{Holz\text{-}Metall}$	0.083	0.005	15.7	<0.0001
$U\text{-}Wert_{Fenster}$ * $Rahmen_{Kunststoff}$	-0.020	0.010	-2.1	0.0383
$U\text{-}Wert_{Fenster}$ * $Rahmen_{Kunststoff}$ * $Rahmen_{gedämmt}$	-0.045	0.014	-3.2	0.0017
$U\text{-}Wert_{Fenster}^{-1}$ * dB38	0.054	0.010	5.7	<0.0001
Abstandhalter verbessert	0.675	0.312	2.2	0.0306
Log_{10} (Menge)	-0.040	0.006	-6.6	<0.0001
Dreh-kipp (dummy)	0.044	0.007	6.4	<0.0001
Anzahl Flügel	0.067	0.006	10.8	<0.0001
Montage (dummy)	0.099	0.105	9.5	<0.0001
Absender=3	-0.056	0.011	-4.9	<0.0001

Quelle Statistische Auswertung: CEPE

Übersetzt auf die einzelnen Fenstertypen lässt sich also folgende Abhängigkeit des Fensterpreises vom Fenster-U-Wert feststellen (Tabelle 4.3-20Tabelle 4.2-18).

Tabelle 4.3-20 Regressionskoeffizienten (Schätzer) für den Fenster-U-Wert und abgeleitete Preissteigerung bei einer Fenster-U-Wert-Verbesserung von 10% (zu beachten ist der Gültigkeitsbereich gemäss Tabelle 4.3-18).

		Regressionskoeffizienten für $U\text{-}Wert_{Fenster}$		
		Holz	Holz-Metall	Kunststoff
	konv. Rahmen	-0.253	-0.170	-0.273
	gedämmte Rahmen	-0.222	-0.139	-0.318
Preissteigerung bei Fenster-U-Wert-Verbesserung um 10%		Holz	Holz-Metall	Kunststoff
ab einem U-Wert von 1.4 W/m²K	konv. Rahmen	8.5%	5.6%	9.2%
	gedämmte Rahmen	7.4%	4.6%	10.8%
ab einem U-Wert von 1.0 W/m²K	konv. Rahmen	6.0%	4.0%	6.5%
	gedämmte Rahmen	5.2%	3.2%	7.6%

Der Nachteil des Modellansatzes 2 ist, dass sich von einem Gesamtfenster-U-Wert nicht ohne weiteres auf die Glasqualität und damit auf den g-Wert schliessen lässt. Wie die nachfolgenden Grenzkostenberechnungen zeigen, hat dieser jedoch einen markanten Einfluss auf die Energiebilanz der Fenster und damit auf die spezifischen Grenzkosten.

Zwischen dem $U\text{-}Wert_{Fenster}^{-1}$ und der Variable Schalldämmass >38 dB ist eine Interaktion festzustellen. Das führt zum einen dazu, dass das Kostenniveau der Schallschutzfenster rund 9% (energetische Referenzqualität, U_W 0.9 W/m²K) bis 14% (U_W 0.9 W/m²K) höher ist. Für die Fenster mit Schalldämmass ab 38 dB ist also eine **stärkere** Kostensteigerung in Funktion der verbesserten energetischen Qualität (sinkender U-Wert) festzustellen. Bei einer Fenster-U-Wertverbesserung von 10% beträgt die Preissteigerung 9.6% satt 8.5% (ab einem Fenster-U-Wert von 1.4 W/m²K) bzw. 7.6 % statt 6.1 % ab einem Fenster-U-Wert von 0.9 W/m²K. Zwischen den beiden Zielen Energieeffizienz und Schallschutz zeigt sich also kein positiver Synergieeffekt. Dies bestätigen die Fenster- bzw. Glashersteller im Wesentlichen. Für einen weitergehenden Schallschutz sind schwerere und damit teurere Gläser einzusetzen; ein drittes Glas bringt gegenüber der Zweifachverglasung nur eine kleine schalltechnische Verbesserung (zB. 34 dB statt 32 dB). Allerdings ist hier festzuhalten, dass die Auswertungen die heutige Marktsituation reflektieren. Eine Verbesserung beider Ziele wird wenig nachgefragt (energetisch weitergehend wird vorwiegend an ruhigen Orten gebaut bzw. beim Einsatz von Schallschutzfenstern gibt man sich mit der gegenüber dem Ausgangszustand erreichten Verbesserung zufrieden) und dementsprechend ist dieses Angebotssegment auf der Herstellerseite nicht kostenoptimiert. Aus technischem Blickwinkel könnte nämlich ein gewisser Synergieeffekt relativ leicht ausgenützt werden: der Glasabstand zwischen den drei Gläsern ist asymmetrisch zu halten. Dies führt zu einer dB Verbesserung von ..... auf ..... dB und zu geringen Mehrkosten von schätzungsweise ..... CHF/m².

e) Die Ergebnisse der Auswertung

Die in der Abbildung 4.3-33 angebebenen acht Datenpunkte für je eine gleiche Rahmenqualität (je parallel der durchgezogenen Linie) stehen für die Glas-U-Werte 1.1 W/m²K, 0.9 W/m²K, 0.7 W/m²K und 0.5 W/m²K. Die Datenpunkte einer gleichen Glasqualität (parallel der gestrichelten Linie) stehen für die unterschiedlichen Rahmen-U-Werte 1.5 W/m²K, 1.3 W/m²K, 1.1 W/m²K und 0.8 W/m²K, wobei die letzteren beiden als „gedämmt“ codiert sind.

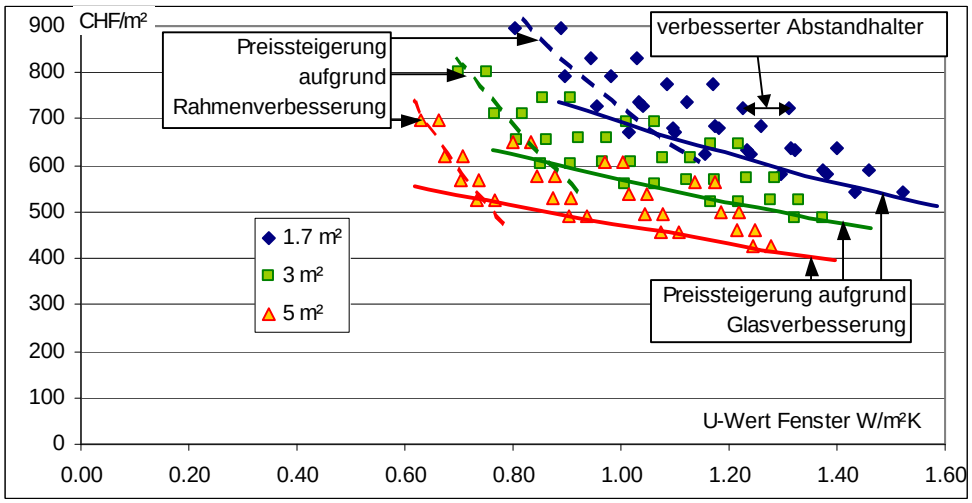


Abbildung 4.3-33 Fensterpreise für **Holz-Fenster** in Funktion des Fenster-U-Wertes für verschiedene energetische Rahmen- und Glasqualitäten, sowie für konventionelle und verbesserte Glasabstandhalter, Fläche 1.7 m², 3 m² und 5 m², Rahmenanteil 30%, 22% und 15%.

Der Rahmen-U-Wert von Holzfenstern kann verbessert werden, indem

- Der Rahmen dicker ausgestaltet wird, z.B. 68 mm oder 74 mm statt 54mm
- Eine besser dämmendes Material, z.B. eine Faserdämmplatte, aufgedoppelt wird
- Der Rahmen im Kern gedämmt wird, z.B. mit PU

Bei Rahmen-U-Werten, die tiefer sind als rund 1.3 W/m²K, wurde eine der obigen Massnahmen ergriffen. Die damit verbunden Mehrpreise sind graduell; es erfolgt KEIN Kostensprung bei einem bestimmten U-Wert. In diesen Modellansatz passen selbst Passivhausfenster mit Rahmen-U-Werten von 0.8 W/m²K.

Aus der Kenntnis der Daten heraus liegt die Vermutung nahe, dass die Preis- bzw. Kostensteigerung der Rahmenverbesserung der Holzfenster stark geprägt ist durch die Passivhausfenster. Dabei ist zu betonen, dass es sich dabei um Preise eines Pioniermarktes handelt, welcher ein sehr geringes Volumen aufweist. Die entsprechenden Fensterhersteller bestätigen denn auch im Gespräch, dass die Produktionsvolumina sehr gering sind und Fenster dieser Qualität beinahe in Einzelanfertigung hergestellt werden müssen. Da es sich meistens um kleinere bis mittlere Unternehmen handelt, sind diese nicht in der Lage, während einer gewissen Einführungsphase die Preise der Passivhausfenster mit dem Verkauf von konventionellen Fenstern querzufinanzieren, um den Preis tiefer zu halten, damit die Nachfrage zu stimulieren und damit dann die Kosten senken zu können. Eine Stimulierung der Nachfrage durch Verbreitung eines Labels wie Passivhaus- oder Minergie-P, ein Druck seitens der Norm und/oder eine zeitlich beschränkte Anschubfinanzierung könnte helfen, über den Mengendegressionseffekt die Kosten zu senken.

Tabelle 4.3-21 Fensterpreise und Fenster-U-Werte für verschiedene energetische Rahmen- und Glasqualitäten, Holzfenster, Fläche 1.7 m², Rahmenanteil 30%.

		Rahmen 1.5		Rahmen 1.3		Rahmen 1.1		Rahmen 0.8	
		Fenster-U-Wert W/m²K	Preis Fr/m²	Fenster-U-Wert W/m²K	Preis Fr/m²	Fenster-U-Wert W/m²K	Preis Fr/m²	Fenster-U-Wert W/m²K	Preis Fr/m²
Glas-U-Wert	1.1	1.52	543	1.46	589	1.39	639	1.29	722
	0.9	1.36	583	1.29	633	1.23	686	1.13	776
	0.7	1.20	626	1.13	680	1.06	737	0.97	833
	0.5	1.04	673	0.97	730	0.90	792	0.80	894

Quelle Auswertung Fenstererhebung CEPE

Eine Verbesserung des Glas-U-Wertes von 1.1 W/m²K auf 0.5 W/m²K ist bei der für den Gebäudebestand typischen Grösse von 1.7 m² mit Mehrkosten von rund 25% bzw. 130 CHF/m² Fenster verbunden, siehe Tabelle 4.3-21 (100 CHF/m² Fenster bei grossflächigen Fenstern, siehe Tabelle 4.3-23). Damit lässt sich bei den kleinflächigen Fenstern eine Fenster-U-Wert-Verbesserung von 0.42 W/m²K, von 1.52 W/m²K auf 1.1 W/m²K, erreichen, bei den grössten Flächen eine solche von 1.28 W/m²K auf 0.74 W/m²K, also eine Verbesserung von 0.54 W/m²K. Eine Verbesserung der Rahmen von 1.5 W/m²K (heutiger Standard) auf 0.8 W/m²K (passivhausähnlich) verursacht Mehrkosten von rund 33%, was 180 CHF/$m^2_{Fenster}$ bei kleinflächigen und 140 CHF/$m^2_{Fenster}$ bei grossflächigen Fenstern bedeutet. Bei kleinflächigen Fenstern ist damit eine Fenster-U-Wert-Verbesserung von 0.33 W/m²K und bei grossflächigen eine solche von 0.17 W/m²K verbunden. Die kombinierte Verbesserung von Rahmen und Gläsern vom Referenzfenster hin zum Passivhausfenster ist mit Mehrkosten von rund zwei Dritteln verbunden. An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass es sich bei den Rahmenverbesserungen und den Passivhausfenstern um Werte eines sich erst bildenden Marktes und von sehr kleinen Produktionsserien handelt.

Es sei an dieser Stelle auch darauf hingewiesen, dass aus diesen Kostenbetrachtungen keine direkten Schlüsse auf die Kosteneffizienz der Energieeffizienz durch Fensterqualitätsverbesserung gezogen werden dürfen, denn für die Beurteilung der Energieeffizienz ist der g-Wert und die Einbausituation (Orientierung, Verschattung) mit zu berücksichtigen.

Tabelle 4.3-22 Fensterpreise und Fenster-U-Werte für verschiedene energetische Rahmen- und Glasqualitäten, Holzfenster, Fläche 3.5 m², Rahmenanteil 22%.

		Rahmen 1.5		Rahmen 1.3		Rahmen 1.1		Rahmen 0.8	
		Fenster-U-Wert W/m²K	Preis Fr/m²	Fenster-U-Wert W/m²K	Preis Fr/m²	Fenster-U-Wert W/m²K	Preis Fr/m²	Fenster-U-Wert W/m²K	Preis Fr/m²
Glas-U-Wert	1.1	1.36	475	1.31	515	1.26	559	1.19	632
	0.9	1.19	510	1.14	554	1.09	600	1.02	678
	0.7	1.02	548	0.97	594	0.93	645	0.86	728
	0.5	0.85	588	0.81	638	0.76	692	0.69	782

Quelle Auswertung Fenstererhebung CEPE

Der Vergleich von Tabelle 4.3-22 und Tabelle 4.3-23 mit Tabelle 4.3-21 verdeutlicht einen ausgeprägten Grössendegressionseffekt (obgleich ein Teil der Kostendegression aufgrund der geringeren Rahmenanteile zustande kommt). Das Fenster des energetischen Referenzfalles ist grossflächig (5 m²) um rund 120 CHF/m² kostengünstiger als bei der kleinflächigen Variante und ausserdem ist der Gesamtfenster-U-Wert beim grossflächigen Fenster tiefer. Und ein Fenster mit einem Gesamt-U-Wert von z.B. 0.89 W/m²K kostet bei der kleinflächigen Variante rund 890 CHF/m² (Rahmen 0.8, Glas 0.5) und bei der grossflächigen nur 700 CHF/m² (Rahmen 1.3 W/m²K, Glas 0.7 W/m²K) und dies bei höherem g-Wert und höherem Glasanteil.

Tabelle 4.3-23 Fensterpreise und Fenster-U-Werte für verschiedene energetische Rahmen- und Glasqualitäten, Holzfenster, Fläche 5 m², Rahmenanteil 15%.

		Rahmen 1.5		Rahmen 1.3		Rahmen 1.1		Rahmen 0.8	
		Fenster-U-Wert W/m²K	Preis Fr/m²	Fenster-U-Wert W/m²K	Preis Fr/m²	Fenster-U-Wert W/m²K	Preis Fr/m²	Fenster-U-Wert W/m²K	Preis Fr/m²
Glas-U-Wert	1.1	1.28	425	1.25	461	1.21	500	1.16	564
	0.9	1.10	456	1.07	495	1.03	536	0.99	606
	0.7	0.92	490	0.89	531	0.86	576	0.81	651
	0.5	0.74	526	0.71	570	0.68	618	0.63	699

Quelle Auswertung Fenstererhebung CEPE

In Abbildung 4.3-34 kommen für die Fenster mit Kunststoffrahmen die gleichen Glas-U-Werte zur Anwendung, während die Datenpunkte einer je gleichen Glasqualität (je parallel der gestrichelten Linie) für die unterschiedlichen Rahmen-U-Werte 1.6 W/m²K, 1.5 W/m²K, 1.2 W/m²K und 1.1 W/m²K, wobei die letzteren beiden als „gedämmt“ codiert sind.

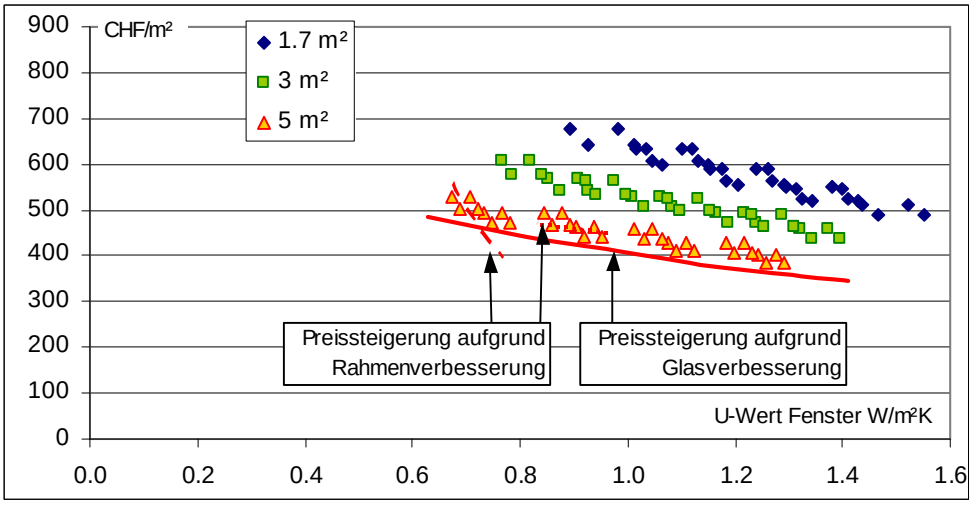


Abbildung 4.3-34 Fensterpreise für **Kunststoff**-Fenster in Funktion des Fenster-U-Wertes für verschiedene energetische Rahmen- und Glasqualitäten, sowie für konventionelle und verbesserte Glasabstandshalter, Fläche 1.7 m², 3 m² und 5 m², Rahmenanteil 30%, 22% und 15%.

Beim Wechsel von zwei (tiefster möglicher U-Wert ca. 1.0. evtl. 0.9) auf drei Gläser (U-Werte von 0.7 bzw. 0.5) ist weder bei den Holz- noch den Kunststoffenstern ein Kosten**sprung** festzustellen, sondern nur eine graduelle, kontinuierliche Kostensteigerung. Das heisst, die Mehrpreise folgen für zwei bzw. drei Gläser dem gleichen numerischen Zusammenhang.

Man erkennt, dass bei den Holzfenstern die Steigung bei der Verbesserung des Glas-U-Wertes weniger steil ist als bei der Verbesserung des Rahmen-U-Wertes. Bei den Kunststoffenstern ist dies im Durchschnitt der möglichen Rahmenverbesserungen weniger ausgeprägt der Fall. Mit speziell „gedämmten" Rahmen (gepunktete Linie in Abbildung 4.3-34) ist eine Verbesserung des Fenster-U-Wertes nicht steiler als die der Glasverbesserung (durchgezogene Linie). Bei den Kunststoffenstern ist der erreichte (tiefste) U-Wert des Rahmens allerdings höher als bei den Holzfenstern. Dies erklärt zum einen, dass die Preissteigerung aufgrund der Rahmenverbesserung bei den KS-Fenstern leicht geringer ist, denn die letzte Herausforderung, nämlich die Erfüllung der Passivhausanforderung ist noch nicht in den Daten enthalten. Zum anderen bewirkt dies besonders bei den kleinen Fenstern, dass bei den Kunststoffenstern ein nicht gleich tiefer Gesamtfenster-U-Wert erreichbar ist, wobei insbesondere die Passivhaus-anforderung bei der kleinen Fläche nur knapp erreicht werden kann.

Modellansatz 2

Beim Modellansatz 2 lassen sich die Effekte der Glas- und der Rahmenverbesserung nicht mehr so gut trennen wie im Ansatz 1. Wie im Ansatz 1 lässt sich ein bestimmter Gesamtfenster-U-Wert durch unterschiedliche Möglichkeiten erreichen (Glasverbesserung, mit konventionellem oder verbessertem Glasabstandhalter, Rahmenverbesserung, graduell oder gedämmt), was sich in einer entsprechenden Streuung bei den Kosten ausdrückt.

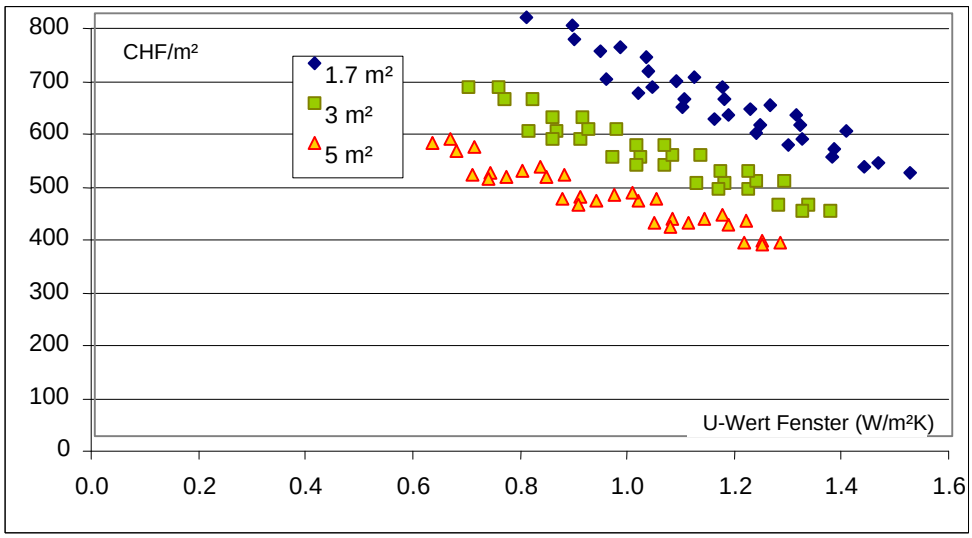


Abbildung 4.3-35 Fensterpreise für **Holzfenster** in Funktion des Fenster-U-Wertes für „gedämmte" und konventionelle Rahmen, Fensterfläche 1.7 m², 3 m² und 5 m², Rahmenanteil 30%, 22% und 15%.

Das allgemeine Preis- bzw. Kostenniveau ist bei den Holzfenstern (Abbildung 4.3-35) höher als bei den Kunststoffenstern (Abbildung 4.3-36) und auch die Preissteigerung in Funktion des abnehmenden Gesamtfenster-U-Wertes ist bei den Holzfenstern etwas ausgeprägter. Ausserdem scheint sich bei den Kunststoffenstern eine Verbesserung der Rahmen nicht in allen Fällen negativ auf die Kosten-/Energieeffizienz auszudrücken.

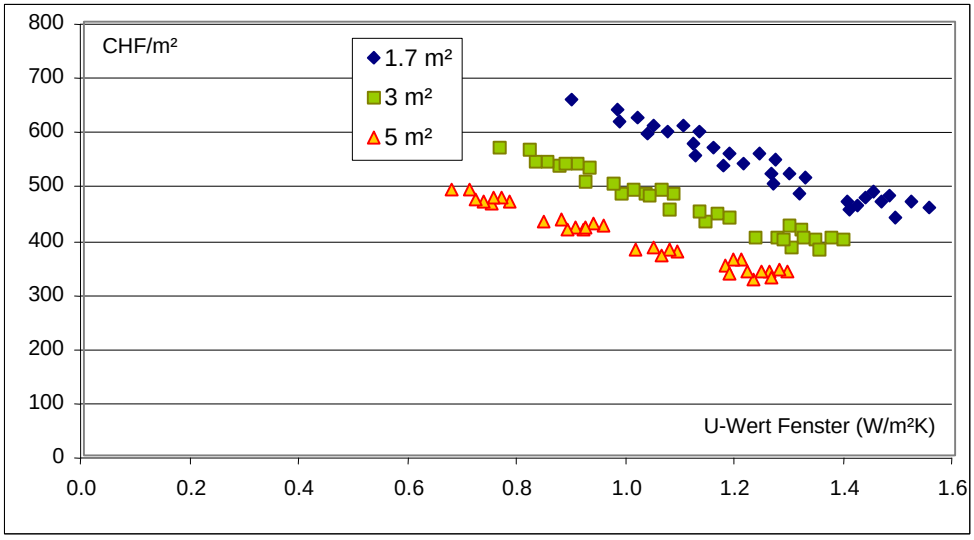


Abbildung 4.3-36 Fensterpreise für Kunststoffenster in Funktion des Fenster-U-Wertes für konventionelle und „gedämmte" Rahmen, Fensterfläche 1.7 m², 3 m² und 5 m², Rahmenanteil 30%, 22% und 15%.

Vergleich Modellansatz 1 und 2, Fazit

Beide Modellansätze sind statistisch hoch signifikant. Aufgrund der unterschiedlichen funktionalen Form ergeben sich zwangsweise auch Unterschiede bei der Anwendung der Modellergebnisse. Insgesamt kann jedoch von einer guten Übereinstimmung gesprochen werden, insbesondere beim Kunststoffenster. Beim Holzfenster ist das allgemeine Preis- bzw. Kostenniveau generell etwas höher. Im folgenden gelangt der Modellansatz 1 zur Anwendung, weil dieser den Vorteil hat, dass das Fenster technisch besser beschrieben werden kann und sich damit besser für den Grenzkostenansatz eignet.

Bei beiden Modellansätzen lässt sich sowohl bei den Holz- wie bei den Kunststoffenstern ein ausgeprägter Grössendegressionseffekt feststellen. Grossflächigere Fenster weisen bei gleichen Rahmen und Glasqualitäten aufgrund der geometrischen Verhältnisse und des im allgemeinen tieferen Glas-U-Wertes einen tieferen Gesamtfenster-U-Wert auf. Beim Neubau besteht damit ein Kosten- und Energieoptimierungspotential durch das Zusammenlegen der geplanten Fensterflächen zu grossflächigeren, aber weniger Fenstern (bei gleicher Gesamtfensterfläche). Die Erhöhung der Fensterflächenanteile (was wiederum die Chance für grösserflächige und damit energetisch verbesserte und kostengünstigere Fenster erhöht) ist jedoch erst im Gesamtgebäudekontext zu beurteilen, siehe dazu die Betrachtungen zur Energiebilanz und zu den Grenzkostenberechnungen.

Kosten bei der Gebäudeerneuerung

Die oben beschriebene Analyse bezieht sich auf das Preis- bzw. Kostenverhältnis für den Neubau. Bei der Gebäudeerneuerung gelten in etwa die selben Preise. Hingegen kommen Kosten für den Demontage und die Entsorgung der alten Fenster hinzu. Diese spielen bei der Grenzkostenbetrachtung „Was kostet der Energieeffizienzgewinn durch den Einbau eines gegenüber dem Standard verbesserten Fensters" keine Rolle, hingegen bei der Fragestellung „Was kostet der Energieeffizienzgewinn eines Austausches des alten Fensters durch ein neues. [Die Kosten zu Demontage und Entsorgung folgen].

Fensterpreis bei Fenstern mit verbessertem g-Wert

Die oben beschriebene Analyse basiert auf Fenstern mit Gläsern, die bzgl. Glas-U-Wert und g-Wert alle ungefähr gleich sind; ein U-Wert von 1.1 W/m²K bedeutet üblicherweise einen g-Wert von 0.57, ein Glas-U-Wert von 0.7 W/m²K einen g-Wert von 0.52 und ein solcher von 0.5 W/m²K einen von 0.42. Soll der g-Wert demgegenüber verbessert werden, ist mit Mehrkosten für die Verglasung gemäss Kapitel 4.3.6 zu rechnen. Direkte Erhebungen bei Fensterherstellern bzgl. der Auswirkungen dieser Mehrkosten auf den Fensterpreis wurden keine durchgeführt. Wir schätzen, dass sich die Mehrkosten der Verglasung mit einer Preissteigerung von ca. 30% auf den Fensterpreis übertragen lassen. Annahme: plus 30 CHF/m² für eine Verbesserung des g-Wertes von 0.42 auf 0.5 bei der Dreifach-WS-Verglasung mit U-Wert 0.5 W/m²K (bei grossflächigen Fenstern und 23 CHF/m²).

f) Die Anwendung der Auswertungsergebnisse im Grenzkostenprojekt

Im Bereich der Fenster gibt es verschiedene Möglichkeiten, die Energieeffizienz zu verbessern, wobei einige dieser Möglichkeiten nur für den Neubau im Vordergrund stehen, andere für Neubau und Gebäudeerneuerungen, siehe die diesbezüglichen Fallunterscheidungen gemäss Tabelle 4.3-24.

Tabelle 4.3-24 Fallunterscheidungen bei der Grenzkostenbetrachtung im Fensterbereich

		Bedeutung für	
Fall		Neubau	Erneuerung
1	Verbesserung der energetischen Fensterqualität (je nach Orientierung: tieferer Fenster-U-Wert, Erhöhung des g-Wertes)	hoch	hoch
2	Verbesserung der energetischen Fensterqualität bei gleichzeitigem Einsatz grösserflächiger Fenster (geringerer Fenster-U-Wert, höherer Glasanteil, tiefere spezifische Kosten)	Sehr attraktiv, sofern architektonisch o.k.	Nicht zutreffend
3	Erhöhung der Fensterflächenanteile bei gleichbleibender energetischer Fensterqualität	nach Süden	gering
4	Erhöhung der Fensterflächen und gleichzeitige Verbesserung der energetischen Fensterqualität	v.a. nach Süden	gering
5	Verlagerung der Fensterflächen gegen Süden (von Ost/West/Nord) bzw. gegen Ost/West (von Nord)	hoch, wenn architektonisch o.k.	Nicht zutreffend

Die Fälle 2 bis 5 bieten beim Neubau die Möglichkeiten, die Kosten und damit die Grenzkosten zu optimieren: Indem die Flächenmasse der einzelnen Fenster vergrössert und die Anzahl der Fenster verkleinert wird (bei gleichbleibender Gesamtfläche), fallen aufgrund des Skaleneffekts geringere Zusatzkosten an und gleichzeitig wird als Nebeneffekt die Energieeffizienz nochmals verbessert (weil der Rahmenanteil von grossen Fenstern kleiner ist als bei kleinen Fenstern, siehe Abbildung 4.3-26).

Die Fälle 2 bis 5 sind vor allem für den Neubau relevant. Die entsprechenden Massnahmen können bei unterschiedlichsten Voraussetzungen (energetische Wandqualität, energetisches Gewinn-/Verlustverhältnis im Gebäude) ergriffen werden. Es muss an dieser Stelle betont werden, dass nicht alle möglichen Massnahmenkombinationen berechnet werden können und müssen. Es handelt sich bei den folgenden Rechnungen vielmehr um ein exploratives Vorgehen, um die kosteneffizienten architektonischen und planerischen Möglichkeiten der Energieeffizienzverbesserung zu eruieren. Mithilfe dieses Vorwissens und mit den im Bericht dargestellten Kostenelementen können dann verschiedene architektonische Konzepte durch-

gerechnet werden. Dabei können auch verschiedene Referenzfälle zur Anwendung kommen, denn je nach Ausgangslage können die Grenzkosten der Energieeffizienz unterschiedlich ausfallen.

Tabelle 4.3-25 Annahmen zu den Kosten für Fenster (inkl. Montage) unterschiedlicher energetischer Qualität für die Grenzkostenberechnungen in diesem Kapitel

	U-Wert Fenster (W/m²K)		Kosten (CHF/m²)	
	kleinflächig	grossflächig	kleinflächig	grossflächig
Referenzfenster (Rahmen 1.5, Glas 1.1) g=0.57	1.52	1.28	543	425
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.7) g=0.52	1.24	0.94	626	490
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.42	1.10	0.77	673	526
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.5	1.10	0.77	703	549
Rahmen 0.8, Glas 1.1 g=0.57	1.31	1.17	722	564
Rahmen 0.8, Glas 0.7 g=0.52	1.03	0.83	833	651
Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.42	0.80	0.66	894	699
Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.5	0.80	0.66	924	722

Fall 1 Verbesserung der energetischen Fensterqualität

In diesem ersten Fall werden die Kosten und Nutzen der Verbesserung der energetischen Fensterqualität gegenüber dem Referenzfenster betrachtet. Die Mehrkosten der verschiedenen Fensterqualitäten gegenüber dem Referenzfenster (Rahmen 1.5, U-Wert 1.1, g-Wert 0.57) werden dem energetischen Effizienzgewinn gegenüber gestellt. Dabei wird bei den energetischen Berechnungen davon ausgegangen, dass die Fensterqualität für alle vier Orientierungen jeweils gleich ist. Die Berechnungen werden sowohl für eher klein- als auch für grossflächige Fenster gemacht.

Es fällt auf, dass die Grenzkosten bei denjenigen Ausgangslagen tiefer liegen, bei denen die Beschattung höher ist (siehe Tabelle 4.3-26 und Tabelle 4.3-27), vor allem bei der Südorientierung. Weiter fällt auf, dass die Grenzkosten je tiefer liegen, je weniger die Orientierung gegen Süden liegt und je mehr gegen Norden. Das bedeutet, dass in diesen Fällen der Energie-Effizienzgewinn kosteneffizienter realisiert werden kann als bei besonnter Ausgangslage (es bedeutet natürlich nicht, dass die Fenster beschattet werden oder nach Norden ausgerichtet werden sollen; verglichen wird nur innerhalb derselben Ausgangslage! Das erste Ziel, das ausserdem am kosteneffizientesten wenn nicht kostenlos zu realisieren ist, sofern es denn aus der Situation heraus möglich ist, muss natürlich eine im Winter möglichst beschattungsfreie Situation sein und möglichst viel Fensterflächen gegen Süden bzw. Westen und Osten, siehe dazu die Überlegungen zu den Energiebilanzen, z.B. Tabelle 4.2-18). Der „Preis" eines tieferen g-Wertes, der bei verbessertem U-Wert zu bezahlen ist, ist also in Südlage zu gross.

Ausserdem ist festzustellen, dass die Grenzkosten der Rahmenverbesserung höher liegen als diejenigen der Gläserverbesserung.

Tabelle 4.3-26 Grenzkosten (CHF/kWh$_{NE}$) der Verbesserung der energetischen Fensterqualität von Holzfenstern, eher kleine Fenstermasse (1.7 m²), Rahmenanteil 30%, Realzins 3.5%, Lebensdauer 30 Jahre

U_W W/m²K		Ausgangslage: Beschattung 0.9				Ausgangslage: Beschattung 0.7			
		Süd	Ost	West	Nord	Süd	Ost	West	Nord
1.52	**Referenzfenster (Rahmen 1.5, Glas 1.1) g=0.57**								
1.24	**Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.7) g=0.52**	0.42	0.27	0.27	0.22	0.33	0.24	0.25	0.21
1.10	**Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.42**	NA	0.49	0.54	0.27	1.53	0.37	0.40	0.25
1.10	Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.5	0.50	0.33	0.34	0.27	0.40	0.31	0.31	0.26
1.31	Rahmen 0.8, Glas 1.1 g=0.57	0.55	0.54	0.54	0.53	0.54	0.53	0.53	0.53
1.03	Rahmen 0.8, Glas 0.7 g=0.52	0.55	0.45	0.46	0.40	0.50	0.43	0.43	0.39
0.8	Passivhaus* (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.42	0.86	0.47	0.49	0.36	0.62	0.42	0.43	0.35
0.8	Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.5	0.48	0.40	0.40	0.36	0.44	0.38	0.38	0.35
		Ausgangslage: Beschattung 0.5				Ausgangslage: Beschattung 0.3			
1.24	**Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.7) g=0.52**	0.27	0.22	0.23	0.20	0.23	0.20	0.21	0.19
1.10	**Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.42**	0.53	0.30	0.31	0.23	0.31	0.24	0.25	0.21
1.10	Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.5	0.34	0.28	0.29	0.25	0.29	0.26	0.26	0.25
1.31	Rahmen 0.8, Glas 1.1 g=0.57	0.53	0.53	0.53	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52
1.03	Rahmen 0.8, Glas 0.7 g=0.52	0.45	0.41	0.41	0.38	0.41	0.39	0.39	0.37
0.8	Passivhaus* (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.42	0.48	0.38	0.39	0.33	0.39	0.34	0.35	0.32
0.8	Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.5	0.40	0.36	0.36	0.34	0.36	0.35	0.35	0.33

Quelle Erhebungen, Auswertungen und Grenzkostenberechnungen: CEPE

Dieselben Grenzkostenberechnungen lassen sich für Fenster mit grösserflächigen Fenstern Massen realisieren. Weil bei diesen das absolute Kostenniveau markant tiefer ist (um 22% bei tieferem Gesamt-Fenster-U-Wert, vgl. Tabelle 4.3-21 und Tabelle 4.3-23), sind es im gleichen Mass auch die Grenzkosten. Gleichzeitig nimmt auch der Rahmenanteil ab. Das verbessert die Energiebilanz (vergleiche Tabelle 4.2-18 mit Tabelle 4.2-17). Weil sich jedoch die Energiebilanz für das Referenzfenster am meisten verbessert (der hohe Rahmen-U-Wert tritt beim grossflächigen in den Hintergrund), ist der Effizienzgewinn der effizienteren Fenster kleiner, so dass die Grenzkosten nicht ganz so stark sinken wie die Kosten der Fenster. Bemerkung: bei diesem Vergleich werden Fenster mit dem jeweils gleichen Mass verglichen (Referenz- und Effizienzfenster); der Effekt des Wechsels von kleineren zu grösseren und damit kostengünstigeren Massen wird bei Fall 3 aufgezeigt.

Dieselben Berechnungen lassen sich für MFH mit höherem Zinssatz machen, siehe dazu den Anhang (to be done); die Grenzkosten steigen proportional zur Annuität um 27%.

Fazit: die Resultate in Tabelle 4.3-26 und Tabelle 4.3-27 erlauben es prinzipiell, die Wahl der Fensterqualität ökonomisch zu optimieren, indem die Grenzkosten untereinander und im Vergleich zu den übrigen Bauteilen möglichst angeglichen werden. Dazu können folgende weiteren inhaltlichen Fazits gezogen werden:

- Die Energieeffizienz lässt sich bei grossen Fenstern weit kosteneffizienter verbessern
- Die Energieeffizienz ist in Südlage, gleichbleibende Fensterflächen vorausgesetzt, nur mit relativ hohen Grenzkosten zu verbessern. Als kritisch erweist sich insbesondere das dreifach verglaste Fenster mit dem tieferen U-Wert (0.5 W/m²K) und dem tiefen g-Wert von 0.42, der heutige Standard ist für diese Verglasungsqualität
- Die Grenzkosten sind bei der Nordorientierung am tiefsten. Es lohnt sich dort als sehr, die Fensterqualität zu verbessern, gerade auch im Vergleich zu anderen Bauteilen.
- Ebenfalls vergleichsweise tief sind die Grenzkosten bei verschatteten Lagen, besonders bei Ost- und Westorientierungen (bei Nordorientierungen spielt die Verschattung einen geringen Einfluss).

Die selben Grenzkostenberechnungen lassen sich auch für die Kunststoffenster machen. Da bei diesen die Kostensteigerung in Funktion des tieferen Fenster-U-Wertes etwas geringer ist, gilt dies auch für die Grenzkosten. [Eine Berechnung im Anhang folgt].

Tabelle 4.3-27 Grenzkosten (CHF/kWh$_{NE}$) der Verbesserung der energetischen Fensterqualität von Holzfenstern, **grossflächige Fenster (5 m²),** Rahmenanteil 15%, Realzins 3.5%, Lebensdauer 30 Jahre

U_W W/m²K		Ausgangslage: Beschattungsfaktor 0.9				Ausgangslage: Beschattungsfaktor 0.7			
		Süd	Ost	West	Nord	Süd	Ost	West	Nord
1.28	**Referenzfenster (Rahmen 1.5, Glas 1.1) g=0.57**								
0.94	**Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.7) g=0.52**	0.28	0.18	0.18	0.14	0.22	0.16	0.16	0.13
0.77	**Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.42**	2.25	0.26	0.28	0.16	0.61	0.22	0.23	0.16
0.77	Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.5	0.35	0.22	0.23	0.18	0.27	0.20	0.20	0.17
1.17	Rahmen 0.8, Glas 1.1 g=0.57	1.07	0.94	0.95	0.87	0.95	0.88	0.89	0.84
0.83	Rahmen 0.8, Glas 0.7 g=0.52	0.64	0.44	0.45	0.36	0.52	0.40	0.41	0.35
0.66	Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.42	1.51	0.51	0.53	0.35	0.87	0.45	0.46	0.34
0.66	Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.5	0.61	0.42	0.43	0.35	0.50	0.38	0.39	0.33
		Ausgangslage: Beschattungsfaktor 0.5				Ausgangslage: Beschattungsfaktor 0.3			
0.94	**Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.7) g=0.52**	0.18	0.15	0.15	0.13	0.15	0.13	0.13	0.12
0.77	**Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.42**	0.32	0.19	0.19	0.15	0.20	0.16	0.16	0.14
0.77	Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.5	0.22	0.18	0.19	0.16	0.19	0.17	0.17	0.16
1.17	Rahmen 0.8, Glas 1.1 g=0.57	0.87	0.84	0.85	0.83	0.83	0.82	0.82	0.82
0.83	Rahmen 0.8, Glas 0.7 g=0.52	0.43	0.37	0.37	0.34	0.37	0.34	0.34	0.33
0.66	Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.42	0.57	0.39	0.40	0.32	0.40	0.33	0.34	0.30
0.66	Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.5	0.41	0.35	0.36	0.32	0.36	0.33	0.33	0.31

Quelle Erhebungen, Auswertungen und Grenzkostenberechnungen: CEPE

Bei der **Gebäudeerneuerung** sind bei der Grenzkostenbetrachtung die drei Fälle gemäss Tabelle 4.3-28 zu unterscheiden.

Tabelle 4.3-28 Fallunterscheidung bei der Fenster-Grenzkostenbetrachtung bei der Gebäudeerneuerung

Fall	Referenz	Weitergehende Energieeffizienz
E	Erneuerung = Ersatz des alten Fensters durch ein Fenster der Referenzqualität (U_{Rahmen}=1.5 W/m²K, U_{Glas}=1.1 W/m²K)	Ersatz des alten Fensters durch ein Fenster mit gegenüber dem **Referenzfenster** verbesserten energetischen Kennwerten
IS	Instandsetzung = Ersatz des alten Fensters durch ein Fenster der gleichen Qualität (U_{Rahmen}=1.5 W/m²K, U_{Glas} =1.6 bis 3.0 W/m²K, je nach Fensterzustand oder sonstige lebensdauerverlängernde Massnahmen	Ersatz des alten Fensters durch ein Fenster mit gegenüber dem **alten Fenster** verbesserten energetischen Kennwerten (u.a. durch ein heutiges Standardfenster) oder andere Effizienz-massnahmen (siehe Erb, 2001)
IH	Instandhaltung (Farbanstrich)	Wie beim Fall IS

Quelle CEPE

Im **Fall IH** ist der Referenzfall hingegen ein Belassen des Fensters im alten Zustand oder nur ein Unterhalt **(=Instandhaltung).** In diesem Fall sind bei den Mehrkosten die Kosten für Demontage und Entsorgung mitzurechnen, denn diese fallen bei der Instandhaltung nicht an. Für die Kosten der Instandhaltung kann auf die Untersuchung von Eicher + Pauli (Erb, 2001) zurückgegriffen werden. [Berechnungen für diesen Fall folgen].

Bei der Energieeffizienzwirkung der oben genannten Massnahmen ist für die Fälle **IS** und **IH** zu berücksichtigen, dass nebst der Reduktion der Transmissionsverluste eine Reduktion der Lüftungsverluste erfolgt. Im Ausgangszustand ($Fenster_{alt}$) betragen die Lüftungsverluste bei einer Einfachverglasung (EV) 700 MJ/m²$_{Fe}$a und bei einer Doppelverglasung (DV) rund 400 MJ/m²$_{Fe}$a (Erb, 2001). Beim Ersatz dieser Fenstertypen wird der Lüftungsverlust auf ca. **200 MJ/m²$_{Fe}$a bis 300 MJ/m²$_{Fe}$a** reduziert. Damit ergibt sich für die EV ein Effizienzgewinn von 400 MJ/m²$_{Fe}$a bis 500 MJ/m²$_{Fe}$a und bei den DV ein solcher von 100 MJ/m²$_{Fe}$a bis 200 MJ/m²$_{Fe}$a. Bei einem typischen Verhältnis A_{Fe}/EBF von **0.15** ergibt sich damit eine Reduktion des spezifischen Heizwärmebedarfs von 60 MJ/m²$_{EBF}$a bis 75 MJ/m²$_{EBF}$a (EV) bzw. von 15 MJ/m²$_{EBF}$a bis 30 MJ/m²$_{EBF}$a (DV). Dies ist in etwa kohärent zur Tabelle 4.2-10, wo der Lüftungsanteil des Heizwärmebedarfs für verschiedene Fälle aufgelistet ist.

Im Fall E ist der Effekt der Lüftungsverlustreduktion bereits Bestandteil des Referenzfalls.

Fall 2 Verbesserung der energetischen Fensterqualität bei gleichzeitigem Einsatz grösserflächiger Fenster

Aufgrund der festgestellten Kostendegression der grösseren Fensterfläche und wegen der bessereren Gesamtenergieeffizienz eines grossen Fensters verglichen mit einem kleinen (bei gleichen Glas- und Rahmen-U-Werten), interessiert im folgenden die Frage, welche Grenzkosten die Fensterverbesserung aufweist, wenn gleichzeitig die gegebene Fensterfläche mittels grösserflächiger Fenster realisiert wird.

Tabelle 4.3-29 Grenzkosten (CHF/kWh$_{NE}$) der Verbesserung der energetischen Fensterqualität von Holzfenstern bei gleichzeitigem Wechsel von klein- (1.7 m²) zu grossflächigen Fenstern (5 m²), Realzins 3.5%, Lebensdauer 30 Jahre

U_W		Ausgangslage: Beschattung 0.9				Ausgangslage: Beschattung 0.3			
W/m²K		Süd	Ost	West	Nord	Süd	Ost	West	Nord
1.52	**Referenzfenster, kleine Fläche (Rahmen 1.5, Glas 1.1) g=0.57**								
1.28	**Zweifachglas, grosse Fläche (U_{rahmen}1.5, Glas 1.1)**	-0.05	-0.06	-0.06	-0.07	-0.06	-0.06	-0.06	-0.07
0.94	**Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.7) g=0.52**	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.01	-0.01	-0.01	-0.02
0.77	**Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.42**	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.77	Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.17	Rahmen 0.8, Glas 1.1 g=0.57	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
0.83	Rahmen 0.8, Glas 0.7 g=0.52	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03
0.66	Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.42	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04
0.66	Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.5	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04

Quelle Erhebungen, Auswertungen und Grenzkostenberechnungen: CEPE

Negative Werte in Tabelle 4.2-25 bedeuten einen wirtschaftlichen Gewinn, denn beim Wechsel von kleinflächigen zu grossflächigen Fenstern sinken einerseits die Kosten der Fenster und andererseits wird ein Energieeffizienzgewinn erzielt, weil der Gesamtfenster-U-Wert zurückgeht und der Glasanteil und damit die solaren Gewinne steigen. Diese Massnahme ist selbstredend nur für den Neubau anwendbar und hat natürlich architektonische Beschränkungen. Es bietet sich hier aber für den Architektinnen und Architekten eine Möglichkeit, Kosten zu sparen und gleichzeitig energieeffizienter zu bauen.

Es handelt sich hier um ein Fallbeispiel. In der Realität wird die durchschnittliche Fenstergrösse im Neubau kaum nur 1.7 m² betragen und sie kann kaum auf durchschnittlich 5 m² gesteigert werden. Die Resultate in Tabelle 4.2-25 zeigen aber immerhin auf, wie sehr es sich auszahlt, die Fensterflächen mit möglichst grossflächigen Fenstern zu realisieren. Die Aufgabe der ArchitektInnen ist es, diese Erkenntnis möglichst architektur- und wohngerecht umzusetzen.

Fall 3 Erhöhung der Fensterflächenanteile bei gleichbleibender energetischer Fensterqualität

Nebst der Frage nach den Grenzkosten der unterschiedlichen Fensterqualität interessiert im Neubau insbesondere die Frage nach dem Verhältnis Fenster zu Fassade. Diese Frage stellt sich bei gegebener Fensterqualität (hier behandelter Fall 3) und bei gleichzeitiger Verbesserung der Fensterqualität gegenüber dem heutigen Baustandard (Fall4).

In Fall der Fensterflächenvergrösserung bei gleichbleibender Fensterqualität (U-Werte Rahmen und Glas) kann ein Effizienzgewinn realisiert werden in denjenigen Fällen, in denen die Energiebilanz der Fenster besser ist als die der Wand. Zwei Fälle gilt es zu unterscheiden: Bei der Vergrösserung der Fensteranteile an der Fassade können mehr Fenster der gleichen Grösse eingesetzt werden (Fall 3a) oder es kann gleichzeitig die Fensterfläche pro Fenster vergrössert werden (Fall 3b). Im zweiten Fall wird die Energiebilanz zusätzlich verbessert, weil die Fenster

einen geringeren Fenster-U-Wert aufweisen (kleinerer Rahmenanteil) und einen höheren Glasanteil (höhere Gewinne).

Ist der Energieeffizienzgewinn positiv, stellt sich die Frage nach den Kosten. Nebst den Mehrkosten für die zusätzliche Fensterfläche fallen in der Nettobetrachtung auch Minderkosten an. Im Neubau können die Kosten der vermiedenen Wand eingespart werden (rund 220 CHF/m² bis 300 CHF/m² für die kostengünstigsten Wandvarianten , je nach Dämmstärke). Bei der Erneuerung ist entweder keine Kostenersparnis oder sie fällt wesentlich geringer aus. Eine Kostenersparnis ergibt sich, wenn die Wand gleichzeitig wärmegedämmt wird und durch die Fensterflächenvergrösserung weniger Fläche zu dämmen ist (rund 120 CHF/m2 bis 200 CHF/m2). Diese Kostenersparnis wird teilweise wieder wettgemacht durch die Abbruchkosten der Wand (50 CHF/m² bis 80 CHF/m², to be checked). Nebst diesen eigentlichen Baumeisterkosten sind ausserdem die Unannehmlichkeiten für die Mieterinnen oder Hausbesitzer und evtl. damit verbundene Kosten zu nennen, welche diese Massnahme bei bestehenden Gebäuden unattraktiv machen; entsprechend selten wird sie ausgeführt.

Grenzkostenberechnung im Fall 3:

$$\text{Kosten } (\text{Wand}_{\text{kleiner Fensteranteil}}+\text{Fenster}_{\text{kleiner Anteil}}-(\text{Wand}_{\text{grosser Fensteranteil}}+\text{Fenster}_{\text{grosser Anteil}})) \,/\, \text{Energiebilanz}(\text{Wand}_{\text{kleiner Fensteranteil}}+\text{Fenster}_{\text{kleiner Anteil}}-(\text{Wand}_{\text{grosser Fensteranteil}}+\text{Fenster}_{\text{grosser Anteil}}))$$

Die Fragestellung hier ist, inwiefern es sich bei gegebenen U-Werten für die Wand sowie die Rahmen und Gläser lohnt, die Gesamtfensterfläche zu vergrössern. Die Rechnungen gelten also für den Fall, wo die Fensterqualität (U-Werte von Rahmen und Glas) schon entschieden ist, und es noch um die Festlegung der Fensterfläche pro Fassade geht. Dabei sind in den folgenden Tabellen hauptsächlich die Zeilen des Referenzfensters für den Grenzkostenansatz gemäss dem Ziel des Berichts relevant. Die weiteren Zeilen dienen den Architekten, Planern und Eigentümmer, um bei gegebener Fensterqualität zu beurteilen, wie sich eine Erhöhung der Fensterflächenanteile auswirkt.

Die Rechnungen werden am Beispiel der Wand mit Minergiequalität ausgeführt. Dies im Hinblick darauf, dass die Wandqualität im Grenzkostenkurvenansatz ebenfalls verbessert würde. Die Grenzkosten der Erhöhung der Fensterflächenanteile sind bei einer Wand gemäss heutiger Bauweise tiefer (die wegfallenden Kosten der Wand sind zwar leicht tiefer, aber die Energiebilanz dieser Wand schlechter ist als diejenige der Minergiewand und der Effizienzgewinn im Endeffekt kosteneffizienter). Bei der Passivhauswand können die Kosten höher oder tiefer ausfallen, siehe entsprechende Sensitivitätsbetrachtungen.

Fall 3a Gleich grosse, aber mehr Fenster, bei gleichbleibenden U-Werten für Glas und Rahmen

Die folgenden Resultate beinhalten keine Kosten von evtl. zusätzlich notwendigem Sonnenschutz. Solche Kosten sind jedoch insbesondere bei unverschatteten Lagen mit hohem Fensterflächenanteil zu berücksichtigen, z.B. für Direktsolargewinnhäuser mit hohem Glasanteil gegen Süden. Bei sehr hohen Anteilen wird ein automatisch gesteuerter Sonnenschutz notwendig (ausfahrend, damit sich die BewohnerInnen nicht eingeschlossen fühlen. Bei kleineren Anteilen kann evtl. ein fix montierter Sonnenschutz angebracht werden, welcher die Sonne im Winter ins Gebäude lässt und im Sommer abhält. Bei Ost- und vor allem Westlagen sind hohe Glasanteile vor allem bzgl. sommerlichem Wärmeschutz kritisch, vor allem zu Zeiten der tiefstehenden Sonne. Ausfahrender Sonnenschutz ist hier weniger wirksam als das Storensystem.

Tabelle 4.3-30 Grenzkosten (CHF/kWh$_{NE}$) der Vergrösserung der Fensterflächenanteile mittels mehr kleiner bzw. mehr grosser Fenster bei Südorientierung (Fallbeispiel Minergie-Wand, U-Wert$_{Wand}$=0.2 W/m^{2}K)

Süden	Mehr kleine Fenster				Mehr grosse Fenster			
	Beschattungssituation (Beschattungsfaktor)							
	0.9	**0.7**	**0.5**	**0.3**	**0.9**	**0.7**	**0.5**	**0.3**
Referenzfenster (Rahmen 1.5, Glas 1.1) g=0.65	0.33	0.79	Energiebilanz der Massnahme ist nicht positiv oder Kosten liegen über 1 CHF/kWh$_{NE}$		0.15	0.22	0.58	Energiebilanz nicht positiv oder Kosten über 1 CHF / kWh$_{NE}$
Referenzfenster (Rahmen 1.5, Glas 1.1) g=0.57	0.45	2.03			0.17	0.27	1.15	
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.7) g=0.52	0.44	1.02			0.18	0.26	0.52	
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.42	0.66	1.86			0.23	0.33	0.64	
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.5	0.46	0.90			0.20	0.27	0.47	
Rahmen 0.8, Glas 1.1 g=0.57	0.48	1.05			0.24	0.37	1.02	
Rahmen 0.8, Glas 0.7 g=0.52	0.49	0.85			0.26	0.36	0.63	
Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.42	0.59	0.95			0.32	0.43	0.74	
Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.5	0.46	0.70			0.28	0.37	0.58	

Quelle Erhebungen, Auswertungen und Grenzkostenberechnungen: CEPE

Unter Berücksichtigung des evtl. zusätzlichen Sonnenschutzes könnten sich die untenstehenden Kosten also erhöhen. Je nach architektonischer Lösung der Erhöhung der Fensterflächen fallen die Kosten unterschiedlich aus. Handelt es sich um eine Vergrösserung der einzelnen Fensterflächen (Verbreiterung, Verlängerung, Fall 3b) fallen die Zusatzkosten tiefer aus, als wenn zusätzliche Fenster hinzukommen.

Wie Tabelle 4.3-30 zeigt, liegen die Kosten der Fensterflächenvergrösserung, also von mehr Fensterfläche pro Wandfläche, durch den Einsatz von mehr (gleichflächigen) Fenstern relativ hoch. Dies gilt bei relativ kleinen Fenstern (<=1.7m2) noch mehr als bei grossen. Die Grenzkosten steigen ausserdem schon bei mässiger Verschattung (Beschattungsfaktor<0.7) und relativ schnell ist der Punkt erreicht, ab dem ein Einsatz von mehr Fenstern entweder keine energetische Verbesserung mehr bringt oder die Grenzkosten über einem Franken pro kWh$_{NE}$ zu liegen kommen.

Bei Ost- und Westlage (siehe Tabelle 4.3-31) lässt sich ein Energieeffizienzgewinn (zu Kosten unter 1 CHF/m^2) gar nur mittels mehr grossflächiger Fenster realisieren (und beim Wechsel von klein- zu grossflächigen, siehe Fall 3b) und auch dies nur für mehr oder weniger unverschattete Lagen (Beschattungsfaktor>=0.9) und zu relativ hohen Grenzkosten (>= 0.6 CHF/m^2). Mehr kleine Fenster ergeben in Ost- oder Westlage entweder keine energetische Verbesserung oder Grenzkosten über 1 CHF/kWh$_{NE}$.

Tabelle 4.3-31 Grenzkosten (CHF/kWh$_{NE}$) der Vergrösserung der Fensterflächenanteile mittels **mehr grosser** Fenster bei Ost- und Westorientierung (Fallbeispiel Minergie-Wand, U-Wert$_{Wand}$=0.2 W/m^{2}K)

	Beschattung 0.9		Beschattung 0.7	
	Ost	West	Ost	West
Referenzfenster (Rahmen 1.5, Glas 1.1) g=0.65	1.16	0.79	Energiebilanz der Massnahme ist nicht positiv oder Kosten liegen über 1 CHF/kWh$_{NE}$	
Referenzfenster (Rahmen 1.5, Glas 1.1) g=0.57	5.29	1.67		
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.7) g=0.52	0.72	0.60		
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.42	0.79	0.68		
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.5	0.59	0.52		
Rahmen 0.8, Glas 1.1 g=0.57	1.93	1.30		
Rahmen 0.8, Glas 0.7 g=0.52	0.82	0.71		
Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.42	0.88	0.79		
Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.5	0.71	0.64		

Quelle Erhebungen, Auswertungen und Grenzkostenberechnungen: CEPE

Hinweis: Die Berechnungen in Tabelle 4.3-30 und Tabelle 4.3-31 gehen von nur marginal mehr Fenstern aus, d.h. der Effekt, dass bei mehr Fenstern der Faktor fg zurückgeht, wurde nicht berücksichtigt. Bei massiv mehr Fenstern wäre das zu berücksichtigen und die Grenzkosten würden etwas höher liegen.

Sensitivitätsrechnungen ergeben für die Südorientierung rund 5% bis 12% tiefere Grenzkosten, wenn die Fensterfläche in einer Wand in Referenzbauweise (U-Wert=0.28) statt in Minergiebauweise vergrössert wird. Grund: die Energiebilanz wird bei der Referenzwand stärker verbessert als die vermiedenen Wandkosten kleiner werden (minus 25 CHF/m^2). Bei der Passivhauswand sind die Grenzkosten ungefähr gleich, leicht höher oder leicht tiefer als gemäss Tabelle 4.3-30. Grund hier: Der Effekt, dass die Effizienzverbesserung durch grössere Fensterflächen kleiner ist als bei der Minergiewand hält sich die ungefähr die Waage mit dem Effekt, dass die vermiedenen Kosten der Passivhauswand wesentlich höher sind (plus 50 CHF/m^2). Bei der Ost- oder Westorientierung liegen die Grenzkosten rund 10% bis 20% tiefer als gemäss Tabelle 4.3-31, wenn die Fensterflächenvergrösserung an einer Wand gemäss heutiger Bauweise (U-Wert=0.28) vorgenommen wird. Für die Passivhauswand liegen die Kosten 5% bis 15% höher.

Fall 3b Wechsel zu grösserflächigen Fenstern

Bei einer Erhöhung der Fensterflächen im Verhältnis zur Fassadenfläche bietet sich die Möglichkeit, statt mehr Fenster grössere Fenster einzusetzen und damit den Kosten-degressionseffekt auszunützen. Damit

- fallen sowohl die hohen Kosten des kleinflächigen Fensters (ab 540 CHF/m^2) weg zugunsten der tiefen Kosten des grossflächigen Fensters (ab rund 425 CHF/m^2)
- kommt die bessere Energiebilanz des grossflächigen gegenüber dem kleinflächigen Fenster zum Tragen
- wird der Unterschied zwischen den spezifischen Kosten der Fenster zu denjenigen der Wand geringer (Wand: rund 250 CHF/m^2 bei 16 bis 20 cm Wärmedämmung)

Tabelle 4.3-32 Grenzkosten der Vergrösserung der Fensterflächenanteile bei gleichzeitigem Wechsel von kleinflächigen zu grossflächigen Fenstern, Südorientierung (Fallbeispiel Minergie-Wand, U-Wert$_{Wand}$=0.2 W/m2K), gemessen am kleinflächigen Fenster der jeweiligen Qualität

Süden	Beschattungssituation			
	0.9	0.7	0.5	0.3
Referenzfenster (Rahmen 1.5, Glas 1.1) g=0.65	0.07	0.09	0.15	1.17
Referenzfenster (Rahmen 1.5, Glas 1.1) g=0.57	0.07	0.10	0.18	
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.7) g=0.52	0.09	0.11	0.16	0.41
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.42	0.11	0.13	0.19	0.40
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.5	0.10	0.12	0.17	0.32
Rahmen 0.8, Glas 1.1 g=0.57	0.13	0.17	0.32	
Rahmen 0.8, Glas 0.7 g=0.52	0.15	0.18	0.26	0.65
Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.42	0.18	0.23	0.34	0.79
Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.5	0.17	0.21	0.29	0.59

Quelle Erhebungen, Auswertungen und Grenzkostenberechnungen: CEPE

Bei der Orientierung Süd sind die Grenzkosten der Vergrösserung der Fensteranteile (mehr Fenster und weniger Wand) bei geringer Beschattung (Beschattungsfaktor>0.7) sehr tief (Tabelle 4.3-32). Dies gilt, in etwas vermindertem Masse, auch für die Passivhausfenster was dadurch zu erklären ist, dass eine relativ starke Grössendegression der Kosten (von der Fensterfläche 1.7 m² auf 5 m²) zugrunde liegt. Ausserdem ist der Gesamtfenster-U-Wert der grösseren Fenster tiefer.

Bei höherer Beschattung steigen die Grenzkosten wegen der sich rasch verschlechternden Energiebilanz an und bei der grossen Verschattung von 70% (Beschattungsfaktor=0.3) ist kaum mehr eine energetische Verbesserung durch Fensterflächenvergrösserung möglich.

Auch bei Ost- und Westorientierung lässt sich ein Energieeffizienzgewinn durch Fenstervergrösserung realisieren, allerdings zu wesentlich höheren Grenzkosten und realistischerweise nur bei sehr geringer Verschattung (Beschattungsfaktor=0.9, siehe Tabelle 4.3-33).

Tabelle 4.3-33 Grenzkosten der Vergrösserung der Fensterflächenanteile bei gleichzeitigem Wechsel von kleinflächigen zu grossflächigen Fenstern, Ost- und Westorientierung (Fallbeispiel Minergie-Wand, U-Wert$_{Wand}$=0.2 W/m²K), gemessen am kleinflächigen Fenster der jeweiligen Qualität

	Beschattung 0.9		Beschattung 0.7	
	Ost	West	Ost	West
Referenzfenster (Rahmen 1.5, Glas 1.1) g=0.65	0.29	0.25	0.62	0.46
Referenzfenster (Rahmen 1.5, Glas 1.1) g=0.57	0.36	0.29	1.35	0.77
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.7) g=0.52	0.25	0.22	0.37	0.32
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.42	0.27	0.25	0.38	0.34
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.5	0.24	0.23	0.32	0.29
Rahmen 0.8, Glas 1.1 g=0.57	0.58	0.48	1.72	1.11
Rahmen 0.8, Glas 0.7 g=0.52	0.39	0.36	0.56	0.50
Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.42	0.47	0.43	0.66	0.59
Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.5	0.41	0.38	0.54	0.49

Quelle Erhebungen, Auswertungen und Grenzkostenberechnungen: CEPE

Sensitivität: Die Resultate für die Fälle der Fensterflächenvergrösserung bei einer Wand gemäss heutiger Bauweise (Tabelle C.3-1 und Tabelle C.3-2) bzw. bei einer Wand in Passivhausqualität (Tabelle C.3-3 und Tabelle C.3-4) sind sehr ähnlich, die Tabellen befinden sich im Anhang.

Fall 4 Erhöhung der Fensterflächen und gleichzeitige Verbesserung der energetischen Fensterqualität

Im diesem Fall 4 gelangt die Verbesserung der energetischen Fensterqualität, der Einsatz grösserflächiger Fenster (Fall 2) und die Vergrösserung der Fensterflächenanteile pro m² Fassade (Fall 3) kombiniert zur Anwendung. Die Berechnungsmethodik ist deshalb eine Kombination der beiden Fälle; auf eine Wiedergabe kann an dieser Stelle verzichtet werden.

Der Referenzfall besteht bei der Südorientierung aus 18m² kleinflächigen Fenstern der Referenzqualität (Rahmen 1.4 W/m²K bis 1.5 W/m²K, Glas 1.1 W/m²K) und 58 m² Wand. Die Grenzkostenberechnung basiert auf 40 m² grossflächigen Fenstern mit verbesserter Energieeffizienz (siehe Tabelle 4.3-34) und 36 m² Wand. In Richtung Ost und West beträgt die Fläche der kleinen Fenster 12 m² und für die Grenzkostenberechnung 30 m², bei jeweils gleicher totaler Brutto-Wandfläche wie in Richtung Süden, wobei es sich um eine Wand mit Minergiequalität handelt (U-Wert=0.2 W/m²K). Für die Berechnung wurde davon ausgegangen, dass die Massnahme gegen Süd sowie gegen Ost und West gleichzeitig durchgeführt werden. Würden sie einzeln ausgeführt, ergäben sich kleine Verschiebungen, jedoch ohne Einschränkung der Allgemeingültigkeit der Resultate. Dasselbe gilt auch für andere Wandqualitäten, siehe dazu die Sensitivitätsbetrachtungen im Fall 3.

Erwartungsgemäss liegen die Grenzkosten zwischen den Fällen 2 und 3 (vgl. z.B. Tabelle 4.3-34 mit Tabelle 4.3-30 und Tabelle 4.3-29 für die Südorientierung).

Tabelle 4.3-34 Grenzkosten (CHF/m²) der Fensterqualitätsverbesserung bei gleichzeitiger Vergrösserung der Fensterflächenanteile und Wechsel von kleinflächigen zu grossflächigen Fenstern, Südorientierung (Fallbeispiel Minergie-Wand, U-Wert$_{Wand}$=0.2 W/m²K), **gemessen am kleinflächigen (1.7 m²) Referenzfenster**

Süden	Beschattungssituation			
	0.9	0.7	0.5	0.3
Referenzfenster (Rahmen 1.5, Glas 1.1) g=0.57	0.07	0.10	0.18	NA
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.7) g=0.52	0.11	0.13	0.18	0.34
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.42	0.16	0.19	0.24	0.37
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.5	0.14	0.16	0.20	0.31
Rahmen 0.8, Glas 1.1 g=0.57	0.18	0.23	0.37	1.52
Rahmen 0.8, Glas 0.7 g=0.52	0.22	0.25	0.32	0.52
Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.42	0.28	0.32	0.39	0.54
Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.5	0.24	0.27	0.33	0.46

Quelle Erhebungen, Auswertungen und Grenzkostenberechnungen: CEPE

Durch die Ausnützung des Grössenskaleneffekts und die verbesserte Energiebilanz der Fenster gegenüber der Wand können insbesondere in nicht oder wenig verschatteter Südlage tiefe Grenzkosten erreicht werden. In Übereinstimmung mit den Resultaten von Fall 3 steigen die Grenzkosten der Fensterflächenvergrösserung/Fensterverbesserung bei zunehmender Verschattung, **dies im Gegensatz zu Fall 1** (nur Verbesserung der energetischen Fensterqualität, siehe Tabelle 4.3-26 und Tabelle 4.3-27).

Tabelle 4.3-35 Grenzkosten (CHF/m²) der Fensterqualitätsverbesserung bei gleichzeitiger Vergrösserung der Fensterflächenanteile und Wechsel von kleinflächigen zu grossflächigen Fenstern, Ost- und Westorientierung (Fallbeispiel Minergie-Wand, U-Wert$_{Wand}$=0.2 W/m²K), **gemessen am kleinflächigen (1.7 m²) Referenzfenster**

	Beschattung 0.9		Beschattung 0.7		Beschattung 0.5	
	Ost	West	Ost	West	Ost	West
Referenzfenster (Rahmen 1.5, Glas 1.1) g=0.57	0.36	0.29	NA	0.77	NA	NA
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.7) g=0.52	0.25	0.23	0.33	0.30	0.55	0.50
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.42	0.31	0.29	0.37	0.35	0.51	0.48
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.5	0.27	0.25	0.32	0.30	0.42	0.40
Rahmen 0.8, Glas 1.1 g=0.57	0.57	0.50	1.02	0.84	NA	NA
Rahmen 0.8, Glas 0.7 g=0.52	0.41	0.39	0.51	0.47	0.71	0.66
Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.42	0.47	0.45	0.54	0.52	0.67	0.65
Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.5	0.41	0.39	0.46	0.44	0.57	0.55

Quelle Erhebungen, Auswertungen und Grenzkostenberechnungen: CEPE

Die Grenzkosten steigen im hier vorliegenden Fall 4 wie im Fall 3 bei der Ost- und Westorientierungen gegenüber der Südorientierung und bei zunehmender Verschattung an

(Tabelle 4.3-35). Bei der Verschattung 70% und mehr (Beschattungsfaktor<=0.3) liegen sie durchwegs über 0.8 CHF/kWh_{NE}, weshalb sie hier nicht mehr tabellarisch dargestellt werden.

Bei der Interpretation der Resultate dieses Falls 4 ist im Auge zu behalten, dass dabei eine Vergrösserung der Fläche pro Fenster von 1.7 m^2 auf 5 m^2 zugrunde liegt, eine Möglichkeit, die in der Realität bestimmt nicht für die gesamte Fensterfläche eines Neubaus angewendet werden kann. Bei kleineren Flächen, z.B. 3 m^2 bis 4 m^2 pro Fenster, liegen die Kosten entsprechend etwas höher.

Fall 5 Verlagerung der Fensterflächen gegen Süden bzw. gegen Ost/West

Sofern es architektonisch und aus Sicht der Bewohnbarkeit möglich ist, zahlt sich eine Verlagerung der Fensterflächen gegen Süden (von Ost/West/Nord) bzw. gegen Ost/West (von Nord) bei gleicher Fensterqualität und gleicher Verschattung immer aus. Denn diese Massnahme ist für den Neubau kostenlos (allenfalls Planungskosten) und bringt eine energetische Verbesserung. Grenzen sind der Massnahme aus architektonischen Gründen (Ästhetik), aus den Bedürfnissen nach Tageslicht in einzelnen Räumen und aus Gründen der Überhitzung von einzelnen Räumen gesetzt. Bei „normaler" Zweifachwärmeschutzverglasung sollten die Anteile pro Fassade ausserdem aus Komfortgründen nicht zu dominant ausfallen (kalte Strahlung, Kaltluftströme).

g) Zusammenfassung und Fazit

Nebst der Höhe der Grenzkosten stellt sich auch die Frage, wieviel der Energiebedarf mit den entsprechenden Massnahmen reduziert werden kann. Dies ist in den folgenden drei Abbildungen für die Orientierungen Süd, West und Nord graphisch dargestellt am Beispiel der Verschattung von 30% (Beschattungsfaktor=0.7). Bei der Interpretation der Graphiken ist zu beachten: Der Energieeffizienzgewinn und auch die Grenzkosten gelten für die getroffenen Annahmen (siehe oben im Text). Die Ergebnisse dürfen nicht linear auf andere Situationen (insbesondere andere Verhältnisse von Wärmegewinn zu Verlust) übertragen werden. Dennoch erlauben die Darstellungen, diejenigen Bereiche zu identifizieren, wo durch die Wahl der Fensterqualität und/oder durch architektonische Massnahmen sowohl ein hoher Effizienzgewinn als auch relativ tiefe Kosten resultieren.

Folgende Fazits können aus der Grenzkostenbetrachtung gezogen werden, wovon einige davon überraschen mögen, aber nachvollzieh- und erklärbar sind.

1) Wahl der Fensterqualität

- Die **Grenzkosten einer Fensterqualitätsverbesserung sind desto tiefer, je höher die Verschattung** ist, z.B. bei vorgegebener Situation im Gebäudebestand. Es lohnt sich also eher, bei verschatteten Lagen in verbesserte Fenster zu investieren als bei unverschatteten.
- Dasselbe gilt aus analogem Grund auch für die Orientierung: je weniger die Fenster gegen Süden und je mehr gegen West und Ost und insbesondere **gegen Norden** orientiert sind, **desto tiefer** sind die Grenzkosten einer Fensterqualitätsverbesserung. Bei den Fenstern, die in Richtung West/Ost und insbesondere Nord gegeben sind (z.B. im Gebäudebestand oder durch die Minimalanforderung oder den individuellen Bedarf), kann also eine relativ **kosteneffiziente Energiebedarfsminderung** erreicht werden.
- Relativ hoch jedoch sind die Grenzkosten der Verbesserung der Glas-U-Werte und der Rahmen-U-Werte (heute noch) gegen Süden, besonders bei geringer Verschattung.
- Das Dreifach-IV-Fenster mit Glas-U-Wert 0.7 ist aufgrund seines relativ tiefen U-Wertes und seines hohen g-Wertes relativ grenzkosteneffizient. Das Dreifach-IV-Fenster mit Glas-

U-Wert 0.5 und seinem relativ tiefen g-Wert von 0.42 weist vielfach vergleichsweise hohe Grenzkosten aus, besonders gegen Süden, aber auch gegen West/Ost. Aus energetischer (winterlicher) Sicht ist deshalb auf einen hohen g-Wert zu achten.

- Nicht bei jeder Orientierung bzw. Verschattungssituation bringen die gleiche Massnahmen die grösste Energieeffizienz bzw. die tiefsten Grenzkosten. So weist das Passivhausfenster zwar meistens, aber nicht in jedem Fall die grösste Energieeffizienz auf, hat aber umgekehrt auch nicht in jedem Fall die höchsten Kosten.

2) Architektonische Möglichkeiten

- Die Wahl von grossflächigen statt kleinflächigen Fenstern ermöglicht Grenzkosten, die im Negativen liegen oder unter dem heutigen Energiepreis, dies bei gleichzeitig hoher Energieeffizienz. Wenn immer möglich, sollten also grossflächige statt kleinflächige Fenster gewählt werden. Ist dieses Potential ausgeschöpft (die gesamte im Referenzfall konzipierte Fensterfläche wird in Form von grossflächigen Fenstern realisiert), gibt es weitere Effizienzmöglichkeiten:
- Eine Erhöhung der Anteile der Fensterfläche an der Fassadenfläche ist gegen Süden attraktiv, besonders wenn grosse Fenster hinzugefügt werden und noch verstärkt, wenn gleichzeitig grosse Fenster anstelle von kleinen gewählt werden. Die Kosten sind dann für einige Fenstertypen tiefer oder mindestens im Bereich der Wärmekosten, selbst wenn die heutigen tiefen Energiepreise zugrunde gelegt werden.
- Eine Erhöhung der Fensterflächen gegen stark verschattete Südlagen, gegen teilverschattete Ost- und Westlagen oder generell gegen Nordlagen bringt entweder keinen Effizienzgewinn oder die Grenzkosten liegen relativ hoch.
- Bei wenig verschatteten Ost- und Westlagen kann eine Erhöhung der Fensterflächenanteile pro Fassadenfläche durchaus in Betracht gezogen werden, vor allem, wenn grosse statt kleine Fenster eingesetzt werden.

3) Methodisch

Die Grenzkostenbetrachtung im Neubau ist „ziemlich mehrdimensional". Es gibt nicht nur eine architektonische Strategie, energieeffizient mit möglichst geringen Kosten zu bauen. **Nicht** im Widerspruch zueinander stehen insbesondere die beiden Strategien

- Maximale Reduktion des Heizwärmebedarfs **(Minergie-P / Passivhaus)** durch die sehr hohe Reduktion der Transmissionsverluste
- Markante, aber nicht ganz so weitgehende Reduktion der Transmissionsverluste bei gleichzeitiger Erhöhung der Gewinne durch zusätzliche Fensterflächen gegen Süden **(Direktgewinnsolarhaus)**

Anhand der gezeigten Resultate und anhand der dargestellten Inputwerte (Kosten für Fenster unterschiedlicher Qualität und Grösse) ist es für den Planer oder die Bauträgerschaften jedoch möglich, die Fensterqualität kosten-/energieeffizient zu wählen und ebenso zu planen. Einige der Energiebedarfsnachweisprogramme lassen sich mit externen Datenquellen verknüpfen. So kann relativ einfach die Konsequenz der Fensterwahl und der Architektur auf die gesamten Mehrkosten und den gesamten Heizwärmebedarf sichtbar gemacht werden.

Interpretationshinweis: In Abbildung 4.3-37 und Abbildung 4.3-38 sind für die Fälle 3a und 3b nur die mit einem Kreis bezeichneten Punkte für das Grenzkostenprojekt relevant; die übrigen dienen den Architekten und Planerinnen zur Information, wie die Grenzkosten und die Energieeffizienz der Erhöhung der Fensterflächenanteile liegen, wenn die Fensterqualität bereits entschieden ist (siehe auch die entsprechenden Ausführungen zum Fall 3 im Text).

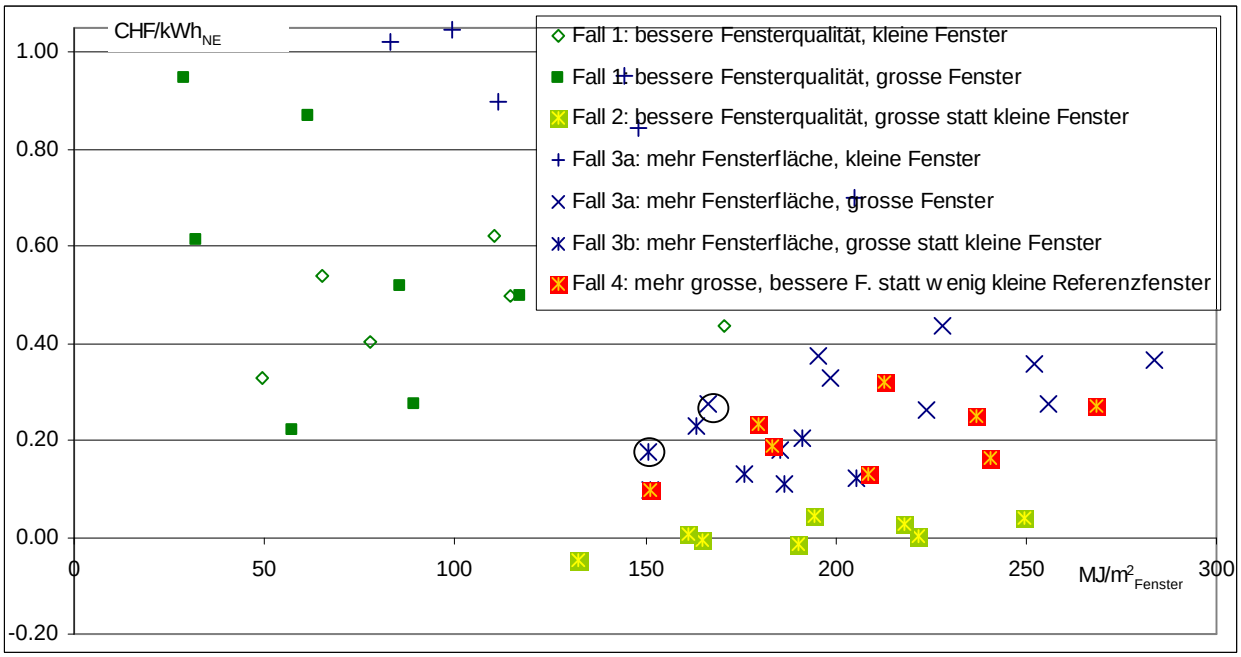


Abbildung 4.3-37 Grenzkosten in Funktion des Energieeffizienzgewinns pro m² Fensterfläche (**Südlage**, Beschattungsfaktor 0.7)

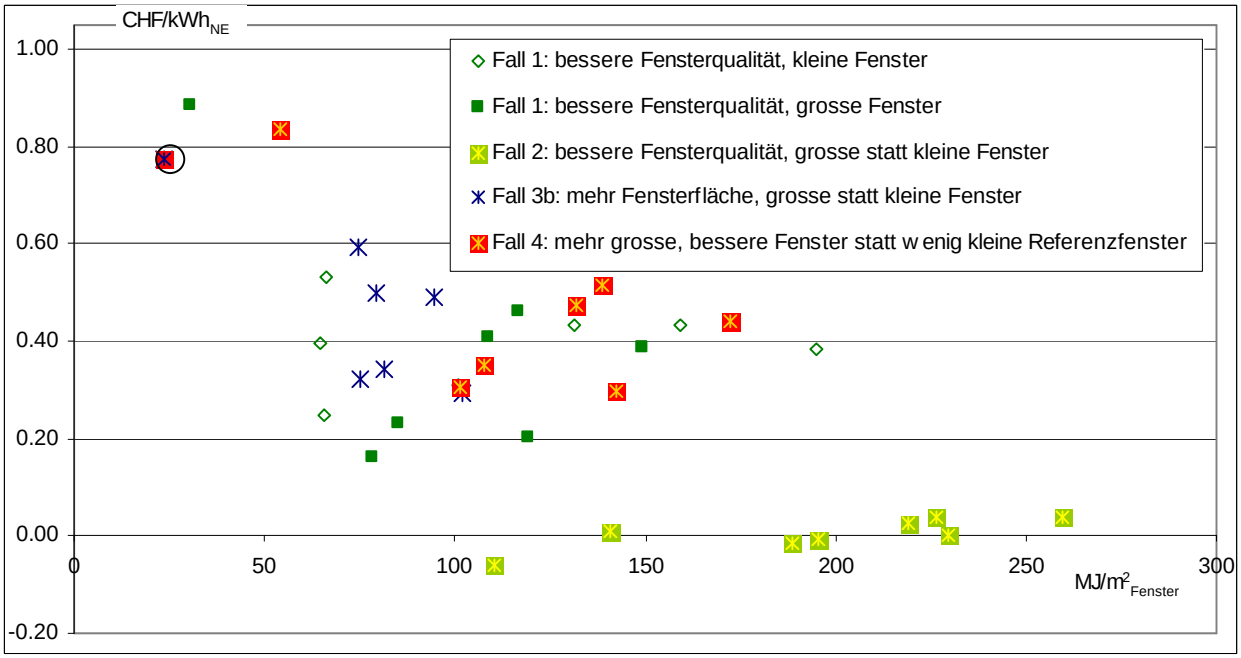


Abbildung 4.3-38 Grenzkosten in Funktion des Energieeffizienzgewinns pro m² Fensterfläche (**Westlage**, Beschattungsfaktor 0.7)

Bei der Nordorientierung ergibt sich durch eine Vergrösserung der Fensterflächenanteile keine Effizienzverbesserung, weshalb diese Massnahme in (Abbildung 4.3-39) fehlt.

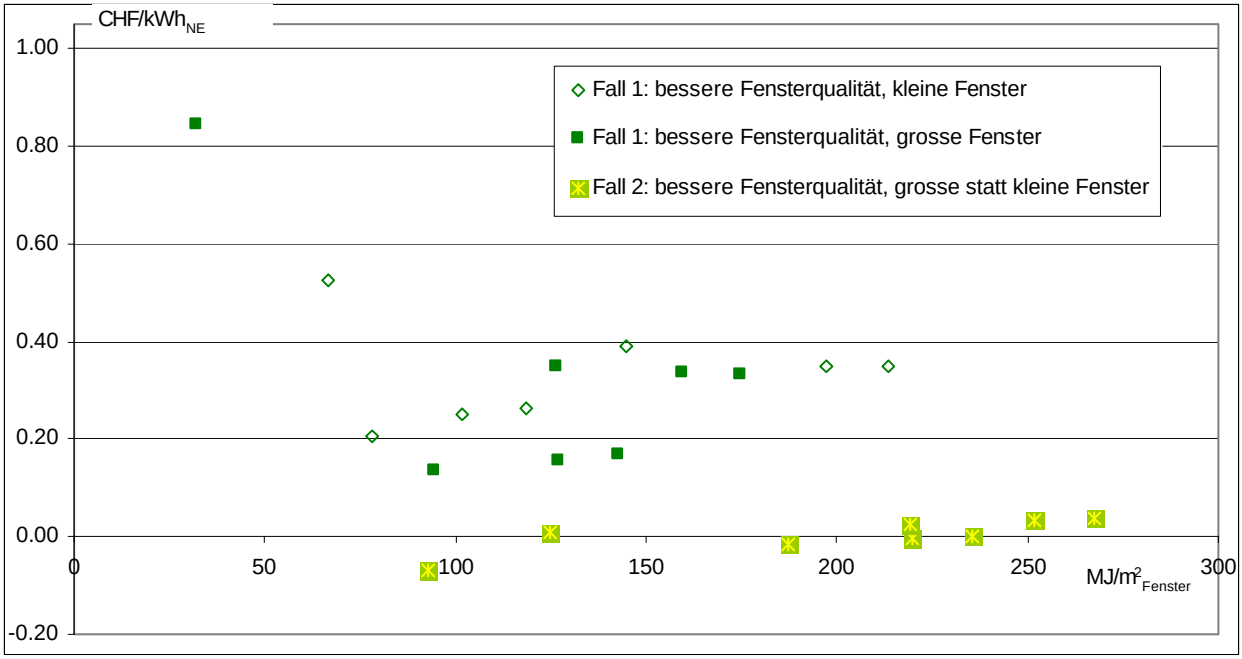


Abbildung 4.3-39 Grenzkosten in Funktion des Energieeffizienzgewinns pro m² Fensterfläche (Nordlage, Beschattungsfaktor 0.7)

h) Fenstererneuerung im Gebäudebestand

Bzgl. der Grenzkosten der Fenstererneuerung im Gebäudebestand sind zwei Fälle zu unterscheiden:

- Statt einer ohnehin erfolgenden Fenstererneuerung mit einem Fenster gemäss heutigem Standard (Glas-U-Wert 1.1 W/m2K, Holzrahmen U-Wert rund 1.4 W/m²K bis 1.5 W/m²K, KS 1.5 W/m²K bis 1.6 W/m²K) wird ein Fenster mit besserer energetischer Qualität eingesetzt. Die Grenzkosten sind dann gleich denjenigen dem Neubau gemäss Fall 1 (siehe 154). Die Grenzkosten sind gleich, weil sich die zusätzlichen Kosten- und Energieeffizienzelemente im Grenzkostenansatz „herauskürzen"; die Kosten für Abbruch und Entsorgung der alten Fenster würden im Referenzfall ebenfalls anfallen und der energetische Effizienzgewinn für tiefere Lüftungsverluste (Undichtheiten) treten im Referenzfall ebenfalls auf
- Vorzeitiger Fensterersatz: Anfallende Kosten: Restwert des bestehenden Fensters. Dieser entspricht dem Fehlbetrag, der dadurch dem Erneuerungsfonds entsteht (falls ein solcher vorhanden ist). Die jährlichen Einzahlungen in einen solchen Fonds entsprechen der Abschreibung und Verzinsung des alten Fensters („reaktiver" Zahlungsstrom) oder sie sind gleich der Abschreibung und Verzinsung eines neuen Fensters inkl. Abbruch/Entsorgung des alten Fensters („proaktive Fondbewirtschaftung"). Die Beträge sind in etwa gleich, denn die Preise der Fenster sind in den letzten Jahren in etwa gleich geblieben (siehe Kap. 4.5) und damit auch Kosten für den Gebäudebesitzer. Energetischer Effizienzgewinn (während der Dauer zwischen vorzeitigem Ersatz und ohnehin notwendigem Ersatz): Verbesserte Energiebilanz des Fenster sowohl bzgl. Wärmeschutz bzw. auch bzgl. Lüftungsverluste. Je nach Situation (Orientierung und Verschattung) und je nach erreichter Verbesserung der Lüftungsverluste betragen die Grenzkosten beim vorzeitigen Ersatz von EV-Fenster durch ein heutiges Standardfenster 14 bis 19 Rp/kWh$_{NE}$ und beim DV-Fenster 30 bis 40 Rp/kWh$_{NE}$. Werden die alten Fenster vorzeitig durch ein dreifach-WS-Fenster ersetzt, betragen die Grenzkosten 16 bis 20 Rp/kWh$_{NE}$ beim EV und knapp 30 bis 37 Rp/kWh$_{NE}$ beim DV-Fenster. Anzumerken ist an dieser Stelle dreierlei: 1) Nicht berücksichtigt sind die Wertvermehrung

und die Co-Benefits, die gerade im Fall des vorzeitigen Fensterersatzes von grosser Bedeutung sein können, denn die zu erreichende Verbesserung bzgl. Wärmeschutz, erhöhte Fensterscheiben-Oberflächentemperaturen, verminderte Zugserscheinungen und die Verbesserung der Lärmsituation können markant sein. 2) Der Energieeffizienzgewinn und die Grenzkosten fallen nur während der Periode der Vorzeitigkeit an (nachher würden die Fenster ohnehin ersetzt). 3) Ein vorzeitiger Fensterersatz sollte fachgerecht erfolgen (am besten gleichzeitig mit einer energetischen Fassadenerneuerung), um bauphysikalischen Risiken zu begegnen.

- Weitere Fälle der energetischen Verbesserung durch Renovationen, bei denen am Fenster punktuelle Massnahmen ergriffen werden, hat Eicher + Pauli untersucht (Erb, 2001). Die Jahreskosten aller Massnahmen sind ähnlich hoch, weshalb an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen wird.

Die übrigen Fälle für den Neubau behandelten Fälle in den vorangehenden Kapiteln (Fall 2 bis Fall 5) wie die Vergrösserung der Fensterflächen haben aus Sicht der Grenzkosten kaum eine Bedeutung, denn die Kosten wären im Vergleich zum Neubau markant höher. Nicht nur können keine Kosten für „vermiedene" Wandflächen in Abzug gebracht werden, sondern es kommen im Gegenteil Kosten für den Abbruch der Wand bzw. für die Vergrösserung der bestehenden Fensteröffnung hinzu. Wenn in der Praxis trotzdem (selten) auch im Gebäudebestand Fenster vergrössert, so geschieht das in den Fällen mit ungenügenden Lichtverhältnissen und/oder aus dem modernen Bedürfnis nach lichtdurchfluteten Wohnungen heraus.

4.3.8 Dach

Im Dachbereich gibt es sowohl beim Neubau wie auch bei der Erneuerung von Gebäuden eine Vielfalt von Bauweisen, Ausgangslagen und Erneuerungsvarianten. Beim Neubau wie bei der Dacherneuerung des Gebäudebestands ist grundsätzlich zwischen Flachdach, Steildach mit Wärmedämmung und Steildach mit Estrichboden- bzw. Deckendämmung zu unterscheiden. Bei jeder dieser grundsätzlichen Bauweisen gibt es eine oder mehrere technische Varianten der Wärmedämmung. Diese unterscheiden sich teilweise bei Neubau und Erneuerung, je nach Ausgangslage im Dachbereich.

a) Methodik der Kostenermittlung im Dachbereich

Für die Ermittlung der Kosten weitergehender Wärmedämmassnahmen im Dachbereich konnte der SVDW (Schweizerischer Verband für Dach und Wand) für eine Zusammenarbeit gewonnen werden. Zunächst wurde eine Typisierung vorgenommen und die wichtigsten zu untersuchenden Fälle festgelegt. Kriterien waren die Relevanz (erwartete Häufigkeit) und zu erwartende Kostenunterschiede, insbesondere bzgl. der Unterschiede zwischen unterschiedlichen Dämmstärken.

Für die in Tabelle 4.3-36 dargestellten Fälle wurde bei den SVDW-Mitgliedfirmen die Kosten des Dachneubaus bzw. der Dacherneuerung für verschiedene Dämmstärken erhoben. Damit die Belastung der Unternehmen in vertretbarem Rahmen gehalten werden konnte, wurden pro Unternehmen die Kosten für nur jeweils einen grundsätzlichen Fall erhoben, jedoch für rund vier Wärmedämmstufen, denn die Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Dämmstärken steht im Focus des Grenzkostenprojekts.

Tabelle 4.3-36 Preiserhebungsbögen zuhanden der Unternehmen, total 9 verschiedene Preis-Erhebungsbögen, pro Unternehmen nur 1 Preis-Erhebungsbogen

	Nr	Referenzerneuerung	Weitergehende Erneuerung
Neubau Steildach	1	Dämmung auf den Sparren	Dämmung zwischen und auf den Sparren
	2	Dämmung zwischen den Sparren	Dämmung zwischen und unter den Sparren
	3	Dämmung des Dachbodens	
Neubau Flachdach	4	Flachdach, 2 Fälle: mit Gefällsüberzug oder Gefällswärmeplatten	
Erneuerung Steildach	5	Erneuern der Dachwohnung bzw. Dämmen von innen. 2 Fälle: bereits ausgebauter Dachraum und Dachraumausbau	Dämmung zwischen und unter den Sparren, ausgeführt von innen
	6	Dach reparieren / erneuern	Dämmung zwischen und auf den Sparren, von aussen. 2 Fälle : Bereits ausgebauter Dachraum und Dachraumausbau
	7	Estrichboden dämmen, 2 Fälle: selbsttragende Platten oder mit Unterkonstruktion	
Erneuerung Flachdach	8	Lokale Reparatur der Abdichtung	Abbrechen der bestehenden Abdichtung und neue Wärmedämmung
	9	Wärmedämmung über bestehende Flachdachabdichtung	

Wie im Fassadenbereich ist auch im Dachbereich grundsätzlich zwischen flächen- und längenbasierten Kosten- bzw. Preiselementen zu unterscheiden. Miteinzubeziehen sind nebst der eigentlichen Wärmedämmung und deren Verarbeitung insbesondere die übrigen Kostenelemente, welche von der Dämmstärke abhängen. Bei der Flachdacherneuerung ist dies zum Beispiel die Erhöhung der Brüstung, die zusätzliche Schutzblechabwicklung u.a.; beim Steildach die Lattungen mit höheren Querschnitten oder die längeren Distanzschrauben sowie zusätzliche Verlegeunterlagen beim Wechsel der Dämmvariante von z.B. „auf den Sparren" zu „auf und zwischen den Sparren". Auf die einzelnen Elemente wird in den nachfolgenden Unterkapiteln bei der Darstellung der Kosten eingegangen.

Nebst den Preiselementen wurden die Unternehmen auch zu Häufigkeiten verschiedener Ausführungsvarianten und deren typischen Dämmstärken befragt, dies, um für den Grenzkostenansatz die Preisinformationen gewichten zu können und einen energetisch- und bautechnischen Referenzpunkt zu erhalten. Die Ergebnisse dieses Befragungsteils sind im Kapitel 3 dokumentiert und dienen in den folgenden Unterkapiteln als Grundlage für die Grenzkostenbetrachtung.

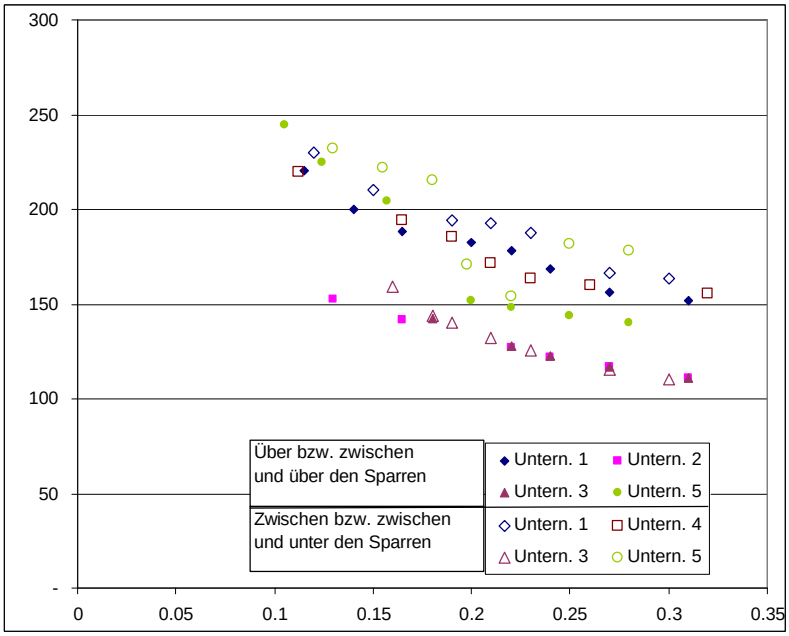
b) Neubau, Steildachdämmung

Die Kosten der Tragkonstruktion sind in den Preisen nicht enthalten, da sie unabhängig von der Dämmstärke sind. Das zusätzliche Gewicht des Dämmmaterials bei erhöhten Dämmstärken hat keine Relevanz für die Dimensionierung der Tragkonstruktion. Ebenfalls nicht enthalten sind die Kosten der Ziegellattung und der Eindeckung, da diese ebenfalls unabhängig von der Dämmstärke sind (enthalten ist jedoch die Konterlattung).

Enthalten sind neben den Kosten für das Dämmaterial insbesondere Zusatzkosten für Lattungen mit erhöhten Querschnitten bzw. für zusätzliche Lattungen falls solche für höhere Dämmstärken notwendig werden. Die Mehrkosten bei zunehmenden Dämmstärken werden denn auch vor allem verursacht durch den zusätzlichen Dämmstoff, die zusätzliche Lattung (z.B. wenn nicht nur zwischen, sondern zusätzlich unter den Sparren gedämmt wird), Lattungen mit erhöhten Querschnitten, zweilagiges Verarbeiten der Dämmung, zusätzliche Verlegeunterlage sowie längere Distanzschrauben (Doppelgewindeschrauben) oder Konsolen (z.B. bei „Flumserdach" oder Isover Luro-Tafixe).

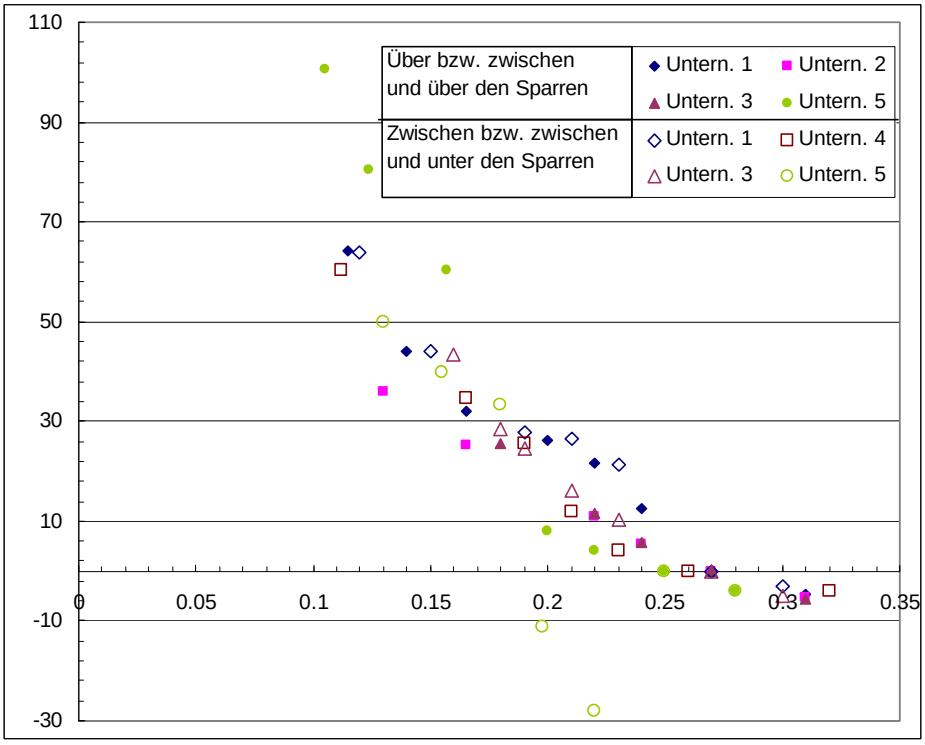
Der Sprung der Dämmung von „zwischen" nach „zwischen und unter" ist bei rund 16 cm bis 18 cm zu verzeichnen (Sparrenhöhe plus evtl. Lattung), der Sprung von „nur auf" den Sparren zu „auf und zwischen" den Sparren bei rund 18 cm bis 24 cm, da ansonsten die aufgebaute Konstruktionshöhe zu mächtig wird (vgl. Abbildung 4.2-9 und 4.2-10). Nimmt man einen U-Wert von 0.7 W/m² K als Referenzwert an, so errechnen sich die in Tabelle 4.2-10 aufgeführten Grenzkosten bei Zusatzinvestitionskosten von ca. 6.- CHF/m (für U = 24) bis 70.- CHF/m² (für U = 0,11).

Das absolute Kostenniveau unterscheidet sich zwischen den beiden grundsätzlichen Varianten (zum einen über bzw. zwischen und über den Sparren und zum andern zwischen und zwischen und unter den Sparren) nicht systematisch. Es ist jedoch eine Streuung des Kostenniveaus von plus minus rund 25% festzustellen, die jedoch als Funktion der Dämmstärke nicht wesentlich zunimmt. Diese Streuung rührt u.a. auch von der Materialwahl beim Unterdach oder der Dachschalung her und ist nicht direkt relevant für die Grenzkostenbetrachtung.



Quelle CEPE-Umfrage bei SVDW-Mitglied Unternehmen

Abbildung 4.2-9: Preise (CHF/m²) von Dachneubauten in Funktion des U-Wertes (W/m²K) der Dachkonstruktion



Quelle CEPE-Umfrage bei SVDW-Mitgliedunternehmen

Abbildung 4.2-10: Mehrpreise (CHF/m²) von Dachneubauten gegenüber der Referenzbauweise in Funktion des U-Wertes (W/m²K) der Dachkonstruktion

In einigen Fällen sind bei zunehmenden Dämmstärken Minderkosten zu verzeichnen. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn bei geringen Dämmstärken (z.B. 10 cm oder 12 cm), die kleiner als die Sparrenhöhe sind, eine zusätzliche Befestigung oder eine Schalung vorgesehen werden muss, für die erhöhten Dämmstärke jedoch nicht, da in diesem Fall die zusätzliche Befestigung bzw. Schalung nicht notwendig ist.

Tabelle 4.2-10: Brutto-Grenzkostenberechnung (Durchschnittskostenansatz gg. Referenz) für Dachwärmedämmungen bei Neubauten, EFH: 3.5%, MFH 5.5% real, 50 Jahre, Referenz: 0.27 W/m²K

U-Wert	Mehr-investitions-kosten CHF/m²		EFH dr=3.5% a=0.043 Kapitalmehrkosten CHF/m²$_{Dach}$.a		MFH dr=5.5% a=0.059		Wärme-transmissions-verlust kWh/m²a		Grenzkosten gg. Referenz (Durchschnittskostenansatz) EFH CHF/kWh		MFH CHF/kWh	
W/m²K	von	bis	von	bis	von	bis	Absolut	Reduktion	von	bis	von	bis
0.27	0						23					
0.24	5	7	0.2	0.3	0.3	0.4	21	2.6	0.08	0.11	0.11	0.16
0.21	14	18	0.6	0.8	0.8	1.1	18	5.2	0.11	0.15	0.16	0.20
0.18	26	32	1.1	1.4	1.5	1.9	16	7.8	0.14	0.17	0.20	0.24
0.15	39	48	1.7	2.0	2.3	2.8	13	10	0.16	0.20	0.22	0.27
0.13	50	60	2.1	2.6	3.0	3.5	11	12	0.18	0.21	0.24	0.29
0.11	64	75	2.7	3.2	3.8	4.4	10	14	0.20	0.23	0.27	0.32

Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

c) Erneuerung bei Gebäuden mit Steildächern

Die Tabelle 4.3-37 zeigt eine Übersicht über die möglichen Erneuerungsvarianten im Steildachbereich sowie die dazu definierten Referenzerneuerungen, an denen die Mehrkosten im Grenzkostenansatz gemessen werden.

Tabelle 4.3-37 Übersicht über die Erneuerungsvarianten im Steildachbereich

Anwendungsfall	Erneuerungsvariante	Referenzerneuerung 1	Referenzerneuerung 2
Dachraum bereits ausgebaut	Dämmung von oben (inkl. neues Unterdach)	Ersatz Unterdach plus Eindeckung	14 cm WD, Abbruch evtl. bestehender WD
Dachraumausbau	Dämmung von oben (inkl. neues Unterdach)	14 cm WD	
Dachraumausbau	Dämmung von unten	14 cm WD	
Keine Dachraumnutzung	Dämmung Estrichboden	Keine WD	12 cm WD

Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

Bei der Definition der Referenzfälle im Dachbereich muss zwischen folgenden Ausgangslagen unterschieden werden.

- Ist der **Dachraum bereits ausgebaut**, steht eine Wärmedämmung von oben im Vordergrund (eine Wärmedämmung von innen bzw. von unten ist in diesen Fällen sehr selten). Zwei Referenzfälle sind zu unterscheiden:
  1. Der Auslöser für die Dacherneuerung ist ein zu erneuerndes Unterdach und/oder eine zu erneuernde Eindeckung; bzgl. Wärmedämmung werden keine Änderungen vorgenommen und
  2. Die Erneuerung des Unterdachs bzw. der Eindeckung wird zum Anlass genommen, eine Wärmedämmung (von ca. 14cm im Referenzfall) anzubringen, wobei eine evtl. bereits bestehende Wärmedämmung abgebrochen wird.
- Bei der Ausgangslage des **Dachraumausbaus** gibt es für zwei bautechnische Erneuerungsvarianten (Wärmedämmung von unten bzw. von oben) je nur einen Referenzfall: 14 cm Wärmedämmung
- Wird der **Dachraum nicht genutzt** und kann oder soll er auch später nicht genutzt werden, ist der Referenzfall die Dämmung des Estrichbodens und zwar mit rund 12 cm.

Es sind also die Kosten der folgenden Erneuerungsvarianten, welche dann als Basis für die Grenzkostenbetrachtung dienen, zu untersuchen:

- Steildacherneuerung mit Wärmedämmung von oben
- Steildacherneuerung mit Wärmedämmung von unten
- Dämmung des Estrichbodens

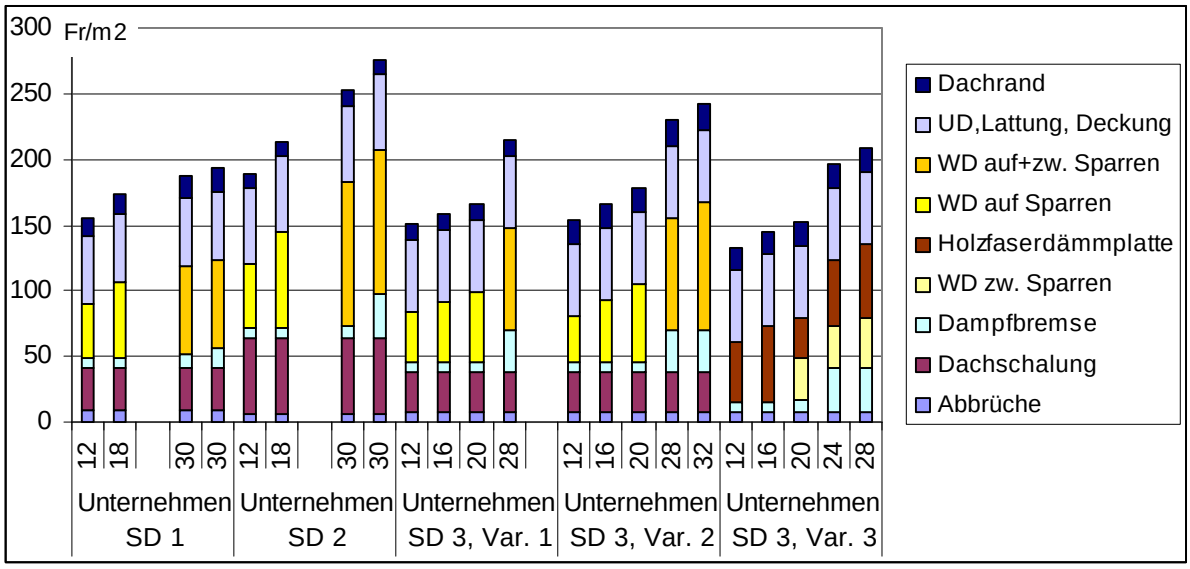
Als weiterer möglicher Fall ist der Ersatz des gesamten Dachaufbaus zu nennen, dies wenn die Tragstruktur sehr erneuerungsbedürftig ist (durch Feuchtigkeit oder Holzwurmbefall) oder wenn das Dachraumvolumen vergrössert werden soll. Die Grenzkosten sind in diesem Fall gleich denjenigen beim Neubau und werden deshalb im folgenden nicht explizit erfasst.

d) Steildacherneuerung von oben

Eine Steildacherneuerung von oben bietet die beste Möglichkeit, eine Wärmedämmung wirkungsvoll und inklusive einer fachgerechten Lösung der Konstruktionsdetails und Bauanschlüsse anzubringen. Die einfachste Variante ist das Anbringen einer Dachschalung sowie das Wärmedämmen auf den Sparren. Dies gilt sowohl für den Fall, in dem schon eine Dachwohnung besteht, als auch wenn der Dachraum zu Wohnzwecken ausgebaut werden soll. Dazu werden eine Verlegeunterlage und eine Dampfbremse auf die Sparren montiert. Ab einer Dämmstärke von ca. 20 cm wird üblicherweise sowohl auf wie auch zwischen den Sparren gedämmt. Als Verlegeunterlage für die Zwischensparrendämmung dient in einen Fall die bestehende Innenraumbekleidung und im anderen Fall die neu zu erstellende Innenraumbekleidung; in beiden Fällen wird wie bei der Dämmung „nur auf den Sparren" eine Verlegeunterlage auf die Sparren montiert. Die Kosten für nicht sichtbare Dachschalungen betragen rund 25 CHF/m² bis 30 CHF/m². Die Mehrkosten für sichtbare Dachschalungen werden dem Grenzkostenansatz gemäss dem neuen Dachraum zugeordnet. Die Dampfsperre wird im Fall des Dachraumausbaus unter die Sparren montiert, muss hingegen im Fall der schon bestehenden Dachwohnungen zwischen die Sparren verlegt werden, was mit signifikantem Mehraufwand verbunden ist (über 30 CHF/m² statt rund 10 CHF/m²).

Als Verlegeunterlage oder gar als Substitut kann auch eine Holzfaserplatte (z.B. Pavatherm) verwendet werden, welche ebenfalls wärmedämmend ist. Damit können die Kosten der Verlegeunterlage eingespart werden. Der Lambda-Wert dieser Faserplatten liegt bei

0.045 W/mK und ist damit wesentlich tiefer als bei Holz (0.14 W/mK), aber rund 30% höher als bei mineralischen Dämmstoffen (0.035 W/mK). Deshalb verursacht eine bestimmte Dämmwirkung im Vergleich zu mineralischen Dämmstoffen einen erhöhten Aufbau, so dass dem alleinigen Einsatz solcher Platten aus architektonischen und konstruktiven Gründen gewisse Grenzen gesetzt sind. Sie sind jedoch in Kombination mit einer konventionell verlegten WD mit (Kreuz-)lattung durchaus interessant. Bei der Abbildung 4.3-40 ist auf die Dämmstärken der Rubriken zu achten: Bei der Variante 3 des Unternehmens 3 ist zu beachten, dass die Dämmwirkung bei vergleichbarer Dämmstärke geringer ist, siehe dazu die Bemerkungen weiter oben.



Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

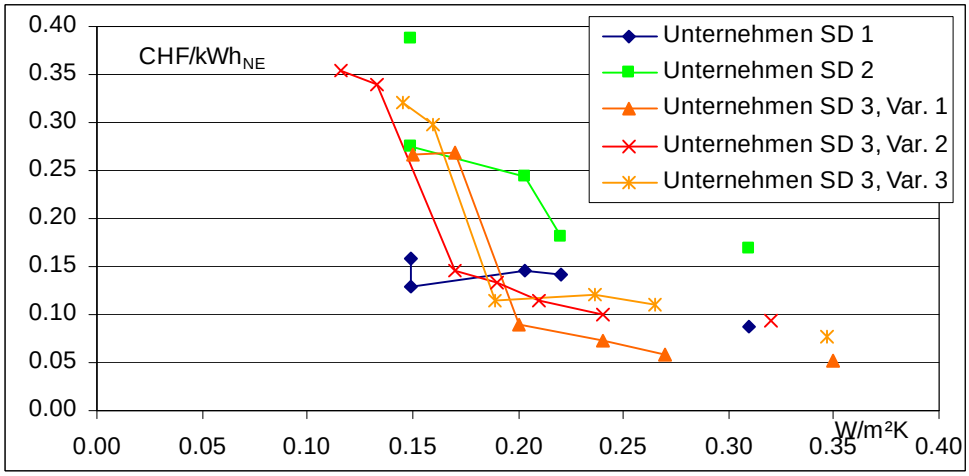
Abbildung 4.3-40 Kostenstruktur von Dacherneuerungen, von oben ausgeführt, inkl. Zuschlag für First sowie Dachrand / Anschluss an Fassade (0.46m/m²), einfache Dachform für EFH

Die kostensteigernden Faktoren sind die WD-Lattung, die Wärmedämmung sowie die Verlegearbeiten (in der Abbildung in einer Rubrik zusammengefasst) und das Verlegen der Dampfsperre, sobald aufgrund der Dämmstärke nicht mehr nur oben, sondern auch zwischen den Sparren gedämmt werden muss. Die Kosten für den Dachrandabschluss und die Zuschläge für Kehle und Grate hingegen fallen nicht sehr stark ins Gewicht, weder bei der Referenzdämmstärke noch als Funktion der zunehmenden Dämmstärke. Nimmt die Formenvielfalt zu, z.B. für Kreuzfirste oder bei Gauben und Lukarnen, erhöhen sich die linearen Kostenanteile. Die Relevanz kann anhand der obigen Kostenstruktur abgeschätzt werden. Die Kostenstruktur für das MFH ist ähnlich, ausser dass der Kostenanteil des Dachrandes geringer ausfällt.

Architektonische Aspekte: Zunehmende Dämmstärken lassen das Dach wuchtig aussehen, wenn die Wärmedämmung nur auf die Sparren aufgebracht wird. Diesem optischen Effekt lässt sich jedoch begegnen, indem der Ortrand gebrochen wird, d.h. indem zwei hintereinander versetzte Ortbretter angebracht werden, oder indem das sogenannte Stichermodell zur Anwendung kommt, bei dem die WD nur bis und mit Fassadenfläche geführt wird, das Vordach aber ohne WD bleibt.

Die in der Abbildung 4.3-43 dargestellten spezifischen Kosten der Energieeffizienz sind gegenüber folgenden Referenzfällen mit den entsprechenden Annahmen gerechnet.

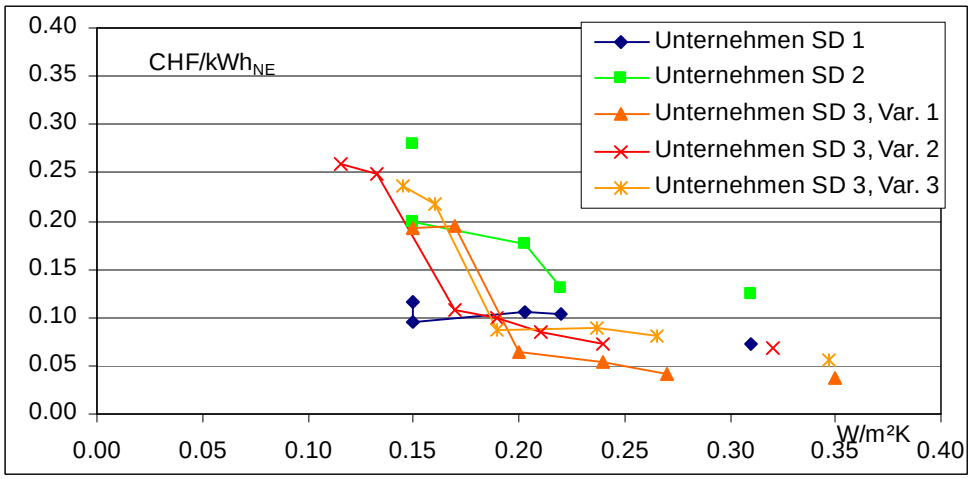
- Erneuerung des Unterdachs und der Eindeckung (ohne weitere Massnahmen an der vorhandenen Wärmedämmung), U-Wert 0.85 W/m²K
- Verstärkte Wärmedämmung gegenüber der Referenzdämmstärke, U-Wert 0.27 W/m²K (ca. 14 cm bei Kreuzlattung, ca 12 cm bei Distanzschrauben)



Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

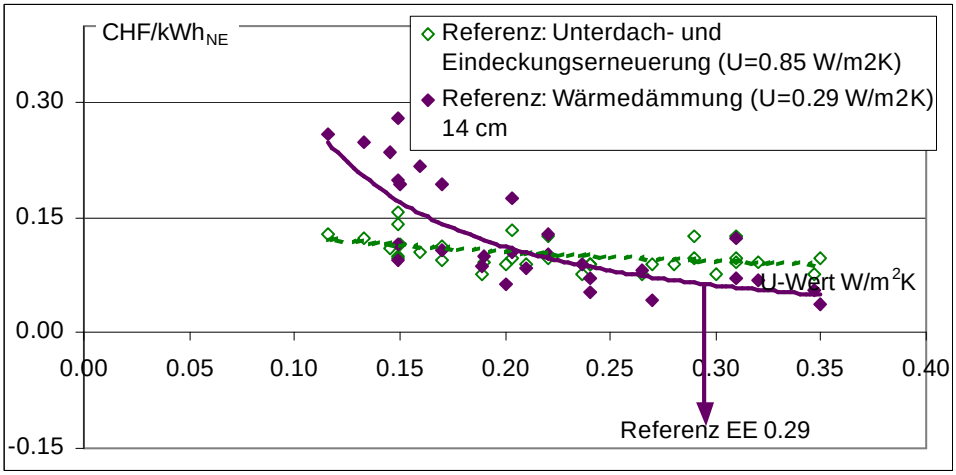
Abbildung 4.3-41 Grenzkosten (Durchschnittskostenansatz) von Dachwärmedämmungen für EFH bei bereits ausgebautem Dachraum, von oben ausgeführt

Aus der Abbildung 4.3-42 für MFH geht wiederum die Streuung der berechneten Grenzkosten aufgrund der Unternehmensangaben hervor. Selbst bei einem gleichen Unternehmen variieren die Angaben für verschiedene bautechnische Varianten.



Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

Abbildung 4.3-42 Grenzkosten (Durchschnittskostenansatz) von Dachwärmedämmungen für MFH bei bereits ausgebautem Dachraum, von oben ausgeführt

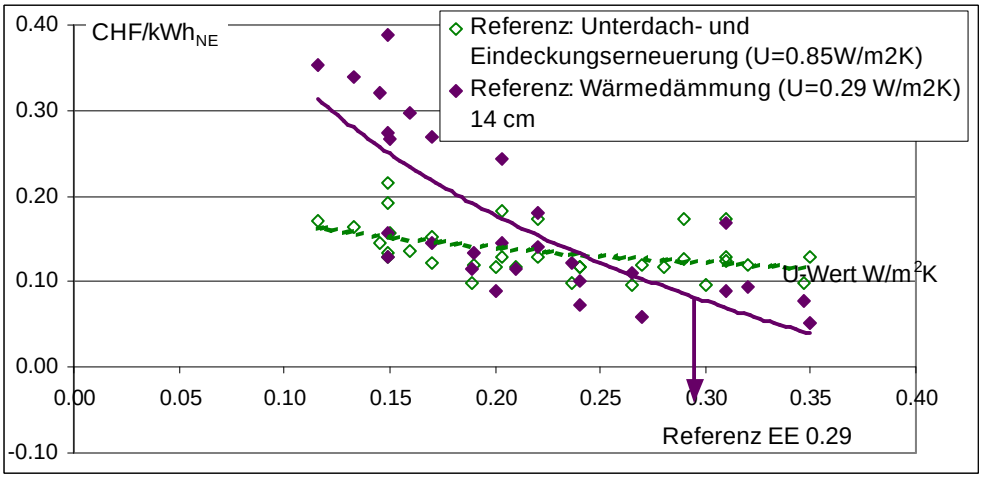


Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

Abbildung 4.3-43 Grenzkosten (Durchschnittskostenansatz) von Dachwärmedämmungen für EFH bei bereits ausgebautem Dachraum, von oben ausgeführt

Die Grenzkosten im Durchschnittskostenansatz steigen gegenüber dem Referenzwert 0.85 W/m²K naturgemäss in Funktion des mit der Wärmedämmung erreichten U-Wertes viel weniger steil an als gegenüber dem Referenz-U-Wert 0.29 W/m²K (Abbildung 4.3-43 und Abbildung 4.3-44).

Stellt man sich also beim Referenzfall „Unterdach- und Eindeckungserneuerung" die Frage nach der Dämmstärke, so ist festzustellen, dass die Erhöhung der Dämmstärke nur zu einem geringen Anstieg der spezifischen Energieeffizienzkosten führt. Die Reduktion des U-Wertes von 0.85 W/m²K auf 0.30 W/m²K kostet ca. 9 Rp/kWh$_{NE}$ und eine solche auf 0.15 W/m²K ca. 11 Rp/kWh$_{NE}$ (EFH) bzw. 12 Rp/kWh$_{NE}$ und 15 Rp/kWh$_{NE}$ (MFH).

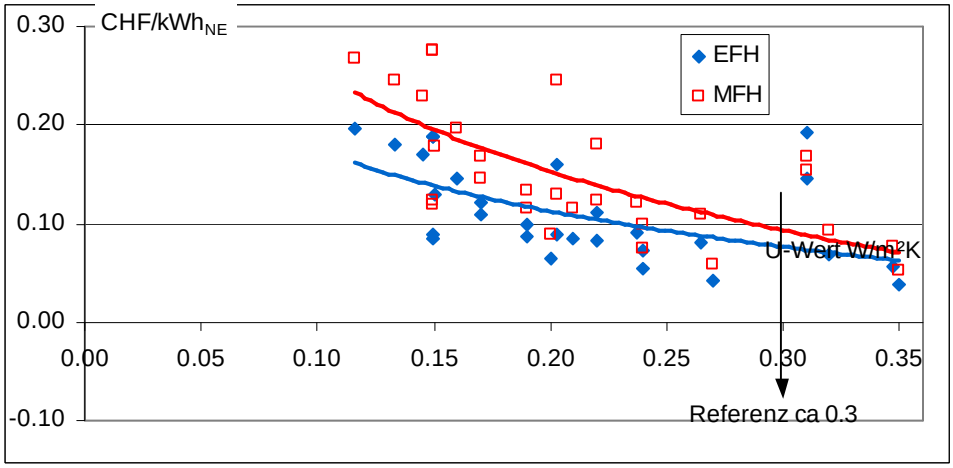


Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

Abbildung 4.3-44 Grenzkosten (Durchschnittskostenansatz) von Dachwärmedämmungen bei MFH bei bereits ausgebautem Dachraum, von oben ausgeführt

Die Ausgangsituation hat einen Einfluss auf die Grenzkosten. Ist der Dachraum bereits ausgebaut (Abbildung 4.3-43 und Abbildung 4.3-44) so ist das Verlegen der Wärmedämmung und insbesondere der Dampfbremse wesentlich aufwändiger als wenn die Wärmedämmung zusammen mit dem Ausbau des Dachraums angebracht wird Abbildung 4.3-45.

Deshalb sind die Grenzkosten beim bereits ausgebauten Dachraum (gegenüber dem Referenzfall, in dem eine Wärmedämmung angebracht wird) höher als beim Dachraumausbau.



Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

Abbildung 4.3-45 Grenzkosten (Durchschnittskostenansatz) von Steildachwärmedämmungen (von oben ausgeführt) für EFH und MFH bei Dachraumausbau, Referenzdämmstärke = 14 cm

e) Steildacherneuerung von innen

Nachteil der Steildachsanierung und der Wärmedämmung von innen ist für die Bauträgerschaft vor allem der Verlust an Nutzhöhe, also des verkleinerten Dachraums. Dies ist gerade deshalb relevant, wenn der Dachraum ausgebaut werden soll (ansonsten könnte auch der Estrichboden gedämmt werden) und macht sich umso stärker bemerkbar, je mehr gedämmt werden soll. Das kann entweder ein Hinderungsgrund für diese Variante sein oder es müssten für den verlorenen Dachraum zusätzliche Kosten oder ein Mindernutzen in Funktion der Dämmstärken in Rechnung gestellt werden. Andererseits hat die Variante Dämmen von innen natürlich wie bei der Estrichbodendämmung den Vorteil, dass sie auch vom privaten Hausbesitzer selbst realisiert werden kann, wobei eben auch hier das selbe gilt: bauphysikalische Risiken sollten beachtet werden und der Beizug einer Fachperson ist zu empfehlen.

Weitere Nachteile liegen beim Dämmen von innen auf der ausführungstechnischen Ebene. Das saubere Anschliessen an das Unterdach ist aufwändig und das Anschliessen an die Aussenwärmedämmung ist von innen eher schwierig zu realisieren; auch Unterbrüche im Dämmperimeter und bei der Luftdichtigkeitsfolie müssen u.U. in Kauf genommen werden. Die Erneuerung von innen ist bei den Dachunternehmen nicht sehr beliebt und der Rücklauf der Befragung war in diesem Bereich gering weil mögliche bauphysikalischer Risiken bestehen und weil Dämmen zwischen den Sparren und das Anbringen von Lattungen wegen des beschränkten Raums aufwändiger ist im Vergleich zu Aussenarbeiten. Möglicherweise wären die Zimmerleute die besseren Ansprechpartner, aber dies war nicht Inhalt der Befragung.

Bei der Erneuerung von innen wäre der Referenzfall typischerweise der, dass der Dachraum zu Wohnzwecken ausgebaut wird der Ausbau dieses geplant ist (wenn nicht, kann könnte gleich der Estrichboden gedämmt werden). Bei der Dämmung von innen müssten also die Kosten für die Innenraumbekleidung dem Zweck "Dachraumausbau" zugeordnet werden. Dem Zweck Energieeffizienz bleibt dann die Luftdichtigkeitsfolie, der eigentliche Dämmstoff, deren Befestigungsmaterial (z.B. durch Lattung oder Dachschalung) sowie zusätzliche Lattung, wenn die Dämmstärke die Sparrenhöhe übersteigt. Bei der Variante Dämmung von innen sind dann die Arbeitskosten tendenziell höher, da das Befestigen der Luftdichtheitsfolie aufwendiger ist und im Innern mit den langen Lattungen nicht so rationell gearbeitet werden kann.

Fazit: Die Mehrkosten des Dämmens von innen sind eher höher als beim Dämmen von aussen die absoluten Kosten jedoch eher geringer (wobei dann eben auch nicht derselbe Nutzen da ist, nämlich ein frisch erneuertes Unterdach. Quintessenz: Durchaus beide Varianten sind in Betracht zu ziehen, eine Fachperson beizuziehen ist sicher immer ratsam, gerade auch im zweiten Fall.

Eine ausführungstechnisch und bei fachgerechter Ausführung auch bauphysikalisch attraktive Variante ist – wie im Fall der Estrichbodendämmung – das Wärmedämmen mit Schüttdämmung, vor allem bei bereits ausgebautem Dachraum.

Der Dämmstoff kann dann da mittels Öffnungen, die für diesen Zweck erstellt werden, zwischen Innenraumbekleidung und Unterdach eingeblasen werden. Nachteile hier: Dämmstärke beschränkt (im Vergleich zu den über 20 bis 30 cm, von denen sonst die Rede ist), es besteht ein Risiko dass der Dämmstoff ab einigen Stellen nur in unzuriechendem Masse hingelangt (eine Thermographie ist deshalb empfehlen, insbesondere da deren Kosten moderat sind), mögliches Setzen des Dämmstoffs in Zukunft, Umweltverträglichkeit (Papier muss chemisch behandelt werden). Vorteil: Diese Variante weist relativ geringe Investitionskosten auf (z.B. im Vergleich eines Umdeckens und Dämmens oder im Vergleich zu einer kompletten Demontage der Innenraumbekleidung) und es kann eine doch merkliche energetische Verbesserung erreicht werden.

f) Estrichbodendämmung

Die Dämmung des Estrichbodens ist in wirtschaftlicher und ausführungstechnischer Hinsicht eine attraktive Wärmedämmmassnahme, da sie einfach und ohne grosse begleitende Kosten ausgeführt werden kann. Sie kann auch unabhängig von übrigen Bauabläufen realisiert werden. Diese Attraktivität darf jedoch nicht darüber hinweg täuschen, dass gerade diese Massnahme bauphysikalische Risiken enthält, wenn sie nicht fachgerecht ausgeführt wird. Insbesondere auf das sorgfältige Anschliessen der Luftdichtigkeitsfolie ist zu achten. Je nach bestehender Konstruktion das Dachs und der Vordachunterschalung ist ausserdem an der Pfeute oder am Kniestock mit schwierig zu dämmenden Längen oder Teilflächen zu rechnen, dies insbesondere, wenn die Fassade nicht oder nicht gleichzeitig wärmegedämmt wird. Liegt das Niveau des Estrichboden ausserdem oberhalb des Kniestocks (d.h. wenn die obersten Wohnungen teilweise in der Schräge liegen), kann der Dämmperimeter nicht geschlossen werden, d.h. zwischen Dachbodendämmung und Aussenwand bleibt ein Bereich ungedämmt. Auch der Unterbruch der Estrichbodendämmung bei unterteilenden Estrichwänden kann eine Inhomogenität bewirken, welche die energetisch Wirkung im Vergleich zum homogenen Fall verkleinert.

Im Beispiel der Konstruktion der Periode 1925 – 1965 erhöht sich der zu berücksichtigende Linienzuschlag bei einer reinen Estrichbodendämmung von 0.32 auf 0.42. Beim Beispiel aus der Periode bis 1900 verringert er sich jedoch, weil Estrichbodendämmung im Zwischenboden ausgeführt optimal an den in der Wand eingelassenen Balken anschliesst (SIA, 1993).

Tabelle 4.3-38 Flächenspezifische U-Werte (W/m²K) von Wand und Estrichboden sowie lineare Wärmeverlustkoeffzienten (W/mK)für verschiedene Bauperioden

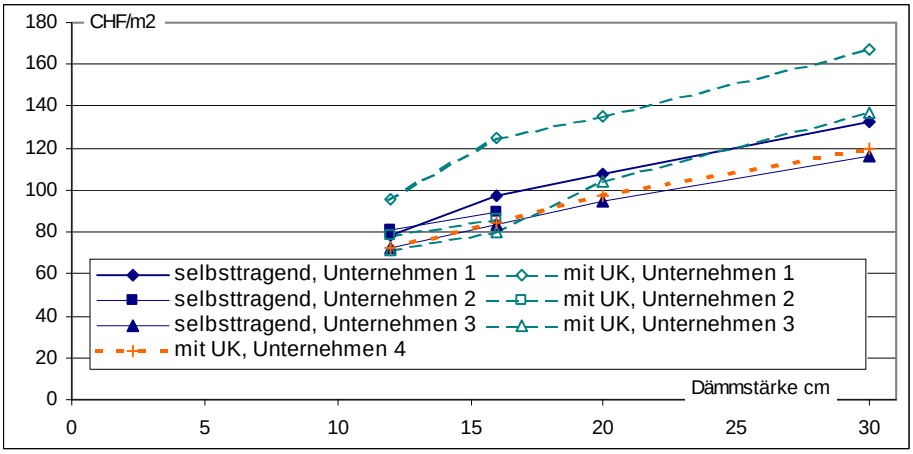
	Wand W/m²K			Estrichboden W/m²K			Linienzuschlag Kniestock W/mK		
	Bis 1900	1900-1925	1925-1965	Bis 1900	1900-1925	1925-1965	Bis 1900	1900-1925	1925-1965
Ausgangslage	1.55	1.0	1.16	0.72	0.87	0.88	0.08	0.10	0.32
Nur Estrichbodendämmung	1.55	1.0	1.16	0.29	0.30	0.26	0.03	k.A.	0.42
Nur Wandaussenwärmedämmung	0.32	0.29	0.30	0.72	0.87	0.88	0.33	0.17	0.23
Estrichbodendämmung und Wandaussenwärmedämmung	0.32	0.29	0.30	0.29	0.30	0.26	*0.03*		*0.10*

Quelle SIA-Wärmebrückenkatalog 3, Altbaudetails, Schätzungen CEPE

Bei der Estrichbodendämmung gibt es zwei technische Möglichkeiten:

- Dämmung mit selbstragenden Dämmplatten, welche Spanplatten/Riemenboden tragen
- Dämmung mit Unterkonstruktion für Spanplatten/Riemenboden

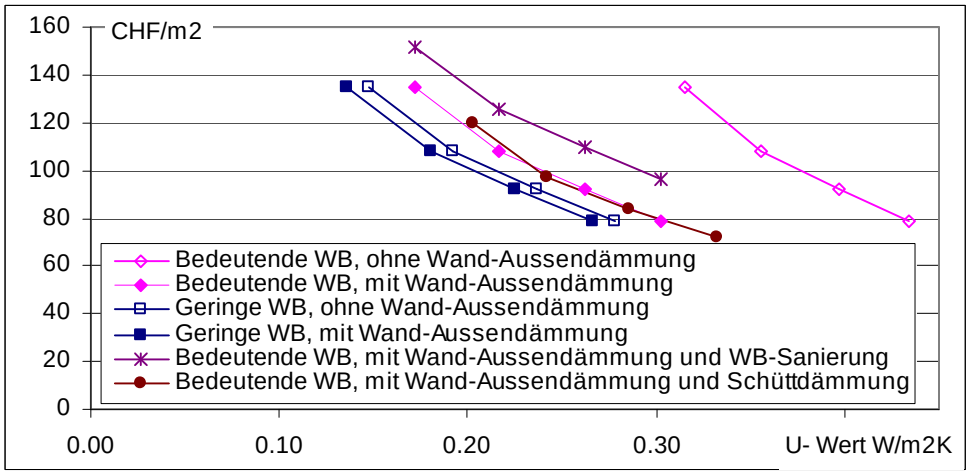
Im ersten Fall ist der die Dämmwirkung des Dämmstoffes kleiner und im zweiten Fall wird die Dämmwirkung durch die Inhomogenität der UK gemindert. Die beiden Effekte heben sich in etwa auf. Im zweiten Fall trägt nebst dem Dämmstoff und deren Verlegung die Unterkonstruktion (UK) zu steigenden Kosten bei zunehmenden Dämmstärken bei. Im ersten Fall ist dafür der Dämmstoff bei gleicher Dämmstärke teurer. Die flächenbasierten Kosten betragen 70 bis 90 CHF/m² bei 12 cm Dämmstärke und 110 bis 160 CHF/m² bei 30 cm. Davon beträgt der Boden (Riemen oder Spanplatten rund 30 CHF/m²). Nebst den flächenspezifischen Kosten sind lineare Kosten für das sorgfältige Anschliessen der Dampfsperre / Luftdichtigkeitsfolie am Dachrand (Kniestock, Pfette, Ortwand) einzurechnen. Ohne besonderen Schwierigkeitsgrad oder Zusatzmassnahmen betragen diese 9 bis 11 CHF/m² bei 12 cm Dämmstärke und 18 bis 20 CHF/m² bei 30 cm Dämmstärke.



Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

Abbildung 4.3-46 Kosten von Estrichbodendämmungen, inkl. lineare Zuschläge für 0.4 m/m²

Abbildung 4.3-47 verdeutlicht, dass die energetische Wirkung einer gleichen Massnahmen je nach Randbedingung sehr unterschiedlich sein kann. Besteht zum Beispiel eine bedeutende Wärmebrücke am Kniestock und an der Ortwand, erhöht sich der rechnerisch energetische Wert der linearen Wärmeverluste unter Umständen sogar, wenn nur der Estrichboden, nicht aber die Aussenwand gedämmt wird und die Wirkung der Wärmedämmung wird entsprechend geschmälert. Werden andererseits die Kosten für besondere Massnahmen am Kniestock oder an der Ortwand miteingerechnet, z.B. das temporäre Entfernen des bestehenden Estrichbodens (Aufschneiden) und das Dämmen des Zwischenbodens am Randbereich oder das Aufborden der Wärmedämmung, so kann zwar die energetische Situation verbessert werden, können sich die Kosten doch deutlich bemerkbar machen (Annahmen in Abbildung 4.3-47: 50 CHF/m). Eine kostengünstige und bauphysikalisch vorteilhafte und risikovermindernde Möglichkeit kann das Dämmen mit Schüttdämmung darstellen.



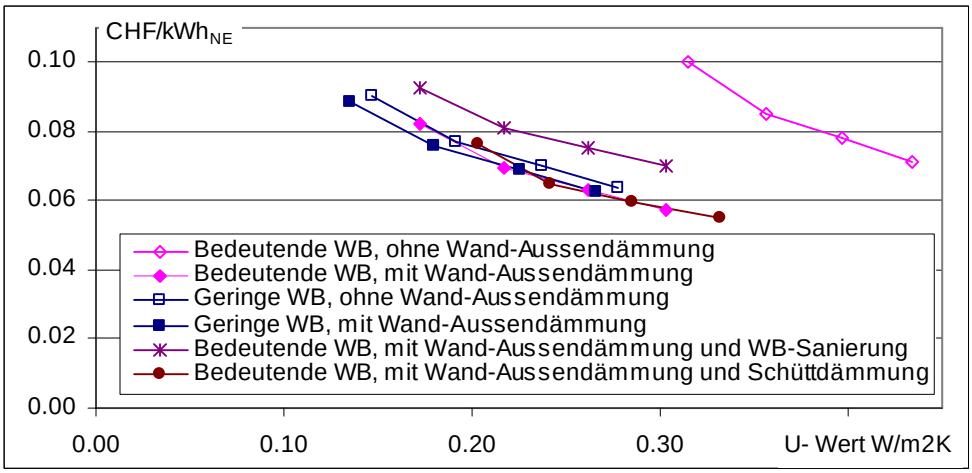
Quelle SIA 1993, Erhebungen und Berechnungen CEPE

Abbildung 4.3-47 Kosten von Estrichbodendämmungen als Funktion ihrer energetischen Wirkung für unterschiedliche Fälle bei einem EFH (0.4m/m² Dachrand).

Fazit: Wenn möglich sollte die Aussenwand gleichzeitig mit dem Estrichboden gedämmt werden. Falls dies nicht möglich ist, sollte nicht zuletzt auch aus bauphysikalischen, beim Dachrand geprüft werden, ob unter Umständen spezielle Massnahmen angebracht sind.

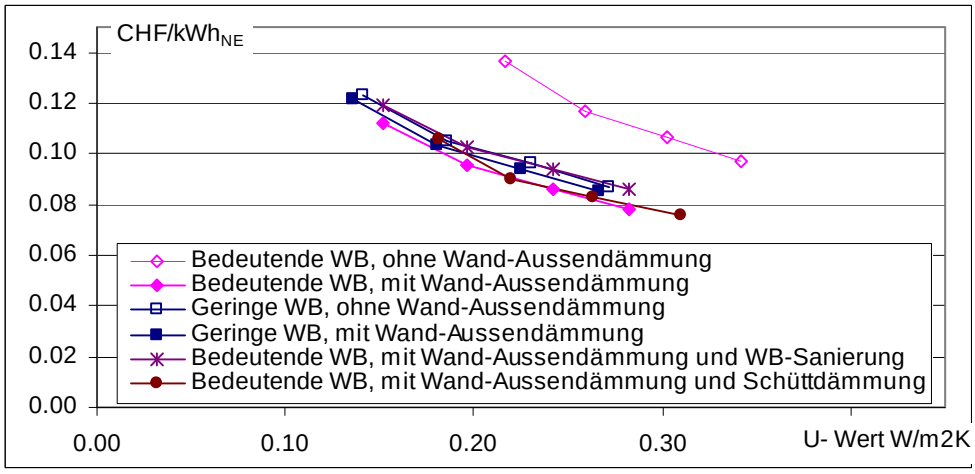
In den folgenden Betrachtungen (Abbildung 4.3-48) wird von einem Ausgangs-Flächen-U-Wert von 0.85 W/m²K ausgegangen. Unter Berücksichtigung der Dachrandverluste ergeben sich 0.88 W/m²K respektive 0.98 W/m²K für die Fälle mit geringer respektive bedeutender Wärmebrücke (0.08 W/mK bzw 0.32 W/mK).

Gegenüber der Referenz, bei der keine Wärmedämmung angebraucht würde, liegen die Grenzkosten von Estrichbodendämmungen bei den EFH im Bereich von 5.5 bis 6.5 Rp/kWh$_{NE}$ bei 12 cm Dämmstärke und rund 9 Rp/kWh$_{NE}$ bei 30 cm, falls die Aussenwand gleichzeitig aussenwärmegedämmt wird (wobei diese Kosten der Aussenwärmedämmung zugerechnet werden). Bestehen bedeutende Wärmebrücken (z.B. Gebäude der Periode 1925 – 1965) liegen die Kosten bei 7 Rp/kWh$_{NE}$, entweder weil Zusatzkosten für die Wärmebrückensanierung anfallen (z.B. 50 CHF/m für das Auftrennen des Estrichbodens und das Dämmen des Zwischenbodens) oder weil die gleichen Kosten eine geringere Wirkung entfalten (und damit der Divisor kleiner ist). Im letzteren Fall ist ausserdem der erreichte U-Wert höher und damit das gesamte Effizienzpotential kleiner



Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

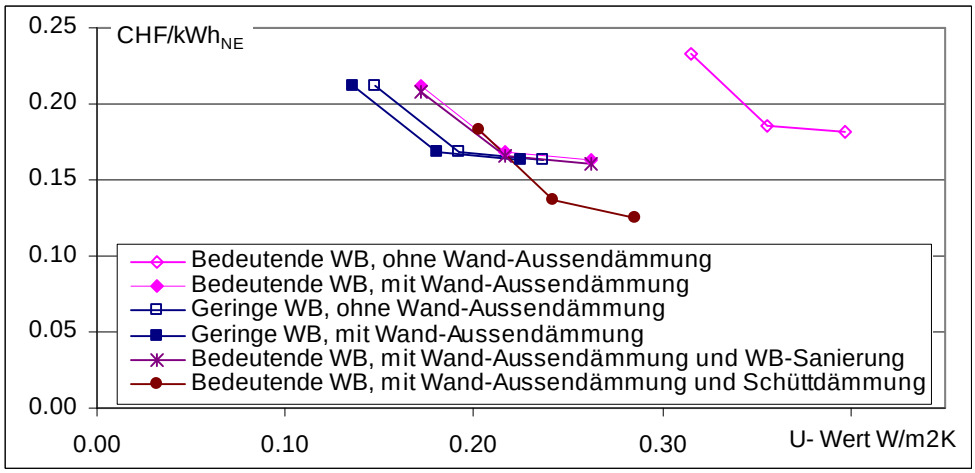
Abbildung 4.3-48 Grenzkosten (Durchschnittskostenansatz) von Estrichboden-Wärmedämmungen bei EFH als Funktion des erreichbaren U-Wert (inkl. Berücksichtigung der Dachrandverluste) gegenüber der Referenz „keine Dämmung", Realzinssatz 3.5%, 50 Jahre Lebensdauer.



Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

Abbildung 4.3-49 Grenzkosten (Durchschnittskostenansatz) von Estrichboden-Wärmedämmungen bei MFH als Funktion des erreichbaren U-Wert (inkl. Berücksichtigung der Dachrandverluste) gegenüber der Referenz „keine Dämmung", Realzinssatz 5.5%, 50 Jahre Lebensdauer.

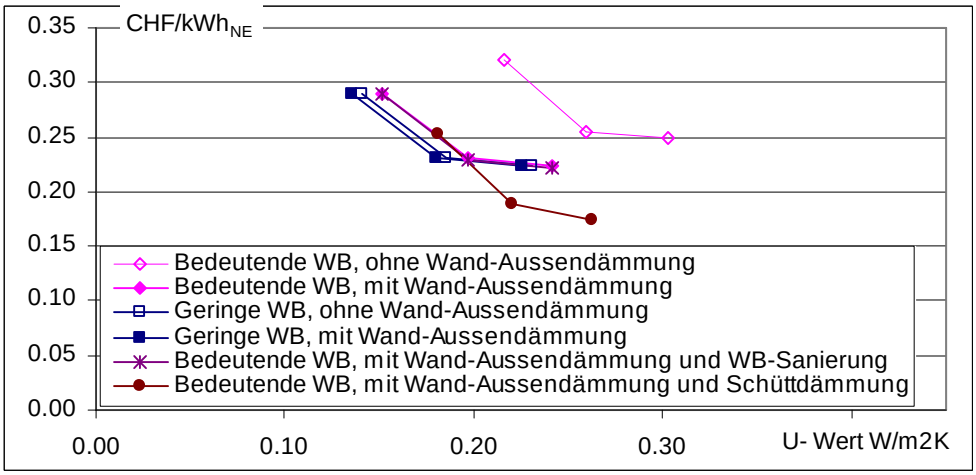
Aufgrund des höheren Realzinssatzes liegen die Grenzkosten im MFH-Bereich erwartungsgemäss höher als bei den EFH, nämlich zwischen rund 8 Rp/kWh$_{NE}$ bei 12 cm Dämmstärke und 12 Rp/kWh$_{NE}$ bei 30 cm. Aus der Abbildung 4.3-50 geht auch hervor, dass bei den MFH sowohl energie- wie die kostenseitigen Randeffekte weniger Bedeutung haben.



Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

Abbildung 4.3-50 Grenzkosten (Durchschnittskostenansatz) von Estrichboden-Wärmedämmungen beim EFH als Funktion des erreichbaren U-Wert (inkl. Berücksichtigung der Dachrandverluste) gegenüber der Referenzdämmstärke 12 cm. Realzinssatz 3.5%, 50 Jahre Lebensdauer.

Gegenüber der Referenzdämmstärke 12 cm liegen die Grenzkosten (im Durchschnittskostenansatz) bis zu einer Dämmstärke von 20 cm bei rund 20Rp/kWh und bei 30 cm gegenüber 12 cm bei 25 Rp/kWh. Im Fall, in dem die Wärmebrücke nicht saniert wird, liegen sie leicht höher, weil der rechnerische lineare Wärmeverlustwert bei zunehmender Dämmstärke leicht zunimmt.



Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

Abbildung 4.3-51 Grenzkosten (Durchschnittskostenansatz) von Estrichboden-Wärmedämmungen beim MFH als Funktion des erreichbaren U-Wert (inkl. Berücksichtigung der Dachrandverluste) gegenüber der Referenzdämmstärke 12 cm. Realzinssatz 5.5%, 50 Jahre Lebensdauer.

g) Dachstockersatz

Wenn der Dachstock als ganzes ersetzt wird, z.B. wenn die Tragstruktur sehr erneuerungsbedürftig ist (durch Feuchtigkeit oder Holzwurmbefall) oder wenn das Dachraumvolumen vergrössert werden soll, kann bautechnisch gleich vorgegangen werden wie im Neubau. Auch hier besteht die Möglichkeit, den Dachstock in Zimmermannsmanier auf der Baustelle zu errichten oder den Dachstock vorgefertigt inklusive Wärmedämmung anzuliefern. Die Grenzkosten sind in beiden Fällen gleich denjenigen im Neubau anzusetzen (weshalb auf Kap. 4.3.8b) verwiesen wird).

h) Flachdachneubau

Die Mehrkosten der Flachdachneubauten in Funktion der Dämmstärke setzen sich aus den gleichen Kostenelementen zusammen wie diejenigen der Flachdacherneuerung.

- Mehrkosten für Dämmaterial
- Mehraufwand für aufwändigeren Transport und Verarbeitung (Handling)
- Mehrkosten beim Dachrand (Dämmaterial, erhöhte Abwicklungen von Schutzblechen etc.)

Im Unterschied zur Erneuerung kann jedoch der Dachrandabschluss so gestaltet werden, dass der Dachrand wärmetechnisch vom Flachdach und von der Aussenwand getrennt ist (z.B. bei Dachvorsprungelementen) oder der Einbezug des Dachrandes in den Dämmperimeter dem Standardvorgehen entspricht (Brüstung).

Beim Flachdach wird davon ausgegangen, dass im Referenzfall die Brüstung gedämmt wird und der gewichtete U-Wert (Flächen-U-Wert unter anteilsmässiger Berücksichtigung der linearen Verluste des Dachrandes) 0.3 W/m²K beträgt. Ausgehend von dieser energetischen und kostenseitigen Referenzdefinition können die auch den Neubau betreffenden Kostenelemente von Unterkapitel i) herangezogen werden, um die Grenzkosten der zunehmenden Energieeffizienz von Flachdachneubauten berechnet werden.

Tabelle 4.3-39 Investitionskosten (CHF/m²) und Brutto-Grenzkosten (CHF/kWh$_{NE}$) der zunehmenden Energieeffizienz von Flachdachneubauten

EFH			MFH			
U-Wert*	Investitionsmehr-kosten	Grenzkosten dr=0.035	U-Wert*	Investitionsmehr-kosten	Grenzkosten dr=0.035	dr=0.055
W/m²K	CHF/m²*	CHF/kWh$_{NE}$	W/m²K	CHF/m²*	CHF/kWh$_{NE}$	CHF/kWh$_{NE}$
0.30	**0**		0.30	0		
0.25	**9**	0.09	0.25	7	0.07	0.09
0.21	**25**	0.13	0.21	18	0.10	0.13
0.18	**38**	0.15	0.17	33	0.12	0.17
0.14	**60**	0.18	0.13	54	0.15	0.21
0.11	**88**	0.22	0.10	81	0.19	0.27
Energietische und kostenseitige Berücksichtigung des Dachrandes: EFH 0.4m/m2, MFH 0.18 m/m2						

Quelle Erhebungen bei SVDW-Mitgliedfirmen und Berechnungen CEPE

Die Brutto-Grenzkosten der zunehmenden Energieeffizienz liegen bei den Flachdachneubauten (Tabelle 4.3-39) etwas höher als bei der Flachdacherneuerung (Tabelle 4.3-41), dies obwohl dort

die Investitionsmehrkosten bei gleichem U-Wert höher liegen. Dieser Sachverhalt erklärt sich insbesondere durch den Referenz-U-Wert, der beim Neubau mit 0.3 W/m²K tiefer liegt als bei der Erneuerung (0.4 W/m²K, jeweils unter Berücksichtigung des Dachrandes), und sich deshalb an einem steileren Ort im Verlauf des Mehrkostenanstiegs befindet. (Remember: wenn die Kosten linear in Funktion der Dämmstärke ansteigen, so steigen sie in Funktion des U-Wertes progressiv an).

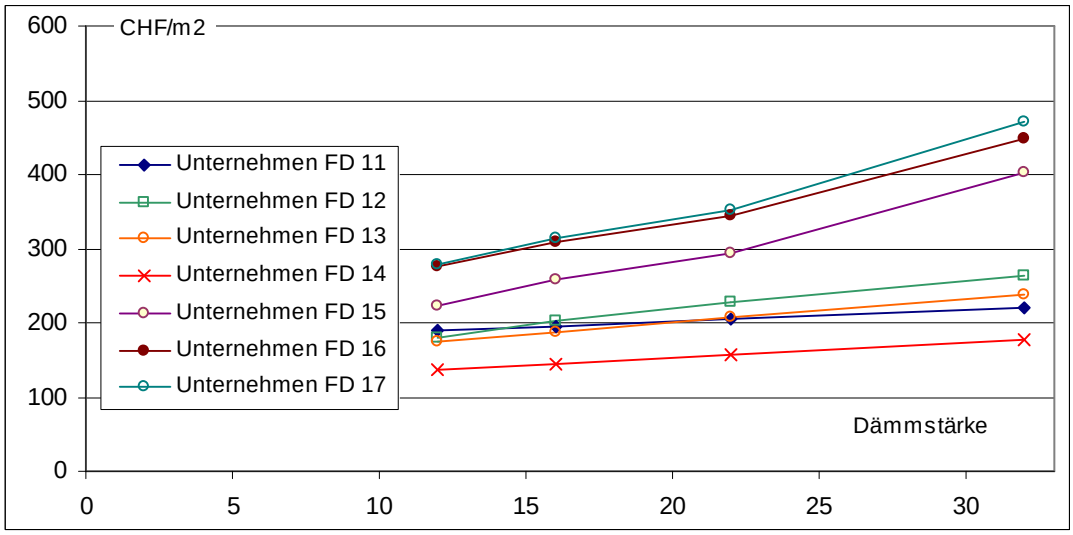
i) Flachdacherneuerung

Bei der Flachdacherneuerung gilt es, im wesentlichen zwischen zwei Fällen zu unterscheiden, siehe dazu auch die Ausführungen im Kapitel 3.2.

- Abbrechen der bestehenden Abdichtung / Wärmedämmung und Neuaufbau, insbesondere bei schadhafter Abdichtung.
- Zusätzliche Wärmedämmung auf bestehendes Flachdach (Plusdach, Doppeldach) bei intakter Flachdachabdichtung

Fall 1: Schadhafte Abdeckung

Wie bei den Fassaden und den übrigen Bauteilen wird zwischen flächenspezifischen und längenspezifischen Kostenelementen unterschieden. Zunächst werden die reinen flächenspezifischen Investitionskosten in Funktion der Dämmstärke dargestellt (Abbildung 4.3-53).

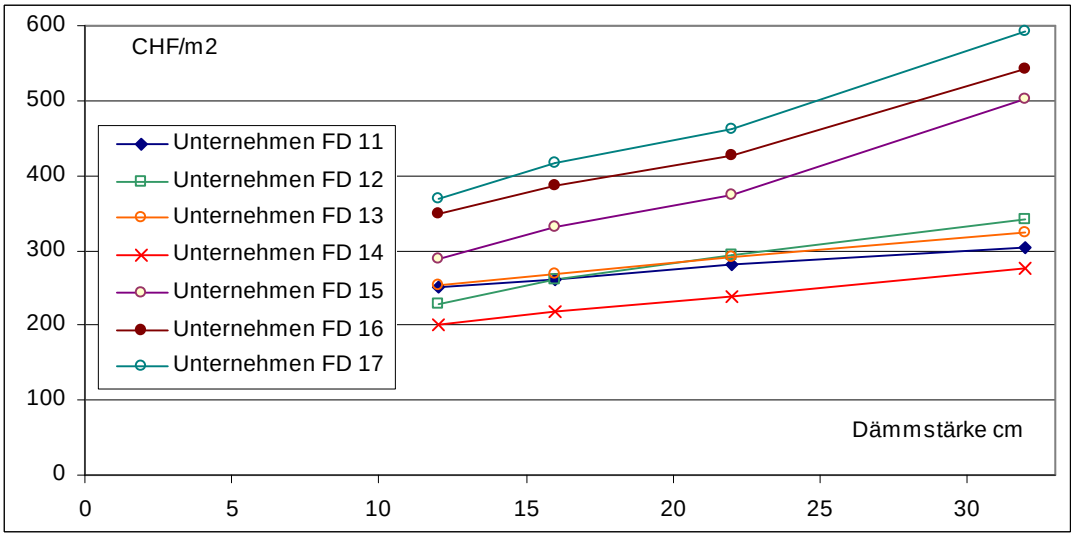


Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

Abbildung 4.3-52 Flächenpreise (ohne Dachrandabschluss) von Flachdacherneuerungen als Funktion der Dämmstärke (Fall Kompletterneuerung der schadhaften Abdichtung)

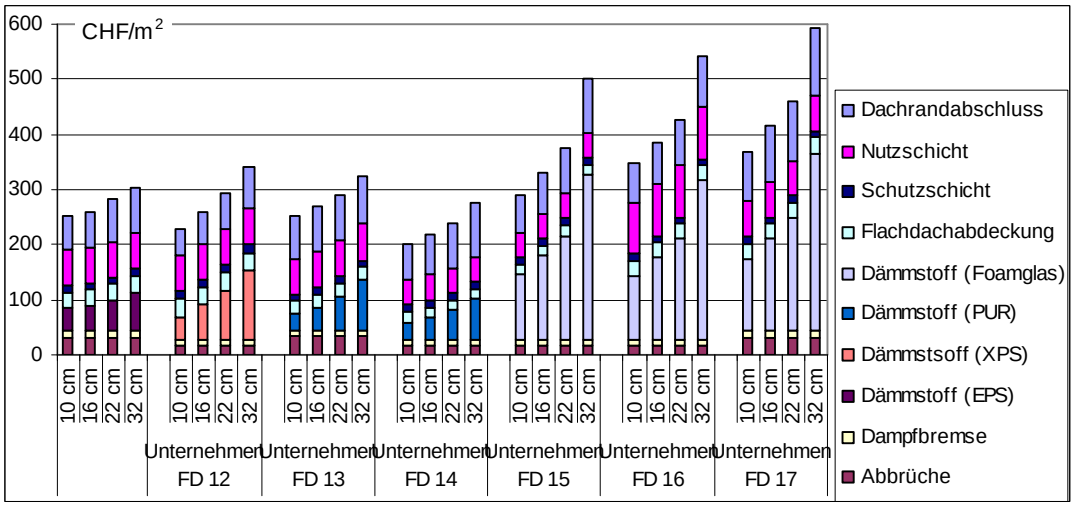
Bei der Abbildung 4.3-52 (Flächenpreise) und auch bei der Abbildung 4.3-53 (Flächenpreise inkl. Dachrandabschluss mit 0.4m/m2) fällt auf, dass das Kostenniveau und insbesondere der Kostenanstieg in Funktion der Dämmstärke bei drei Unternehmen markant höher ist als bei den übrigen Unternehmen. Dies hat damit zu tun, dass diese drei Unternehmen die Kosten für den Dämmstoff Foamglas angegeben hatten, einem markant teurerem Dämmstoff, wie anhand der Abbildung 4.3-54 gut hervorgeht. Beim Vergleich der Abbildungen ist also darauf zu

achten, dass sehr unterschiedliche Dämmstoffe mit spezifischen Eigenschaften, energetischen Kennwerten und demzufolge auch Preisen vorgeschlagen werden, siehe dazu auch die Kostenstruktur in Abbildung 4.3-54. Vor allem die Erneuerung mit Foamglas ist eine eher teuere Varianten und die spezifische Funktionalität des Foamglas wird eher selten benötigt.



Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

Abbildung 4.3-53 Investitionskosten von Flachdacherneuerungen als Funktion der Dämmstärke (Fall Kompletterneuerung der schadhaften Abdichtung) inkl. Erneuerung und Wärmedämmung des Dachrandabschluss für EFH (0.4m / m² Dachfläche)



Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

Abbildung 4.3-54 Kostenstruktur bei Flachdacherneuerungen (Fall Kompletterneuerung der schadhaften Abdichtung) inkl. Erneuerung und WD des Dachrandabschluss für EFH (0.4m Dachrand / m² Dachfläche)

Auch bei der Beurteilung der energetischen Wirkung der Flachdacherneuerungen sind nicht nur die flächenbasierten U-Werte zu betrachten, sondern auch die längenbasierten

Wärmeverluste. Wie bei der Fensterleibung können die rechnerischen Werte der linearen Wärmeverluste des Dachrandes je nach Situation sogar ansteigen, wenn die angrenzenden Flächen (Flachdach, Fassade) wärmegedämmt wird, der Dachrand jedoch nicht. Das ist insbesondere bei Dachvorsprüngen oder bei den weit verbreiteten Flachdachbrüstungen der Fall, wie Tabelle 4.3-40 zeigt. Aus der gleichen Tabelle geht auch hervor, dass der lineare Psi-Wert bei nicht gedämmter Brüstung beträchtlich ist.

Tabelle 4.3-40 Lineare U-Werte (Psi-Werte) für Flachdachbrüstungen bei verschiedenen Dämmstärken der Wand, des Dachs und für verschiedene Erneuerungsfälle im Brüstungsbereich. Annahmen: Wand: Backstein, Dach/Brüstung: Beton, Wanddämmung: PS, Lambda=0.04 W/mK, Dach/Brüstung PU, Lambda=0.027 W/mK

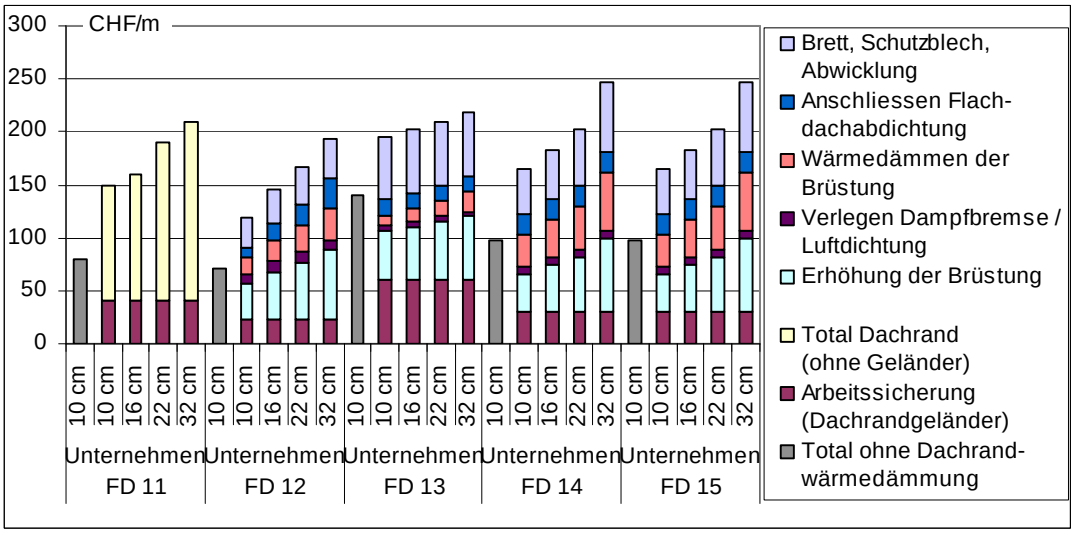
Fassade	Dach	Brüstung nicht gedämmt	Brüstung nur aufborden		Brüstung gedämmt			
					„gut“		gering	
DS cm	DS cm	Psi lin W/mK	DS cm	Psi lin W/mK	DS cm	Psi lin W/mK	DS cm	DS cm
6	6	0.24	4	0.15				
6	12	0.24	4	0.17	4	0.05		
12	12	0.30	10	0.23	6	0.05	4	0.08
12	20	0.27	10	0.21	8	0.05	5	0.05
20	20	0.30	10	0.23	10	0.04	5	0.06
20	30	0.26	10	0.20	10	0.05	5	0.09

Quelle Berechnungen CEPE mit EUROKOBRA, Wärmebrückenatlas auf PC (EMPA, 2001)

Werden die linearen U-Werte für den Fall eines EFH-Flachdachs auf die Fläche umgerechnet und mit U-Wert* bezeichnet (typische Dachrandlänge beim EFH: 0.4m/m^2), wird ersichtlich, dass mit der Dämmung der Brüstung von rund 6 bis 8 cm eine vergleichsweise grosse U-Wert*-Verbesserung erreicht werden kann, typischerweise rund 0.08 bis 0.1 W/m^{2}K (Rechenbeispiel: 0.4m/m^{2,} Verbesserung von 0.3W/mK auf 0.05W/mK). Zum Vergleich: Um diese U-Wert-Verbesserung mit Massnahmen in der Fläche zu erreichen, müsste die gesamte Fläche von 12 cm auf 20 cm verbessert werden.

Wichtig ist vor allem, dass die Wärmedämmung an der Brüstung nicht nur aufgebordet wird, denn der lineare Psi-Wert kann in diesem Fall nur unwesentlich verbessert werden. Zu empfehlen ist die Wärmedämmung der Brüstung und das Anschliessen der Wärmedämmung an diejenige des Flachdachs. Die Dämmstärke der Brüstung sollte dabei etwas auf die Dämmstärke des Flachdachs und der Fassade abgestimmt sein. Aus der Tabelle 4.3-40 ist ersichtlich, wie hoch die Dämmstärke sein muss, damit der lineare Psi-Wert auf unter 0.05 W/mK (Kolonne „gut“) bzw. 0.1 W/mK gesenkt werden kann.

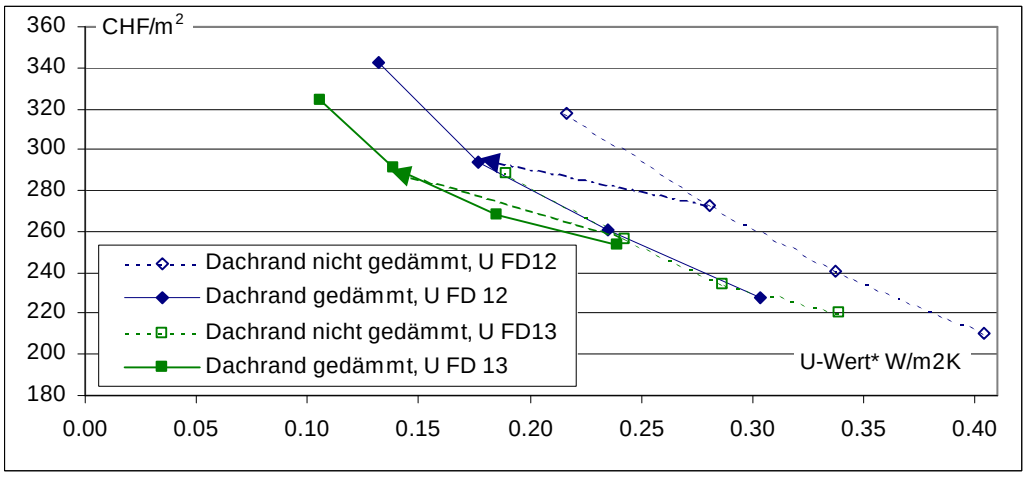
Wird die Brüstung wärmegedämmt, ist mit Mehrkosten von rund 50 bis 80 CHF/m zu rechnen, (siehe Abbildung 4.3-55) denn der grösste Teil der Kosten des Dachrandabschluss fällt ohnehin an, nämlich die Kosten für das Schutzblech, das Anschliessen der Abdichtung, das Dachrandgeländer. Beim EFH ergibt dies umgerechnet auf die Fläche 20 bis 30 CHF/m^2. (Annahme: 40 m Dachrand pro 100 m2 Dachfläche).



Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

Abbildung 4.3-55 Kostenstruktur pro Laufmeter für den Dachrandabschluss bei der Erneuerung von Flachdächern mit Brüstung in Funktion der Dämmstärke des Flachdachs

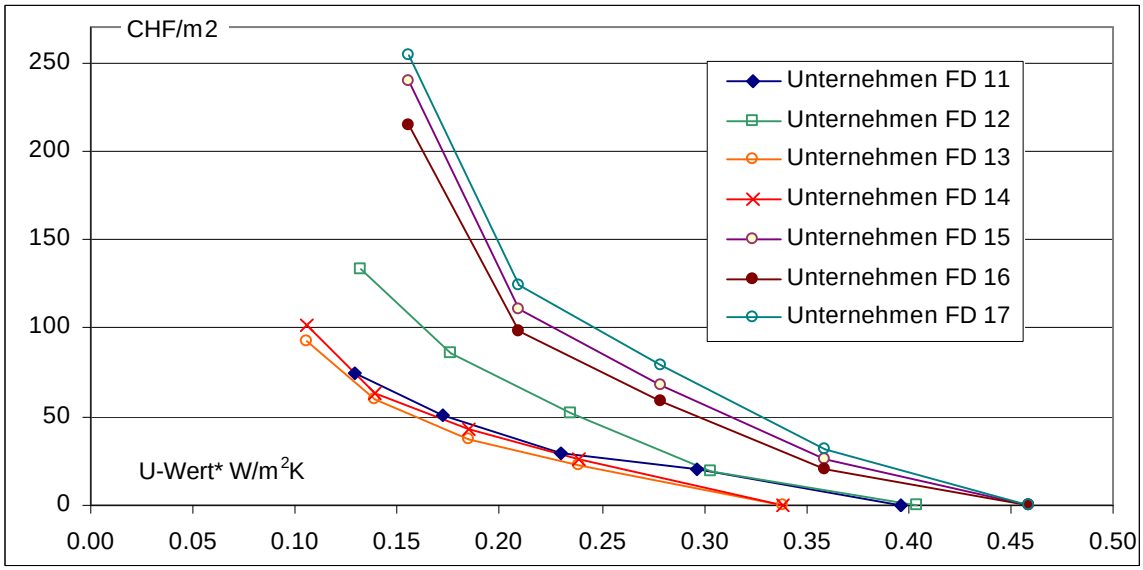
In den meisten Fällen ist es also aus Sicht der Kosteneffizienz zu empfehlen, den Dachrand ebenfalls wärmetechnisch zu erneuern. Eine Dachranderneuerung ist solange kosteneffizienter als eine Erhöhung der Dämmstärke in der Fläche, als in der Abbildung 4.3-56 die Verbindung zwischen „Dachrand wird nicht wärmegedämmt“ und „Dachrand wird wärmegedämmt“ (Pfeil) weniger steil ist als der Kostenverlauf in Funktion der Dämmstärke (jeweils gestrichelt verbundene Punkte). Zugrunde liegt den in der Abbildung 4.3-56 dargestellten Berechnungen die Brüstungsdämmstärke der Spalte „gut“ der Tabelle 4.3-40 sowie 12 cm, 16 cm, 22 cm und 32 cm als Dämmstärke der Dachfläche.



Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

Abbildung 4.3-56 Investitionskosten der Flachdacherneuerung für die Fälle i) Brüstung wird bzw. ii) wird nicht wärmegedämmt am Fallbeispiel der Unternehmen FD 12 und FD 13. U-Wert*: Gewichteter U-Wert unter Berücksichtigung der linearen Wärmeverluste Psi

Abschliessend erfolgt die Berechnung der Grenzkosten, wozu ein Referenzfall zu definieren ist. Da die Ausgangslage eine schadhafte Abdichtung ist und angenommen wird, dass sowohl die bestehende Abdichtung wie die Wärmedämmung abgebrochen wird, erfährt das Bauteil eine tiefgreifende Veränderung, weshalb der Grenzwert auf der Ebene U-Wert eingehalten werden muss (0.4 W/m²K). Dies entspricht je nach Dämmstoff rund 10 cm, wobei der Grenzwert bei Dämmstoffen mit tiefem Lambda-Wert auch erreicht wird, wenn die Brüstung nicht gedämmt wird.



Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

Abbildung 4.3-57 Mehrkosten von Flachdacherneuerungen gegenüber dem Referenzfall in Funktion des gewichteten U-Wertes (Dach und Dachrand, 0.4 m/m²)

Zur Berechnung der Investitionsmehrkosten und der Grenzkosten wird der Dämmstoff Schaumglas nicht berücksichtigt, denn die spezifische Funktionalität des Schaumglases wird im Normalfall nicht benötigt[1].

Für die Mehrfamilienhäuser gelangen für die Ermittlung der Investitionsmehrkosten grundsätzlich die gleichen Kostenelemente zur Anwendung, wobei berücksichtigt wird, dass die spezifische Dachrandlänge beim MFH tiefer liegt, nämlich bei 0.18 m pro m² Dachfläche, was einer Dachfläche von z.B. 12 m mal 30 m entspricht. Die auf die Fläche umgelegten Mehrinvestitionskosten steigen beim MFH in Funktion des sinkenden U-Wertes weniger stark an, weil der Einfluss des Dachrandes auf den umgelegten Flächenpreis weniger stark ist (siehe Tabelle 4.3-41).

Die Grenzkosten der zunehmenden Energieeffizienz von Flachdacherneuerungen sind im Vergleich zu anderen Bauelementen relativ tief. Die ersten 0.1 W/m²K U-Wert-Verbesserung kosten sowohl beim EFH wie beim MFH nicht mehr als 10 Rp/kWh$_{NE}$ brutto und das sehr tiefe U-Wert-Niveau von 0.1 W/m²K kann mit Brutto-Grenzkosten (Durchschnittskostenansatz) zu rund 20 Rp/kWh$_{NE}$ erreicht werden.

[1] In den Fällen, in denen Schaumglas aus bautechnischen oder anderen Gründen tatsächlich in der gesamten Dämmstärke benötigt würde, wären die Grenzkosten entsprechend höher.

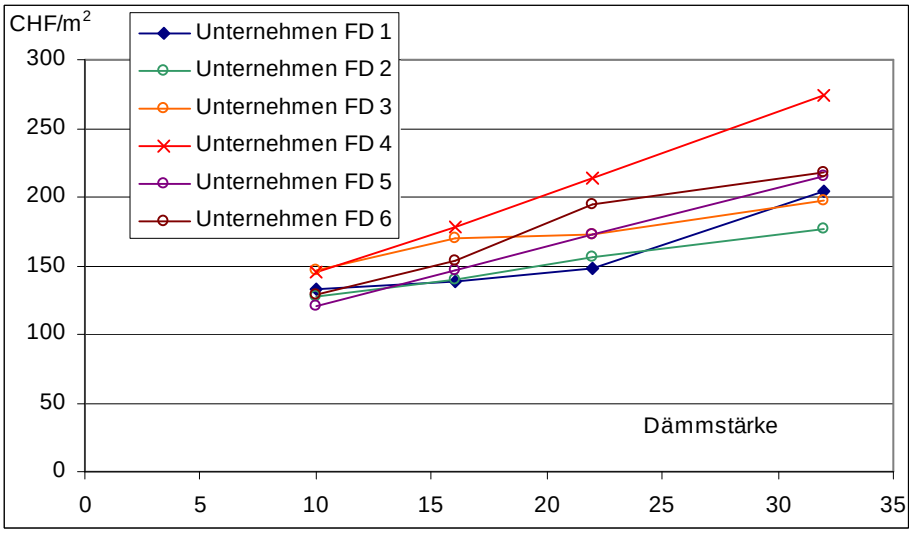
Tabelle 4.3-41 Investitionskosten (CHF/m²) und Brutto-Grenzkosten (Durchschnittskostenansatz, CHF/kWh$_{NE}$) der zunehmenden Energieeffizienz von Flachdacherneuerungen (Ausgangslage schadhafte Abdichtung ist zu ersetzen)

EFH			MFH			
U-Wert*	Investitionsmehrkosten	Grenzkosten dr=0.035	U-Wert*	Investitionsmehrkosten	Grenzkosten dr=0.035	Grenzkosten dr=0.055
W/m²K	CHF/m²*	CHF/kWh$_{NE}$	W/m²K	CHF/m²*	CHF/kWh$_{NE}$	CHF/kWh$_{NE}$
0.40	0		0.35	0		
0.30	15	0.07	0.25	11	0.05	0.07
0.24	35	0.10	0.21	22	0.08	0.10
0.18	62	0.13	0.16	45	0.11	0.16
0.14	90	0.17	0.13	65	0.14	0.20
0.11	120	0.20	0.10	90	0.17	0.24
*Energietische und kostenseitige Berücksichtigung des Dachrandes: EFH 0.4m/m², MFH 0.18 m/m²						

Quelle Erhebungen bei SVDW-Mitgliedfirmen und Berechnungen CEPE

Fall 2: Plusdach

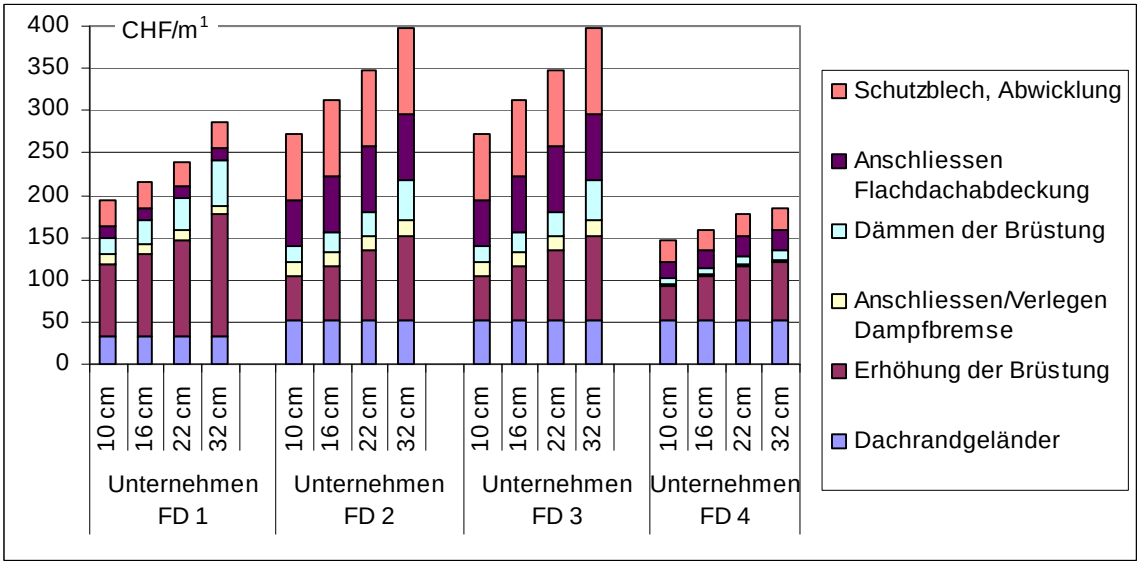
Wie im obigen Fall wird zwischen flächen- und längenbasierten Preisen bzw. Kosten unterschieden.



Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

Abbildung 4.3-58 Plusdach, nur Flächenpreise, ohne Dachranderneuerung, CHF/m²

Zu den Flächenpreisen gemäss Abbildung 4.3-58 die längenbasierten Preiselemente gemäss Abbildung 4.3-59zu addieren, um die totalen, auf die Fläche umgelegten Kosten zu erhalten Abbildung 4.3-60 am Beispiel der EFH für 0.4 m Dachrandlänge pro m2 Dachfläche).



Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

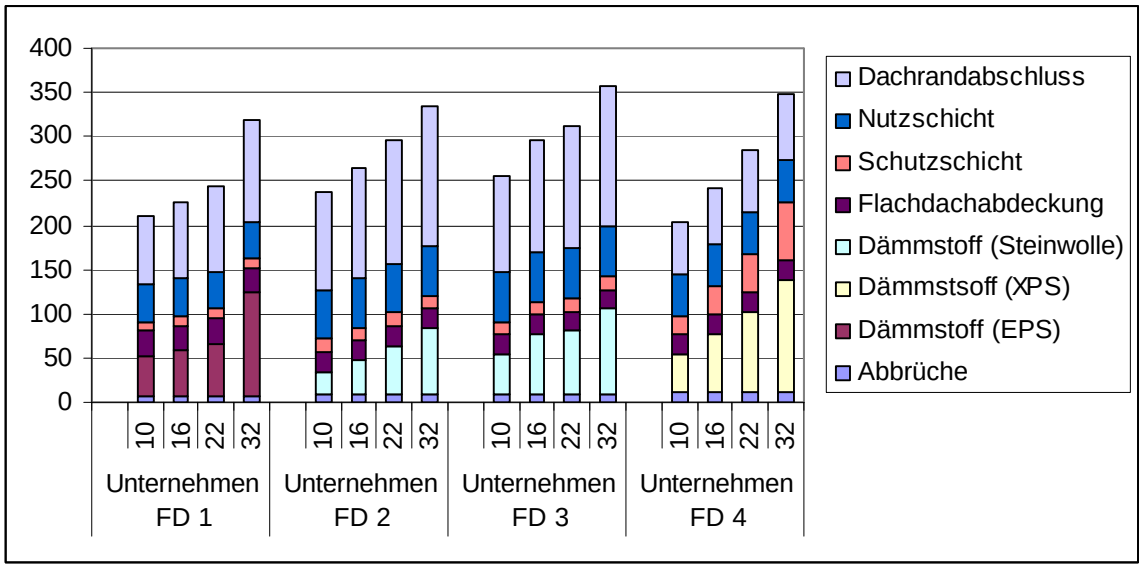
Abbildung 4.3-59 Kostenstruktur der Dachranderneuerung bei Plusdächern (längenbasierte Kosten), CHF/m

Die längenbasierten Kosten für den Dachrandabschluss und das Anschliessen an die Wand können sich erhöhen, falls die Bauabläufe nicht aufeinander abgestimmt sind, d.h. falls Wand und Flachdach nicht gleichzeitig gedämmt werden, und zwar um 80 CHF/m (bei 10 cm Dämmstärke), 90 CHF/m (16 cm), 100 CHF/m (22 cm) bzw. 110 CHF/m (32 cm).

Die gesamten Kosten pro m² erhöhen sich aufgrund der Kosten der Dachranderneuerung beträchtlich. Bei 0.4 m Dachrand pro m² Dachfläche (EFH) ergeben Kosten von 200 bis 300 CHF/m einen auf die Fläche umgelegten Zuschlag von 80 bis 120 CHF/m².

Das Kostenniveau ist beim Plusdach vergleichbar wie bei der kompletten Erneuerungen, d.h. beim Abbrechen der bestehenden Abdichtung/WD, siehe dazu die Abbildung 4.3-53 weiter oben.

Wie bei den übrigen Bauteilen gibt die Kostenstruktur Aufschluss über die Ursachen der Mehr-Investitionskosten in Funktion der Dämmstärke. Die Kosten des Dämmmaterials und die Kosten des Dachrandes sind die bestimmenden Faktoren. Zur Beurteilung der auf die Energie bezogenen spezifischen Kosten sind wiederum die Ausgangslage bzw. die Massnahmen in Randbereich bzw. an der Fassade mitentscheidend. Bei der energetischen Wirkung ist beim Plusdach ausserdem die bestehende WD miteinzubeziehen, d.h. die gleiche Dämmstärke wird hier eine geringere energetische Wirkung entfalten.



Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

Abbildung 4.3-60 Kostenstruktur der Flächenpreise (inkl. längenbasierte Kosten für den Dachrand) bei Flachdacherneuerungen (Plusdach), CHF/m²

Bei den Flachdächern der Bauperioden, in denen bereits Wärmedämmungen üblich waren, sind Annahmen über deren Dämmstärken zu treffen (siehe Tabelle 4.3-42), wenn das Plusdachverfahren zu Anwendung kommt (d.h. wenn die neue Wärmedämmung auf die alte aufgedoppelt werden kann; in welchen Fällen dies möglich ist, muss in diesem Fall mehr als in allen bisher erwähnten eine Fachperson entscheiden).

Tabelle 4.3-42 Annahmen zu bestehenden Wärmedämmungen von Flachdächern als Ausgangslage (Referenz) bei Erneuerungen nach dem Plusdach-Verfahren

Bauperiode	Vor 1960	1961-1975	1976-1985	1986-2000
Dämmstärke	3 cm	5 cm	9 cm	12 cm
Wärmeleitfähigkeit λ (W/mK)	0.05	0.045	0.045	0.04

4.3.9 Kellerdecke, Bodenplatte

Die Dämmtechnik der Kellerdeckendämmung ist vergleichbar mit der einen Variante der Estrichbodendämmung: Unterkonstruktion, Dämmplatten oder Schüttdämmstoff plus Abdeckung (Spanplatten, Riemeboden bzw. Täfer oder Gipsplatte). Wie beim Anschluss des Estrichbodens an die Aussenwand können auch beim Anschluss der Kellerdecke an die Aussenwand (Sockel) Wärmebrücken auftreten. Diese sind unter Umständen schwieriger zu verhindern, insbesondere, wenn das Kellerdeckenniveau unter Terrain liegt und die Dämmung des Sockels mit Tiefbauarbeiten verbunden ist. Es ist damit zu rechnen, dass die Grenzkosten der Wärmedämmung aufgrund dieser Parallelen und Unterschiede ähnlich oder höher sind und dass dem erreichbaren energetischen Level (wegen der linearen Wärmeverluste im Sockelbereich) ebenfalls Grenzen gesetzt sind, auch wenn die Kellerdecke massiv gedämmt würde. Bei der Kellerdecke kommt ausserdem einschränkend dazu, dass markante Dämmstärken zunehmend die Nutzhöhe des Kellerraums einschränkt. Verglichen mit der Estrichbodendämmung ist damit zu rechnen, dass sich bei der Kellerdeckendämmung vermehrt vorhandenen Raumunterteilungen (Kellerwände) verteuernd und energetisch potentialmindernd auswirken.

4.3.10 Wärmebrücken

Der Einfluss der Wärmebrücken auf die Grenzkosten bzw. die Grenzkosten der Wärmebrückenerneuerung sind für die meisten Fälle in den einzelnen Kapiteln behandelt (Fensterleibung, Dachrand, durchlaufender Deckenanschluss, Sockel etc.). An dieser Stelle wird deshalb nur kurz auf die Wärmebrücken von Balkonen und anderer durchgehender Bauteile eingegangen (z.B. Vordächer über Türen).

Die Wärmebrücken aufgrund durchgehender Betonplatten kann zwar theoretisch mittels wärmetechnischer „Add-on"-Massnahmen verbessert werden (Anbringen einer Wärmedämmung unterhalb, oberhalb und an der Stirnseite der Balkonplatte). Dies ist jedoch mit unverhältnismässig hohen Grenzkosten verbunden, siehe auch Wärmebrückenkatalog 3 (SIA, 1993). Die darin aufgeführten Fallbeispiele sind von der Grössenordnung der Grenzkosten immer noch richtig, auch wenn die Daten aus dem Jahr 1993 stammen. Balkonwärmebrücken könnten ausserdem mittels konstruktivem Eingriff erneuert werden. Dieser ist aber mit so hohen Kosten verbunden, dass er nur realisiert wird, wenn er im Rahmen eines anderen Nutzens realisiert werden kann, insbesondere bei einem Ersatz des alten durch einen neuen, grösseren Balkon.

Beim Ersatz von Balkonen ist der energetisch Aspekt höchstens zweitrangig. Die Verminderung des Risikos von bauphysikalischen Schäden (kalte Stellen und damit verbundene Feuchtigkeitsschäden) und vor allem der Mehrnutzen für Mieterinnen und Gebäudebesitzer steht an erster Stelle der Motivation für Balkonabbrüche und den Ersatz durch solche (meist) grösserer Fläche.

Die Reduktion der energetischen Verluste ist dann als Co-Benefit anzusehen. Mittels der Methode der anrechenbaren Kosten kann ermittelt werden, welcher Teil der Investitionskosten eines neuen Balkons der energetischen Komponente zuzurechnen ist. Der restliche Teil, welcher den Mehrnutzen aufgrund der grösseren Balkonfläche oder durch verminderte Bauschadensrisiken gegenüber zu stellen ist, wird dadurch geringer und die Rentabilität der Massnahme entsprechend grösser, als wenn der Effekt in der Kosten-Nutzenrechnung vernachlässigt worden wäre. Der Effekt ist absolut gesehen allerdings eher klein, wie die Rechnung in Tabelle 4.3-43 zeigt.

$$\text{Nettokosten}_{\text{Balkon}} = \text{Gesamte Kosten}_{\text{Balkon}} - \text{anrechenbare Kosten}_{\text{Energiebedarfsreduktion}}$$

Die der Energie anrechenbaren Kosten sind die Kosten des vermiedenen Heizenergieverbrauchs und liegen in der folgenden Grössenordnung gemäss Tabelle 4.3-43. Bei z.B. 5 m bis 10 m Balkonlänge pro Wohnung ergibt das im besten Fall rund 30 CHF/a bis 60 CHF/a.

Tabelle 4.3-43 Anrechenbare Jahres- und Investitionskosten aufgrund vermiedenen Heizwärmebedarfskosten durch Balkonersatze.

	Psi Vorher	Heizwärme-bedarfs-reduktion	Vermiedene Wärmekosten = anrechenbare Jahreskosten		Anrechenbare Investitions-kosten (mit Wärmekosten tief)	
			tief	hoch	Annuität mit Realzins 3.5%	Annuität mit Realzins 5.5%
	W/mK	MJ/m.a	CHF/m.a	CHF/m.a	CHF/m	CHF/m
Durchgehend betoniert mit Baustahlkorbeinlage	0.7	208	4.0	5.8	86	65
Mit gedämmter Baustahlkorbeinlage	0.5	144	2.8	4.0	60	45
Durchgehend betoniert mit Edelstahlkorbeinlage	0.5	144	2.8	4.0	60	45
Mit gedämmter Edel-stahlkorbeinlage (4cm)	0.3	80	1.6	2.2	33	25
Mit gedämmter Edel-stahlkorbeinlage (8 cm)	0.2	48	0.9	1.3	20	15
Annahme Wärmeverlust nach Balkonersatz (Verankerung) 0.05 W/mK						

Quellen: SIA Doku 0170, Berechnungen mit Eurokobra (CEPE)

Da anrechenbaren Investitionskosten sind mit den typischen Investitionskosten eines Balkonersatz zu vergleichen.

4.3.11 Zusammenfassung der Grenzkosten für die verschiedenen Investitionsmassnahmen

Für verschiedenste Erneuerungsvarianten und Ausgangslagen (Gebäudebauperioden) sind dn Abbildung 4.3-61 die Brutto-Grenzkosten (Durchschnittskostenansatz) in Funktion des Bruttonutzens auf Bauteilebene, also in Funktion der Brutto-Heizwärmebedarfsreduktion pro m² Bauteil zusammengestellt. Sichtbar wird dadurch folgendes:

- Die tiefsten Grenzkosten (im Durchschnittskostenansatz) und gleichzeitig die grösste erreichbare Heizwärmebedarfsreduktion pro m2 Bauteil sind bei den Referenzfällen der Instandsetzung zu verzeichnen. Eine energetische Erneuerung, sei es im Wand-, Dach- oder Estrichbodenbereich statt einer blossen (nicht-energetischen) Instandsetzung (Fassadenanstrich, Unterdacherneuerung, nichts-tun beim Estrichboden) ist selbst bei moderat angesetzten Wärmepreisen als wirtschaftlich zu bezeichnen.
- Der Verlauf der Durchschnittskosten ist meistens sehr flach und das Kostenoptimum ist häufig bei Dämmstärken zwischen 14 cm und beinahe 20 cm.
- Für Bauteile mit tieferem Ausgangs-U-Wert, z.B. solche mit bereits bestehender Wärmedämmung aus der Bauperiode nach 1975, sind die Grenzkosten (Durchschnittskostenansatz) höher und die erreichbare Heizwärmebedarfsreduktion kleiner. Vorteilhaft ist, wenn die bestehende Wärmedämmung in die Erneuerungsmassnahme integriert werden kann, z.B. beim Plusdach oder bei der hinterlüfteten Fassade.

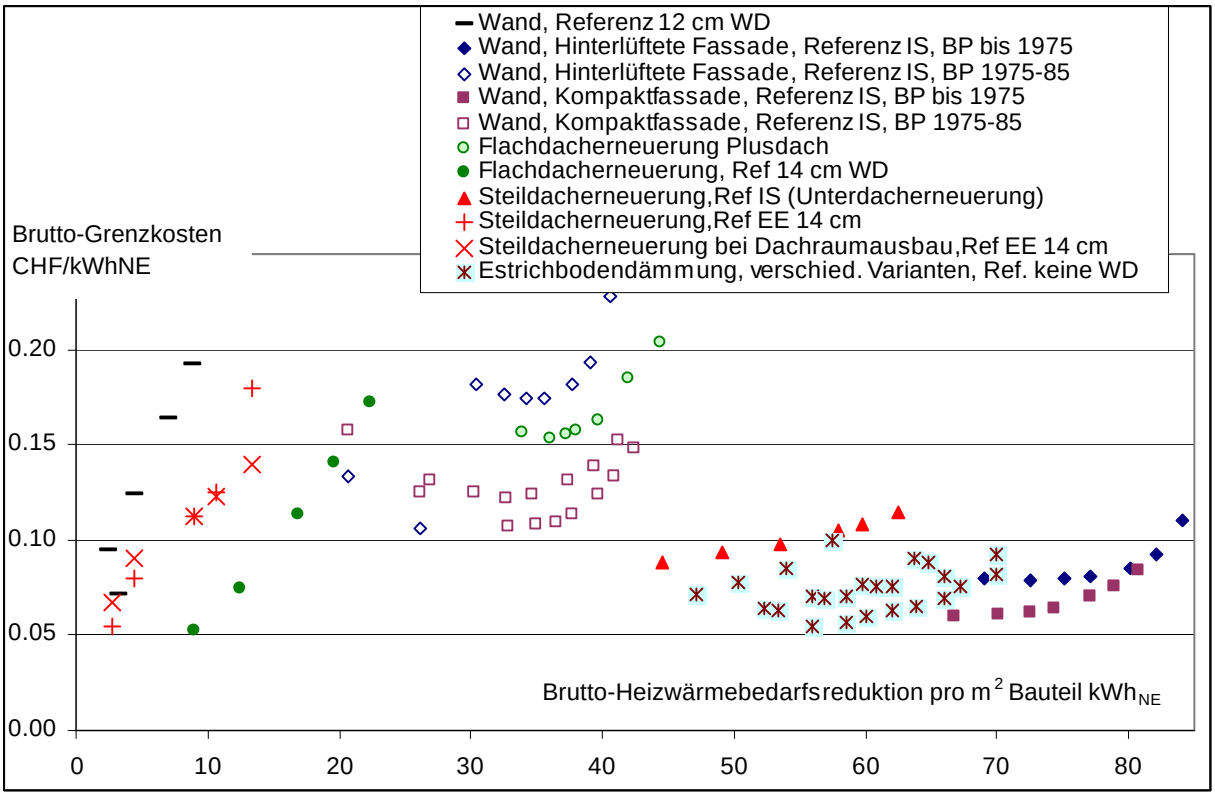


Abbildung 4.3-61 Zusammenfassende Darstellung der Grenzkosten (Durchschnittskostenansatz) für Erneuerungen (Referenzfall: heute übliche energetische Erneuerungen)

- Referenzfall energetische Erneuerung: Die Durchschnittskosten einer Dämmstärkenerhöhung sind zu Beginn (wenige cm mehr) leicht höher als beim Referenzfall der

Instandsetzung, beginnen dann aber stärker anzusteigen. Ausserdem ist die erreichbare Heizwärmebedarfsreduktion naturgemäss wesentlich kleiner, weil das Bauteil schon im Referenzfall einen relativ guten U-Wert aufweist.

(Anmerkung zur Interpretation der Abbildung: der „erste" Datenpunkt stellt beim Referenzfall „Energetische Erneuerung" die Grenzkosten (Durchschnittskosten) „gegen unten" dar, also z.B. nur 10 cm statt 12 cm. Dies stellen gleichzeitig die Grenzkosten von 10 cm auf 12 cm dar und zeigen damit in diesem Bereich die Sensitivität gegenüber der Annahme zur Referenzdämmstärke auf).

4.3.12 Lüftung, Luftdichtigkeit der Gebäudehülle

Hervorgerufen durch die Impulse und Bestrebungen des Minergie-Labels sind Lüftungssysteme auch im Wohnungsbau verstärkt zum Thema geworden. Dabei ist zwischen verschiedenen Systemen zu unterscheiden, welche jeweils ihre spezifischen Vor- und Nachteile haben und deshalb auch durch ihre geeigneten Anwendungsfelder definiert sind. Sie erfüllen gleichzeitig eine mehrdimensionale Funktionalität, die je nach System und Anwendungsgebiet (Neubau oder bestehende Gebäude) unterschiedlich vollständig erfüllt werden können. Im Bereich Wohngebäude erfüllten Lüftungssysteme folgende Funktionalitäten (siehe auch Themenblatt Minergie (Minergie, 2001a)):

- **Luftwechsel:** Per Definition ist die Gewährleistung des Luftwechsels die Basisfunktion einer Lüftungsanlage. Jeder Raum sollte mit der aus hygienischer Sicht optimalen Frischluftmenge versorgt. Diese richtet sich nicht zuletzt nach der Luftfeuchtigkeit, welche ausgeglichen sein sollte. Dieser Aspekt wird umso wichtiger, je dichter die Gebäude gebaut werden bzw. je dichter sie im Zuge einer Erneuerung werden. Dies ist insbesondere in Neubauten und in Gebäuden mit einer umfassenden Gebäudehüllenerneuerung und neuen Fenstern der Fall. Ohne Lüftungssysteme wären in diesen Fällen die Bewohner vor hohe Anforderungen an das Lüftungsverhalten gestellt. Für die Gebäudebesitzer vermindern entsprechend geregelte und unterhaltende Lüftungssysteme gleichzeitig das Risiko von Feuchtigkeitsschäden.
- **Luftqualität:** Die Aussenluft wird nach Möglichkeit gefiltert. Schadstoffe im Gebäude (Wohngifte, Tabakrauch, Radon) werden kontinuierlich abgeführt.
- **Thermischer Komfort:** Der gezielte Luftaustausch verhindert Zugerscheinungen und ein Auskühlen der Räume.
- **Schallschutz:** Das Lüftungssystem schützt vor Aussenlärm. Schalldämpfer sorgen dafür, dass die Ventilatoren nicht stören.
- **Energieverbrauch:** Die Wärmeverluste beim Lüften werden auf ein Minimum beschränkt. Einige Systeme gewinnen aus der Abluft Wärme zu Heizzwecken oder zur Wassererwärmung zurück.

Die ersten Punkte sind insbesondere auch für die Co-Benefits von Bedeutung, die im Kapitel 4.6 behandelt werden.

Es kann zwischen folgenden Systemen unterschieden werden:

- Komfortlüftung mit Wärmerückgewinnung
- Abluftanlage mit Aussenluftdurchlässen
- Einzelraum-Komfortlüftung
- Komfortlüftung mit Abluftwärmepumpe
- Abluftanlage mit Wärmepumpe
- Automatische Fensterlüftung

a) Kosten von Lüftungsanlagen

Für die Ermittlung der Kosten und der energetischen Nutzen der Lüftungsanlagen konnte die HTA Luzern für eine Projektmitarbeit gewonnen werden. Diese verfügt über eine breite Erfahrung im Bereich Haustechnik und insbesondere im Bereich Lüftungsanlagen, jeweils mit auch einem starken Bezug zur Praxis. Dies ermöglichte es, nicht nur die Kosten der Lüftungsanlagen für verschiedene typische Fälle praxisnah zu spezifizieren, sondern

gleichzeitig die jeweils beste Eignung der verschiedenen Lüftungsanlagetypen für die unterschiedlichen Ausgangssituationen im Gebäudebestand sowie das jeweilige Potential abzuschätzen.

Um gesamtschweizerisch gültige Aussagen machen zu können, wird zunächst eine Berechnung der durchschnittlichen EBF und der Zimmerzahl der Wohnungen notwendig. Die EBF können für die verschiedenen Wohnungsgrössen (Zimmerzahl) anhand der Wohnungszählung 1990 berechnet werden. Folgende Durchschnitts-EBF kommen in den folgenden Berechnungen zur Anwendung:

Tabelle 4.3-44 Durchschnittliche EBF pro Wohnung für die verschiedenen Wohnungsgrössenklassen des Gebäudebestandes 1990

Bis 2 1/2Zimmer	3 u. 3 1/2 Zimmer	4 u. 4 1/2 Zimmer	Mehr als 5 Zimmer	Gewichtetes Mittel	EFH
64	90	115	132	97	170

Quelle BFS 1996

Tabelle 4.3-45 Investitionskosten CHF von Lüftungsanlagen mit WRG für bestehende MFH und EFH unter den baulichen Voraussetzung gemäss Tabelle 4.3-46

	Komfortlüftung zentral	Komfortlüftung pro Wohnung	Einzelraum-Komfortlüftung
Grundkosten pro Wohnung, Total	**7800**	**9700**	**2800**
Anteil Gerät	2000	4000	
Abluft Bad und Küche			2000
Anteil Steuerung	300	300	-
Schalldämpfer, 'Zentrale'	1000	800	-
Aussenluft, Fortluft	2000	1600	-
Projektierung, Administration	1500	1500 *	500 *
Bauseitig (Sanitär, Elektriker, Bau)	1000	1500	300
Variabel pro Zimmer, Total	**1500**	**900**	**2800**
Gerät			1500
Montage			400
Leitungen inkl. Verbindungsstücke	400	400	
Auslässe	100	100	
Projektierung, Administration	100	100	200
Bauseitig (Sanitär, Elektriker, Bau)		300	700
Verteilung über Decke	300		
Verteilung über Fassade	600		
* Zuschlag für EFH		2000	500

Quelle H. Huber, HTA Luzern

Die Investitionskosten werden vielmehr durch die Anzahl der zu belüftenden Zimmer, den Anlagetyp und den baulichen Voraussetzungen bestimmt. Die Investitionskosten sind relativ

wenig von der Gebäudedimension abhängig; der grösste Anteil der Kostenpunkte Aussenluft / Fortluft sowie Leitungen innerhalb der Wohnungen betrifft nicht die längenabhängigen Leitungen, sondern die Anzahl Verbindungsstücke, Abzweiger etc.

Für Neubauten sind die bauseitigen Kosten (Sanitär, Elektriker und Bau) rund 25% tiefer anzusetzen. Die Investitionskosten in Tabelle 4.3-45 gelten unter der Annahme, dass gewisse bauliche Voraussetzungen erfüllt sind, siehe Tabelle 4.3-46. Sind diese nicht erfüllt ist mit Mehrkosten zu rechnen, die in der gleichen Tabelle aufgeführt sind.

Tabelle 4.3-46 Bauliche Voraussetzen für die Kosten gemäss Tabelle 4.3-45 und Mehrkosten, falls die baulichen Voraussetzungen nicht erfüllt sind

	Bauliche Voraussetzungen	Mehrkosten, falls nicht erfüllt
Komfortlüftung zentral	- Platz für Lüftungsgerät im Unter- oder Dachgeschoss, grosszügige Steigzonen mindestens im Bad. - Lichte Raumhöhe min. 2.3 m (vor Einbau der Lüftung). Gleichzeitige Sanierung von Bad und Küche beim Einbau der Lüftung	ca. CHF. 3000 pro Wohnung
Komfortlüftung pro Wohnung	- Platz für Lüftungsgerät in der Wohnung: z.B. Abstellraum, Schrank im Korridor - Lichte Raumhöhe min. 2.3 m (vor Einbau der Lüftung). - Gleichzeitige Sanierung von Bad und Küche beim Einbau der Lüftung.	ca. CHF. 3000 pro Wohnung ca. CHF. 4000 pro EFH
Einzelraum-Komfortlüftung	Gleichzeitige Sanierung von Bad und Küche beim Einbau der Lüftung	ca. CHF. 2000 pro Wohnung ca. CHF. 3000 pro EFH

Quelle H. Huber, HTA Luzern

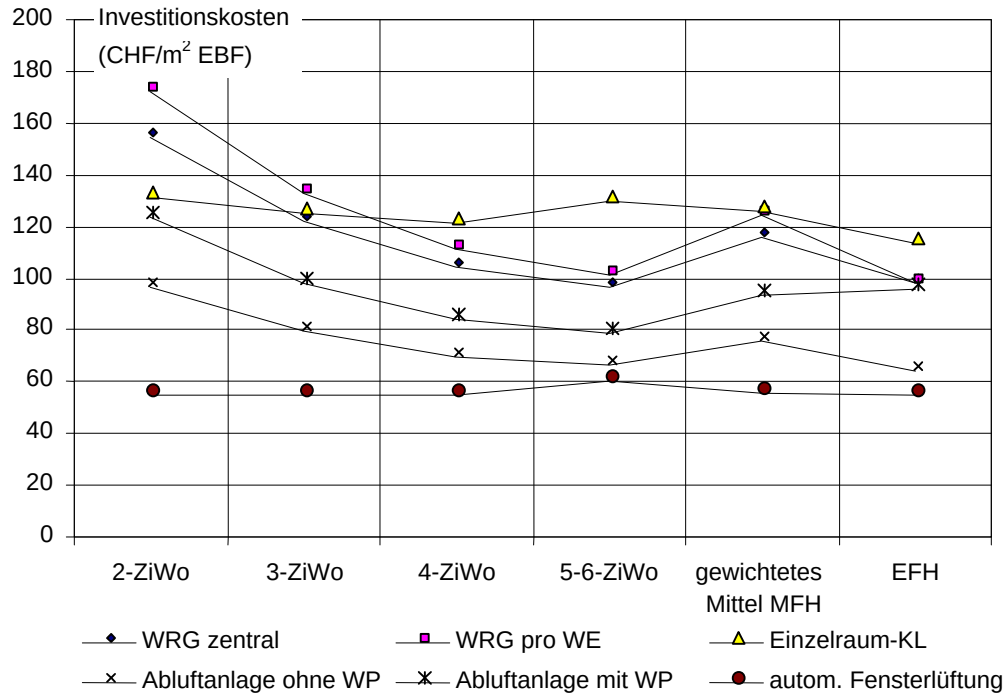
Erfolgt die Verteilung über die Fassade, muss gleichzeitig eine Aussenwärmdämmung von mindestens 16 cm angebracht werden.

Tabelle 4.3-47 Investitionskosten pro EFH bzw. pro MFH-Wohnung (gewichtetes Mittel: 3.2 Zimmer pro Wohnung)

	Neubau		Erneuerung	
	EFH	MFH	EFH	MFH
Komfortlüftung zentral, mit WRG, Verteilung über Decke		10'200		10'700
Komfortlüftung zentral, mit WRG Verteilung über Fassade		10'900		11'600
Komfortlüftung pro Wg, mit WRG	15'900	12'000	16'700	12'600
Einzelraum-Komfortlüftung mit WRG	18'100	11'100	19'300	11'700

Quelle H. Huber, HTA Luzern, Berechnungen CEPE

Zum Vergleich: Im Neubau sind konventionelle WC- und Bad-Abluftanlagen heutiger Baustandard. Die Investitionskosten betragen rund CHF 1000.- bei MFH und CHF 1500.- für das EFH.



Quelle HTA Luzern, HBT

Abbildung 4.3-62 Spezifische Investitionskosten von Lüftungsanlagen für EFH und für MFH für verschiedene Wohnungsgrösssen CHF/m^2_{EBF}

Die Investitionskosten für EFH sind deshalb tiefer als in MFH, weil die Dimensionierung der Lüftungsanlagen proportional zur Anzahl Zimmer und zur Personenbelegung erfolgt und nicht anhand des Nettovolumens. Der Flächenbedarf pro Person ist in EFH höher als in MFH, woraus tiefere flächenspezifische Investitionskosten pro m^2 EBF resultieren.

Unter Berücksichtigung einer wirtschaftlichen Nutzungsdauer von 25 Jahren ergeben sich folgende Kapitalkosten gemäss Tabelle 4.3-48. Dabei wird sichtbar, dass die wesentlich höheren Investitionskosten der EFH durch den tieferen Realzinssatz auf der Ebene der Kapitalkosten beinahe kompensiert werden.

Die Kapitalkosten sind auch im Vergleich zu den in Neubau zum Standard gehörenden konventionellen WC- und Bad-Abluftanlagen zu sehen. Diese Kapitalkosten betragen rund 75 CHF/Jahr bei MFH und 91 CHF/Jahr für das EFH.

Nebst den Kapitalkosten fallen bei Lüftungsanlagen Unterhaltkosten an, dies im Unterschied zu den meisten bis dahin behandelten baulichen Energie-Effizienzinvestitionen. Die Unterhaltskosten umfassen das regelmässige Auswechseln der Luftfilter sowie, da es sich um Anlagen mit bewegten Teilen handelt, um Reparatur- und Wartungskosten.

Tabelle 4.3-48 Kapitalkosten pro EFH bzw. pro Durchschnittswohnung, CHF/a, gerundet

	Neubau		Erneuerung	
	EFH	MFH	EFH	MFH
Komfortlüftung zentral, mit WRG, Verteilung über Decke		760		800
Komfortlüftung zentral, mit WRG Verteilung über Fassade		810		860
Komfortlüftung pro Wg, mit WRG	960	890	1010	940
Einzelraum-Komfortlüftung mit WRG	1100	830	1170	870

Quelle Berechnungen CEPE aufgrund der obigen Tabellen

Tabelle 4.3-49 Unterhaltskosten, CHF/a und EFH bzw. Durchschnittswohnung

	Neubau		Erneuerung	
	EFH	MFH	EFH	MFH
Komfortlüftung zentral, mit WRG, Verteilung über Decke		130		130
Komfortlüftung zentral, mit WRG, Verteilung über Fassade		130		130
Komfortlüftung pro Wg, mit WRG	200	160	200	160
Einzelraum-Komfortlüftung mit WRG	370	220	370	220

Quelle H. Huber, HTA Luzern

Zum Vergleich: Die Unterhaltskosten der konventionellen WC- und Bad-Abluftanlagen liegen bei rund CHF 30.-/Jahr.

b) Energetische Grenzkosten der Lüftungsanlagen

Wie einleitend angemerkt, weisen die Lüftungsanlagen mehr als nur energetische Nutzen auf. Oft ist es sogar so, dass die weiteren Nutzen als Hauptnutzen angesehen werden bzw. die Motivation für einen Investitionsentscheid in Lüftungsanlagen ausmachen. Der energetische Nutzen wäre dann als Nebennutzen zu betrachten. Die nicht-energetischen Nutzen sind jedoch sehr schwierig zu ökonomisch zu quantifizieren[1]. Einige Anhaltspunkte dazu sind im Kapitel 4.6 zu finden. Beispielhaft kann die Vermeidung von Bauschäden bzw. die Verminderung dessen Risikos als Motivation bzw. Nutzen angeführt werden. Geschätzte Grössenordnung: CHF 100.- pro Wohnung und Jahr.

Aufgrund der empirischen Lücken bzgl. der nicht-energetischen Nutzen muss als methodischem Behelf mit der Obergrenze der energetischen Grenzkosten Vorlieb genommen werden. Diese werden berechnet, indem für die nicht-energetischen Nutzen zunächst 0 CHF eingesetzt wird.

[1] Das Programm EWG des Bundesamts für Energie hat dazu ein weiteres Projekt ausgeschrieben, um die Gesamtnutzen des energie-effizienten Bauens und insbesondere auch der Lüftungsanlagen zu quantifizieren.

Unter Berücksichtigung der Unterhaltskosten gemäss Tabelle 4.3-49 und der Kapitalkosten gemäss Tabelle 4.3-48 sowie der in Abzug zu bringenden Kosten für die Referenzlüftung (WC- und Bad-Abluftanlage, nur beim Neubau) und der Reduktion der Heizwärmebedarf gemäss Tabelle 4.2-13 ergeben sich für die verschiedenen Situationen die Grenzkosten der Nutzenergie-Effizienzgewinne (=Heizwärmebedarfsreduktion) gemäss Tabelle 4.3-50 (Referenzfall tiefe Luftwechselraten) bzw Tabelle 4.3-51 (Referenzfall hohe Luftwechselraten). Die beiden Fälle „Verteilung über die Decke" bzw. „Verteilung über die Fassade" liegen kostenmässig sehr nahe beieinander, weshalb sie gemittelt wurden.

Tabelle 4.3-50 Spezifische Grenzkosten der Nutzenergiereduktion CHF/kWh$_{NE}$ von Lüftungsanlagen, ohne Berücksichtigung der nicht-energetischen Nutzen, Referenzfall tiefe Luftwechselraten gemäss Tabelle 4.2-13.

Ausgangslage	Neubau EFH	Neubau MFH	Bestehende EFH, alte Fenster		Bestehende EFH, neue Fenster (nach 1990)	Bestehende MFH, alte Fenster		Bestehende MFH, neue Fenster (nach 1990)
gleichzeitige Massnahme	-	-	keine	neue Fenster	-	keine	neue Fenster	-
Komfortlüftung zentral, mit WRG		0.63				0.44	0.36	0.46
Komfortlüftung pro Wg, mit WRG	0.44	0.70	0.49	0.32	0.44	0.48	0.40	0.51
Einzelraum-Komfortlüftung	*1.16*	*1.45*	0.90	0.59	1.00	0.70	0.53	0.74

Quelle Berechnungen CEPE aufgrund der obigen Tabellen

Die Streubreite der spezifischen Bruttogrenzkosten, welche durch unterschiedliche Ausgangslagen und vor allem durch die Unsicherheit bei der Definition des Referenzfalls entsteht, ist markant, wie der Vergleich innerhalb und zwischen den Tabelle 4.3-50 und Tabelle 4.3-51 zeigt. Den Werten der Tabelle 4.3-50 liegt eine tiefe Luftwechselrate im Referenzfall zugrunde,

Ist der Volumenstrom, der nicht über die Anlage fliesst, grösser als im 4.2.6 angenommen oder werden die Anlagen in den Gebäuden mit hohem Referenzwert mit grösserem Volumenstrom „gefahren", so ist Effizienzgewinn kleiner als in Tabelle 4.2-14 zugrunde gelegt und die Bruttogrenzkosten steigen gegenüber Tabelle 4.3-51 an. Weil der absolute Effizienzgewinn (gemessen im MJ/m^{2}a) aber mit grosser Wahrscheinlichkeit mindestens so gross ausfallen wird wie im Referenzfall „tiefe Luftwechsel", dürften die Grenzkosten nicht über die Werte gemäss Tabelle 4.3-50 steigen. Werden evtl. Mehrkosten für bauliche Massnahmen notwendig, um die Luftdichtheit des Gebäudes zu verbessern und damit den Anteil des Volumenstroms, der nicht über die Anlage läuft, in Grenzen zu halten, gelten ungefähr Grenzkosten gemäss Tabelle D.1-2, sofern die Mehrkosten in der selben Grössenordnung liegen wie diejenigen in Tabelle 4.3-45.

Am kleinsten ist die Streuung im Bereich der Neubauten, weil hier davon ausgegangen werden kann, dass der Referenzfall etwas präziser definiert werden kann. Bei den EFH sind Bruttogrenzkosten ab rund 35 Rp/kWh$_{NE}$ festzustellen und bei den MFH ab rund 42 Rp/kWh$_{NE}$, dies jeweils für Gebäude- oder Wohnungskomfortanlagen. Weil die baulichen Voraussetzungen für diese beim Neubau gegeben sind bzw. bei der Planung geschaffen werden können, sind Einzelraumanlagen in Neubau kaum ein Thema (deshalb in kursiv

gesetzt). Die tabellierten Werte stellen wie oben erläutert eine Obergrenze dar, weil den Kosten mangels Datengrundlage keine weiteren Nutzen zugeordnet wurden.

Die spezifischen Bruttogrenzkosten liegen bei der Gebäudeerneuerung teilweise tiefer, nämlich zwischen rund 20 Rp/kWh$_{NE}$ (Ausgangslage von einem hoher Luftwechsel) und 40 Rp/kWh$_{NE}$, wenn gleichzeitig die Fenster ersetzt. Wird der Fall des gleichzeitigen Fensterwechsel ausser Betracht gelassen, liegen die Kosten eher bei 30 Rp/kWh$_{NE}$, bis 50 Rp/kWh$_{NE}$. Diese Werte gelten, solange die baulichen Voraussetzungen für eine Gebäude- oder Wohnungskomfortanlage gemäss Tabelle 4.3-45 erfüllt sind. Ist dies nicht der Fall, so sind die spezifisch teureren Einzelraumanlagen oder die Mehrkosten gemäss der gleichen Tabelle zu berücksichtigen, siehe dazu Tabelle D.1-1 und Tabelle D.1-2 im Anhang, wodurch sich die spezifischen Grenzkosten um 6 Rp/kWh$_{NE}$ bis 10 Rp/kWh$_{NE}$ erhöhen.

Tabelle 4.3-51 Spezifische Grenzkosten der Nutzenergiereduktion CHF/kWh$_{NE}$ von Lüftungsanlagen, ohne Berücksichtigung der nicht-energetischen Nutzen, Referenzfall hohe Luftwechselraten gemäss Tabelle 4.2-14

Ausgangslage	Neubau EFH	Neubau MFH	Bestehende EFH, alte Fenster		Bestehende EFH, neue Fenster (nach 1990)	Bestehende MFH, alte Fenster		Bestehende MFH, neue Fenster (nach 1990)
gleichzeitige Massnahme	-	-	keine	neue Fenster	-	keine	neue Fenster	-
Komfortlüftung zentral, mit WRG		0.42				0.24	0.19	0.32
Komfortlüftung pro Wg, mit WRG	0.35	0.48	0.27	0.18	0.28	0.27	0.22	0.36
Einzelraum-Komfortlüftung	*0.77*	*0.74*	0.41	0.28	0.50	0.33	0.25	0.46

Quelle Berechnungen CEPE aufgrund der obigen Tabellen

Die Grenzkosten sind bei Neubauten höher, weil der Luftwechsel verglichen mit den bestehenden Gebäuden im Referenzfall tiefer liegt und demzufolge der Energieeffizienzgewinn ebenfalls tiefer liegt (siehe dazu Tabelle 4.2-13) im Kapitel 4.2.6, der gegenläufige Effekt der Mehrkosten der Gebäudeerneuerung gegenüber dem Neubau aber weit geringer ist. Rechnerisch am höchsten liegen die Grenzkosten der Einzelraum-Anlagen. Diese bleiben dennoch eine attraktive Möglichkeit für die Fälle, bei denen die baulichen Voraussetzungen für eine Gebäude- oder Wohnungs-Komfortlüftung nicht gegeben sind oder falls nur die wichtigsten Räume mit einer Lüftungsanlage ausgestattet werden soll (z.B. lärmexponierte und/oder solche mit hoher Aufenthaltswahrscheinlichkeit, Schlafräume etc.). Rechnerisch am tiefsten liegen die Grenzkosten, wenn gleichzeitig mit dem Einbau der Lüftungsanlage die (undichten) Fenster ersetzt und evtl. weitere Dichtungsmassnahmen ergriffen werden. Ein Teil des energetischen Nutzen müsste dann allerdings dem Fensterwechsel zugeordnet werden wenn ein solcher nicht ohnehin fällig ist und die spezifischen Grenzkosten lägen dann gleich wie in der entsprechend linken Spalte in der Tabelle 4.3-50.

Die Unterschied der Grenzkosten zwischen MFH und EFH entsteht durch verschiedene, zum Teil gegenläufige Einflussfaktoren. Anzuführen sind einerseits die tieferen flächenspezifischen Investitionskosten der EFH (die Anlagekosten richten sich nach Zimmer- bzw. Personenanzahl und der Flächenverbrauch pro Person ist bei den EFH höher), die geringeren Kapitalkosten bei den EFH aufgrund des tieferen Realzinssatzes und andererseits durch die höheren Luftwechsel

im Referenzfall, wodurch eine, gemessen in MJ/m²a, höhere Reduktion des Heizwärmebedarfs erzielt werden kann.

4.3.13 Heizanlagen und Luftheizungen in Funktion der energetischen Qualität der Gebäudehülle

Im Hinblick auf eine integrierte und ganzheitliche Betrachtung ist es notwendig, die Grenzkosten der Heizwärmebedarfsreduktion mit den Grenzkosten der Wärmeerzeugung gegenüber zu stellen bzw. die Totalkosten (Wärmeerzeugung und –verteilung sowie die Heizwärmebedarfsreduktionen) zu betrachten. Aus diesem Grund werden nachfolgend die spezifischen Kosten der Wärmeerzeugung und –verteilung für die verschiedenen Heizanlagetypen und für typische Wärmeverteilungen dargestellt. Zu beachten ist dabei, dass es hier vor allem um die systematische Abhängigkeit der Kosten vom Heizwärmebedarf bzw. vom Wärmeleistungsbedarf geht.

Die Jahreskosten der Wärmeerzeugung sind vom Nutzungsgrad abhängig und dieser wiederum – insbesondere bei WP - von der Wärmeverteilung. Bei kombinierter Wärmeerzeugung ist nebst dem Heizsystem das Warmwassersystem mitzuberücksichtigen.

a) Wärmeerzeugung Neubau

Die Investitionskosten der Heizanlage hängen vom spezifischen Wärmeleistungsbedarf (gemessen in kW/m²) und nicht vom JahresHeizwärmebedarf (kWh/m² oder MJ/m²) ab. Tendenziell besteht zwischen diesen beiden Grössen zwar eine Abhängigkeit, aber im Detail hängt der Wärmeleistungsbedarf davon ab, durch welche Massnahmen ein bestimmtes Qh erreicht wird. Wird das Gebäude vor allem mit der Strategie „Reduktion des Transmissions- und Lüftungsverlustes" auf ein tiefes Qh getrimmt, reduziert sich damit der Wärmeleistungsbedarf stärker, als wenn mit grossen Fensterflächen auf hohe solare Gewinne gesetzt wird. Dies liegt darin begründet, dass im Auslegungsfall (kältester Tag, keine Sonneneinstrahlung) das Heizsystem allein den Wärmebedarf decken muss. Der Wärmeleistungsbedarf wird deshalb gemäss (Binz, 2001) berechnet, siehe dazu das Kapitel 4.2.10. Bei der Wärmeerzeugung ist im folgenden zwischen EFH und MFH zu unterscheiden.

Tabelle 4.3-52 Investitionskosten (Tsd. CHF, gerundet) von Wärmeerzeugungsanlagen (inkl. Warmwasser) für Ein- und Mehrfamilienhäuser (250 m² bzw. 720 m² EBF) in Funktion der Energieeffizienzstufen bzw. dem entsprechenden Wärmeleistungsbedarf für Raumwärme (in kW) (gemäss Tabelle 4.2-26)

kW	kW	Oel		Gas		WP Erdsonde		WP Luft		Holzheizung	
MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH
22	8	27	20	24	16	54	28	36	20	25	19
21	7	26	20	23	16	52	26	35	19	24	19
18	6	25	20	22	16	48	24	32	18	23	19
12	4	22	20	19	15	38	19	26	15	21	19
10	3	21	19	18	15	32	16	23	13	20	18

Quelle Afjei et al. 1999, Gantner/Jakob et al (1999), Aktualisierungen CEPE

Die Reduktionen der Investitionskosten der Wärmeerzeugungsanlagen, welche aufgrund der Energieeffizienzinvestitionen in Gebäudehülle und Lüftungsanlagen erreicht werden können,

sind also von Anlagetyp zu Anlagetyp sehr unterschiedlich. Währenddem bei den Anlagetypen Öl, Gas und Holz unterhalb einer spezifischen Leistungsschwelle nur mehr sehr kleine Kosteneinsparungen möglich sind, gehen die Kosten der WP-Systeme besonders bei kleinen Leistungen weit stärker zurück, weil diese Systeme viel besser hin zu kleinen Leistungen skalierbar sind. Im Gegensatz dazu verhindern bei den erstgenannten Anlagetypen fixkostenähnliche Kostenkomponenten (Kamin/Abgasrohr, Gasanschluss, Tank) eine weitere Kostenreduktion. Zu klären bleibt die Frage, ob bei Luft-WP ein Synergieeffekt erzielt werden kann, wenn dieser Anlagetyp mit einer Komfortlüftung kombiniert werden kann.

b) Wärmeverteilung Neubau und bestehende Gebäude

Bei heutigen Wohnneubauten kommen im energetischen Referenzfall (SIA 380/1-Grenzwert oder Musterverordnung der Kantone) sowohl Radiatoren- wie auch Bodenheizungen zum Einsatz. Bei den EFH sind vor allem bei WP-Heizanlagen die Bodenheizungen überwiegend.

Tabelle 4.3-53 Investitionskosten Wärmeverteilung für Neubauten in Funktion der fünf Effizienzstufen

MFH		EFH	
W/m²	CHF/m²	W/m²	CHF/m²
31	44	32	41
29	43	28	40
25	39	25	36
17	38	17	35
13	37	13	34

Quelle GebäudeTechnik 02/1, Gespräche mit Planern, Annahmen CEPE

Bei bestehenden Gebäuden wird angenommen, dass bei der Wärmeerzeugung keine Kostenreduktionen aufgrund der Gebäudehüllenerneuerung realisiert werden können.

c) Nutzungsgrade

Die Nutzugsgrade sind bei einigen Anlagetypen ebenfalls von der Energieeffizienz des Gebäudes abhängig, insbesondere diejenigen der Wärmepumpen, denn eine energie-effiziente Gebäudehülle senkt die Vorlauftemperaturen und damit die Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Wärmeverteilung, siehe dazu (Gantner, Jakob et al., 1999). Aus physikalischen Gründen (Thermodynamik) steigt dann der theoretisch mögliche und auch der in der Praxis realisierbare Nutzungsgrad der Wärmepumpen. Werden also Wärmepumpen eingesetzt, ist es für den Stromverbrauch sehr entscheidend, dass eine Wärmeverteilung realisiert wird, welche tiefe Vorlauftemperaturen ermöglicht. Dies ist insbesondere dann möglich, wenn das Gebäude eine hohe Energieeffizienz aufweist, d.h. wenn die Gebäudehülle und die Lüftungsverluste einen tiefen Wärmeleistungsbedarf haben. Bei sehr effizienten Gebäuden kommen tendenziell eher sogenannte selbstregulierende Wärmeverteilungen zum Einsatz. Diese Systeme werden selbstregulierend genannt, weil die Vorlauftemperatur bzw. die Temperatur der Wärmeabgabe ist dann so tief (z.B. 25°C bis 30°C), dass bei Sonneneinstrahlung der Fussboden so weit erwärmt wird, dass aus physikalischen Gründen keine unnötige Wärmeabgabe seitens der Wärmeverteilung mehr möglich ist. Dies reduziert das Überhitzungsrisiko in der Übergansperiode und damit verbundene zusätzliche Lüftungsverluste weil die Fenster geöffnet werden. Der Ausnutzungsgrad der freien Wärme wird erhöht. Und –last but not least– können bei diesen tiefen VL-Temperaturen sehr hohe Wärme-

pumpennutzungsgrade erreicht werden. Zwischen der Erhöhung der Gebäudeenergieeffizienz bei Gebäudehülle und Lüftung und den Wärmeerzeugung besteht also eine positive Synergie.

Tabelle 4.3-54 Jahresnutzungsgrade von Luft- und Sole-WP für die Raumwärme allein (ohne Warmwasser) bzw. für Raumwärme und Warmwasser (WW) kombiniert, je in Funktion der Energieeffizienzstufen des Gebäudes (Definition gem. Kap. 4.4)

	VL-Temp	Luft			Sole		
		Raumwärme allein		Raumwärme inkl. WW	Raumwärme allein		Raumwärme inkl. WW
	°C	2000	2020	2000	2000	2020	2000
a) Referenzfall	40	2.7	3.2	2.5	3.5	4.6	3.4
b)	38	2.9		2.6	3.7		3.5
c)	35	3.1		2.7	4.0		3.7
d)	33	3.3		2.7	4.2		3.6
e) mit NT-Bodenheizung	30	3.6	4.2	2.6	4.5	5.9	3.6
e) mit Luftheizung	60	2.0	2.6	2.0	2.7	3.5	2.9

Quelle Ganter/Jakob 1999, Anpassungen CEPE

Die Annahmen der WP-Nutzungsgrade für den Referenzfall in Tabelle 4.3-54 sind kompatibel zu den Messungen des WP-Testzentrums Töss und zu den im Projekt FAWA durchgeführten Feldmessungen an 120 Anlagen, siehe Erb et al. 2000. Experten beurteilen, dass die dabei im Lauf der letzten vier Jahre festgestellte Nutzungsgradverbesserung nicht durch die Verbesserung des Gütegrades der WP selbst, sondern vielmehr durch den Lernprozess, die WP richtig hydraulisch einzubinden und vor allem die Vorlauftemperaturen der Heizungsverteilung zu senken, zustande gekommen ist. Diese Tatsache stützt auch das Vorgehen, die Jahresnutzungsgradverbesserung bei tieferen Vorlauftemperaturen aufgrund der thermodynamisch theoretischen COP multipliziert mit dem Gütegrad (konstant belassen) zu berechnen: $COP_{theoretisch}(T_{VL}, T_{WQ}) = T_{VL} / (T_{VL} - T_{WQ})$, wobei T_{VL}=Vorlauftemperatur in K und T_{WQ}=Temperatur der Wärmequelle der Wärmepumpe (Sole:0°C, Luft: 2°C). Für den Jahresnutzungsgrad ist die für das Jahr (bzw. die Heizperiode) repräsentative Vorlauftemperatur einzusetzen. Bei der Verbesserung bis 2020 gehen die Autoren von einer Kombination der Einflussfaktoren Gütegradverbesserung und Wärmequellentemperaturabsenkung aus.

Der Nutzungsgrad der Wärmepumpen ist für die Luftheizungen relativ tief, weil bei der Luftheizung aufgrund der tiefen spezifischen Wärmekapazität des Wärmeträgermediums Luft und einem beschränken Volumenstrom (tiefe Geschwindigkeit, um Schallprobleme zu begegnen, nicht zu grosse Querschnitte wegen des Platzbedarfs der Luftkanäle) wiederum relativ hohe Vorlauftemperaturen erforderlich sind (50°C bis 70 C), wobei angenommen wird, dass dieses System nur für Gebäude mit Passivhaus oder Minergie-P Qualität eingesetzt würde (siehe auch GebäudeTechnik 02/1).

Wird die Wärmepumpe auch die für die Warmwassererzeugung eingesetzt, reduziert sich der mittlere Nutzungsgrad der Wärmepumpe und zwar **anteilig** zu den Energiemengen für Raumwärme und Warmwasser. Bzgl. Jahresnutzungsgrad der Wärmepumpen für Warmwassererzeugung werden die Annahmen gemäss Tabelle 4.3-55. Die Auswirkung der kombinierten

Raumwärme- und Wärmewassererzeugung ist in Tabelle 4.3-54 in den jeweils rechten Spalten zu sehen.

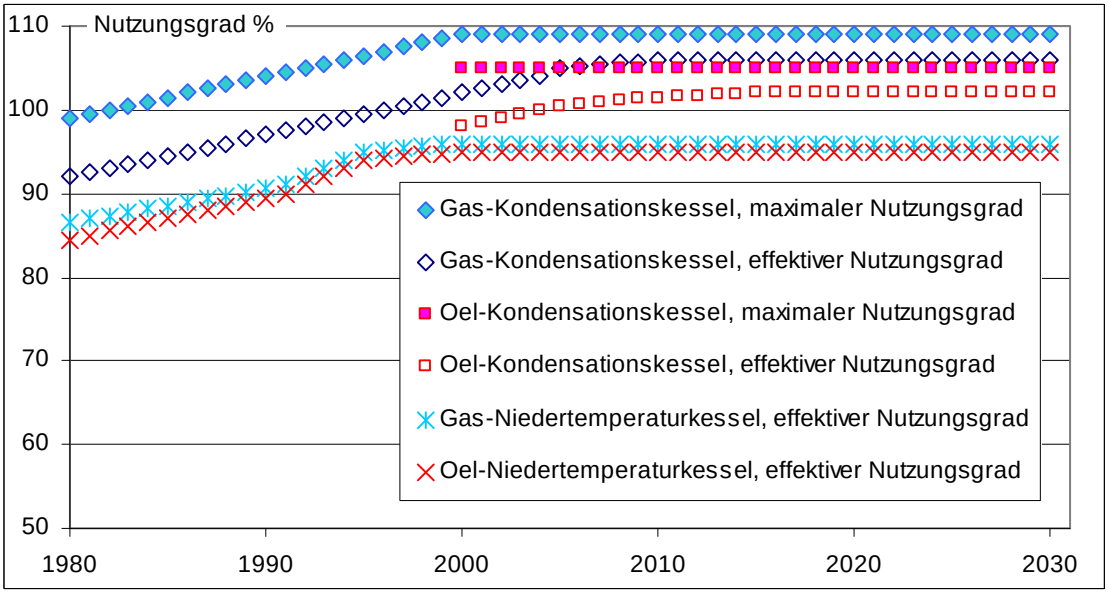
Tabelle 4.3-55 Nutzungsgrade von Wärmepumpen zur Warmwassererzeugung (to be checked)

Sole-WP 2000	Luft-WP 2000	Abluft-WP 2000
3.0	2.0	1.7 (WP allein) 3.3 (inkl. WRG)
3.0	2.0	1.7 (WP allein 3.3 (inkl. WRG)

Quelle Ganter/Jakob 1999,Annahmen CEPE, Huber Energietechnik

Bei der Abluft-WP wird angenommen, dass der Energiegehalt der Abluft in etwa ausreicht, um den Bedarf für Warmwasser zu decken. Der Raumwärmebedarf wird dann durch eine Luft-WP mit Wärmequelle Aussenluft, allenfalls vorgewärmt durch ein Erdregister, gedeckt. Dabei ist zu beachten, dass auch der Wärmebedarf des Luftwechsels gedeckt werden muss, denn bei der Abluft-WP wird gemäss Definition keine WRG eingesetzt (die Lüftungen mit WRG werden Komfortlüftungen genannt und reduzieren mittels WRG den Raumwärmebedarf; evtl. kann die Fortluft nach der WRG zusätzlich der Wärmepumpe in den Zuluftkanal gemischt werden, so dass sich der Nutungsgrad gegenüber Tabelle 4.3-54 noch etwas erhöht).

Bei Öl-, Gas- und Holzheizungen ist die Abhängigkeit des Nutzungsgrades in Funktion der Gebäudehüllenqualität und der Lüftungsverluste gering. Hingegen wird ebenfalls eine zeitliche Entwicklung angenommen, siehe Abbildung 4.3-63.



Quelle CEPE 2002, Arbeitsgruppe Nutzungsgrade Prognos, VSG, EV, BFE, PSI, CEPE

Abbildung 4.3-63 Vergangene und künftige zeitliche Entwicklung der maximalen und effektiven Nutzungsgrade von Heizöl EL- und Erdgas-Neuanlagen, jeweils exklusive Verteilverluste der Wärmeverteilung

Tabelle 4.3-56 Nutzungsgrad inkl. Verteilverluste Heizöl EL (Annahmen zu Kondensationsanteilen gemäss Arbeitsgruppe Nutzungsgrade und Erdgas (Annahme: kondensierend)

	2000	2010	2020
Erdgas	96%	101%	102%
Heizöl EL	89%	93%	96%

Quelle CEPE 2002, Arbeitsgruppe Nutzungsgrade Prognos, VSG, EV, BFE, PSI, CEPE

Ausserdem können in Neubauten die Verteilverluste weiter reduziert werden, wenn sich die Wärmeerzeugungsanlage innerhalb des Dämmperimeters befinde und dieser konsequent geschlossen ist, dieser also beispielsweise unterhalb der Kellerbodenplatte durchführt. Anbetrachts der bereits sehr hohen Nutzungsgrade und tiefen Verteilverluste und der im übrigen Berichtsteil sehr hohen Unterschiede der Energieeffizienz kann jedoch dieser Effekt rechnerisch eher vernachlässigt werden.

d) Verteilverluste

Bei bestehenden Gebäuden können die Verluste der Raumwärme- und insbesondere der Warmwasserverteilung beträchtliche Ausmasse annehmen. Diese können durch Nachisolation der Verteilleitungen reduziert werden. Die dafür notwendigen Kosten (CHF/m) sowie der Anteil der Leitungen, der realistischerweise aus Gründen der Zugänglichkeit nachträglich gedämmt werden kann, konnte in diesem Projekt nicht mehr erarbeitet werden. Der Effizienzgewinn, das heisst die Reduktion der Verteilverluste beträgt schätzungsweise einige bis zu einige wenige zehn MJ/m2.a. Vermutlich liegen die Grenzkosten dieser Massnahmen mindestens teilweise auf relativ tiefem Niveau.

4.3.14 Fazit des empirischen Kapitels

Möglich, dass uns ebenfalls noch einige Daten fehlen. Bleibt zu hoffen, dass es nicht solche sind, welche so entscheidend sind für die Schlussfolgerungen wie diejenigen in Abbildung 4.3-64.....

Quelle züritipp, 1. bis 7.2.2002

Abbildung 4.3-64 Datenanfragen und ihre Interpretation am Beispiel der Schneehöhenmessung an der Talstation durch Emil.

4.4 Zusatzkosten und –nutzen energieeffizienter Wohnneubauten mit Kostenstand 2000

Während bei der Erneuerung von Wohngebäuden manche Parameter wie z.B. Gebäudeorientierung, das Verhältnis Aussenfläche zu Volumen oder die Fensterverteilung festgelegt sind, hat der Architekt beim Neubau weitgehende Gestaltungsmöglichkeiten, zusätzliche Energieeffizienzgewinne durch minimale Grenzkosten zu realisieren (allerdings nur bis zu einem gewissen Grad). Grundsätzlich bildet das Gesamtsystem der Wohnneubauten, also das Zusammenspiel von konstruktiven, haustechnischen und architektonischen Konzepten, die Ausgangsbasis. Aus analytischen Gründen und zwecks Kompatibilität zu anderen Studien (z.B. Energieperspektiven von Prognos, Akzeptanz der kontrollierten Lüftung) werden die hier ausgewerteten bzw. simulierten Objekte jedoch auf der Ebene des Nutzenergiebedarfs kategorisiert und analysiert.

Die Beispielobjekte werden entsprechend dem Wärmebedarf für Raumwärme (Nutzenergiebedarf nach bisheriger, Heizwärmebedarf nach neuer Bezeichnung) gruppiert und für diese Gruppen entsprechende konzeptionelle, bauliche und haustechnische Lösungsansätze herausgearbeitet. Folgende Nutzenergiebedarfskategorien wurden gewählt (SIA 380/1 Berechnungsmethode 1988):

Tabelle 4.4-1 Definition der Nutzenergiebedarfs- bzw. Heizwärmebedarfskategorien für EFH und MFH für den Bottom-Up Ansatz

Heizwärmebedarf (Qh)	Beschreibung, Bezeichnung
a) 270 bzw. 300 MJ/m²a bzw. ca. 225 bis ca. 260 MJ/m²a	Referenz für den Grenzkostenansatz: Erfüllung der heutigen Norm bzw. Grenzwert nach SIA 380/1 (alte bzw. neue Berechnungsnorm, je nach A/EBF)
b) ca. 180 bis ca. 210 MJ/m²a	Minergie-Primäranforderung Gebäudehülle, Einführung geplant Sept. 2002, 80% des Grenzwertes nach neuer Berechnungsnorm, in diesem Bericht als Minergie-Primäranforderung bezeichnet
c) ca. 145 MJ/m² bis ca. 170a	Zielwert, entspricht 60% des Grenzwertes
d) bis ca. 65 MJ/m²a (MFH) bzw. bis ca. 90 MJ/m²a (EFH)	Minergie-Gebäudehülle-allein: Minergie wird mit allein mit Massnahmen an der Gebäudehülle erreicht und es kommen fossile Energieträger zum Einsatz: im Bericht als Minergie-GHa[1] bezeichnet
e) 45 bis 55 MJ/m²a:	Minergie-P (Arbeitstitel, bei Minergie in Pilotphase, entspricht ungefähr dem Passivhausstandard)

Quelle Darstellung HBT/CEPE

(*) Die Bezeichnungen implizieren nicht in allen Details die Berechnungsarten der z.T. geschützten Marken. So ist Minergie ein Label, das Anforderungen auf der Ebene der Endenergie stellt, während sich die obigen Kategorien auf die Nutzenergie beziehen. Die Annahme von 65 MJ/m²a (MFH) bzw. 90 MJ/m²a (EFH) ergibt sich aus der Endenergie für Heizung und Warmwasser minus der Energiekennzahl Warmwasser (50 MJ/m²a für das EFH bzw. 80 MJ/m²a für das MFH) und der Annahme, dass die Minergie-Anforderung in diesem Fall mit einer fossilen Anlage erreicht wird.

[1] Die Begriffe Minergie-Primär und Minergie-Gebäudehülle-allein sind keine offiziellen Begriffe des Minergie-Labels oder des Minergievereins, sondern dienen der Veranschaulichung der untersuchten Nutzenergie bzw. Heizwärmebedarfskategorien, siehe nachfolgenden Exkurs.

Diese Einteilung entspricht den fünf im Kap. 4.4.3 beschriebenen Typen, für welche nach dem Bottom-up Ansatz die Gebäude- und die Grenzkosten berechnet werden.

Exkurs zur Begriffsdefinition

Minergie ist ein Gebäude-Label, welches bis Mitte 2002 ausschliesslich Anforderungen auf Ebene Endenergie gestellt hat (seit Mitte 2002 wird zusätzlich eine Anforderung an die Gebäudehülle gestellt: max. 80% des Grenzwertes). Diese Anforderungen konnten bis anhin entweder mit Bedarfsreduktionsmassnahmen (insbesondere Gebäudehülle) oder auf Seite der Wärmebereitstellung erfüllt werden (insbesondere Wärmepumpen sowie weitere Anlagen mit Nutzung von erneuerbaren Energien wie Holz, Solar, Biogas etc.). Je nach Energieträger fliessen diese mit Gewichtungsfaktoren in das Berechnungsverfahren ein. Der Heizwärmebedarf verschiedener Minergie-Gebäude kann deshalb sehr unterschiedlich sein, was eine Charakterisierung von Minergie auf dieser Ebene schwierig macht. Der Durchschnitt der Qh der heute erstellten Minergie-Gebäude beträgt ca. 150 MJ/m²a. Dieser Durchschnittswert beinhaltet einen grossen Teil der Gebäude, welche Massnahmen an der Gebäudehülle mit solchen im Bereich der erneuerbaren Energien einschliesslich der Wärmepumpen kombinieren. Um der Anschaulichkeit halber dennoch einen Bezug zu Minergie herzustellen, werden in diesem Bericht folgende Begriffe eingeführt:

- Minergie-Primär: Minergie-Primäranforderung an die Gebäudehülle, Einführung geplant Sept. 2002, 80% des Grenzwertes nach neuer Berechnungsnorm.
- Minergie-Gebäudehülle (Minergie-GH): Die Minergie-Anforderung (45 kWh/m²a bzw. 42 kWh/m²a auf Ebene Endenergie inkl. Warmwasserverbrauch) wird vorwiegend mit Massnahmen an der Gebäudehülle erreicht und der restliche Energiebedarf für Heizung und Warmwasser wird fossil gedeckt. Das damit noch mögliche Qh ist relativ nahe dem Passivhaus-Standard, wenn auch nicht ganz so tief.

Quelle Darstellung CEPE

4.4.1 Methodisches Vorgehen

Für Neubauten werden die Gebäudekosten und Effizienzgewinne auf der Basis der Einzelinvestitionen ermittelt. Dabei werden die wesentlichen Neubaukonzeptionen berücksichtigt, welche zu guten energetischen Lösungen führen. In diesem Teil der Untersuchung geht es vor allem um den Zusammenhang zwischen Energiebedarf und Gebäudekosten. Hierbei wurden zwei unterschiedliche Analysewege beschritten.

In einem **top-down-Ansatz** wurde eine Relation zwischen dem Flächenpreis (Gebäudekosten BKP2 pro m² EBF) und dem spezifischen Energiebedarf geprüft, und zwar in der Art eines Benchmarks in Abhängigkeit des wärmetechnischen Konzeptes. Hierbei muss damit gerechnet werden, dass die Streuung der Kosten aufgrund unterschiedlicher Ausbaustandards (z.B. mehr oder weniger teure Fussbodenbeläge oder konstruktive Besonderheiten)sehr gross ist. Als Kontrollgrösse - beispielsweise auch für die zweite unten beschriebene Methode - ist aber ein empirisch festgestellter Zusammenhang zwischen Energieverbrauch und Gebäudekosten doch sehr interessant, zumal wenn es gelingt einige Abweichungen der Baukosten durch einige Merkmale statistisch zu erklären.

Als Grundlage für die statistischen Auswertungen dienten die Daten von Energie 2000/Diane-Öko-Bau, der Minergie-Labelstelle, der Dienststelle für Energie des Kantons Wallis und Auswertungen von Baugesuchen in den Kantonen AG, ZH und BE. Die Daten hatten allerdings nur sehr wenige Merkmale (die allen Datensätzen gemeinsam sind), um Kostenabweichungen statistisch erklären zu können.

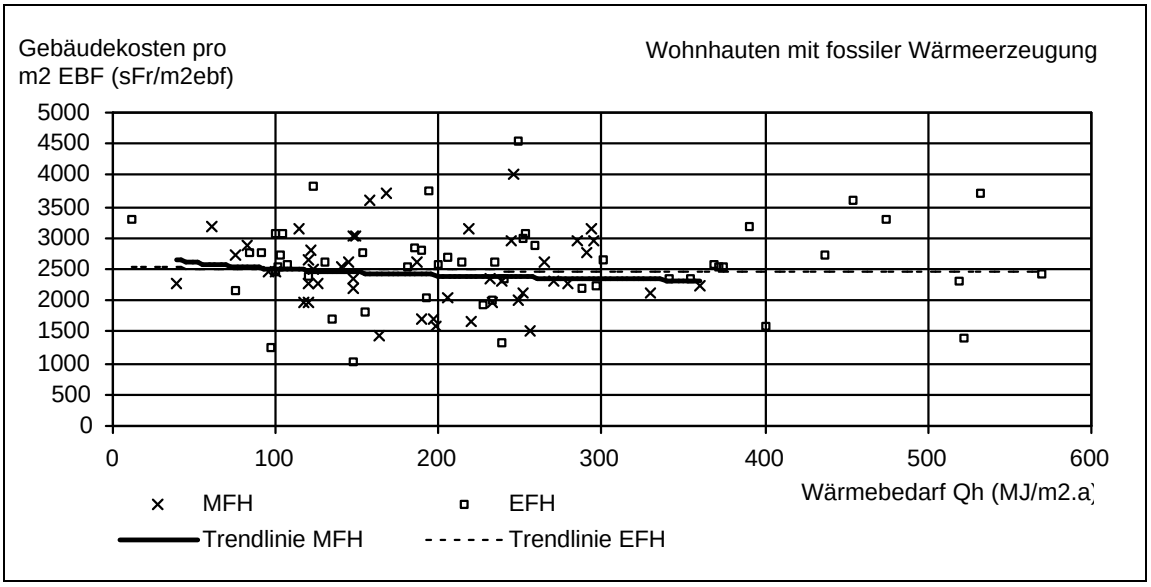
Mittels der zweiten Methode, dem **bottom-up-Ansatz**, wird exemplarisch ein real existierendes und in den technischen Details wohlbekanntes Wohngebäude (Fallbeispiel) hinsichtlich unterschiedlicher Ausführung der Gebäudehülle und des Heizsystems untersucht, und die Zusatzkosten und Energiegewinne werden einander gegenüber gestellt. Mit Hilfe eines einfachen Energie-Nachweis-Programms wird der unterschiedliche Energiebedarf der einzelnen Bauoptionen ermittelt. Die möglichen Zusatzmassnahmen zur Steigerung von Energieeffizienz sind fallweise inkl. Kosten- und Ertragsfolge dargestellt. In einem ersten Schritt wird das Gesamtsystem von Gebäudehülle und Haustechnik belassen und mit Zusatzmassnahmen angereichert. In einem zweiten Schritt wird der Wechsel von Systemlösungen untersucht, der in der Regel zu Kostenreduktionen führen kann. Die bauteilorientierten Kostenelemente (unter Weglassung der Besonderheiten bei Erneuerungen), welche im bauteilorientierten Ansatz (Kap. 4.3) erhoben wurden, konnten hier mitverwendetet werden.

Bemerkung: Das energiebewusste Projektieren eines Wohngebäudes setzt ein konzeptionelles Denken voraus, d.h., bereits in der Raumdisposition und -Ausrichtung, in der Modellierung des Baukubus greifen Überlegungen ein, welche energierelevant sein können. Der hier aufgezeigte bottom-up-Ansatz, bei dem ein energetischer „Normalfall" (Erfüllung der Energievorschriften) zu einem Passivhaus verändert wird, entspricht aus architektonischer Sicht nicht dem optimalen Vorgehen, wenn dieses keine Änderung der ursprünglichen architektonischen Idee bewirkt. Trotz dieser Vorbehalte wurden aufgrund des bottom-up-Ansatzes das genau bekannte Referenzobjekt, ein Vier-Familienhaus, und ein daraus abgeleitetes Einfamilienhaus-Modell auf die o.g. fünf Nutzenergiebedarfskategorien mit den entsprechenden Massnahmen jeweils modellhaft umgebaut und nach den Kosten- und Energieaspekten hin analysiert.

4.4.2 Top-down-Ansatz – Ergebnisse statistischer Auswertungen von Neubauten

Die Datenerhebung umfasst 219 Wohngebäude (85 MFH und 134 EFH); die Daten stammen aus sechs verschiedenen Quellen (E2000/Diane-Oekobau, "Wohnbauten im Vergleich" ETHZ, Minergie VS, MINERGIE Agentur Bau / MINERGIE Labelstelle Bern, Auswertung von Baugesuchen in den Kantonen AG; BE und ZH seitens des CEPE der ETH Zürich und der Kantonalbank LU. Wie zu erwarten war, sind die zur Verfügung stehenden Datenpunkte wegen der unterschiedlichen Bauweisen und den damit induzierten Kostenunterschieden derart heterogen, dass eine Regressionsanalyse mit Berücksichtigung verschiedener Merkmale nur in sehr beschränktem Umfang möglich war.

Die nachstehende Auswertung erfolgte nach den Parametern Wärmebedarf Qh und Gebäudekosten pro m² EBF. Die Kosten wurden mittels Zürcher Baukostenindex auf den Indexstand vom 1.4.2001 hochgerechnet. Die Objekte wurden differenziert nach den Heizenergiesystemen fossile Wärmeerzeugung, Wärmepumpenanlagen und solarer Wärmeerzeugung (vgl. Abbildung 4.4-1 und 4.4-2).

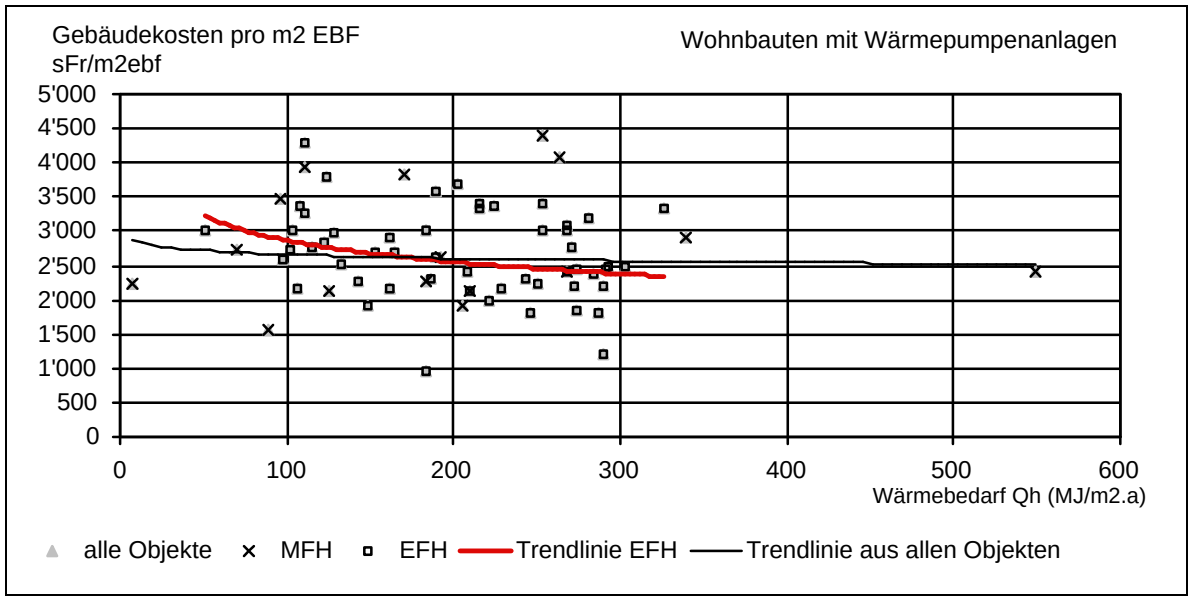


Quelle Minergie-Agentur Bau, Erhebungen CEPE, HBT, diverse, Darstellung HBT

Abbildung 4.4-1: Wärmebedarf Qh und Gebäudekosten pro EBF bei ausgewählten Wohnbauten mit fossiler Wärmeerzeugung (n = 47 MFH und 52 EFH)

Der durchschnittliche Wärmebedarf beträgt für diese Stichprobe *fossil beheizter Wohngebäude* 217.1 MJ/m² a bei einer Standardabweichung von 115.5 MJ/ m² a, die durchschnittlichen Gebäudekosten belaufen sich auf 2'537 CHF/m² EBF (Standardabweichung = 622 CHF/m² EBF). Die durchschnittlichen spezifischen Gebäudekosten für Einfamilienhäuser dieses Samples liegen mit 3,3°% nur unwesentlich unter jenen für Mehrfamilienhäuser (vgl. Abbildung 4.4-1). Die durchschnittlichen Gebäudekosten pro m² EBF dieses Samples liegen somit ca. 10% über dem Benchmark des Baukosten-Kennzahlensystems[1] der ETHZ (1999).

[1] Meyer Paul, Christen Kurt et al, Baukosten-Kennzahlensystem (BKKS)©, 1999, Professur für Architektur und Baurealisation ETHZ und VZ VermögensZentrum Zürich



Quelle Minergie-Agentur Bau, Erhebungen CEPE, HBT, diverse, Darstellung HBT

Abbildung 4.4-2 Wärmebedarf Qh und Gebäudekosten pro EBF bei ausgewählten Wohnbauten mit Wärmepumpenanlagen (n = 14 MFH und 53 EFH)

Der durchschnittliche Wärmebedarf der ausgewerteten *Objekte mit Wärmepumpenanlagen* beträgt für diese Stichprobe 198 MJ/m² a bei einer Standardabweichung von 86 MJ/m² a, d.h. ein um knapp 10 % reduzierter Wärmebedarf (mit etwas geringerer Streuung der Werte) gegenüber den fossil beheizten Wohnbauten. Die durchschnittlichen Gebäudekosten belaufen sich erwartungsgemäss auf einen leicht höheren Wert von 2'676 CHF/m² EBF mit erhöhten Streuwerten (Standardabweichung = 686 CHF/m² EBF). Die durchschnittlichen spezifischen Gebäudekosten für Einfamilienhäuser liegen wiederum mit 2,8°% geringfügig unter jenen für Mehrfamilienhäuser. Vergleicht man die durchschnittlichen Mehrkosten der mit Wärmepumpen betriebenen Wohngebäude und den fossil beheizten Wohngebäuden, so ergeben sich ein durchschnittliche Mehrinvestitionen von 7,30 CHF je eingesparte MJ Wärmebedarf.

Die Stichprobe von *Objekten mit solarer Wärmeerzeugung* (8 EFH) ist zu klein, um eine repräsentative, fundierte Aussage machen zu können. Die durchschnittlichen Gebäudekosten belaufen sich auf 2'769 CHF/m² EBF (Standardabweichung = 885 CHF/m2 EBF) und liegen damit um knapp 10°% über den Werten für fossil beheizte Wohngebäude, was allerdings nicht unbedingt allein auf die Solaranlage zurückgeführt werden kann, sondern auch auf andere bauliche Merkmale ohne Energierelevanz.

Die durchschnittlichen, spezifischen Gebäudekosten steigen nach diesen Auswertungen in Abhängigkeit der Wärmeerzeugungssystems sowie mit abnehmenden Wärmebedarf erwartungsgemäss an (vgl. Tab. 4.4-1 und Abbildung 4.4-3).

Der Verlauf der spezifischen Gebäudekosten sowie der Grenzkostenkurve bei den fossil beheizten Gebäuden legen den Schluss nahe, dass die Mehrkosten des energieeffizienten Bauen, welche auf einzelne Optimierungsmassnahmen zurückführen sind, durch eine intelligenten Konzeption von Raum-Layout, Materialwahl und Konstruktion kompensieren lassen. In der Tat sind viele andere Einfussfaktoren, welche die Baukosten beeinflussen

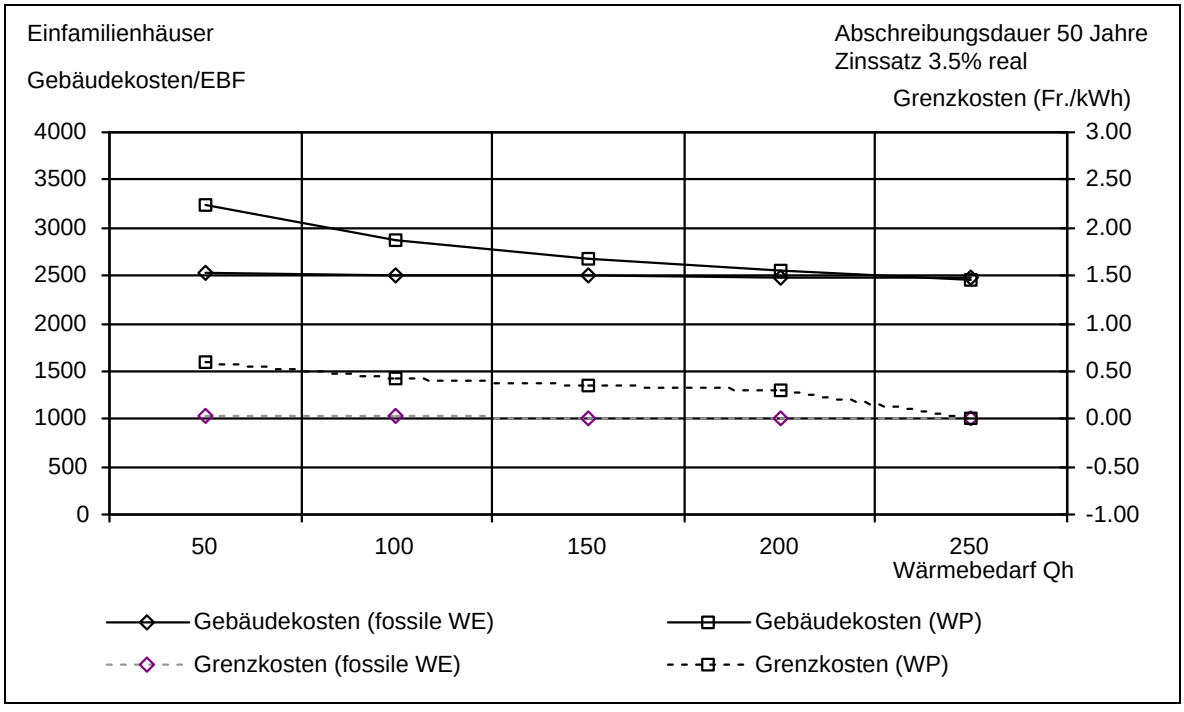
(Ausstattung, Materialwahl, Raumaufteilung, Bauträgerschaftstyp, Architekt/Planer etc.), in dem verwendeten Datensample nicht enthalten sind.

Die Steigung zwischen fossil betriebenen Gebäuden und den Wärmepumpengebäuden ist zwar augenfällig, könnte jedoch mit statistischen Methoden nicht als signifikant erhärtet werden. Es ist denn auch nicht unmittelbar plausibel, dass die Grenzkosten wärmepumpenbetriebener Wohngebäude so deutlich von denen fossilbetriebener Wohngebäude abweichen und die Grenzkosten fossilbetriebener Wohngebäude über den betrachteten Wärmebereich fast Null sind. Zu erwarten wäre vielmehr, dass die WP-Gebäude zwar ein höheres Kostenniveau bei Standardenergiebedarf aufweisen (wegen der teureren Wärmepumpe), dass dann aber die Steigung in Funktion zunehmender Energieeffizienz der Gebäudehülle (hin zu abnehmenden Qh) nicht steiler verläuft (eher weniger steil, da bei den WP mehr Kosten eingespart werden können als bei den fossilen Anlagen).

Tabelle 4.4-2 Durchschnittliche Gebäudekosten und Streuung (Standardabweichung) des Datensamples für den top down Ansatz.

	Durchschnittliche Gebäudekosten in CHF / m² EBF	Standardabweichung
Wohnbauten mit fossiler Wärmeerzeugung	2.537	622
Wohnbauten mit Wärmepumpenanlagen	2.676	686
Wohnbauten mit solarer Wärmeerzeugung	2.769	885

Quelle Berechnungen HBT



Quelle Berechnungen HBT

Abbildung 4.4-3 Gebäudekosten pro EBF und Grenzkosten (Durchschnittskostenbetrachtung) bei Einfamilienhäusern mit unterschiedlichen Wärmeerzeugungssystemen

Als Fazit lässt sich festhalten, dass mit der vorliegenden beschränkten Menge von beschreibenden Variablen (d.h. von kostenbeeinflussenden Faktoren), die Mehrkosten der Energie-Effizienz nicht isoliert werden können, da sie von den übrigen Faktoren kompensiert werden. Es kann jedoch gefolgert werden, dass die Mehrkosten des energieeffizienten Bauens offensichtlich durch solche anderen Faktoren (weitgehend) kompensiert werden können. Dies ist in dem Sinn plausibel, als dass die Mehrkosten z.B. bei Minergie 10% kaum je überschreiten (was auch der nachfolgenden Bottom-up-Ansatz aufzeigt) und eine Variation der Kosten in dieser Grösse relativ problemlos durch geschicktes Planen, kosteneffizientes Bauen, kostenbewusste Materialwahl und Ausstattung aufgefangen werden können. Dies stützt auch die These von Belz (2000), dass die Pioniere des energie-effizienten Bauens teilweise auch die Pioniere des kosteneffizienten Bauens sind. Denn gerade wegen der auftretenden Mehrkosten der Energieeffizienz entsteht ein Druck, möglichst kosteneffizient zu bauen.

Viele Bauträger, .v.a. auch private EFH-Bauende, verfügen gerade während der Lebensphase eines Hausbaus nur über beschränkte Budgets (berufliche Karriere noch nicht voll entwickelt, Kinder) und müssen deshalb gezwungenermassen Prioritäten setzen, sei dies bzgl. energetischen Aspekten, den erwähnten übrigen Faktoren oder bzgl. der Landkosten.

4.4.3 Bottom-up Ansatz (Einfamilienhäuser und Mehrfamilienhäuser)

Am Ausgangsobjekt des Fallbeispiels (nicht zu verwechseln mit dem in diesem Bericht verwendeten Konzept der Referenzbauweise, denn das gewählte Fallbeispiel weist eine bessere Energieeffizienz auf als gesetzlich erforderlich und als die Referenzneubauweise), einem Vierfamilien-Wohngebäude, werden die Einflüsse unterschiedlicher Wärmedämmstärken an der Fassade und am Dach, unterschiedlicher Fensterqualitäten etc. zunächst einzeln und dann in Kombinationen untersucht. Die Einzelbauteiluntersuchungen betreffen das Fallbeispiel (MFH). Anschliessend sind zu den Nutzenergiebedarfskategorien je ein möglicher Lösungsansatz für das MFH und das EFH skizziert.

Gebäudedaten:

Als Ausgangsobjekt für die Betrachtungen wurde ein real gebautes 4-geschossiges Mehrfamilienhaus (**MFH**) mit 4 Maisonetten, am Bodensee gelegen, ausgewählt. Baujahr 1998/99, Laubengang-Erschliessung. Davon werden gegen „oben" bzw.. „unten" die Referenzneubauweise (Grenzwert) sowie die vier definierten Effizienzstufen abgeleitet.

Aussenwände	Kompaktfassade, 12 cm Polystyrol (PS) Wärmedämmung
Holzfenster	IV-Gläser mit U-Wert 1,3
Dach	Warmdach mit 16 cm Mineralwolle zwischen den Sparren
Kellerdecke	Deckenisolierung 8 cm PS und 4 cm PS unter Unterlagsboden
Wärmeerzeugung	Gas-Wandtherme
Wärmeverteilung	Bodenheizung
Lüftung	Komfortlüftung pro Wohnung

Kenndaten:	
Qh	138 MJ/m² a
EBF	719 m²
beheiztes Volumen	1'660 m³
beheizte Gebäudehülle A*	1'179 m² (ohne Berücksichtigung der Reduktionsfaktoren b)
Gebäudehüllenziffer	1,3 (A/EBF)
Fassadenflächenanteile	18% Fensterfläche (S=45%, N=29%, O/W je 13%) 82% Wandfläche
Gebäudevolumen SIA 116	2'597 m³ SIA
Gebäudekosten pro EBF	2'230 CHF/ m² EBF
Gebäudekosten/m³ SIA	618 CHF/m³ SIA

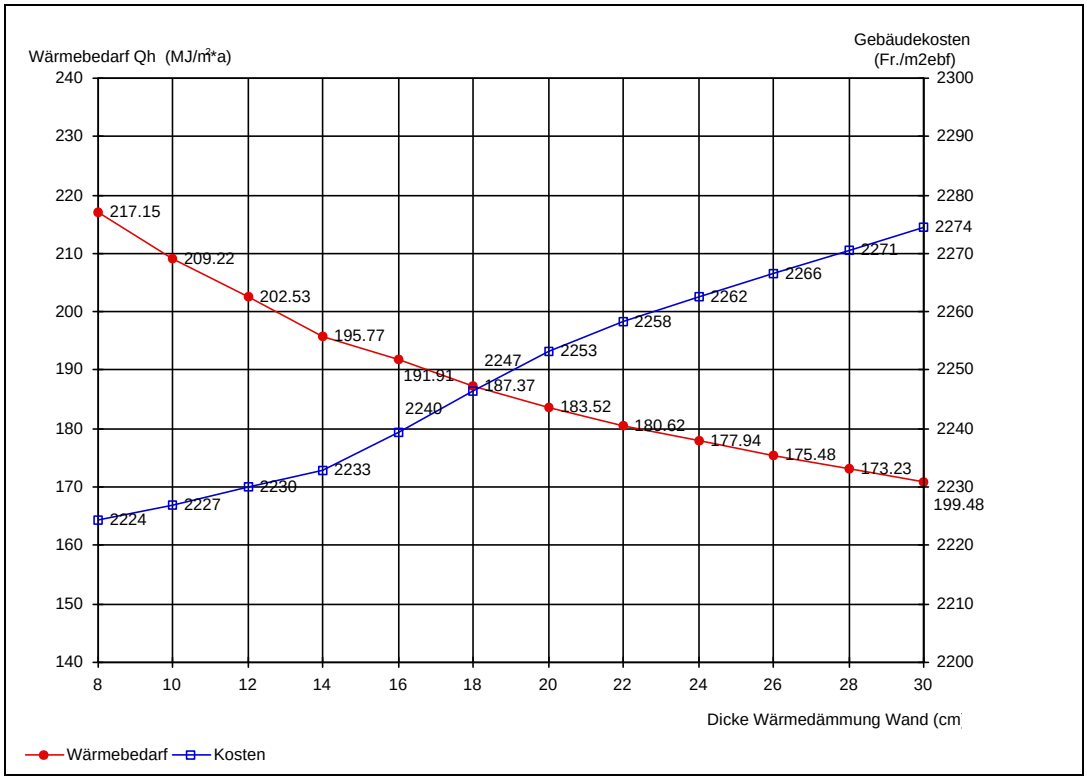
Das **Einfamilienhaus**-Modell wurde vom obigen MFH abgeleitet mit folgenden Kenndaten:

Qh	150 MJ/ m² a
EBF	250 m² (EG,OG,DG)
beheiztes Volumen	548 m³
beheizte Gebäudehülle A*	490 m² (ohne Berücksichtigung der Reduktionsfaktoren b)
Gebäudehüllenziffer	1,75 (A/EBF)
Fassadenflächenanteile	11% Fensterfläche (S=35%, N=23%, O/W je 21%) 89% Wandfläche
Gebäudevolumen SIA 116	954 m³ SIA
Gebäudekosten pro EBF	2'500 CHF/ m² EBF
Gebäudekosten/m³ SIA	654 CHF/m³ SIA

Das MFH-Modell entspricht einer mittleren Gebäudehüllenzahl der Stichprobe gemäss Kap. 3.1.1. Das vom Fallbeispiel (4-Fam.-Maisonetten-Haus) abgeleitete EFH ist bezüglich EBF und Gebäudevolumen (beheizt bzw. nach SIA 116) eher im oberen Segment anzusiedeln.

a) Wand / Fassade

Untersucht wird der Einfluss unterschiedlicher Wärmedämmstärken von 8 cm bis 30 cm unter gleichbleibender Konstruktion der übrigen Bauteile. Berechnungsbasis der Kosten bilden direkte Erhebungen bei einer renommierten Fassadenbaufirma im Raum Zürich, d.h. die hier verwendeten Kosten liegen 5–15% unter dem Mittelwert aus Kapitel 4.3.3 und entsprechen somit dem günstigsten und zweitgünstigsten Unternehmen gem. Abbildung 4.3-1. Die Aussagen beschränken auf die Kompaktfassaden. Der Grenzkostenberechnung liegt eine Abschreibungsdauer von 40 Jahren und ein Zinssatz von 5.5% real für Mehrfamilienhäuser zugrunde.

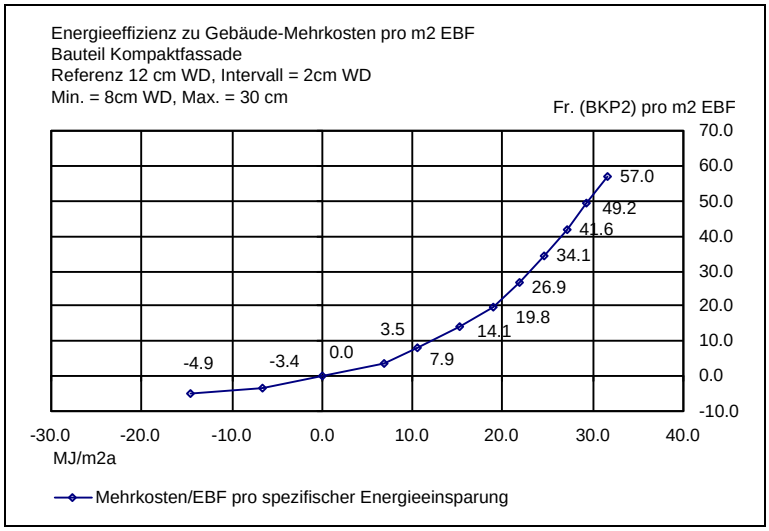


Quelle Berechnungen HBT

Abbildung 4.4-4: Wärmebedarf Qh und Gebäudekosten pro EBF bei unterschiedlicher Dicke der Wärmedämmung bei Neubau an den Fassadenwänden.

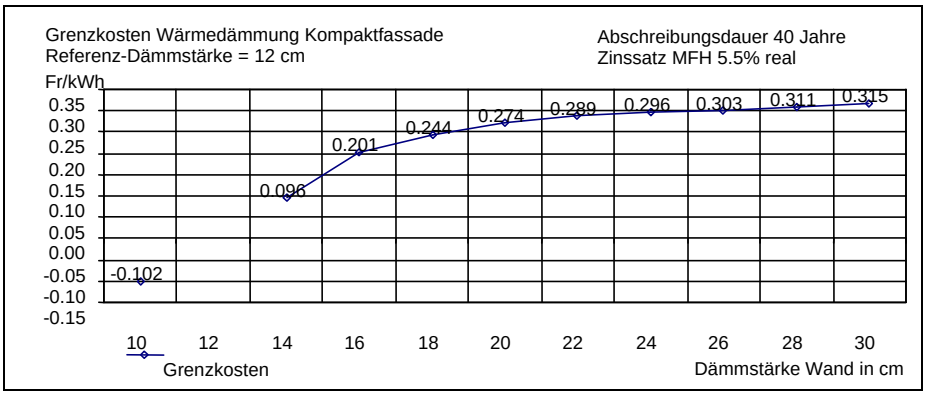
Die Steigung der Gebäudekosten mit zunehmender Dämmstärke an den Fassaden etwa linear verläuft (vgl. Abbildung 4.4-4). Dies gilt auch für die Grenzkosten (im Durchschnittskostenansatz) der Baukosten als Funktion der Dämmstärke bis zu einer Dämmstärke von ca. 18 cm, worauf der Anstieg der Durchschnittskosten deutlich abzuflachen beginnt (vgl. Abbildung 4.4-6). Demgegenüber sind die Gebäude-Mehrkosten als Funktion der eingesparten Wärmeenergie stark progressiv (vgl. Abbildung 4.4-5): so kosten die ersten zusätzlich gegenüber der Referenz eingesparten 12 MJ/m² EBF etwa zusätzlich rd. 10,- CHF/m² EBF, und die nächsten zusätzlich eingesparten 8 MJ/m² EBF kosten weitere 10,- CHF/m² EBF. Allerdings sei

angemerkt, dass die Mehrkosten für Kompaktfassaden bei Dämmstärken über 22 cm bei den angefragten Unternehmern erheblich differieren, da noch sehr wenig Ausführungserfahrung und Pionierpreise in die Preisbildung einfliessen.



Quelle Berechnungen HBT

Abbildung 4.4-5 Energieeffizienz der Wärmedämmung an Fassadenwänden bei Neubau (Gebäude-Mehrkosten pro EBF als Funktion der Energieeinsparung)



Quelle Berechnungen HBT

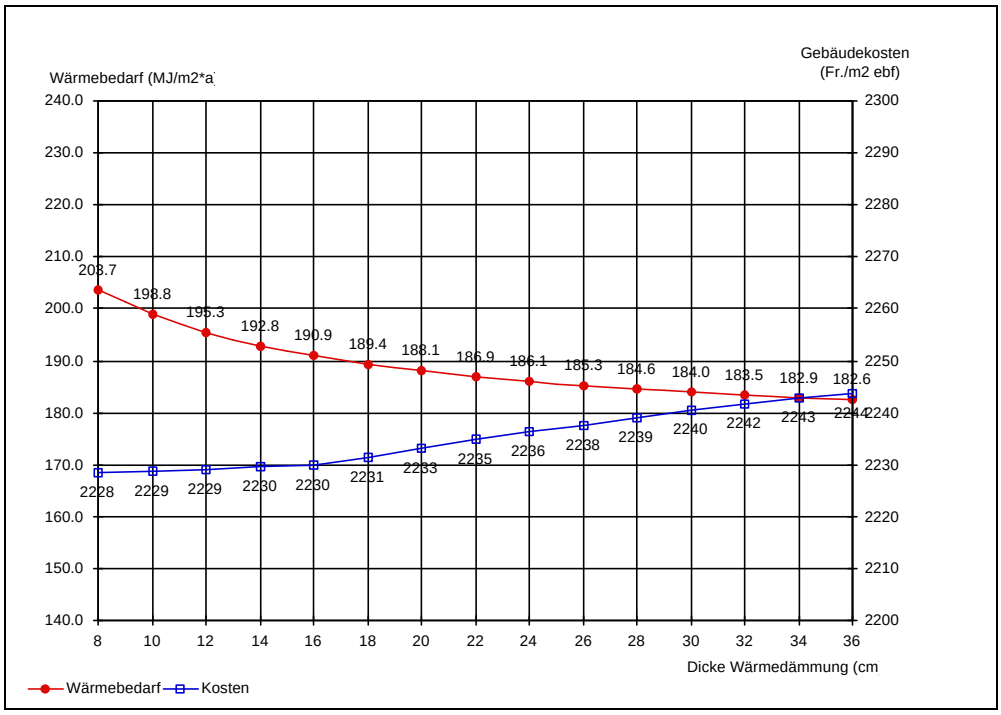
Abbildung 4.4-6 Grenzkosten (Durchschnittskostenbetrachtung) der Wärmedämmung an Fassadenwänden bei Neubau (Kompaktfassade)

b) Dach (Steildach)

Untersucht wird der Einfluss unterschiedlicher Wärmedämmstärken von 8 cm bis 36 cm zwischen und unter den Sparren, unter gleichbleibender Konstruktion der übrigen Bauteile.

Berechnungsgrundlage bilden die Kostenangaben aus 4.3.8 ohne die erneuerungsspezifischen Kostenanteile. Der Grenzkostenberechnung liegt eine Abschreibungsdauer von 50 Jahren und ein Zinssatz von 5,5% real für Mehrfamilienhäuser zu Grunde.

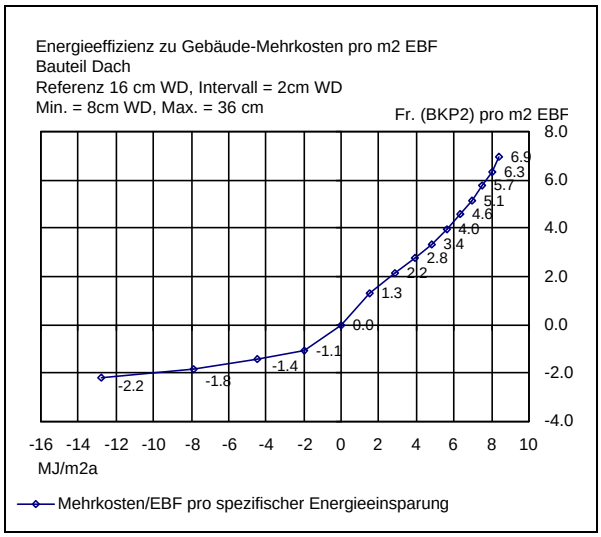
Auch in diesem Fall der Dämmung von Steildächern zeigt sich ein ähnlicher Zusammenhang zwischen den Baukosten (bzw. den Grenzkosten) und zunehmender Dämmstärke (vgl. Abbildung 4.4-7 und 4.4-9); er ist relativ linear. Da aber mit zunehmender Dämmstärke die eingesparten Wärmemengen nicht linear abnehmen, ergibt sich für die Zusatzinvestitionen wiederum ein progressiver Verlauf, so dass die ersten gegenüber der Referenz-Wärmedämmung eingesparten 4 MJ/m^2_{EBF} etwa 2,8 CHF/m^2 zusätzlich kosten, während weitere 4 MJ/m^2_{EBF} bereits Mehrkosten von etwa 3,5 CHF/m^2_{EBF} verursachen würden. Diese Kostensteigerung erklärt sich nicht zuletzt daraus, dass bei einer Dämmstärke von 14 cm die Wärmedämmung noch zwischen den Sparren liegt, während bei dickeren Wärmedämmungen zweilagig verlegt werden muss, d.h. zwischen und unter den Sparren, wodurch Mehrkosten für die Befestigung etc. entstehen.



Quelle Berechnungen HBT

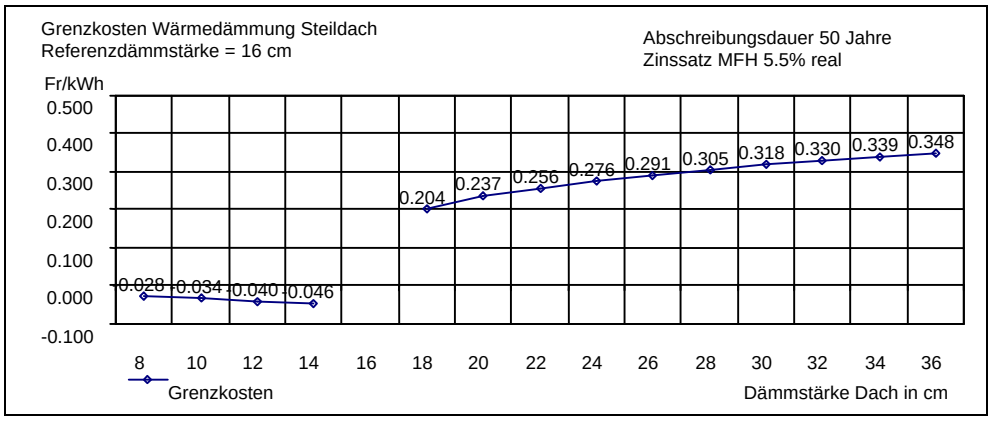
Abbildung 4.4-7 Wärmebedarf Qh und Gebäudekosten pro EBF bei unterschiedlicher Dicke der Wärmedämmung am Dach eines Neubaus.

Dargestellt sind in Abbildung 4.4-9 auch die Grenzkosten (Durchschnittskostenansatz) einer verminderten Dämmstärke (auf der negativen y-Achse aufgetragen). Die Grenzkosten von 14 cm auf 16 cm betragen 4.6 Rp/kWhNE, diejenigen von 16 cm auf 18 cm hingegen rund 20 Rp/kWh_{NE}, was mit dem oben erwähnten Kostensprung zu tun hat. Auch hier zeigt sich, dass das Grenzkostenkonzept sehr sensitiv ist hinsichtlich einer relativ moderaten Variation von Kosten, denn als Kostendifferenz entstehen dabei wesentlich grössere Variationen.



Quelle Berechnungen HBT

Abbildung 4.4-8 Enegieeffizienz der Wärmedämmung an Steildächern beim Neubau (Gebäude-Mehrkosten pro EBF als Funktion der Energieeinsparung)



Quelle Berechnungen HBT

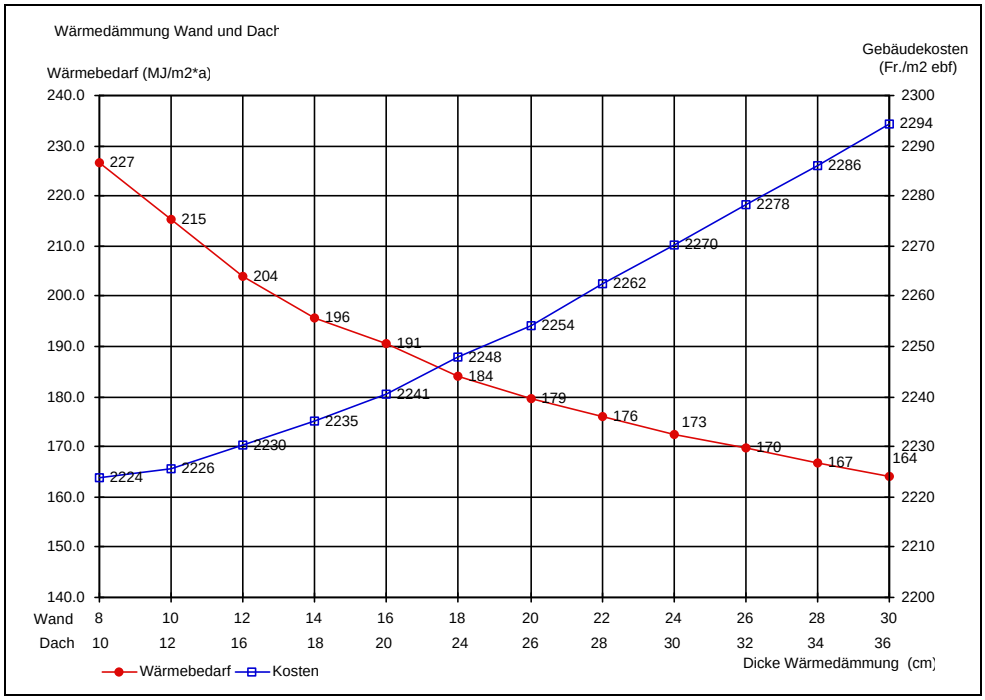
Abbildung 4.4-9 Grenzkosten (Durchschnittskostenbetrachtung) der Wärmedämmung an Steildächern beim Neubau

c) Wand und Dach (Steildach)

Untersucht wird der Einfluss unterschiedlicher Wärmedämmstärken von 8 cm bis 30 cm an Fassadenwänden und 10 cm bis 36 cm beim Dach, unter gleichbleibender Konstruktion der übrigen Bauteile, d.h. hier werden zwei der oben getrennt berechneten Massnahmen zusammen betrachtet, wobei eine typische Konstellation der beiden Wärmedämmstärken unterstellt wurde (vgl. Abbildung 4.4-10). Die Dämmstärke am Dach beträgt bei den schwachen Wanddämmungen +2 cm, im mittleren Bereich (12–16 cm) +4 cm und bei den grösseren Wanddämmungen +6 cm als bei der Fassade.

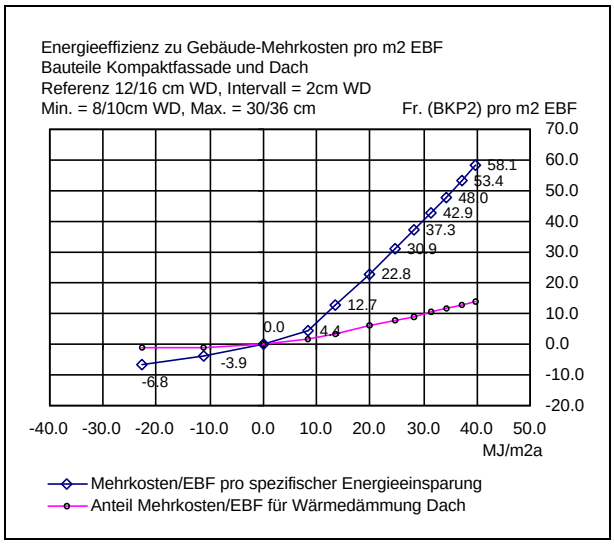
Wie nicht anders zu erwarten, vermindern sich die zusätzlichen Investitionen pro m² EBF als Funktion des eingesparten Wärmebedarfs gegenüber der einen Fassadenanalyse (s.o): Die Gebäude-Mehrkosten für die ersten eingesparten 10 MJ/m² betragen etwa 5 CHF/m², während

die nächsten 10 eingesparten MJ zusätzlich etwa 17 CHF/m² EBF erforderlich machen (vgl. Abbildung 4.4-11). Der Grenzkostenberechnung liegt eine durchschnittliche Abschreibungsdauer von 40 Jahren für die Fassadenwände bzw. 50 Jahre fürs Steildach und ein Zinssatz von 5,5% real für Mehrfamilienhäuser zu Grunde.



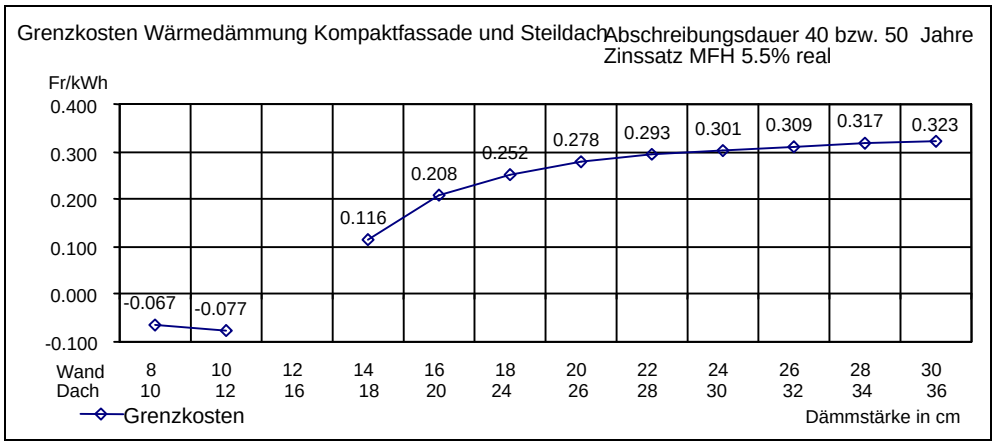
Quelle Berechnungen HBT

Abbildung 4.4-10 Wärmebedarf Qh und Gebäudekosten pro EBF bei unterschiedlicher Dicke der Wärmedämmung an den Fassadenwänden und am Steildach beim Neubau



Quelle Berechnungen HBT

Abbildung 4.4-11 Gebäude-Mehrkosten pro m² EBF als Funktion der Energieeinsparung bei Wärmedämmungen an Fassadenwänden und Steildächern beim Neubau

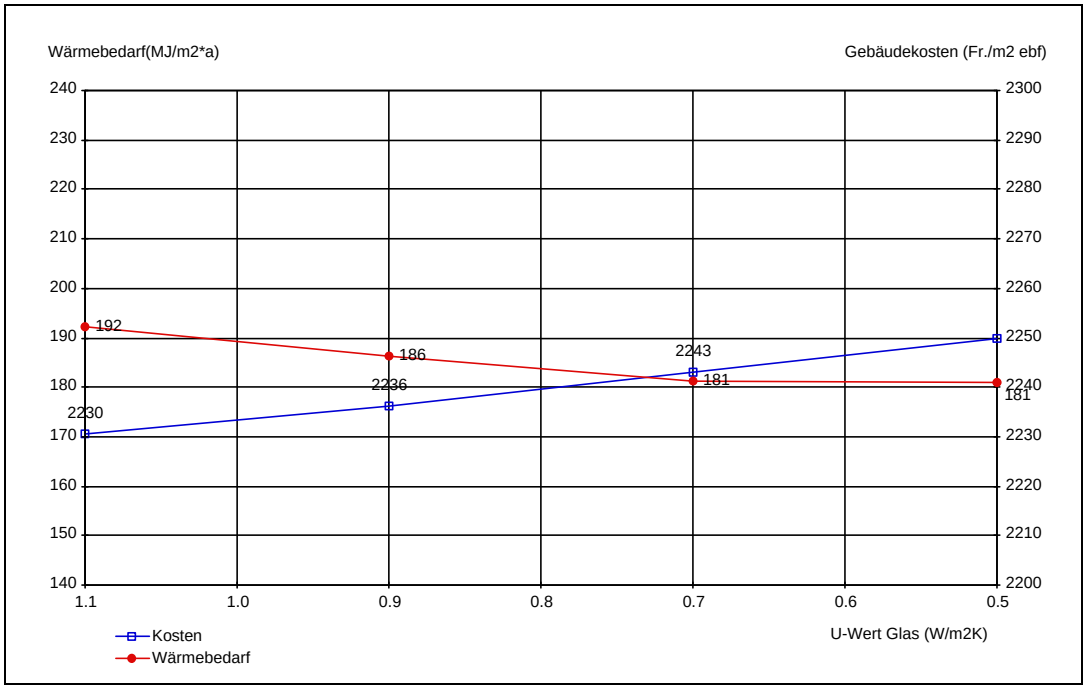


Quelle Berechnungen HBT

Abbildung 4.4-12 Grenzkosten(Durchschnittskostenbetrachtung) der Wärmedämmung an Fassadenwänden und Steildächern beim Neubau

d) Fenster mit gleichbleibendem Fensterflächeanteil

Untersucht wird der Einfluss unterschiedlicher Glas-U-Werte bei konstanter Flügel- und Fensterrahmenkonstruktion (Rahmen-U-Wert = 1,5), unter gleichbleibender Konstruktion der übrigen Bauteile. Die Kostenbasis entspricht den Untersuchungen im Kap. 4.3.7.

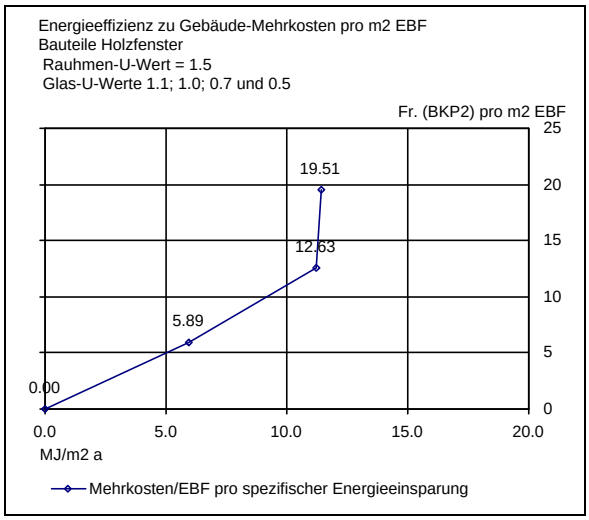


Quelle Berechnungen HBT

Abbildung 4.4-13 Wärmebedarf Qh und Gebäudekosten pro EBF bei unterschiedlichen Glas-U-Werten beim Neubau.

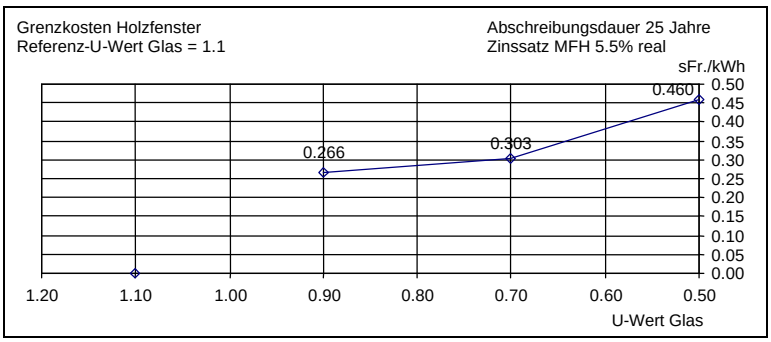
Allerdings beinhalten die folgenden Berechnungen aus Gründen des Projektablaufs lediglich die Kosten der Standardfenstergrösse (1.7m²). Das architektonische Gestaltungsmittel, grösserflächige statt kleine Fenster einzusetzen, ist hier nicht enthalten. Ausserdem dürfte die durchschnittliche Fensterfläche im Neubau grösser sein als 1.7 m2. Und zudem sind nur Fenster mit heute sehr gebräuchlichen Kennwerten in die Betrachtung miteinbezogen. Fenster mit höherem g-Wert zum Beispiel fehlen.

Während die Steigung der Gebäudekosten mit dem besseren (abnehmenden) U-Wert bis 0,7 der Verglasung linear verläuft, ist gegenüber einer Verglasung mit einem U-Wert unter 0,7 nur noch ein unbedeutender Energiegewinn zu verzeichnen (vgl. Abbildung 4.4-13 und 4.4-14). D.h. bei einem tieferen U-Wert als 0,7 wird der erhöhte Wärmeschutz durch den sinkenden g-Wert (Nutzen der Globalstrahlung) kompensiert. Im linearen Bereich der Energieeffizienz (vgl. Abbildung 4.4-14) betragen die zusätzlichen Investitionskosten für verbesserte Verglasung ca. 1 CHF pro MJ/m² a Energiegewinn. Grundlagen für die Grenzkostenberechnung: durchschnittliche Abschreibungsdauer von 25 Jahren für die Holzfenster, 5,5% Realzinssatzsatz.



Quelle Berechnungen HBT

Abbildung 4.4-14 Enegieeffizienz der Glas-U-Werte (Gebäude-Mehrkosten pro EBF als Funktion der Energieeinsparung) beim Neubau



Quelle Berechnungen HBT

Abbildung 4.4-15 Grenzkosten (Durchschnittskostenbetrachtung) von Fenstern mit unterschiedlichen Glas-U-Werten beim Neubau (Referenz-U-Wert Glas=1.1 W/m²K)

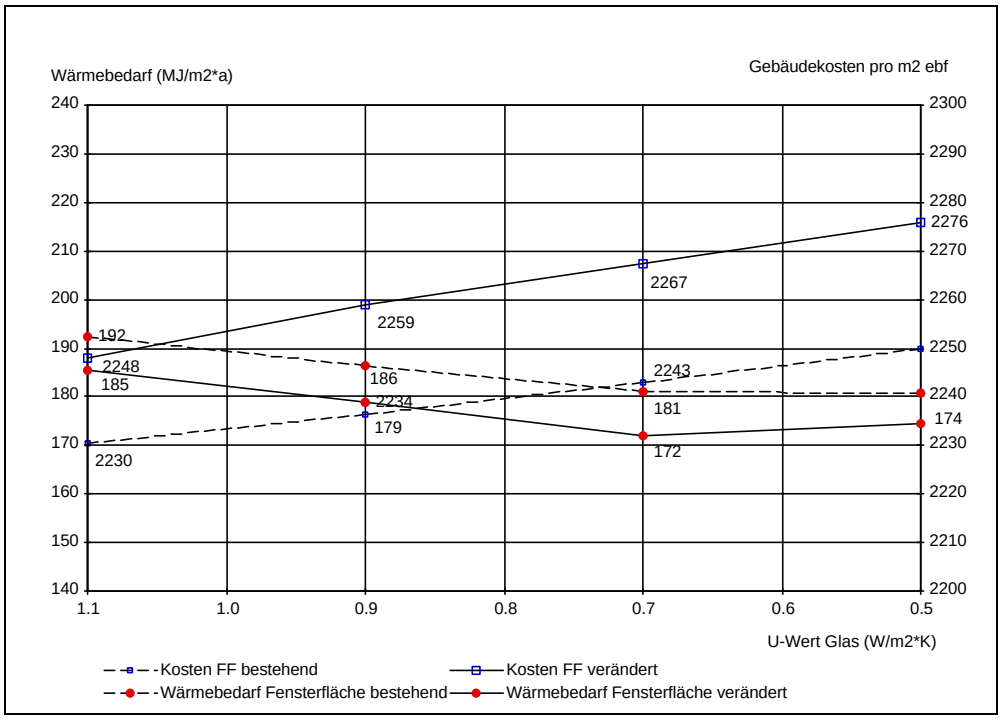
e) Grenzkosten der Energieeffizienz durch Vergrösserung der Fensterflächenanteile

Untersucht wird der Einfluss veränderter Fensterfächen bei verschiedenen Glas-U-Werten, unter gleichbleibender Konstruktion der übrigen Bauteile, wobei der Rahmen-U-Wert vorerst konstant bei 1,5 belassen wird.

Die Fensterfläche nach Süden wird verdoppelt, während die nach den übrigen Himmelsrichtungen auf die gesetzlich notwendige Fensterfläche reduziert wird, d.h. auf 70% der Referenzfläche. Insgesamt steigt der Fensterflächenanteil von 18% auf 21%. In der Kostenkalulation sind Minder- und Mehrkosten aus Wandkonstruktion samt Kompaktfassade und Sonnenschutz berücksichtigt (gilt auch für die nachfolgenden Varianten).

In einem ersten Schritt wird der Rahmen-U-Wert konstant bei 1,5 belassen und an allen Fassadenorientierungen jeweils dieselben Verglasungen eingesetzt.

Aus Gründen des Projektablaufs beinhalten die folgenden Berechnungen die Kosten der Standardfenstergrösse (1.7m2). Das architektonische Gestaltungsmittel, grösserflächige statt kleine Fenster einzusetzen, ist hier nicht enthalten. Ausserdem dürfte die durchschnittliche Fensterfläche im Neubau grösser sein als 1.7 m2. Ausserdem sind nur Fenster mit heute sehr gebräuchlichen Kennwerten in die Betrachtung miteinbezogen. Fenster mit höherem g-Wert zum Beispiel fehlen.



Quelle Berechnungen HBT

Abbildung 4.4-16 Wärmebedarf Qh und Gebäudekosten pro EBF bei veränderter Fensterfläche und unterschiedlichen Glas-U-Werten.

Der geringe Energieeffizienzgewinn nur durch die Veränderung der Fensterflächenanteile mag auf den ersten Blick erstaunen. Das nachstehende Zitat vermag den Sachverhalt zu erklären:

Beim energetisch schlechten Haus (mit schlechten Fenstern) ist die Vergrösserung der Südfenster energetisch negativ. Beim energetisch guten Haus wirkt sich die Vergrösserung positiv aus. Beim hochgedämmten Niedrigenergiehaus mit kurzer Heizperiode ist die Vergrösserung negativ. Quelle: Humm, Othmar; NiedrigEnergieHäuser, Innovative Bauweisen und neue Standards, Seite 48 ff.

Durch den geringen Effizienzgewinn dieser hier durchgerechneten Varianten ergeben sich folglich entsprechend hohe spezifische Grenzkosten, siehe Tabelle 4.4-3. Wird die Fensterqualität jedoch spezifisch pro Orientierung ausgewählt und werden insbesondere die Preisreduktionen berücksichtigt, die beim Einsatz von grossflächigen Fenstern möglich sind, resultieren sehr viel tiefere Grenzkosten, teilweise die tiefere als solche von Wärmedämmungen, siehe dazu Kap. 4.3.7, dessen Erkenntnisse aus Gründen des Projektablaufs in diesem Kapitel 4.4 nicht mehr Eingang finden konnten.

Tabelle 4.4-3 Grenzkosten architektonischen Massnahme „Fensterflächenvergösserung“

	Fensterfläche vorher		Fensterfläche nachher		Differenz		Grenzkosten
Ug	Gebäude-kosten	Qh	Gebäude-kosten	Qh	Gebäude-mehrkosten	Energie-Effizienz	
W/m²K	CHF/m²$_{EBF}$	MJ/m²a	CHF/m²$_{EBF}$	MJ/m²a	CHF/m²$_{EBF}$	MJ/m²a	CHF/kWh$_{NE}$
1.1	2230	192	2248	185	18	7	0.64
0.9	2234	186	2259	179	25	7	0.88
0.7	2243	181	2267	172	24	9	0.66
0.5	2250	180	2276	174	26	6	1.07

f) Grenzkosten energie-effizienter Fenster beim Gebäude mit veränderterten Fensterflächenanteilen [1]

Beim Gebäude mit nunmehr veränderten Fensterflächen werden die Grenzkosten zunehmend energie-effizienterer Fenster untersucht. Es geht also um die Frage, ob die Energieeffizienz energetischen Verbesserung der Fenster beim Gebäude mit veränderten Fenstergrössen und -anordnung kosteneffizienter oder weniger kosteneffizient ist als im ursprünglichen Zustand.

Erwartungsgemäss verläuft die Steigung der Gebäudekosten mit dem besseren (abnehmenden) U-Wert der Verglasung bis zum Glas-U-Wert 0,7 positiv-linear und schlägt anschliessend negativ um (vgl. Abbildung 4.4-16 und 4.4-17). Unter einem U-Wert von 0,7 wird der Wärmegewinn aus erhöhtem Wärmeschutz durch den sinkenden G-Wert (Nutzen der Globalstrahlung) im Standardfall negativ (g-Wert=52% bei Glas-U-Wert von 0.7 W/m²K und g-Wert=42% bei Glas-U-Wert von 0.5 W/m²K). Höhere g-Werte bei diesen Glas-U-Werten sind zwar auf dem Markt erhältlich, müssen aber explizit verlangt werden und sind mit Mehrkosten verbunden, siehe dazu das Unterkapitel 4.3.6 zu den Verglasungen. Der Grenzkosten-

[1] [Aus Gründen des Projektablaufs beinhalten die folgenden Berechnungen die Kosten der Standardfenster-grösse (1.7m2). Das architektonische Gestaltungsmittel, grösserflächige statt kleine Fenster einzusetzen, ist hier nicht enthalten. Ausserdem dürfte die durchschnittliche Fensterfläche im Neubau grösser sein als 1.7 m2. Ausserdem sind nur Fenster mit heute sehr gebräuchlichen Kennwerten in die Betrachtung miteinbezogen. Fenster mit höherem g-Wert zum Beispiel fehlen.]

berechnung liegt eine durchschnittliche Abschreibungsdauer von 25 Jahren für die Holzfenster und ein Zinssatz von 5,5% real für Mehrfamilienhäuser zu Grunde.

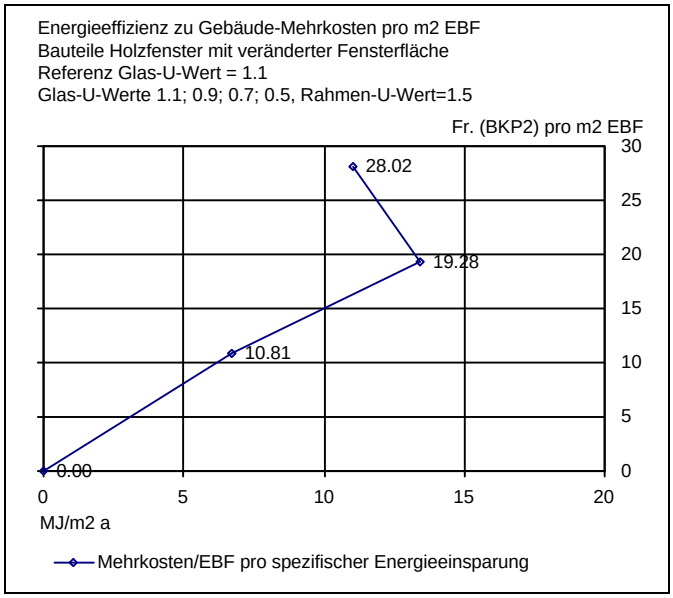
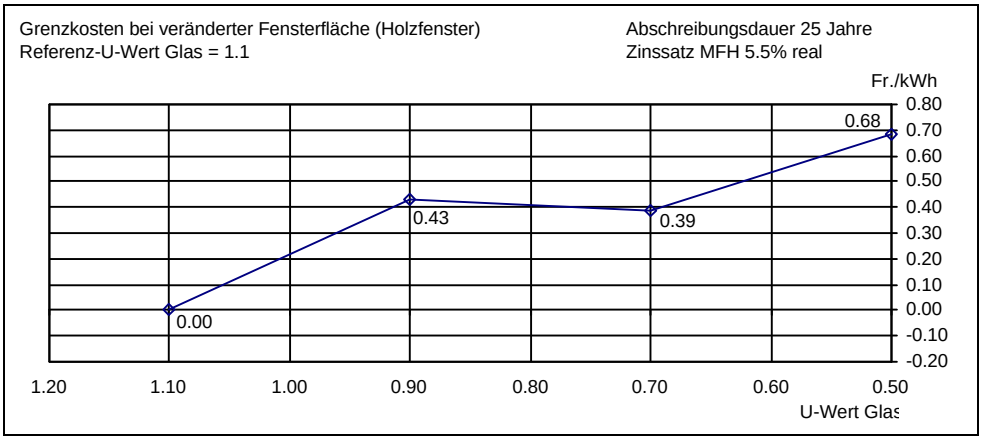


Abbildung 4.4-17 Enegieeffizienz bei veränderter Fensterfläche und unterschiedlichen Glas-U-Werten beim Neubau, Rahmen-U-Wert konstant 1,5 (Gebäude-Mehrkosten pro EBF als Funktion der Energieeinsparung)



Quelle Berechnungen HBT

Abbildung 4.4-18 Grenzkosten (Durchschnittskostenbetrachtung) von Fenstern mit unterschiedlichen Glas-U-Werten bei veränderter Fensterfläche.

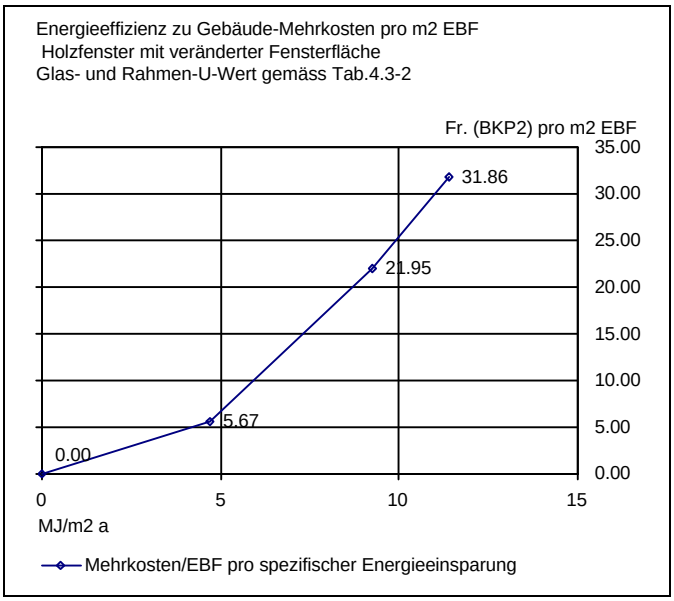
Im zweiten Schritt werden Glas- und Rahmen-U-Werte variiert und zwischen Süd- und den übrigen Orientierungen unterschieden, um der negativen Energieeffizienz aus der Südexposition zu begegnen. Eine Optimierung der Fensterflächen gepaart mit einer Verbesserung des Glas-U.Wertes von 1.1 auf 0,7 bzw. 0,5 der nicht nach Süden exponierten Fenster (Rahmen-U-Wert 1, 5 bzw. 1.1 resp. 0,8) weist eine progressive Energieeffizienz auf: für die ersten eingesparten 5 MJ/m² a müssen zusätzlich rd. 7,- CHF/m² EBF aufgewändet werden, während

für weitere zusätzlich eingesparte 5 MJ/ m² a zusätzlich 18,- CHF/ m² EBF investiert werden müssen.

Tabelle 4.4-4 Grenzkostenberechnung (Durchschnittskostenansatz) für energieeffiziente Fenster bei unterschiedlichen Glas- und Rahmen U-Werten, 25 Jahre, 5.5% real, Referenz-U-Werte: 1.1 / 1.5

	Eposition	Glas-U-Wert	Rahmen-U-Wert	Wärme-bedarf Qh MJ/m² a	Energie-effizenz MJ/ m² a	Mehrinves-titionen CHF/m² EBF	Grenz-kosten CHF/kWh
Referenz	Süd Nord/Ost/West	1,1 1,1	1,5 1,5	185	–	–	–
Var 1	Süd Nord/Ost/West	1,1 0,7	1,5 1,5	181	6	5,65	0,324
Var 2	Süd Nord/Ost/West	1,1 0,7	1,1 1,1	176	9	21,95	0.638
Var 3	Süd Nord/Ost/West	1,1 0,5	1,1 0,8	174	11	31,85	0,751

Quelle Berechnungen HBT



Quelle Berechnungen HBT

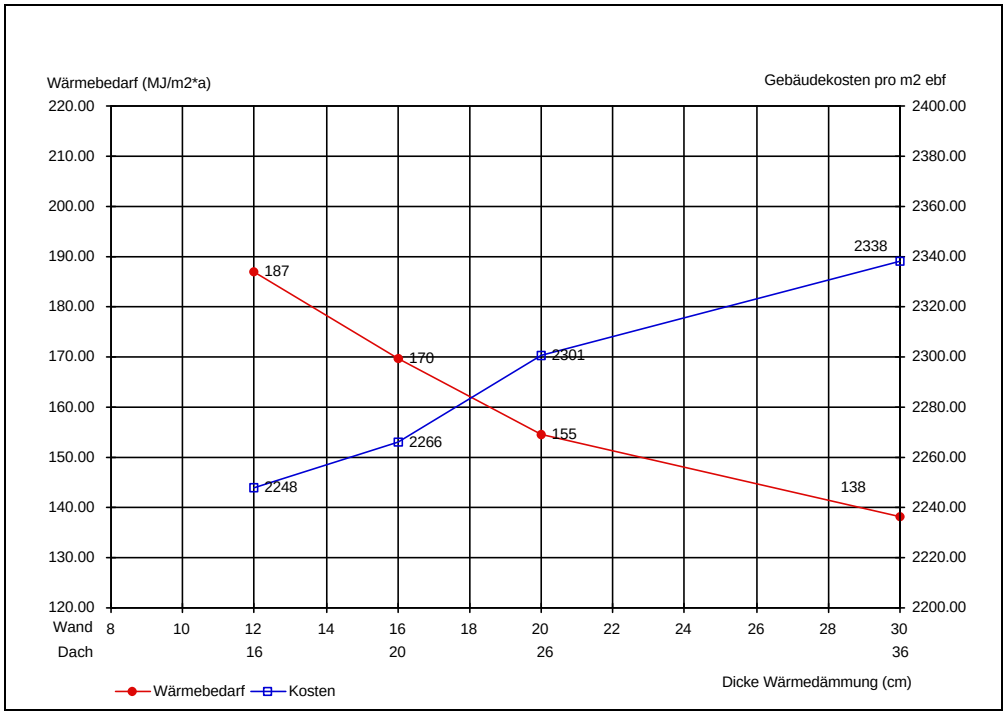
Abbildung 4.4-19 Enegieeffizienz bei veränderter Fensterfläche und unterschiedlichen Glas- und Rahmen-U-Werten beim Neubau (Gebäude-Mehrkosten pro EBF als Funktion der Energieeinsparung)

Fazit: Als Einzelmassnahme ist eine Veränderung der Fensterflächen (nach Süden mehr, und bei den übrigen Orientierung nur das gesetzliche Minimum) bezogen auf das ganze Gebäude weniger kosteneffizient , auch wenn bessere Gläser verwendet werden, weil die Grenzkosten dieser Massnahme gegenüber den oben genannten relativ teurer sind. Das liegt einerseits darin begründet, dass der Gewinnfaktor der freien Wärme etwas zurück geht (weil das

Gewinn-/Verlustverhältnis zunimmt) und andererseits weil die Kosten der Fenster in Funktion zunehmender Energieeffizienz stärker ansteigen als bei der Wand. Hieran zeigt sich sehr deutlich, dass ein energieeffizientes Haus als gesamtes System konzipiert und umgesetzt werden muss, um kosteneffiziente Lösungen zu realisieren (siehe dazu weitere ausführliche Berechnungen von Kosten und Nutzen verschiedener Gestaltungsvarianten und Fensterqualitäten im Neubau, Kapitel 4.3.7).

g) Variable Dach- und Fassadenwand-Dämmung bei veränderte Fensterflächen [1]

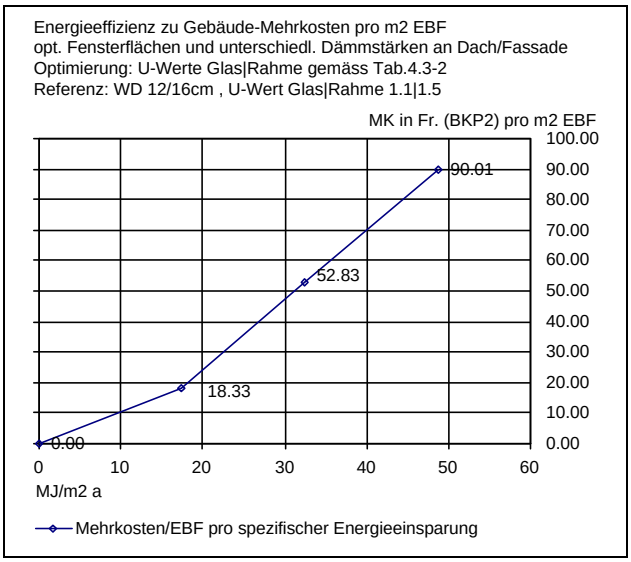
Aufgrund der oben dargelegte Ergebnisse wird nunmehr der Einfluss veränderter Dach- und Fassadenwand-Dämmstärken bei veränderten Fensterflächen sowie Glas- und Rahmen-U-Werten gemäss Tab.4.4-2 untersucht. Die Fensterfläche nach Süden wird verdoppelt, während die nach den übrigen Himmelsrichtungen auf die gesetzlich notwendige Fensterfläche reduziert wird, d.h. auf 70% der Referenzfläche. Als Variablen gelten die Dämmstärken von 12 cm Wand und 16 cm Dach bzw. 16 cm/20 cm, 20 cm/26 cm, 30 cm/36 cm. Der Grenzkostenberechnung liegt eine durchschnittliche Abschreibungsdauer von 25 Jahren für die Holzfenster bzw. von 45 Jahren für die Dach- und Fassaden-Wärmedämmungen und ein Zinssatz von 5,5% real für Mehrfamilienhäuser zu Grunde.



Quelle Berechnungen HBT

Abbildung 4.4-20 Wärmebedarf Qh und Gebäudekosten pro EBF bei veränderter Fensterfläche und unterschiedlichen Dach- und Fassadendämmungen beim Neubau.

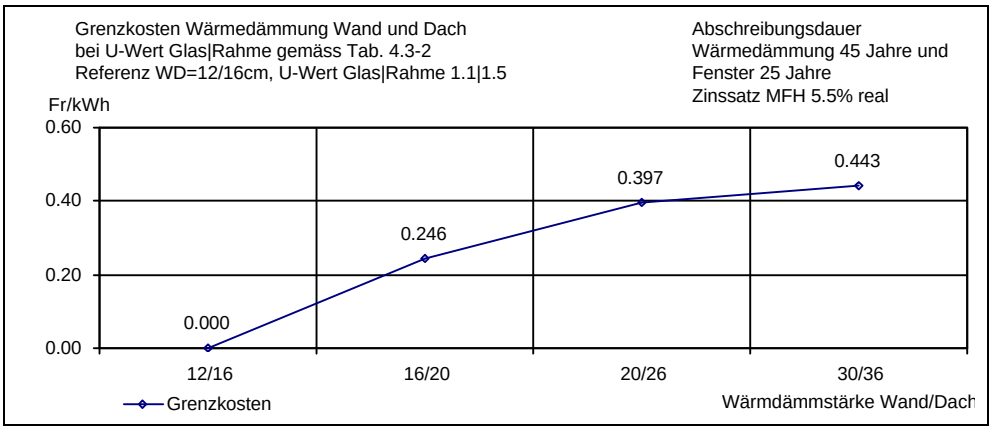
[1] [Aus Gründen des Projektablaufs beinhalten die folgenden Berechnungen die Kosten der Standardfenstergrösse (1.7m2). Das architektonische Gestaltungsmittel, grösserflächige statt kleine Fenster einzusetzen, ist hier nicht enthalten. Ausserdem dürfte die durchschnittliche Fensterfläche im Neubau grösser sein als 1.7 m2. Ausserdem sind nur Fenster mit heute sehr gebräuchlichen Kennwerten in die Betrachtung miteinbezogen. Fenster mit höherem g-Wert zum Beispiel fehlen.]



Quelle Berechnungen HBT

Abbildung 4.4-21 Energieeffizienz bei veränderter Fensterfläche und unterschiedlichen Dach- und Fassadendämmungen von Neubauten (Gebäude-Mehrkosten pro EBF als Funktion der Energieeinsparung)

Während die Steigung der Gebäudekosten mit zunehmender Dämmstärke etwa linear verläuft (vgl. Abbildung 4.4-20) und dies auch für die Grenzkosten der Baukosten als Funktion der Dämmstärke gilt (vgl. Abbildung 4.4-22), sind die Mehrinvestitionen als Funktion der eingesparten Wärmeenergie leicht progressiv (vgl. Abbildung 4.4-21): so kosten die ersten zusätzlich gegenüber der Referenz eingesparten 20 MJ/ m^2 a etwa zusätzlich 23 CHF/m^2 EBF, und die nächsten zusätzlich eingesparten 10 MJ/ m^2 a kosten weitere 25 CHF/ m^2 EBF.



Quelle Berechnungen HBT

Abbildung 4.4-22 Grenzkosten (Durchschnittskostenbetrachtung) bei veränderter Fensterfläche und unterschiedlichen Dach- und Fassadendämmungen bei Neubauten

h) Zusammenfassung der Einzelmassnahmen zu den fünf Nutzenergiebedarfskategorien für das Mehrfamilienhaus und das Modell-EFH (Fallbeispiel Gasheizung)

Auf der Grundlage der obigen Einzelbauteiluntersuchungen werden fünf Massnahmenpakete definiert, die in ihrem Wärmebedarf (Qh) den eingangs vorgegebenen Nutzenergiebedarfskategorien entsprechen. Mit den daraus resultierenden Gebäude-Mehrkosten werden die Grenzkosten der Abschreibungsdauer (bauteilspezifisch) und einer Verzinsung von 5,5% bei MFH und 3,5% bei EFH dargestellt. Mit eingerechnet sind Minderkosten aufgrund der kleiner dimensionierten Heizungsanlage und –verteilung in Funktion der Nutzenergiebedarfskategorien.

a) **Referenzneubauweise**: Grenzwert gemäss SIA 380/1 (1988) und Absenkpfad SIA 1996. Heutige Bauweise (Normalfall), entspricht dem Fallbeispiel ohne Komfortlüftung, einer reduzierten Wärmedämmung von 10 cm an Fassade und 12 cm am Dach und Fenstern mit Glas- bzw. Rahmen-U-Werten von 1,1 bzw. 1,5.

b) **Minergie-Primär:** Minergie-Primäranforderung an die Gebäudehülle (Einführung geplant). Entspricht dem Fallbeispiel ohne Komfortlüftung und einer leicht verbesserten Wärmedämmung von 16 cm an Fassade, 20 cm am Dach und 5 cm zusätzliche Wärmedämmung an der Kellerdecke sowie Fenstern mit Glas- bzw. Rahmen-U-Werten von 1,1 bzw. 1,5.

c) **Zielwert** entspricht dem Fallbeispiel ohne Komfortlüftung, mit einer verbesserten Wärmedämmung von 20 cm an Fassade, 26 cm am Dach und 5 cm zusätzliche Wärmedämmung an der Kellerdecke, einer optimierten Fensterfläche und einem verbesserten Glas-U-Wert (nach Süden 1,1 bzw. Nord, Ost und West 0,7), Rahmen-U-Wert = 1,5.

d) **Minergie-Gebäudehülle-allein (Minergie-GHa)** entspricht dem Fallbeispiel (mit Komfortlüftung) mit einer verbesserten Wärmedämmung von 24 cm an Fassade, 30 cm am Dach und 10 cm Wärmedämmung an der Kellerdecke, einer optimierten Fensterfläche und einem verbesserten Glas-U-Wert (1,1 nach Süden bzw. 0,7 nach den anderen drei Himmelsrichtungen, Rahmen-U-Wert = 1,1).

e) **Minergie-P / Passivhaus** entspricht dem Fallbeispiel (Komfortlüftung) mit einer verbesserten Wärmedämmung von 30 cm an Fassade, 36 cm am Dach und 20 cm Wärmedämmung an der Kellerdecke, einer weiter optimierten Fensterfläche und einem verbesserten Glas- bzw. Rahmen-U-Wert (1,1 / 1,1 nach Süden und 0,5 / 0,8 nach Nord, Ost, West). Zusätzlich sind bei tiefem Wärmededarf Massnahmen zur erhöhten Dampf-/ Luftdichtigkeit (10 CHF/m^2 Wand- und Dachfläche) notwendig.

Bei den Grenzkosten der Tabelle 4.4-5 sind die investitionsseitigen Reduktionsmöglichkeiten bei der Wärmeerzeugung und –verteilung bereits berücksichtigt[1]. Zugrunde liegen der obigen Tabelle 4.4-5 die Annahmen zu Wärmeerzeugung und Wärmeverteilung gemäss der untenstehenden Tabelle 4.4-6. Wie der Vergleich der beiden Tabellen zeigt, sind die Reduktionen von Wärmeerzeugung und –verteilung klein im Vergleich zu den Mehr-Investitionskosten von Gebäudehülle und Lüftungsanlage.

[1] [Nicht berücksichtigt ist aus Gründen des Projektablaufs das architektonische Gestaltungsmittel, grösserflächige statt kleine Fenster einzusetzen. Ausserdem dürften die durchschnittliche Fensterfläche im Neubau grösser sein als 1.7 m2 und die Grenzkosten entsprechend kleiner. Ausserdem sind nur Fenster mit heute sehr gebräuchlichen Kennwerten in die Betrachtung miteinbezogen. Fenster mit höherem g-Wert z.B. fehlen.]

Tabelle 4.4-5 Gebäudekosten pro m² EBF, Wärmebedarf Qh, Energieeffizienz, Zusatzkosten und Netto-Grenzkosten für die 5 Nutzenergiebedarfskategorien (MFH / EFH)

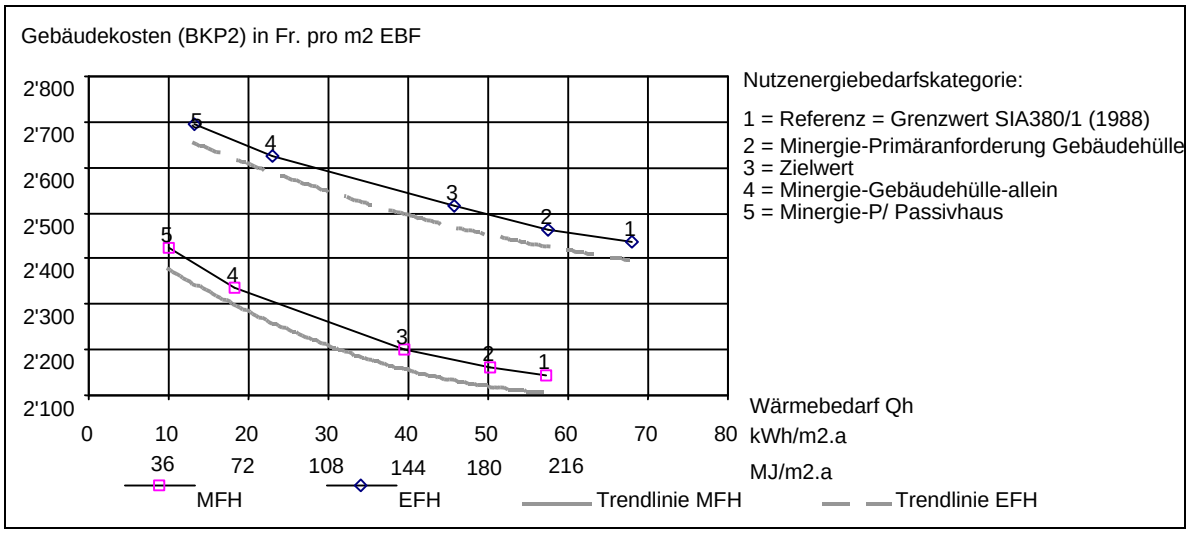
Nutz-energie-kategorie	Gebäudekosten CHF/m² EBF		Wärmebedarf Qh MJ/ m² a		Energieeffizienz MJ/ m² a		Mehrinvestitionen CHF/ m² EBF		Grenzkosten CHF/kWh$_{NE}$	
	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH
a)	2'145	2'438	206	245	Ausgangsbasis		Ausgangsbasis		Ausgangsbasis	
b)	2'161	2'464	181	207	25	38	16	26	0,145	0,113
c)	2'201	2'515	142	165	64	80	57	77	0,211	0,170
d)	2'334	2'626	66	83	140	163	189	188	0,344	0,224
e)	2'408	2'681	36	48	155	182	263	243	0,389	0,252

Quelle Berechnungen HBT

Tabelle 4.4-6 Spezifische Investitionskosten (CHF/m²) von Wärmeerzeugung (WE) und Wärmeverteilung (WV) für die verschiedenen Nutzenergiebedarfskategorien, ausgehend vom Fallbeispiel

Nutz-energie-kategorie	kW MFH	kW EFH	Wärmeerzeugung MFH	Wärmeerzeugung EFH	Raumwärmeverteilung MFH	Raumwärmeverteilung EFH	Total WE+WV MFH	Total WE+WV EFH
a)	22	8	24	34	44	41	68	75
b)	21	7	23	33	43	40	66	73
c)	18	6	21	31	39	36	60	67
d)	12	4	20	30	38	35	58	65
e)	10	3	19	29	37	34	56	63

Quelle Kosten HBT, Wärmeleistungsbedarf gemäss Tabelle 4.2-26

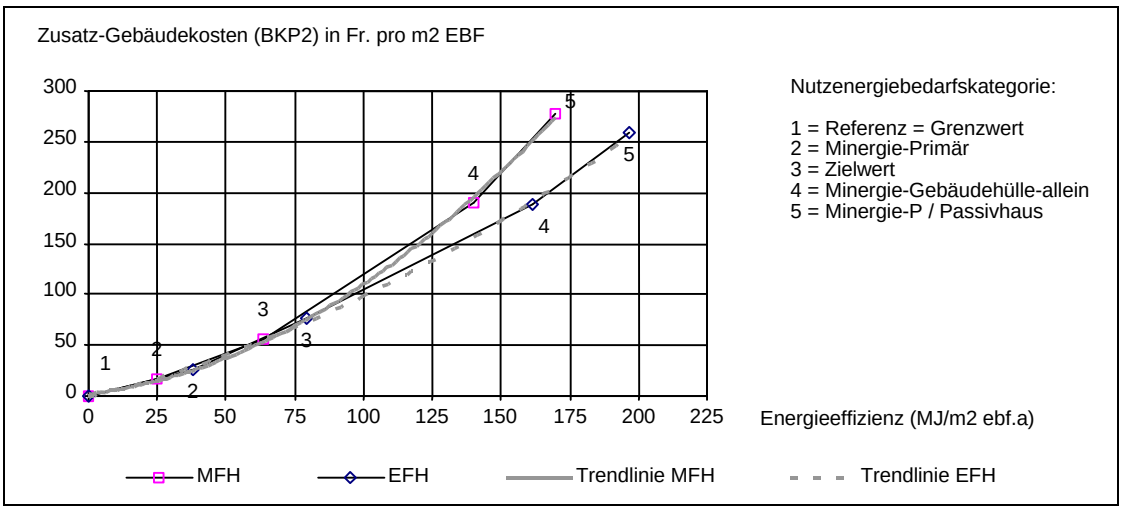


Quelle Berechnungen HBT

Abbildung 4.4-23 Gebäudekosten pro EBF in Funktion des Wärmebedarfs Qh bei den fünf Nutzenergiebedarfskategorien für **MFH** und **EFH**.

Die Gebäudekosten pro m² EBF nehmen für die beiden Gebäudearten MFH und EFH in Funktion des sinkenden Wärmebedarfs praktisch linear und parallel zu (vgl. Abbildung 4.4-23). Das Kostenniveau liegt für das EFH rd. 300 CHF pro m² EBF höher, während die Resultate aus dem Top-down-Ansatz für das EFH eine grössere Steigung als beim MFH aufweist (vgl. Abbildung 4.4-26). Zudem liegen im Vergleich mit den erhobenen Gebäudekosten des top down-Ansatzes die obigen Ergebnisse bei den MFH rd. 6–8% bzw. bei den EFH bis 15% unter dem Durchschnitt.

Durch die Transfomation des MFH-Fallbeispiels zum Modell-EFH erhöht sich der Wärmebedarf für die Katergorie "Grenzwert" trotz gleicher Bauweise von 206 MJ/ m² a (MFH) auf 245 MJ/ m² a, dies weil das Verhältnis A/EBF beim EFH grösser ist als beim MFH . Der Wert dürfte nach Norm eigentlich rund 270 MJ/m²a betragen, der Referenzfall ist also etwas zu tief definiert; die Grenzkosten werden damit etwas überschätzt. Die Zusatzinvestitionen pro eingespartem Wärmebedarf (MJ/ m² a) steigen beim MFH stärker an als beim EFH.

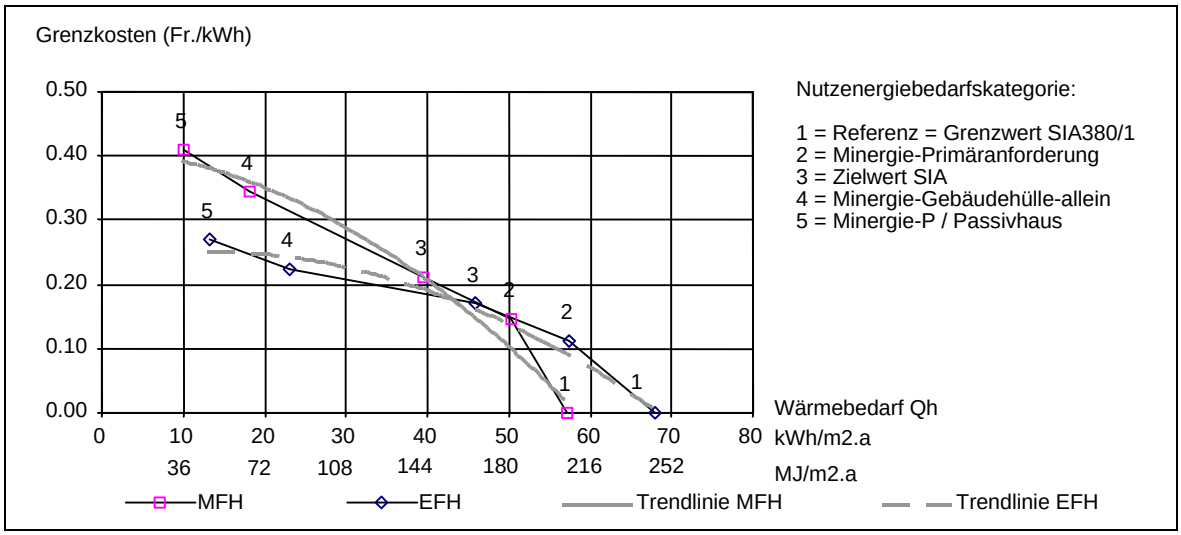


Quelle Berechnungen HBT

Abbildung 4.4-24 Enegieeffizienz bei den fünf Nutzenergiebedarfskategorien für **MFH** und **EFH**

Die Mehrinvestitionskosten von Minergie-Gebäudehülle-allein[1] betragen zwischen 8% und 10% gegenüber der Referenzbauweise, diejenige von Minergie-P / Passivhaus zwischen 10% und 13%. Die obigen Resultate des Botton-up-Ansatzes zeigen, dass die Grenzkosten zwischen Minergie-Gebäudehülle-allein und Minergie-P / Passivhaus nicht sehr unterschiedlich sind. Beachtet man aber, dass gegenüber der Kategorie Zielwert die vermietbare Wohnfläche beim MFH um 3% bzw. 8% sinkt, sind jährliche Mietzinsverluste von 5–15 CHF/m² EBF in Kauf zu nehmen, was auf der Ebene der Investitionskosten 60 CHF/m² bis 180 CHF/m² entspricht. Der Aspekt der reduzierten vermiet- bzw. nutzbaren Wohnfläche ist vor allem dann einzubeziehen, wenn im Referenzfall die Ausnützung schon voll ausgeschöpft ist oder die minimalen Grenzabstände schon erreicht sind und sich die entsprechenden massgebenden Bauvorschriften auf das Aussenmass der Gebäude beziehen. Die diesbezüglichen Regelungen sind von Kanton zu Kanton und von Gemeinde zu Gemeinde verschieden.

[1] Bemerkung: Damit die Anforderung Minergie auch wirklich erfüllt werden kann, muss bei Minergie-Primär auch tatsächlich eine entsprechende Haustechnik (z.B. WP) oder ein erneuerbarer Energieträger eingesetzt werden; solche Kosten sind hier noch nicht eingerechnet, siehe dazu Betrachtungen im Unterkapitel 4.4.3k))



Quelle Berechnungen HBT

Abbildung 4.4-25 Grenzkosten der fünf Nutzenergiebedarfskategorien für **MFH** und **EFH** im Bezug auf den Wärmebedarf Qh beim Neubau

Die Investitionskosten für die Komfortlüftung betragen gemäss HTA Luzern beim MFH zwischen 80 und 120 CHF/m^2_{EBF} (Basisobjekt des Fallbeispiels: 95.2 CHF/m^2_{EBF}) bzw. zwischen 60 und 90 CHF/m^2_{EBF} beim EFH (Referenzobjekt = 69 CHF/m^2_{EBF}). Die sich daraus ergebendenden Gebäudekosten und die Grenzkosten sind in Tabelle 4.4-7 aufgeführt. Daraus kann letztlich die Sensitivität gegenüber den unterschiedlichen Investitionskosten der Lüftungsanlage abgeleitet werden. Da bei der Energie-Effizienzmassnahme Lüftung die absoluten Kosten und nicht Differenzkosten (wie bei der Wärmedämmung gegenüber einer Referenzdämmstärke) in die Berechnung einfliessen und die Grenzkosten ausserdem nicht zu 100% auf den Kapitalkosten beruhen, ist die Sensitivität gegenüber den Investitionskosten geringer als bei verstärkten Wärmedämmungen. Hingegen ist die Sensitivität bzgl. des angenommenen Realzinssatzes relativ stark, dies, weil die Abschreibedauer wesentlich kürzer ist als bei Wärmedämm-investitionen. Auch hier gilt es also, den jeweils angenommen Zinssatz im Auge zu behalten und diesen jeweils auf den Anwendungsfall zutreffend zu wählen.

Tabelle 4.4-7 Gebäudekosten pro m² EBF und Grenzkosten unter Berücksichtigung der Gabelung bei Komfortlüftungspreisen

Nutz-energie-kategorie	Gebäudekosten MFH CHF/m² EBF		Gebäudekosten EFH CHF/m² EBF		Grenzkosten MFH mit dr=5.5% CHF/kWh		Grenzkosten EFH mit dr=3.5% CHF/kWh	
	80 [1]	120 [2]	60 [3]	90 [4]	80 [1]	120 [2]	60 [3]	90 [4]
d)	2'319	2'359	2'617	2'647	0.315	0.392	0.213	0.253
e)	2'393	2'433	2'672	2'702	0.367	0.426	0.245	0.276

[1] Minimalpreis KL im MFH
[2] Maximalpreis KL im MFH
[3] Minimalpreis KL im EFH
[4] Maximalpreis KL im EFH

Quelle Berechnungen HBT

Das Passivhaus kann statt mit einer konventionellen Wärmeerzeugung- und -verteilung auch mit einer Luftheizung ausgerüstet werden. Im Moment herrscht in Fachkreisen ein Diskurs über die Vor- und Nachteile von Luftheizungen im allgemeinen und darüber, ob die Kosten einer konventionellen Heizungsverteilung plus Komfortlüftung höher oder tiefer seien als diejenigen einer Luftheizung. Wir gehen deshalb von der vereinfachenden Annahme aus, dass die Investitionskosten beider Lösungen gleich sind. Die Luftheizung hat jedoch Konsequenzen für die Betrachtung auf Endenergieebene, siehe dazu das entsprechende Unterkapitel k).

i) Gebäudekosten für weitere Anlagetypen

Die in den vorgängigen Kapiteln erarbeiteten Gebäudeinvestitionskosten lassen sich auch mit weiteren Wärmeanlagetypen kombinieren. Basis dazu bildet die Tabelle 4.4-5, wovon die Kosten für die Gasheizung (Tabelle 4.4-6) subtrahiert werden, um dann die spezifischen Investitionskosten der Wärmeerzeugungsanlagen und der Wärmeverteilung (gemäss Tabelle 4.4-8 zu addieren.

Tabelle 4.4-8 Investitionskosten (CHF/m²EBF) von Wärmeerzeugungsanlagen (inkl. Warmwasser) für Ein- und Mehrfamilienhäuser (250 m² bzw. 720 m² EBF) in Funktion der Energieeffizienzstufen bzw. dem entsprechenden Wärmeleistungsbedarf (in kW)

kW	kW	Oel		Gas		WP Erdsonde		WP Luft		Holzheizung	
MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH
22	8	36	79	34	69	76	113	51	81	35	77
21	7	35	79	33	68	72	106	49	77	34	77
18	6	33	78	32	67	66	96	45	71	32	76
12	4	30	77	28	66	52	77	36	58	29	75
10	3	29	75	26	64	44	66	32	50	28	74

Quelle Afjei et al. 1999, Gantner/Jakob et al (1999), Aktualisierungen CEPE, Investitionskosten gemäss Tabelle 4.3-52, Wärmeleistungsbedarf gemäss Tabelle 4.2-26.

In der obigen Tabelle 4.4-8 sind 6000 CHF (EFH) und 6500 CHF (MFH) für den Gasanschluss (Anschlussgebühr oder Kostenbeitrag an Tiefbau) miteingerechnet (Annahme: Cost sharing mit Wasser, Elektrizität, Abwasser, Kabel etc. beim Erschliessen der Neubauten). Es stellt sich hier jedoch die Frage, ob die Erdgasunternehmen bei sehr tiefen Gasbezügen, wie sie bei Minergie oder Passivhaus gegeben sind, die Anschlussgebühren erhöhen, anderweitige Fixkosten erheben oder den Gaspreis anheben würden, um die Infrastruktur- und Administrativkosten refinanzieren zu können. Beim Passivhaus-EFH können die Verteilkosten rasch auf 10 bis 15 Rp/kWh ansteigen (Durchschnitt Heizung und Warmwasser) oder bis 20 Rp/kWh (wenn der durch die geringere Energiedichte verursachte Minderertrag verursachergerecht nur auf die Raumwärme umgelegt wird[1]), weil die spezifische Energiedichte der Erdgasverteilung entsprechend abnimmt.

[1] Berechnungsbasis: Dem Preis für EFH: 5.5 Rp/kWh stehen den Gasversorgungsunternehmen Kosten von 2 bis 2.5 Rp/kWh für Gaseinkauf/Transport sowie 3 bis 3.5 Rp/kWh für Feinverteilung an EFH. Die Kosten der Feinverteilung erhöhen sich proportional zur abnehmenden Energiedichte (vom heutigen Baustandard zum Minergie-P / Passivhaus: Faktor 5 bis 6 für Raumwärme allein bzw. Faktor 3 bis 4 für Raumwärme + WW.

Erwartungsgemäss ist das Niveau der spezifischen Investitionskosten bei den EFH höher als bei den MFH. Ebenfalls wie zu erwarten sind die Investitionskosten der WP-Systeme insbesondere bei den MFH bei der energetischen Referenzbau investitionsintensiver als die Öl- und Gasheizungen. Weil sich die WP jedoch besser skalieren lassen, sind die Kosten der Anlagen beim Passivhaus ähnlichen Gebäude beinahe vergleichbar mit denjenigen der Ölheizungen.

Tabelle 4.4-9 Investitionskosten (CHF/m²EBF) von Gebäuden mit verschiedenen Wärmeerzeugungsanlagen (inkl. Warmwasser) für Ein- und Mehrfamilienhäuser (250 m² bzw. 720 m² EBF) in Funktion der Energieeffizienzstufen [1]

kW	kW	Oel		Gas		WP Erdsonde		WP Luft		Holzheizung	
MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH
22	8	2'157	2'483	2'155	2'473	2'197	2'517	2'172	2'485	2'156	2'481
21	7	2'173	2'510	2'171	2'499	2'210	2'537	2'187	2'508	2'172	2'508
18	6	2'213	2'562	2'212	2'551	2'246	2'580	2'225	2'555	2'212	2'560
12	4	2'344	2'673	2'342	2'662	2'366	2'673	2'350	2'654	2'343	2'671
10	3	2'418	2'727	2'415	2'716	2'433	2'718	2'421	2'702	2'417	2'726

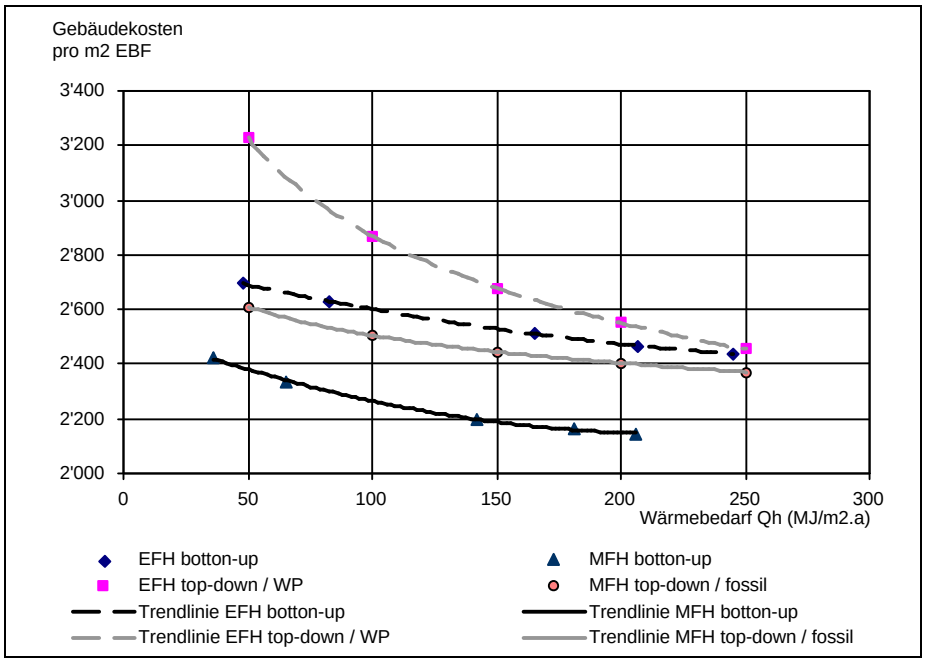
Quelle HBT (Investitionskosten Gebäudehülle und Lüftungsanlagen), Investitionskosten Wärmeerzeugung und –verteilung gemäss Tabelle 4.4-8

j) Vergleich der Investitionskosten zwischen top down und bottom-up Ansatz

Nach der Berechnung der Investitionskosten für Gebäude unterschiedlicher Wärmeerzeugungsanlagen lassen sich diese mit den Ergebnissen des top down Ansatzes vergleichen (Abbildung 4.4-26). Dabei ist bezüglich der Mehrinvestitionskosten der MFH mit fossiler Wärmeerzeugung eine relativ gute Übereinstimmung festzustellen. Bei den EFH jedoch ergibt der top down Ansatz eine wesentlich markantere Kostensteigerung für die Gebäude mit WP. Eigentlich wäre eher das Gegenteil zu erwarten, denn die Anlagekosten lassen sich bei den WP wesentlich flexibler und kostenwirksamer hin zu kleinen Leistungen hin skalieren als die fossilen Anlagen. Es ist zu vermuten, dass beim top down Ansatz aufgrund einer zu geringen Datenmenge die Unsicherheit bei den EFH-WP sehr gross ist. Deshalb wird im folgenden weiterhin voll auf den bottom-up Ansatz abgestützt.

Trotz dieser scheinbar hohen Energiepreissteigerungen wirken sich diese nur relativ geringfügig auf die Grenzkosten aus, denn entsprechend mit der Energiepreissteigerung geht auch der Energieverbrauch zurück.

[1] [Nicht berücksichtigt ist aus Gründen des Projektablaufs das architektonische Gestaltungsmittel, grösserflächige statt kleine Fenster einzusetzen. Ausserdem dürften die durchschnittliche Fensterfläche im Neubau grösser sein als 1.7 m2 und die Grenzkosten entsprechend kleiner. Ausserdem sind nur Fenster mit heute sehr gebräuchlichen Kennwerten in die Betrachtung miteinbezogen. Fenster mit höherem g-Wert zum Beispiel fehlen.]



Quelle Berechnungen HBT

Abbildung 4.4-26 Grenzkosten der fünf Nutzenergiebedarfskategorien für **MFH** und **EFH** im Bezug auf den Wärmebedarf Qh beim Neubau.

k) Betrachtung auf Ebene Endenergie für weitere Anlagetypen

Anhand der Investitionskosten (Tabelle 4.4-9) lassen sich Mehrinvestitionskosten gegenüber dem energetischen Referenzgebäude, der Nutzenergiebedarfsstufe a), berechnen, siehe Tabelle 4.4-10. Es sind dies die Mehrkosten jeweils innerhalb eines gleichen Wärmeerzeugungstyps. Die Mehrkosten auf der Ebene der Investitionskosten betragen rund 6% bis 9% beim Gebäudetyp „Minergie-Gebäudehülle-allein“ und 8% bis 11% beim Passivhaus oder Minergie-P Gebäude.

Tabelle 4.4-10 Mehrinvestitionskosten (CHF/m²) von Neubauten gegenüber der Referenzneubauweise für EFH und MFH mit verschiedenen Wärmeerzeugungsanlagetypen für die vier Effizienzlevels b) bis e)

	Oel		Gas		WP Erdsonde		WP Luft		Holzheizung	
	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH
b)	16	27	16	26	14	20	15	22	16	27
c)	56	79	57	79	50	64	53	70	56	79
d)	187	190	187	189	170	157	179	169	187	190
e)	260	244	260	243	237	201	249	217	261	244

Quelle Berechnungen CEPE aufgrund Tabelle 4.4-8 und Tabelle 4.4-9

Mittels der Kostenanteile und der spezifischen Lebensdauer der einzelnen Investitionskomponenten lassen sich die jährlichen Mehrkosten, die sogenannten Kapitalkosten berechnen (Tabelle 4.4-10).

Tabelle 4.4-11 Mehrkapitalkosten (CHF/m²a) von Neubauten gegenüber der Referenzneubauweise für EFH und MFH mit verschiedenen Wärmeerzeugungsanlagetypen für die vier Effizienzlevels b) bis e)

	Oel		Gas		WP Erdsonde		WP Luft		Holzheizung	
	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH
b)	1.0	1.3	1.0	1.3	0.84	0.9	0.91	1.0	1.0	1.3
c)	3.7	4.1	3.8	4.1	3.3	3.2	3.5	3.4	3.7	4.1
d)	13	10	13	10	12	8	12	9	13	10
e)	16	13	16	13	15	10	15	11	17	13

Quelle Berechnungen CEPE

Anhand der Nutzenergiebedarf der fünf Effizienzstufen gemäss Tabelle 4.4-5 und anhand der Nutzungsgrade in Funktion der Gebäudeenergieeffizienz gemäss Tabelle 4.3-56 lassen sich Endenergieverbräuche für die verschiedenen Gebäudeeffizienzstufen und Wärmeerzeugungstypen berechnen (Tabelle 4.4-12). Kommt eine Luftheizung mit hohen VL-Temperaturen zum Einsatz, erhöht sich der Stromverbrauch des Levels e), Minergie-P / Passivhaus, aufgrund der schlechteren WP-Nutzungsgrade wieder, beinahe auf das Effizienzlevel d).

Tabelle 4.4-12 Endenergieverbrauch für Raumwärme (MJ/m²a) [1]für EFH und MFH mit verschiedenen Wärmeerzeugungsanlagetypen für die fünf Effizienzlevels a) bis e)

	Oel		Gas		WP Erdsonde		WP Luft		Holzheizung	
	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH
a)	231	275	215	250	59	70	76	90	282	336
b)	203	233	189	211	49	56	63	73	248	284
c)	160	185	148	168	36	42	46	54	195	226
d)	74	93	69	85	16	20	20	25	90	114
e1)	40	54	38	49	8	11	10	13	49	66
e2)*	Wie e1)				13	18	18	24	Wie e1)	
*) Passivhaus mit Luftheizung und höherer Vorlauftemperatur, JNG gem. Tabelle 4.3-54										

Quelle Berechnungen CEPE

Werden die Kapitalmehrkosten durch die Effizienzgewinne (Differenz gegenüber dem Referenzfall a)) dividiert, ergeben sich dann die Brutto-Grenzkosten im Durchschnittskostenansatz, siehe Tabelle 4.4-13. In diesen Werten bereits berücksichtigt sind die Minderinvestitions-

[1] Die relative Endenergieeinsparung (z.B. der Unterschied zwischen a) und e) ausgedrückt in %) ist natürlich weniger beeindruckend, wenn man sich zu den Werten der Tabelle 4.4-12 den Energieverbrauch für die Warmwasseraufbereitung dazudenkt (60 bis 90 MJ/m2a dividiert durch den Jahresnutzungsgrad) . In absoluten Grössen (MJ/m2a oder kWh) werden die Unterschiede jedoch gleich bleiben (vorausgesetzt, die hydraulische Einbindung wird tatsächlich so gelöst, dass die VL-Temperatur und damit die Verdampfertemperatur der Raumwärmeverteilung auch bei kombinierten Systemen tief bleibt, wie hier angenommen), so dass die Grenzkostenresultate bzgl. der Raumwärme gültig bleiben.

kosten bei Wärmeerzeugung und –verteilung, nicht jedoch die geringeren Unterhalts- und Reparatur- und andere Betriebskosten. Ein Teil der Betriebs- und Unterhaltskosten weist Fixkostencharakter auf und ist für alle Effizienzlevels konstant, ein Teil jedoch ist variabel, geht tendenziell also zurück, je besser das Effizienzlevel des Gebäudes ist und je kleinere Anlagen im Einsatz stehen. Allerdings hat dieser Aspekt einen relativ geringen Einfluss auf die Grenzkosten (1 bis 2 Rp/kWh). Danach können die Werte aus Tabelle 4.4-13 mit dem Langfristenergiepreis verglichen werden (unter dem Vorbehalt, dass die hier dargestellten Konzepte noch nicht das Kostenoptimum darstellen, siehe dazu die später folgende Darstellung der Jahreskosten).

Tabelle 4.4-13 Brutto-Grenzkosten[1] der Endenergieeffizienz (CHF/kWh$_{EE}$) für EFH und MFH mit verschiedenen Wärmeerzeugungsanlagetypen für die vier Effizienzlevels b) bis e)

	Oel		Gas		WP Erdsonde		WP Aussenluft		Holzheizung	
	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH
b)	0.13	0.11	0.14	0.12	0.32	0.24	0.27	0.20	0.10	0.09
c)	0.19	0.16	0.20	0.18	0.52	0.41	0.42	0.33	0.15	0.14
d)	0.30	0.21	0.32	0.23	1.00	0.61	0.80	0.49	0.25	0.17
e1)	0.31	0.21	0.33	0.23	1.05	0.64	0.85	0.52	0.26	0.18
e2)	Wie e1)		Wie e1)		1.18	0.73	0.96	0.60	Wie e1)	
e3)	0.26	0.18	0.28	0.20	0.97	0.62	0.80	0.51	0.21	0.15

e1) Minergie-P / Passivhaus mit NT-Wärmeverteilung

e2) Passivhaus mit Luftheizung und höherer Vorlauftemperatur, JNG gem. Tabelle 4.3-54. **keine** Kosteneinsparung der Luftheizung gegenüber konv. Wärmeverteilung plus Lüftung

e3) wie e2), aber **inkl.** Kosteneinsparung der Luftheizung gegenüber konv. Wärmeverteilung plus Lüftung (ca. 30% der Kostensteigerung von c) auf d)

Quelle Berechnungen CEPE basierend auf Tabelle 4.4-9 (HBT)

Auffallend sind die eher hohen Grenzkosten bei den WP-Gebäuden. Dazu sind zwei Punkte anzumerken:

- Die Investitionsentscheide auf der Ebene der Gebäudehülle sollten nicht allzusehr die Wärmeerzeugungsanlagen ausgerichtet werden, sondern eher umgekehrt, denn die Lebensdauer der Gebäude ist wesentlich länger als die der Anlagen. Spätere Korrekturen beim Gebäude sind mit hohen Kosten verbunden, währenddem die Anlagen (gerade die WP, wie zu hoffen ist) einen weiteren technischen Fortschritt erfahren werden.
- Die Grenzkosten auf Endenergieebene reagieren bei den WP sehr sensitiv auf die Annahme des Jahresnutzungsgrades, damit letztlich auf die Qualität der WP sowie auf die Ausführung und Einbindung der WP in die Wärmeverteilung. Beträgt die Vorlauftemperatur z.B. 50°C statt 40°C, sinken die Grenzkosten von 24 Rp/kWh$_{EE}$ auf

[1] [Nicht berücksichtigt ist aus Gründen des Projektablaufs das architektonische Gestaltungsmittel, grösserflächige statt kleine Fenster einzusetzen. Ausserdem dürften die durchschnittliche Fensterfläche im Neubau grösser sein als 1.7 m2 und die Grenzkosten entsprechend kleiner. Ausserdem sind nur Fenster mit heute sehr gebräuchlichen Kennwerten in die Betrachtung miteinbezogen. Fenster mit höherem g-Wert zum Beispiel fehlen.]

11 Rp/kWh$_{EE}$ (Sole) bzw. von 20 Rp/kWh$_{EE}$ auf 9 Rp/kWh$_{EE}$, wie Tabelle 4.4-14 aufzeigt (denn der einsparbare Stromverbrauch wird bei schlechteren JNG grösser).

Tabelle 4.4-14 Sensitivität der Grenzkosten (CHF/kWh$_{EE}$) auf den Jahresnutzungsgrad der Wärmepumpen.

	JNG		Grenzkosten (dr=3.5%)	
VL-Temp	Sole	Luft	Sole	Luft
50	2.9	2.2	0.11	0.09
45	3.2	2.4	0.15	0.12
40	3.5	2.7	0.24	0.20

Quelle Berechnungen CEPE

In Tabelle 4.4-13 sind die Brutto-Grenzkosten auf Ebene Endenergie innerhalb eines jeweils gleichen Energieträgers berechnet (also die Effizienzstufen b) bis e) der Ölanlagen gegenüber der Referenz mit Öl, Gas mit Gas, etc.), dies wegen der unterschiedlichen umwelt- und klimaspezifischen Eigenschaften dieser Energieträger. Bei den Wärmepumpen kommt jedoch beides Mal der Energieträger Strom zum Einsatz, weshalb hier die Grenzkosten des einen WP-Typs gegenüber dem anderen berechnet werden können, siehe Tabelle 4.4-15.

Tabelle 4.4-15 Brutto-Grenzkosten (CHF/kWh$_{EE}$) der Sole-WP für Gebäudeeffizienzstufen b) bis e) gegenüber der Luft-WP und der Referenzstufe a)

	WP-Sole	
	MFH	EFH
b)	0.27	0.16
c)	0.40	0.29
d)	0.78	0.47
e)	0.85	0.51

Folgende Fazits lassen sich anhand der Grenzkostenbetrachtung ziehen:

- Die Grenzkosten sind umso höher, je tiefer der Energieverbrauch im Referenzszenario ist, denn der Energieeffizienzgewinn ist relativ gesprochen bei allen Anlagetypen mehr oder weniger gleich. Dies führt zu höheren Effizienzgewinnen gemessen in absoluten MJ/m^{2}a, wenn der Endenergieverbrauch im Referenzfall höher war. Die rechnerischen Grenzkosten sind deshalb bei der Holzenergie am tiefsten (angenommener Nutzungsgrad 75%), bei der schon im Referenzfall am wenigsten verbrauchenden Sole-WP am höchsten.
- Der Unterschied bei den Grenzkosten (im Durchschnittskostenansatz) zwischen Minergie-Gebäudehülle-allein und Minergie-P/Passivhaus ist relativ gering. Bei den Luftheizungen kombiniert mit WP können sich die Grenzkosten aufgrund der sich verschlechternden Nutzungsgrade nochmals erhöhen. Wenn bei Luftheizungen die Investitionskosten wesentlich tiefer gehalten werden können als diejenigen von konventioneller NT-Wärmeverteilung plus Lüftung zusammen, können die Grenzkosten wieder auf ca. das vorangehende Energieeffizienzlevel zurück geführt werden.

- Aufgrund des höheren Zinssatzes und der damit verbundenen höheren Kapitalkosten sind die Grenzkosten bei den MFH erwartungsgemäss höher als bei den EFH.

Mit den oben zugrunde liegenden Kosten- und Energieinformationen lassen sich statt der Grenzkosten auch die Jahreskosten für die verschiedenen Fälle berechnen. Dazu werden exemplarisch die Energiepreise gemäss Tabelle 4.4-16 angenommen. Zur Erinnerung: Diese könnten über die lange Lebensdauer der Gebäudeeffizienzinvestitionen wesentlich steigen und wären dann wesentlich höher anzusetzen. Eine CO_2-Abgabe von z.B. 210 CHF/tCO_2 (Höchstsatz gemäss CO_2-Gesetz) bewirkt beim Erdgas einen Zuschlag von 4.2 Rp/kWh und beim Heizöl von 5.6 Rp/kWh.

Tabelle 4.4-16 Annahmen zu Energiepreisen (CHF/kWh_{EE}) für die verschiedenen Wärmeerzeugungssysteme

	Oel	Gas	WP Sole	WP Luft	Holz
MFH	0.055	0.050	0.160	0.160	0.070
EFH	0.060	0.055	0.160	0.160	0.070

Quelle Annahmen CEPE

Der Nullpunkt kann für die Kostendarstellung beliebig gewählt werden, denn es geht primär um eine vergleichende Betrachtung. Dargestellt werden könnten z.B. die gesamten Kapitalkosten für das Gebäude. Für die Abbildungen 4.4-27 und 4.4-28 ist das Gebäude ohne Wärmeerzeugung und die Gebäudehülle mit der energetischen Referenz als Nullpunkt gewählt.

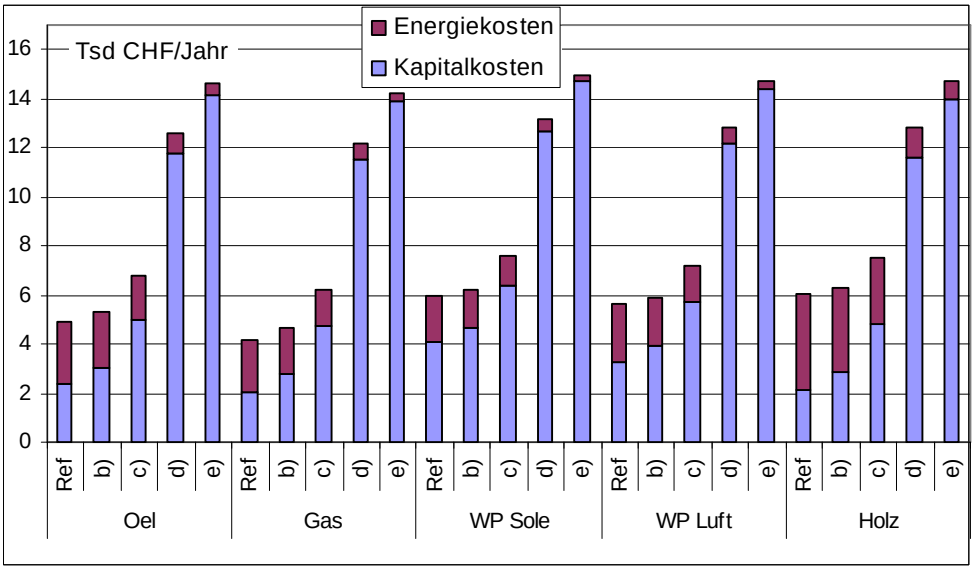
Pro Einfamilienhaus bzw. pro Wohnung betragen die Mehrkosten bei den angenommenen Energiepreisen für die ersten Wärmeschutz-Effizienzlevels einige wenige hundert Franken pro Jahr, selbst bei „suboptimaler" Kostenoptimierung[1], ohne Einbezug der Co-Benefits und der externen Kosten. Der Kostenanstieg bei zunehmender Energieeffizienz wird wesentlich flacher, wenn z.B. eine CO2-Abgabe oder Energiepreissteigerungen aufgrund internationaler Entwicklungen (siehe Kap. 4.1.1) in Rechnung gestellt werden; unter Umständen verschiebt sich dann sogar das Kostenminimum hin zu energie-effizienteren Lösungen.

In den Abbildungen 4.4-27 und 4.4-28 wird der durch die Lüftungsanlagen verursachte Kostensprung von c) auf d) bzw. e) deutlich sichtbar. Da der ökonomische Nutzen der Co-Benefits zur Zeit unbekannt ist, kann die Frage auch umgekehrt gestellt werden im Sinn von „Wieviel müsste der ökonomische Nutzen der Co-Benefits betragen, damit die der Energie zuzuordnenden Kosten nicht zu stark ansteigen". Grob geschätzt ist dies bei den oben angenommenen Energiepreisen etwa 2000 CHF pro Jahr und pro Wohnung bzw. pro EFH.

Im nächsten Unterkapitel (siehe Kap. 4.4.4) sowie im Kapitel 6 zu den gesamtschweizerischen Grenzkostenkurven sind die Jahreskosten von weiteren architektonischen Neubauvarianten dargestellt.

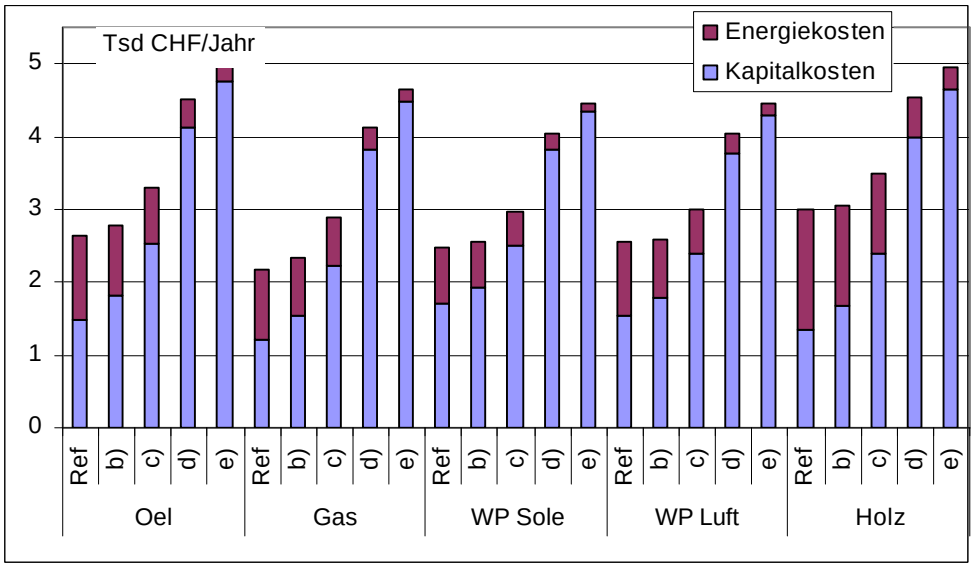
[1] [Nicht berücksichtigt ist aus Gründen des Projektablaufs das architektonische Gestaltungsmittel, grösserflächige statt kleine Fenster einzusetzen. Ausserdem dürften die durchschnittliche Fensterfläche im Neubau grösser sein als 1.7 m2 und die Grenzkosten entsprechend kleiner. Ausserdem sind nur Fenster mit heute sehr gebräuchlichen Kennwerten in die Betrachtung miteinbezogen. Fenster mit höherem g-Wert zum Beispiel fehlen.]

Weitere Endenergiebedarfsreduktionen können in allen Fällen auch durch den Einsatz von Solarenergie für die Raumheizung und Warmwassererwärmung erzielt werden. Die Grenzkosten dieser Zusatzinvestitionen betragen ca. 0.15 bis 0.3 CHF/kWh$_{EE}$.



Quelle Berechnungen CEPE

Abbildung 4.4-27 Jahreskosten (Tsd. CHF/Jahr) für den Endenergieverbrauch und die Kapitalmehrkosten für Gebäudehülle, Wärmeerzeugung und Lüftungsanlage bei **MFH, 720 m², 4 Maisonette-Wohnungen,** Energiepreise gem. Tabelle 4.4-16.



Quelle Berechnungen CEPE

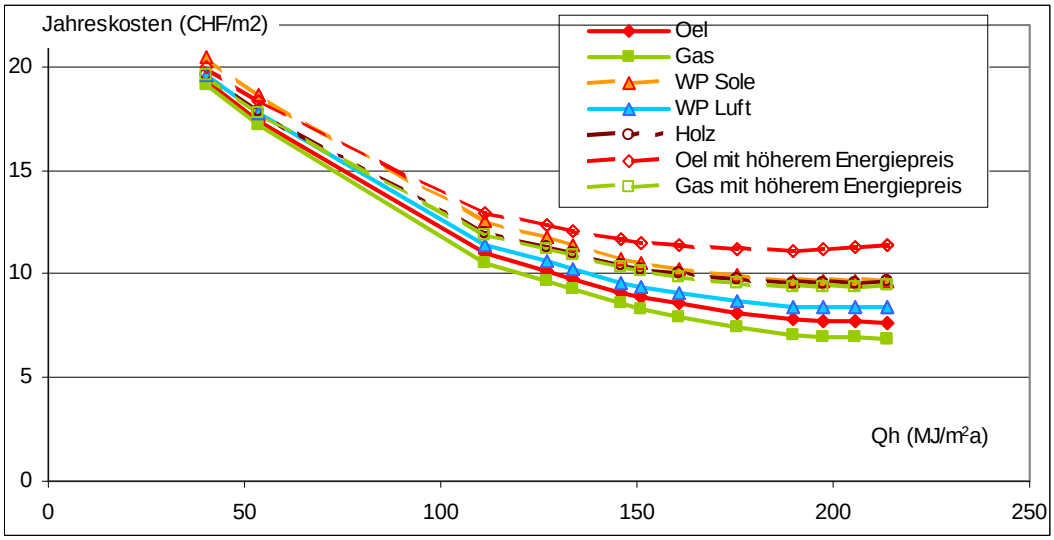
Abbildung 4.4-28 Jahreskosten (Tsd. CHF/Jahr) für den Endenergieverbrauch und die Kapitalmehrkosten für Gebäudehülle, Wärmeerzeugung und Lüftungsanlage bei **EFH, 250 m² EBF,** Energiepreise gem. Tabelle 4.4-16.

4.4.4 Jahreskosten von weiteren Neubaukonzepten

Im Hinblick auf die gesamtschweizerische Hochrechnung der im Kapitel 4.3 erarbeiteten Kostenelemente und der architektonisch-energetischen Zusammenhänge im Kapitel 4.2, insbesondere hinsichtlich Fenstern (Anteile, Fenstergrösse, energetische Qualität), wurden für weitere Neubaukonzepte Kostenkurven erarbeitet, siehe dazu auch das Kapitel 6.1.1. Den Abbildungen 4.4-28 und 4.4-29 liegen dabei die Energiepreise Tabelle 4.4-16 zugrunde, wobei der erhöhte Energiepreis einer CO_2-Abgabe von 210 CHF/tCO_2 entspricht.

In der folgenden Abbildung 4.4-28 ist von einem mittelgrossen MFH der Verlauf der Jahreskosten in Funktion eines sukzessive tieferen Heizwärmebedarfs dargestellt (A(EBF=1.4). Weitere Angaben zu den Annahmen zum Gebäude sind im Kapitel 6.1.1 beschrieben.

In der selben Art ist in Abbildung 4.4-29 ein Beispiel eines Einfamilienhauses dargestellt (A/EBF=1.8). Das EFH wird von konventioneller Bauweise mit üblichem Fensterflächenanteil zu einem Gebäude kombinierter Solargewinn- und Verlustverkleinerungsstrategie umgebaut. Der Fensterflächenanteil wird dabei jedoch nur auf noch realistischen 30% (AFe/EBF) erhöht und gegen Süden beträgt die Fensterfläche 35m² bei einer opaken Fläche gegen Süden von 40m².



Quelle Berechnungen CEPE

Abbildung4.4-28 Jahreskosten (CHF/m2EBF) in Funktion des sukzessive tieferem Heizwärmebedarfs bei MFH (1100 m2, A/EBF=1.4, Realzinssatz 3%)

Die ermittelten Gesamtjahreskosten (netto) weisen - ohne Berücksichtigung begleitender Nutzen - einen zunächst sehr flachen Verlauf im Bereich der heutigen Bauweise und darunter (z.B. zwischen 250 und 200 MJ/m²a) auf. Im dargestellten Beispiel kann ohne wesentliche Mehrkosten eine Verbesserung des spezifischen Heizwärmebedarfs Qh um 40 MJ/m²a bis 60 MJ/m²a bzw. um einen Viertel erreicht werden, dies selbst mit der unwahrscheinlichen Annahme, dass der Energiepreis im Durchschnitt über die gesamte Lebensdauer nur rund 5.5 Rp/kWh beträgt (ca. 55 CHF/100 l). Um insgesamt über 100 MJ/m²a lässt sich der Heizwärmebedarf zu Nettokosten von 2 CHF/m² bis 3 CHF/m² vermindern, was 20 bis 30 CHF/Monat Mehrkosten für eine Wohnung von 120 m² bedeutet. Wird eine Energiepreiserhöhung im Bereich einer CO_2-Steuer von 210 CHF/t CO2 veranschlagt, verflacht sich der

Kostenverlauf weiter, und das wirtschaftliche Optimum verschiebt sich weiter nach links hin zu einem tieferen spezifischen Energiebedarf.

Den Werten in Abbildung 4.4-28 und in Abbildung 4.4-29 wurden nicht die best practice Kosten zugrunde gelegt (siehe dazu auch die Variation der Mehrkosten im Kapitel 4.3; in Zukunft könnte mit wachsenden Lern- und Skaleneffekten die Kostensteigerung durchaus auch moderater verlaufen, als hier dargestellt (siehe Kap. 4.5). Ebenfalls nicht berücksichtigt sind hier die nicht-energetischen Nutzen, die bei weitergehenden Energie-Effizienzmassnahmen häufig beobachtet werden (siehe Kapitel 4.6). Insofern sind die oben beschriebenen einzelwirtschaftlichen Netto-Kosten unvollständig und können zu Fehlentscheidungen bei Wärmeschutz- und Energieeffizienz-Investitionen führen.

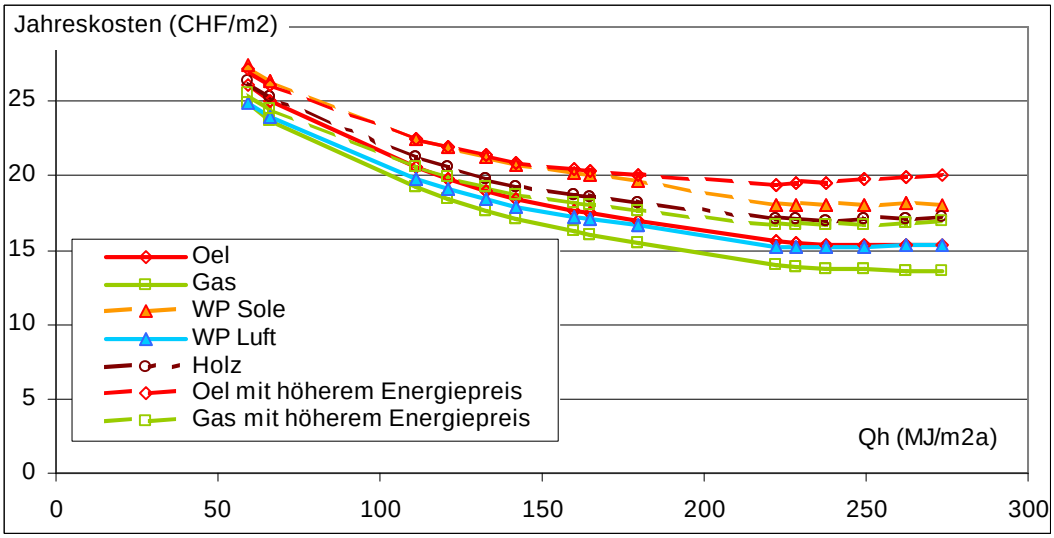


Abbildung4.4-29 Jahreskosten (CHF/m2EBF) in Funktion des sukzessive tieferem Heizwärmebedarfs bei EFH (200 m2, A/EBF=1.8, Realzinssatz 3%)

4.5 Dynamisierung der Kosten und energetischen Nutzen von Wärmeschutzinvestitionen bis 2030

Die kostenseitige Veränderung von Wärmeschutzinvestitionen über der Zeit bleibt in den meisten Analysen bis heute unbeachtet, da die Datenbeschaffung hierfür ausgesprochen aufwändig ist, auch wenn die Methodik zur Abschätzung der Kostenentwicklung soweit entwickelt und empirisch überprüft ist, dass sich die Dynamisierung der Kosten für energiewirtschaftliche Analysen anbietet. Zukünftig zu erwartende technische Verbesserungen werden dagegen häufiger in derartigen Analysen oder in ex ante-Politik-Evaluationen berücksichtigt, nicht aber die veränderten Kosten infolge

- denkbarer Lern- und Mengendegressions-Effekte oder
- neuer Technologien, wobei letztere häufig zunächst spezifisch teurer sind als die traditionellen Technologien.

Derartige Dynamisierungen sollten möglichst sowohl kosten- als auch nutzenseitig mitbetrachtet werden, da die Dynamisierung im Ergebnis häufig zugunsten der neuen technischen Lösungen der rationellen Energienutzung ausfällt und ohne diese Berücksichtigung Unterschätzungen forcierter Wärmeschutzinvestitionen infolge "zu teurer Lösungen" gerade für Gebäude als sehr langlebige Investitionsgüter nicht zu vermeiden wären.

Im folgenden wurde daher versucht, anhand der Ergebnisse von schriftlichen und mündlichen Umfragen sowohl über die technische Entwicklung als auch über die Mengen- und Preisentwicklung in der Vergangenheit Aussagen über die zeitliche Entwicklung der Investitionskosten für die kommenden zwei bis drei Jahrzehnten zu machen. Das methodische Vorgehen wird in Kap. 4.5.1 kurz beschrieben.

4.5.1 Methodische Hinweise zu Lerneffekten und Skaleneffekten – Erfahrungskurven

Insbesondere bei neuen Technologien, aber auch bei herkömmlichen Investitionen oder neuen organisatorischen Massnahmen, ist für Zukunftsbetrachtungen in der Regel mit Kostendegressionen (in realen Werten) zu rechnen. Zumindest ist diese Frage jeweils zu prüfen. Theoretisch lassen sich die drei Einflüsse der Kostenreduktion durch

- **Lerneffekte** (Verringerung der Durchschnittskosten bei gleicher Ausbringungsmenge pro Zeit infolge Verbesserungen am Produkt oder Produktivitätsgewinnen bei der Herstellung),
- **economies of scale** (Stückzahl- bzw. Anlagengrössen-Kostendegression) und
- **economies of scope** (Verbundvorteile bei der simultanen Produktion mehrerer verschiedener Güter)

unterscheiden (vgl. Abbildung. 4.5-1). In der Praxis und bei der empirischen Erhebung der Daten für Kosten und Produktionsmengen verwischen sich allerdings die Einflüsse von Lern- und Skaleneffekten, und beobachtete Kostensenkungen lassen sich nur schwer diesen einzelnen Einflüssen zuordnen (Stein, 1988, S. 402 ff.). Darüber hinaus werden in der betrieblichen Praxis Kostensenkungspotenziale identifiziert (z.B. verbesserte Produktionsmittel und -verfahren, bedingt durch technischen Fortschritt, Verkürzung der Durchlaufzeiten), die durch *spezielle Aktionen im Herstellungsprozess* zu einem jeweiligen Zeitpunkt ausgeschöpft werden können . Spezielle Aktionen waren in den 90er Jahren z.B. eine gezielte Prüfung der Möglichkeiten zur Verkürzung der Durchlaufzeiten in vielen Produktionsbetrieben, die komplexe und kapitalintensive Produkte herstellten (z.B. Grosskraftwerke).

Alle drei o.g. Einflüsse der Kostenreduktion lassen sich i.a. wegen des hohen Analyseaufwandes nicht getrennt in einem deterministischen Erklärungsmodell quantitativ beschreiben. Vielmehr

werden sie heute anhand empirischer Daten und sehr einfacher Funktionen beschrieben; die auf diese Weise gewonnenen Koeffizienten werden dann für spezifizierte technische Systeme jeweils an die konkrete Anwendung durch Schätzungen angepasst. Auch in diesem Projekt wird ebenfalls so verfahren.

Merkmale	**Kostensenkungseinflüsse**		
	Lerneffekte (einschl. Aktionen)	**Stückzahl-Kosten-degression**	**Anlagengrössen-Kostendegression**
Gemeinsamkeit	Rückgang der spezifischen Kosten bei kumulierter Produktion		
Ursachen	Zunehmende Übung und Erfahrung beim Ausführen einzelner Arbeitsschritte; Nutzung besserer Produktionsmethoden und -mittel bei gleicher Ausbringungsmenge pro Zeiteinheit;	Steigende Stückzahlen bei häufig gleichbleibenden Fixkosten für die Produktion; Über-gang zum Mehr-schichtenbetrieb, schnellere Taktzahl; höherer Grad der Auto-mation;	zunehmende Anlagengrösse bei Stoff- und Energieumwandlung in kontinuierlichen Prozessen; Volumen von Apparaten und Maschinen steigt mit dritter Potenz, die Fläche quadratisch;
Wirkung	Insbesondere Reduktion der variablen Kosten,	Reduzierung der stückbezogenen Fixkosten	Reduzierung der mengenbezogenen Fixkosten
Empirische Beobachtungen	die Stückkosten sinken über der kumulierten Ausbringungsmenge (z. B. bei Verdopplung sinken Kosten um 15 - 20 %) bzw. im Produktzyklus (über der Zeit z.B. 1 bis 2 %/a), bei Aktionen einmalig um z.B. 10 bis 20 %.	Die Stückkosten sinken (mit abnehmender Degression) über der Ausbringungsmenge (meist zu Beginn des Produktzyklus in besonderem Ausmass);	Die Produktionskosten sinken (mit abnehmender Degression) über der Produktionsmenge; Degressionskoeffizient, bezogen auf die Kapazitätsänderung: 0,5 bis 0,9;
Beispiele im Energiebereich	Wärmeschutzfenster, Passivhäuser, PKW; Kraftwerksbau Mitte der 90er Jahre (Aktionseffekt);	Vakuum-Isolation, PV-Module, hocheffiziente Elektro-Motoren gleicher Leistung, Brennstoffzellen, Klein-BHKW	Einsatz grösserer Fenster gegenüber kleineren, Vakuum-Isolationselemente, BHKW grösserer Leistung

Quellen: Jochem, Diekmann, 2001, CEPE eigene Anpassungen

Abbildung 4.5-1 Merkmale und Beispiele für verschiedene Kostensenkungseinflüsse

a) Lerneffekte

Die Kostendegression durch Lernen wird häufig in Form einer Potenzfunktion dargestellt:

$$y = a \cdot x^{-b} \quad \text{oder} \quad \log y = \log a - b \cdot \log x$$

y: Kosten für die zuletzt produzierte Einheit

a: Kosten für die im Rahmen der kumulierten Produktionsmenge zuerst produzierte Einheit

x: kumulierte Produktionsmenge zwischen zuerst und zuletzt produzierter Einheit)

b: Steigungsparameter der Lernkurve (bei doppellogarithmischer Darstellung)

Die *Fortschrittsrate* $f = 2^{-b}$

gibt an, auf welches relative Niveau sich die spezifischen Kosten vermindern, wenn sich die kumulierte Produktion verdoppelt. Die komplementäre Grösse

$L = 1 - f$

wird auch als *Lernrate* bezeichnet. Eine Fortschrittsrate von 85 % bzw. eine Lernrate von 15 % bedeutet, dass mit jeder Verdopplung des gesamten Outputs die Produktionskosten der zuletzt produzierten Einheit nur noch 85 % des vorhergehenden Wertes betragen. Die produzierte Menge kann entweder auf einen Betrieb, ein Land oder die Weltproduktion bezogen werden.

b) Stückzahl-Kostendegression (economy of scale)

Bei diesem Effekt handelt es sich um Veränderungen der Stückkosten bei unterschiedlichen Produktionsmengen, die sich als sinkende Durchschnittskosten mit zunehmender Produktionsmenge je Zeiteinheit darstellen, weil die variablen Kosten durch verstärkte Automation, Rabatte bei den in grösseren Mengen gelieferten Vorleistungen oder andere Skalenerträge sinken und weil die anteiligen fixen Kosten pro Stück mit steigender Anlagenauslastung und Ausbringungsmenge kleiner werden. Dieser Sachverhalt kann nicht nur für die industrielle Massenfertigung mit (starren) Produktionssystemen bei sehr hohem Automatisierungsgrad gelten, sondern auch für flexibel automatisierte Produktionssysteme (Hieber, 1991, S. 192 ff) oder selbst handwerkliche Fertigung.

Solche Effekte dürften vor allem bei jenen neuen Energiewandlern und Energienutzungstechniken zu beachten sein, die in Grossserien hergestellt werden (z.B. Elektrogeräte, Elektromotoren, Lüftungssysteme, aber auch neue Fenstersysteme, z.B. bei der Beschichtung der Gläser vom Batch- auf den Continue-Betrieb) oder Hochleistungskern- und Vakuum-Isolationselemente).

c) Anlagengrössen-Kostendegression

Während die stückzahlenabhängige Kostendegression sich eher auf modulare Systeme mit ihrem Potenzial zur Massenproduktion bezieht, geht die Anlagengrössen-Kostendegression von Kostenreduktionspotenzialen durch die Wahl zu grösseren Anlagen aus. Diese Degression zielt insbesondere auf die Investitionskosten I einer Anlage 1 im Vergleich zu den Kosten einer anderen Produktionskapazität 2 ab:

$$\frac{I_1}{I_2} = \left[\frac{Kap_1}{Kap_2}\right]^m \quad \text{oder} \quad \log (I_1/I_2) = m \cdot \log (Kap_1/Kap_2)$$

wobei
- I = jeweilige Investitionsausgabe
- Kap. = jeweilige Nennkapazität der Produktionsanlage
- m = Degressionsexponent, der empirisch ermittelt wird und von vielen Einflüssen abhängt.

Für die spezifische (kapazitätsbezogene) Investition ergibt sich daraus die Beziehung

$$I/Kap = c \cdot Kap^{m-1}$$

Degression liegt hier vor, wenn die Bedingung $m < 1$ erfüllt ist.

Diese Methode der Investitionskostenschätzung für das upscaling von Anlagen wurde Ende der 40er Jahre entwickelt (Williams, 1947) und in den letzten Jahrzehnten von vielen Autoren spezifiziert und für verfahrenstechnische Produktionsanlagen weiter verfeinert (z.B. Kölbel/ Schulze, 1982; Humphreys/Katell, 1981; Garrett, 1989). Diese Kostendegression wird nicht nur bei Anlagen, sondern auch bei Maschinen beobachtet, wo beispielsweise der Degressionsexponent für Synchrongeneratoren bei einer Nennleistung zwischen 3 und 300 kW bei etwa 0.4 ermittelt wurde. Dieser Wert nimmt bei grösseren Leistungen zu (z.B. auf 0.55 bei der Leistungsklasse 200 bis 2000 kW), d.h., der Degressionseffekt nimmt mit zunehmender Anlagengrösse mehr und mehr ab.

d) Einzeleffekte und Erfahrungskurven

Der Vorteil dieser Unterscheidung zur Abschätzung von Kostendegressionseffekten durch Lernen und Skaleneffekte ist die schnelle und einfache Durchführbarkeit. Der Nachteil liegt in der Einfachheit der Methoden bei *neuen Anlagen und Maschinen*, deren Lernraten und Degressionskoeffizienten zunächst empirisch nicht feststellbar sind und deshalb mittels Annahmen über die Ähnlichkeit zu bekannten Technologien geschätzt werden müssen. Da diese Koeffizienten aber erheblich voneinander abweichen können, ist die Genauigkeit dieser Methoden mit erheblichen Schätzunsicherheiten belastet (Schembra/Schulze, 1993). Andererseits sind diese Kostendegressionsschätzungen in vielen Fällen realistischer, als eine Konstanz der heutigen Kosten für die nächsten 10 oder 20 Jahre anzunehmen.

Diese Erkenntnis legt es nahe, mit Sensitivitätsanalysen bzgl. der Annahmen zu den Degressionskoeffizienten die Stabilität der Ergebnisse bzgl. der Wirtschaftlichkeit zu überprüfen.

Oftmals können die in der Abbildung 4.5-1 aufgeführten Einzeleffekte empirisch nicht getrennt von einander, sondern nur als Gesamteffekt beschrieben werden. Hierzu werden meist *Erfahrungskurven* über der kumulierten Produktion, Anlagenzahl oder Kapazität ermittelt. Formal entsprechen sie den oben dargestellten Lernkurven, wobei allerdings neben den reinen Lerneffekten auch die anderen Kostendegressionseinflüsse (implizit) mit erfasst werden.

Bei der *praktischen Arbeit mit Erfahrungskurven* sollten folgende Punkte beachtet werden (vgl. auch Seebregts 1999, IEA 2000, McDonald/Schrattenholzer 2001, Jochem/Diekmann 2001):

- Die empirischen Zahlenreihen der (spezifischen) Kosten müssen *inflationsbereinigt* werden.
- Für Erfolgs- bzw. Lernraten kann nicht generell eine Konstanz der Degressionskoeffizienten über eine Dekade oder mehrere Verdopplungsmengen angenommen werden. Meist nehmen die *Degressionskoeffizienten mit der Reifung und Diffusion einer neuen Technologie ab*. Dies ist anhand der Zeitreihen nach Möglichkeit zunächst empirisch zu prüfen und könnte mit Marktanteilen korreliert werden.
- Kostenentwicklungen können nicht einfach mit Hilfe empirischer Erfolgs- bzw. Lernraten fortgeschrieben werden. Bei der Interpretation und Anwendung von Erfahrungskurven sollte der technische und ökonomische Hintergrund der Kosteneinflussgrössen beachtet werden.
- Unterschiedliche Erfahrungskurven können sich abhängig davon ergeben, ob *Herstellungskosten oder Marktpreise* zugrundegelegt werden. Preisdaten sind häufig leichter verfügbar; für Langfristszenarien sollten aber nach Möglichkeiten Kostendaten verwendet werden, um kurzfristige Preisstrategieeffekte der Hersteller oder des Handels (z.B. hohe Preise für den Pioniermarkt, Angstzuschläge) auszublenden.

Neben dem *zeitlichen ist auch der räumliche Bezug der Schätzungen* zu beachten. Wird z.B. die weltweite kumulierte Produktion betrachtet, dann besteht eventuell kein unmittelbarer Zusammenhang zum Technikeinsatz im nationalen Kontext (z.B. sind die Herstellkosten und Preise für Wärmeschutzfenster in Nord- und Westeuropa infolge der unterschiedlichen Gesetzgebung und Klimaverhältnisse sehr unterschiedlich).

Tabelle 4.5-1 Beispiele der Kostensenkungseinflüsse für Wärmedämm-Investitionen und Energiewandler sowie ihre Bedeutung für die zukünftigen Kosten mit Zeithorizont bis 2020

Technikbereich Und Beispiele	**Lerneffekte (inkl. Aktionen)**	**Stückzahl-Kostendegression**	**Anlagengrössen-Kostendegression**
		(economies of scale)	
Traditionelle Techniken			
• Energiewandler, z. B.			
- Kessel, Brenner	++	+	+
- Kompressoren, Pumpen	++	+	+
- Lüftungsanlagen	++	++	+
• Wärmedämmung			
- Mineralfaserbasis	++	+	o
- PS- und PU-Schäume	++	+	+
- Wärmeschutzfenster			
Neue Techniken			
• Energiewandler, z. B.			
- BHKW	++	++	+
- Wärmepumpen	++	+++	+
• Wärmedämmung z. B.			
- Passivhäuser	+++	+++	+
- Vakuumisolation	+++	++	+

Quelle: CEPE

Zu beachten ist nicht zuletzt auch die sachliche Abgrenzung bzw. Aggregation von Techniken (z.B. dürften bei mittelgrossen Kesselanlagen empirisch grössere Degressionseffekte zu beobachten sein als bei Kessselanlagen insgesamt, einschl. Kleinanlagen, weil sich der Anlagengössen-Effekt bemerkbar macht).Zusammenfassend ist festzustellen, dass *Erfahrungskurven* stets nur im Rahmen ihrer sachlichen, zeitlichen und räumlichen Abgrenzung zu interpretieren sind. Generell sollten sie nicht "mechanisch", sondern nur vor dem Hintergrund der technischen sowie ökonomischen Kosteneinflussgrössen verwendet werden. Alles in allem eignen sich Erfahrungskurven unter diesen Bedingungen für eine approximative Beschreibung kontinuierlicher Degressionseffekte. Es ist aber zu betonen, dass damit nicht alle

technologischen Entwicklungen erfasst werden, insbesondere keine radikal innovativen Technologiesprünge, spezielle Aktionen der Hersteller oder veränderte staatliche technische Standards.

e) Behandlung von Degressionseffekten in energiewirtschaftlichen Modellrechnungen

Technologischer Fortschritt mit entsprechenden Kostendegressionen kann in Energieanalysen entweder endogen oder exogen abgebildet werden. Eine Endogenisierung der technischen Entwicklung hätte grundsätzlich den Vorteil, dass schnell Alternativ-Kostenrechnungen gemacht werden können. Allerdings vermindert dies die Transparenz der Annahmen im Vergleich zu einer lediglich exogenen Behandlung dieses Einflusses. Im vorliegenden Bericht werden jeweils die Annahmen zu den Koeffizienten der unterstellten Erfahrungskurven offengelegt.

In den vergangen Jahren hat es zahlreiche Bemühungen gegeben, technischen Fortschritt und seine Auswirkungen auf die Kostendegression in Energiemodellen zu endogenisieren (vgl. etwa Kypreos 1998, Mattson 1998, Messner 1998, ETSAP news 5/1998, 7/1998, 3/2000, Barreto, 2001). Hierbei sind insbesondere die Aktivitäten im Rahmen des EU-TEEM-Projektes zu nennen; Erfahrungen mit den Modellen ERIS, MARKAL und MESSAGE sind in Seebregts et al. (1999) zusammengefasst (vgl. Tab. 4.5-2). Die verwendeten Fortschrittsraten f sind für eine Reihe neuer Technologien der Energiewandlung angegeben, wobei sie zum Teil für die lange Periode gemittelt sind. Leider fehlen bisher Analysen zur Kostendegression im Bereich der rationellen Energienutzung völlig.

Tabelle 4.5-2 Fortschrittsraten für ausgewählte neue Technologien der Energiewandlung in unterschiedlichen Modellen für die Periode 1990-2050

	MARKAL Europe	MARKAL global	Reduced MARKAL global	ERIS global
Advanced coal		0,94	0,93	0,95
Gas combined cycle		0,89	0,85	0,88
New nuclear		0,96	0,93	
Fuel cell	0,82	0,87		0,82
Wind power	0,90	0,89	0,85	0,88
Solar pv	0,81	0,81	0,72	0,85
Solar thermal			0,85	

Quelle: Seebregts et al. (1999), table 5.1.

f) Entwicklung der Investitionskosten für Wärmedämminvestitionen in Zukunft

In der Literatur gibt es keine derartigen empirisch basierten Kostenschätzungen für Wärmedämm-Investitionen bei Gebäuden. Da die in dieser Analyse erhobenen Kostenangaben der Vergangenheit jeweils in nominellen Preisen waren, wurden sie auf Preisbasis 2000 hochgerechnet. Wo es von Bedeutung erscheint, wird jeweils auch die Information über die technische Verbesserung der Wärmeschutzinvestitionen gegeben. Die Dynamisierung der Investitionskosten erfolgt dann anhand typischer Investitionen (und nicht für alle denkbaren Differenzierungen der Investitionsmöglichkeiten). Insofern ist die Dynamisierung der Wärme-

dämmung bei Fassaden, Fenstern und Lüftungssystemen in diesem Bericht noch rudimentär und sollte durch weitere Recherchen und Differenzierungen in Zukunft verbessert werden; beispielsweise müssten Technologiesprünge wie die Beschichtung von Zweiglas-Systemen oder in Zukunft die Vakuumelement-Isolation von Fassaden detaillierter behandelt werden, als dies in dieser Arbeit möglich war.

4.5.2 Wärmedämmung bei Fassaden

a) Bisherige Entwicklung der Dämmtechnik und Dämmstoffe

Die Komplexität der Wärmedämmtechnik hat in den letzten 10 Jahren erheblich zugenommen, und mittlerweile besteht ein grosses Angebot für energie- und kostenoptimierte Detaillösungen (vgl. Kap. 4.3). Die Kostenentwicklung sei jeweils kurz zusammengestellt, um die entsprechenden Informationen für die Wahl der Kostendegressionskoeffizienten offen zu legen.

Die thermische Leitfähigkeit (Lambda-Wert) der heute gebräuchlichsten Dämmstoffe hat sich in den letzten Jahren nur noch sehr langsam verbessert (d.h. abgenommen, vgl. Tab. 4.5-3); sie dürfte aber im Bereich der kunststoffbasierten Dämmstoffe in den kommenden Jahren eine weitere Verbesserung um etwa 20 % bis 40 % erfahren (z.B. BASF "Neopor" auf Basis Styropor).

Tabelle 4.5-3 Preisentwicklung, nominal und real in Preisen von 2000 für Wärmedämmung für Kompaktfassaden aus Polystyrol seit 1985

	1985	**1988**	**1990**	**1991**	**1992**	**1993**	**1995**	**2001**
Material (CHF/ m3)								
- nominal	183	199.5	218	228	236	236	223	188
- real	210	225	240	249	255	252	235	188
Übliche Dämmstärke cm	6-8							12
Materialkosten Dämmstoff CHF/m²	22							20
Zubehör, Gerüst CHF/m²	*23-34*							*20-30*
Montagekosten CHF/m²	88-93		80-82					75-85
Total CHF/m² (real)[1)]	133-149							115-135
[1)] in Preisen von 2000								

Quellen: Interview mit Firma Mamoran,2001;

Kompaktfassaden

Die zunächst nominal dargestellte Preisentwicklung von Wärmedämmungen wurde in reale Werte umgerechnet. Allerdings zeigt sich schon bei den Nominalwerten, dass bei den Montagekosten in den 90er Jahren erhebliche Produktivitätsfortschritte – trotz Lohnsteigerungen – stattgefunden haben (ca. 3%/a seit 1985). So konnte seit 1980 konnte der Arbeitsaufwand von 2.1 h/m² auf 1.7 h/m² gesenkt werden (Quelle: Unternehmen HF 3). In realen Werten führten die Lern- und Skaleneffekte in den vergangenen 15 Jahren zu einer Kostenreduktion der PS-Kompaktfassaden von etwa 0.6 % pro Jahr.

Selbst ein Produktivitätsfortschritt bei der Herstellung des Dämmstoffes wirkt sich infolge des relativ geringen Kostenanteils von ca. 15 % an den Gesamtkosten kaum auf die gesamten Flächenpreise aus. Die entscheidende Frage ist vielmehr, ob Kostenreduktionen bei der Installation der Wärmedämmung durch Produktivitätsfortschritte auch in Zukunft erzielt werden könnten, die nicht durch Lohnerhöhungen kompensiert würden.

b) Kostenschätzungen 2000-2030

Für die Zukunft wird davon ausgegangen, dass sich die Materialkosten des Polystyrol bis 2020 noch jeweils um 1 CHF/m² und Dekade vermindern, sie dann aber wegen zunehmender Erdölpreise (vgl. Kap. 4.1) stagnieren, weil die Produktivitätsfortschritte bei der Herstellung und Lieferung durch die Rohstoffpreissteigerungen kompensiert werden. Es wird weiterhin unterstellt, dass weitere Rationalisierungen bei Planung, Montage und Gerüstkosten von etwa 0.5%/a möglich sind. Dies würde bei den traditionellen Kompaktfassaden mit 12 cm Polystyrol Wärmedämmung um etwa 5% realer Kostensenkung pro Dekade führen (vgl. Tab. 4.5-4).

Tabelle 4.5-4 Geschätzte Kostenentwicklung für Wärmedämmung (12 cm Polystyrol) für Kompaktfassaden (in Preisen von 2000), 2000-2030

Kostenart	**2000**	**2010**	**2020**	**2030**
Materialkosten 12 cm Dämmstoff	20	19	18	19
Zubehör, Gerüst, Vorbereitung	20-30	19-28	18-26,5	17-25
Montagekosten, Anschlüsse	75-85	71-80	68-76	64-72
Summe	115-135	109-127	104-121	100-116
Mittelwert CHF/m²	125.-	118.-	112,50	108,-

Quelle: CEPE

Die durchschnittlichen Fassadenkosten bei einer 20 cm starken Wärmedämmung liegen heute bei rd. 145.- CHF/m² bzw. rd. 175.- CHF/m² bei 30 cm Wandstärke. Die Mehrkosten von

- 25.- CHF/m² bei 20 cm Wärmedämmung entfallen zu etwa 12.- CHF/m² auf das Dämmaterial und zu 8.- CHF/m² auf zusätzliches Montagematerial (Dübel) und Montagekosten.
- 50.- CHF/m² bei 30 cm Wärmedämmung entfallen zu etwa 30.- CHF/m² auf das zusätzliche Dämm-Material und 20.- CHF/m² auf zusätzliches Montagematerial und Montage sowie leicht erhöhte Gerüstkosten.

Während in Zukunft das traditionelle Dämmmaterial analog zum Fall der 12 cm Wärmedämmung um die gleichen (relativ geringen) Kostendegressionen zurückgehen wird, kann bei den Montagematerial- und Lohnkosten von grösseren Lern- und Skaleneffekten ausgegangen werden, weil die 20 cm und 30 cm Fassaden-Kompaktdämmung heute die Ausnahme darstellt. Es wird angenommen, dass sich die Degressionseffekte annähernd wie diejenigen der 12 cm Wärmedämmung für 1985 bis 2000 verhalten, d.h. mit durchschnittlich knapp 1%/a vermindern und sich in der letzten Dekade auf 0.5% verlangsamen. Die Ergebnisse dieser Überlegungen führen dazu, dass die Kosten für eine 20 cm bzw. 30 cm starke Fassadendämmung um durchschnittlich 0.7% pro Jahr zurückgehen und in 2020 die Kosten der 20 cm-Dämmung den heutigen Kosten für eine 12 cm starke Dämmung entsprechen, bzw. die Kosten der 30 cm-Dämmung den heutigen Kosten einer 20 cm-Dämmung (vgl. Tabelle 4.5-5).

Neue Materialen, Konzepte und Innovationen im Bereich der Dämmstoffe haben zunächst einen höheren Preis; aber sie haben in der Regel höhere Kostendegressionspotenziale als die traditioneller Produkte der Wärmedämmung. Bei der Wärmedämmung ergibt sich der interessante Fall, dass die Gesamtkosten für einen bestimmten Energieeffizienzgewinn sprunghaft fallen können, wenn die Wärmedämmeigenschaft des Materials je cm Stärke durch Technologiewechsel verbessert werden kann. Diese Entwicklung deutet sich in den kommenden Jahren an.

Styropor mit Hochleistungsdämmkern als Beispiel eines Technologiesprungs

Die Dämmplatte aus Styropor wird mit einem Kern aus einem anderen geschäumten Kunststoff versehen, welcher eine um den Faktor 1.8 geringere thermische Leitfähigkeit aufweist. Dadurch kann die Dämmstärke gegenüber dem heutigen Material um rund 40% vermindert werden. Bei Dämmstärken von 100 bis 120 mm dieses neuen Materials und konstruktiven Lösungen insbesondere im Bereich der Anschlüsse, die kostenseitig für die Montage der heutigen Praxis entsprechen, kann der Niedrigenergiestandard erreicht werden. Das Produkt ist auf dem Markt erhältlich, aber derzeit mit einem Mehrpreis der Dämmplatte von rund 30 bis 40% bei gleicher Dämmwirkung relativ teuer für eine breite Anwendung, auch wenn Kompensationen für geringere Montagekosten berücksichtigt würden. Das Produkt bedeutet jedoch einen Technologiesprung mit entsprechenden Kostenreduktionsmöglichkeiten in wenigen Jahren, wenn Skaleneffekte beim Material und weitere Lerneffekte bei den Montagekosten erzielt werden können. Übernimmt man die Kostenschätzungen für die 12 cm Wärmedämmung (vgl. Tab. 4.5-4) und geht von einem Degressionskoeffizienten für Skaleneffekte von zunächst 0.85 bis 2020 und später von 0.90 aus, dann ergeben sich ab der Periode 2010 bis 2020 kostenmässige Vorteile gegenüber dem traditionellen PS-Dämmaterial (vgl. Tab. 4.5-6).

Tabelle 4.5-5 Geschätzte Kosten für Wärmedämmung von Kompaktfassaden mit Polystyrol für 20 und 30 cm Stärke (in Preisen von 2000), 2000-2030, CHF/m²

Kostenart		2000	2010	2020	2030
Material	20 cm	32,-	30,-	28,-	28,-
	30 cm	50,-	47,-	44,-	45,-
Übrige Kosten[1)]	für 20 cm WD PS	113,-	104,-	95,-	91,-
	für 30 cm WD PS	125,-	114,-	106,-	101,-
Total	für 20 cm WD PS	145,-	134,-	124,-	119,-
	für 30 cm WD PS	175,-	161,-	150,-	146,-

[1)] Gerüst, Zubehör, Montagekosten, Vorbereitung, Oberfläche: jährl. Degression (vgl. Text)

Quelle: CEPE

Die Ergebnisse - bei einer moderat angenommenen Marktdurchdringung - zeigen den Vorteil der dünneren Wärmedämmschicht nach einer Periode von etwa 20 Jahren, wenn die Kosten der vergleichbaren Wärmedämmleistung konventionellen Polystyrols gleichauf liegen und in der Periode 2020-2030 die Kosten der konventionellen Dämmung unterschreiten (vgl. Tab. 4.5-6). Es wäre zu prüfen, ob die Verdopplungsraten des neuen Polystyrol-Dämmmaterials durch spezielle Förderung auch schneller erreicht und damit auch die Kostendegressionen früher erzielt werden könnten. So wäre durchaus auch eine Kostengleichheit bis etwa 2010 denkbar.

Die Kostenunterschiede zwischen den beiden konventionellen Dämmaterialarten Polystyrol sowie Glas- und Steinwolle, die heute zu beachten sind, dürften auch in Zukunft erhalten bleiben. Für Neuentwicklungen wird abzuwarten sein, ob auch im Bereich der mineralischen Dämmaterialien technische Neuerungen dazu führen, dass die Wärmedämmeigenschaften verbessert werden.

Tabelle 4.5-6 Geschätzte Kosten für Wärmedämmung mit PS-Hochleistungsdämmkern (12 cm und 20 cm) für Kompaktfassaden (in Preisen von 2000),2000 -2030

Kostenart		**2000**	**2010**	**2020**	**2030**
Materialkosten PS-Kern					
Dämmaterialstärke	12 cm	45.-	35.-	30.-	28.-
	18 cm	65.-	55.-	50.-	45.-
Übrige Kosten[1)]	für 12 cm[2)]	105.-	99.-	95.-	89.-
	für 18 cm[3)]	113.-	104.-	96.-	91.-
Total	für 12 cm PS-Kern	150.-	134.-	125.-	117.-
	für 18 cm PS-Kern	210.-	159.-	146.-	136.-

[1)] Grüst, Zubehör, Montagekosten, Vorbereitung, Anschlüsse, Oberfläche

[2)] Analog zu Kostenentwicklung in Tabelle 4.5-4 für 12 cm

[3)] Analog zu Kostenentwicklung in Tabelle 4.5-5 für 20 cm

Quelle: CEPE

Hinterlüftete Fassaden

Da die hinterlüfteten Fassaden bei den kleinformatigen Faserelementen als kostengünstigste Variante dieser Dämmtechnologie mit etwa 50.- CHF/m² teurer sind als die Kompaktfassaden, sind bei der Dynamisierung die Kostenreduktionspotentiale von besonderem Interesse. Da ausserdem bei einer Dämmstärke von ca. 20 cm beim Typ der Unterkonstruktion von Holz auf Holz-Metall mit einem Kostensprung von etwa 5.- bis 8.- CHF/m² und für die Montagekosten von etwa 10.- CHF/m² zu rechnen ist, wären neue, z.B. vakuumbasierte Wärmedämmelemente ein Technologiesprung, der in dieser Arbeit noch nicht behandelt werden konnte. Ihr Kosteneinfluss könnte in Zukunft ebenfalls von Bedeutung sein. Nachteilig ist, dass für die hinterlüfteten Fassaden keine so langfristigen empirischen Daten für die Vergangenheit ermittelt werden konnten, so dass hier auf die Degressionseffekte durch Lernen und Mengendegression und auf die Beobachtungen für die Kompaktfassaden zurückgegriffen werden muss (s.o.).

Die Annahmen zu den Kostenveränderungen basierten zunächst auf einer relativ differenzierten Kostenstruktur für die heutigen hinterlüfteten Fassaden (vgl. Tab. 4.5-7). Dabei wurde davon ausgegangen, dass sich die Kosten für Gerüst, Baustelleneinrichtung, Vorbereitung und Zubehör nicht weiter verringern lassen, ebenso kaum die Kosten für das Dämm-Material, zumal nach 2020 eine Energiepreissteigung erwartet wird, sowie für die Kleinfaserplatten und ihre Montage. Weiterhin wurde davon ausgegangen, dass die Kostendegressionen bei den übrigen Kostenanteilen für die kleinen Dämmstärken über weniger Potenzial in Zukunft verfügen als die grossen Dämmstärken, da diese bis heute noch nicht sehr zum Einsatz kommen und Lern-, Angst- und Pionieraufschläge genommen werden, wie die Erhebungen auch zeigten (vgl. Kap.4.3).

Insgesamt kommen die – relativ vorsichtigen - Kostenschätzungen zu dem Ergebnis, dass die Gesamtkosten der hinterlüfteten Fassaden über eine 30-Jahresperiode bei der Referenzstärke von 12 cm und unveränderter Technologie und Montage um lediglich 10 % zurückgehen, d.h. um 0.35 % pro Jahr, während der Rückgang der grösseren Dämmstärken bei 14 %, d.h. bei durchschnittlich 0.5 % pro Jahr liegen könnte. Bei einer intensiveren Marktentwicklung – als hier unterstellt – wären auch etwas zügigere Kostenminderungen möglich, die aber hier nicht weiter quantifiziert wurden.

Tabelle 4.5-7 Geschätzte Kostenentwicklung für Wärmedämmung von hinterlüfteten Fassaden mit Steinwolle (in Preisen von 2000), 2000 -2030

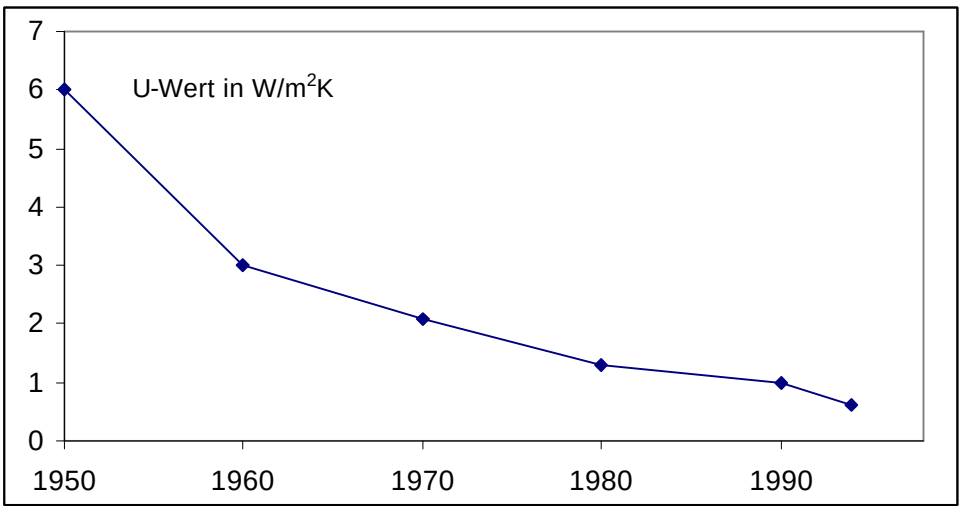
Kosten- und Materialart	**2000**	**2010**	**2020**	**2030**
Dämmmaterial in CHF/^{m2}				
- 12 cm, Steinwolle	23.-	22.-	21.-	22.-
- 20 cm, Steinwolle	38.-	36.-	34.-	34.-
- 30 cm, Steinwolle	55.-	52.-	49.-	50.-
Gerüst, Vorbereitung, Zubehör				
- 12 cm	20.-	20.-	20.-	20.-
- 20 cm	23.-	23.-	23.-	23.-
- 30 cm	27.-	26.-	25.-	25.-
Unterkonstruktion				
- 12 cm	57.-	49,50	47.-	45.-
- 20 cm	58.-	54.-	50.-	47.-
- 30 cm	67.-	62.-	58.-	54.-
Dämmmaterialmontage				
- 12 cm	15.-	14,50	14.-	13,50
- 20 cm	25.-	23,50	22.-	20.-
- 30 cm	33.-	30,50	28,50	26.-
Kleinfaserplatten und Montage	86.-	83.-	81.-	80.-
Fensterleibungen, Anschlüsse				
- 12 cm	37.-	35.-	32.-	30.-
- 20 cm	40.-	37.-	35.-	33.-
- 30 cm	44.-	41.-	38.-	35.-
Total				
- 12 cm	234.-	224.-	215.-	210.-
- 20 cm	272.-	257.-	245.-	234.-
- 30 cm	313.-	295.-	280.-	270.-

Quelle: Schätzungen und Berechnungen des CEPE

4.5.3 Fenstersysteme

a) Bisherige Entwicklung

Das Fenster ist ein typisches Beispiel verbesserter technischer Leistungsfähigkeit und dies zu Preisen, die seit vielen Jahren nominell ungefähr konstant blieben oder gar gesunken sind. Die U-Werte der Fensterverglasungen sind von 6.0 W/m²K im Jahr 1950 über 3.0 W/m²K im Jahr 1960 auf 0.5 W/m²K in der Gegenwart gesunken (vgl. Abbildung 4.5-2), diejenigen von Zweischeiben-Gläsern von 0.3 W/m² K in 1970 auf 1.1 W/m² K bis heute. Dies entspricht einer durchschnittlichen technischen Verbesserung von 3.3 % pro Jahr in diesen drei Jahrzehnten. Die Fortschritte in der Rahmenkonstruktion waren nicht so schnell, so dass sich die U-Werte der Fenstersysteme jährlich um durchschnittlich 1.5 bis 1.8 % pro Jahr verbesserten, je nach Material und konstruktiver Lösung dieser Zweischeiben-Fenstersysteme.



Quelle: Führendes Glasherstellungsunternehmen

Abbildung 4.5-2 Entwicklung der U-Werte von Fensterverglasungen (ohne Berücksichtigung der Rahmen), 1950-2000

Da die erhobenen Kostenangaben jeweils in nominellen Preisen waren, wurden sie zunächst auf Preisbasis 2000 mit geeigneten Preisindizes umgerechnet (z.B. Schweizer Baudokumentation, 1994; BFS, 1997). Wo dies möglich ist, wird jeweils auch die Information über die technische Verbesserung der Wärmeschutzinvestitionen gegeben. Die Dynamisierung der Investitionskosten ist in diesem Bericht noch rudimentär und könnte durch weitere Recherchen und Differenzierungen verbessert werden, beispielsweise müssten Technologiesprünge wie die Beschichtung von Zweiglas-Systemen oder in Zukunft die Edelgasanwendung detaillierter behandelt werden.

Interessant bei der Entwicklung der Kosten ist, dass die Kostensteigerung durch Beschichtung der Gläser infolge von Produktivitätsfortschritten bei der eigentlichen Fensterfabrikation mehr als überkompensiert werden konnte. Wesentlicher Grund dafür ist die Kapitalkosteneinsparung, die aufgrund der immer schneller produzierenden Herstellungsmaschinen möglich wurde. Während 1985 noch mit 3 h/m² für die Herstellung gerechnet wurde, sind es heute bei den modernen Fensterstrassen weniger als 1 h/m².

Betrachtet man die reale Preisentwicklung eines Standardfensters (ohne Baustellenanlieferung und Montage) in den letzten 30 Jahren, so betrug die Kostendegression im Durchschnitt 1% pro Jahr (vgl. Tab. 4.5-8). Nach den Angaben einer Holzfensterherstellers dürfte die Kostendegression in den letzten 15 Jahren allerdings etwas abgenommen haben (0,75%/a; vgl. Tab. 4.5-9), möglicherweise im Gegensatz zu Fenstern mit Kunststoffrahmen.

Tabelle 4.5-8 Kosten zur Fensterherstellung 1970 und heute, nominale und reale Werte, in CHF/m² Standardfenster (U-Wert 1970 ca. 2.5 bis 3.0 W/m²K, heute ca 1.3 W/m²K)

	Glas	Material, Beschichtung	Fenster-werk	Montage inkl. Transport	Kalk. Kosten-deckungsbeitrag	Total
1970						
- nominal	150	70	120	*60*	*80*	480
- real[1)]	202[2)]	94[2)]	135[3)]	80[2)]	90[3)]	601
2000	100	100	80	80	90	450

[1)] in Preisen von 2000 [2)] bereinigt mit Produzentenpreisindex verarbeitende Produktion
[3)] durchschnittlicher Preisindex für Wohnbautenerstellung

Quelle Interview mit Vertreter SZFF

Tabelle 4.5-9 Preisentwicklung von Holzfenstern mit Zwei- und Dreifachverglasung (in CHF/m²)und technische Entwicklung, 1985-2001

Preisentwicklung in CHF/m²		1985	1990	1993	1996	1999	2001	Änderung %/a
- nominal	IV	390	400	400	400	400	410	-
- real	IV	4533	442	429	416	404	406	0,75
- nominal	3fach IV	430	485	485	505	505	495	-
- real		500	536	520	525	510	490	0,13
U-Wert Glas[1)]	IV	3.0	1.5	1.2	1.1	1.1	0.9	6,5
	3fach IV	2.0	1.1	0.7	0.5	0.5	0.5	8,8

[1)] Die angegebenen Glas-U-Wert stellen jeweils den Bestwert dar und nicht die Marktdurchdringung

Quelle: Führender Hersteller von Holz- und Holzmetallfenstern ()

Die Preisentwicklung der Zweischeibenverglasung verlief bei etwa konstanter Nachfrage von 2.6 bis 2.9 Mio m² Isolierglas pro Jahr während der letzten drei Dekaden relativ bewegt: preisbereinigt (in 2000er Preisen) nahmen die Preise von rd. 160.- CHF/m² auf 65.- CHF/m² trotz des o.g. technischen Fortschritts erheblich mit durchschnittlich um 2.7% jährlich ab (vgl. Tab. 4.5-10). Bezieht man diesen Effekt auf Skalen- und Lerneffekte, so wäre der Degressionskoeffizient bei etwa 0.85 über die Zeitspanne seit 1970. Allerdings war er in den 90er Jahren etwas grösser, wovon aber für die Zukunft infolge des Reifegrades dieser Technik nicht ausgegangen wird. Unterstellt man für die Zukunft eine vergleichbare Kostendegression, so würden sich ohne weiteren Technologiesprung die Kosten für die Doppelverglasung in den kommenden 30 Jahren noch einmal um 15% auf etwa 55.- bis 50.- CHF/m² reduzieren. Hier wird die Reife dieser

Technologie deutlich, aber auch die Frage nach neuen Isolierglasscheiben mit grösseren Kostenreduktionspotenzialen.

Die Preisentwicklung der Dreifachverglasung bestätigt die vielen Beobachtungen der Erfahrungskurven: bei gleichem technischem Standard und neuer Technologie verläuft die Degression mit 1.5%/a zwischen 1970 und 1990; der Technologiesprung ab 1996 führt zu höheren Preisen, die aber wieder deutlich rückläufig sind (Tab. 4.5-10).

Bei den dreifach verglasten Holzfenstern ist der Preis während der letzten 15 Jahren in etwa konstant geblieben, obwohl der U-Wert der eingebauten Verglasung sich um den Faktor 4 verbesserte. Die Halbierung des U-Wertes zwischen 1985 und 1990 machte sich preislich am deutlichsten bemerkbar (vgl. Tab. 4.4-9). Allerdings liegt der Marktanteil der dreifach verglasten Fenster heute, auch 10 Jahre nach der Markteinführung der 3-fach IV-Gläser, erst bei etwa 7%. Hier sind deshalb noch deutlich höhere Kostendegressionen als bei Zweifachverglasungen zu erwarten (vgl. Tab. 4.4-11).

Tabelle 4.5-10 Preisentwicklung und technische Entwicklung von Zwei- und Dreifach-Verglasungen, 1970-2000

Werte in CHF/m²		1970	1980	1985	1990	1993	1996	1999	2001
- nominal	IV, Ug 1.1	120	100	90		80			65
- real		160	122	105		86			64
	3fach	IV U-Wert 2.2 – 1.8 W/m²K					IV 0.5 W/m² K		
- nominal		100	90	80				150	120
- real		135	110	99				152	120

Quelle: Führender Hersteller von Isoliergläsern

Tabelle 4.5-11 Preisentwicklung und technische Entwicklung von Zwei- und Dreifach-Verglasungen, 1970-2000, nominelle Preisangaben, CHF/m²

	1970	1980	1985	1990	1993	1996	1999	2001
2-fach IV	60	60	60	60	60	60	60	65
2-fach IV mit Wärme-schutzbeschichtung			150	150	130	110	110	120
3-fach IV		95	95	95	95	95	95	105
3-fach IV mit Wärme-schutzbeschichtung				300	260	215	215	240

Quelle: Führender Hersteller von Isoliergläsern

Tabelle 4.5-12 Entwicklung der relativen Produktionsmengen von Zwei- und Dreifach-Verglasungen, 1970-2000, Angaben in %

	1970	1980	1985	1990	1993	1996	1999	2001
2-fach IV	100	97	82	38	27	17	14	13
2-fach IV mit Wärmeschutzbeschichtung			3	60	70	78	80	80
3-fach IV	3	15						
3-fach IV mit Wärmeschutzbeschichtung				2	3	5	6	7

Quelle: Führender Hersteller von Isoliergläsern

b) Kostenschätzungen 2000-2030

Die modernen Dreifachverglasungen mit U-Werten um 0.5 W/m².K starteten Ende der 90er Jahre mit ähnlichen Preisen wie die Preise der Doppelverglasungen Anfang der 70er Jahre, nämlich mit etwa 160.- CHF/m². Es wird davon ausgegangen, dass die Lern- und Skaleneffekte auch bei diesem Dreifachglas die m²-Preise in den kommenden drei Jahrzehnten vergleichbar senken werden, d.h., es wird ein Degressionskoeffizient von etwa 0.85 bei einem Produktionsbeginn von 1996 und relativ kleinen Stückzahlen unterstellt.

Für die zukünftige Kostenentwicklung der Fenster mit einem U-Wert von 1.4 W/m²Kund 2 Flügeln mit 4 m² wird ein geringerer Kostendegressionseffekt angenommen, da die Kosten der Rahmenherstellung in der Vergangenheit nicht in dem Masse wie die Glaserzeugungskosten gesenkt werden konnten und wahrscheinlich auch in Zukunft kaum bei gleicher Funktionalität des Fensters grössere technische Fortschritte bei der Fertigung und dem Einbau des Fensters möglich erscheinen. Deshalb wird von einem ähnlichen Rückgang der realen Preise mit einem Degressionskoeffizienten von 0.9 ausgegangen, wie er in der Vergangenheit beobachtet wurde. Ausserdem wurde davon ausgegangen, dass die Baustellenanlieferung und Montage kostenseitig nicht mehr verbessert werden kann. Dies transponiert sich in einen Kostenrückgang in realen Preisen um etwa 0.35% pro Jahr, d.h. Preise für Holzfenster mit U-Wert von 1.4 um 600.- CHF/m² in 2000 und 540.- CHF/m² in 2030 (vgl. Tab. 4.5-13).

Bei den besser gedämmten Holzfenstersystemen wurden für die Verglasung und die Rahmenherstellung höhere Rationalisierungserfolge unterstellt, z.B. beim wärmegedämmten Holzrahmen von 990.- CHF/m² in 2000 auf 640.- CHF/m² in 2030, d.h. 1.4%/a. Für Holz-Metallfenster dürften die Werte - bei einer sich leicht vermindernden Preisdifferenz zum Holzfenster - sich proportional entwickeln (vgl. Tab. 4.5-11). Auch hier muss betont werden, dass die Kostendegressionen in Zukunft durch höhere Stückzahlen als unterstellt deutlicher ausfallen könnten. Hierbei mögen kleinere und grössere Innovationen am Produkt oder am Herstellprozess weitere Reduktionen oder technische Verbesserungen ermöglichen.

Weiteres Verbesserungspotential kann über die Abstandhalter realisiert werden. Seit Beginn der 1990er Jahre wurden Alu-Abstandhalter mit einem linearen Psi-Wert von 0.07 W/m²K verwendet. Heute sind Abstandhalter (spacer) aus Edelstahl und Kunststoff auf dem Markt, die Psi-Werte von 0.05 bzw. 0.04 oder noch tiefer haben. Die Mehrpreise von Fenstern mit diesen Abstandshaltern sind relativ gering (12 bis 30 CHF/m²), so gering, dass sie bei den Regressionsanalysen kaum als erklärende Variable in Erscheinung traten (Kap. 4.3.7). Trotzdem werden sie laut Fensterhersteller kaum nachgefragt, d.h. bei der Devisierung kaum verlangt. Sie würden jedoch, gerade bei Fenstern mit tiefen Glas-U-Werten, eine ca. 15%ige Verbesserung des Fenster-U-Wertes bringen. (vgl. Tabelle 4.5-14).

Ein neuer technologischer – und zunächst auch preislicher – Sprung wären Verglasungen mit selektiven Folien zwischen den Gläsern oder vakuumierte Gläser, die derzeit am Markt schon erhältlich sind oder sich in der Pilot- bzw. Demonstrationsphase befinden. Auf diese Fenstersysteme und ihre mögliche Kostenentwicklung wurde in diesem Bericht noch nicht eingegangen, weil die Kosten der ersten Serie noch nicht bekannt sind.

Tabelle 4.5-13 Dynamisierung der Investitionskosten für doppeltes und Dreifach-Wärmeschutzglas und Holzfenster 2000 -2030 (CHF/m²) in Preisen von 2000

Investition	**2000**	**2010**	**2020**	**2030**
Glas				
- Doppelglas	61.-	61.-	57.-	55.-
- Dreifachverglasung[1)]	130.-	105.-	85.-	75.-
Fenstersystem[2)] mit				
- Holzrahmen, U-Wert 1,4	450.-	425.-	405.-	390.-
- Holz-Rahmen, U-Wert 1,24[3)]	530.-	480.-	430.-	400.-
- Holzrahmen, U-Wert 1,1[1)]	585.-	535.-	470.-	440.-
- Holzrahmen, U-Wert 0,8[1)]	830.-	600.-	530.-	490.-
Baustellenanlieferung, Montage				
- Doppelglas	150.-	150.-	150.-	150.-
- Dreifachglas	160.-	160.-	155.-	150.-
Total, Fenstersystem [2)]				
- Holzrahmen, U-Wert 1,4	600.-	575.-	555.-	540.-
- Holz-Rahmen, U-Wert 1,24[3)]	690.-	640.-	585.-	550.-
- Holzrahmen, U-Wert 1,1[1)]	745.-	695.-	625.-	590.-
- Holzrahmen, U-Wert 0,8[1)]	990.-	760.-	685.-	640.-

[1)] Glas-U-Wert 0,5 [2)] Doppelflügel [3)] Glas-U-Wert 0,7

Quelle: CEPE

Tabelle 4.5-14 Resultierender Fenster-U-Wert in Funktion des Abstandhalters bei verschiedenen Glas- und Rahmen-U-Werten, 1.7m² Fensterfläche, 7.7 m Glasrandlänge

		Rahmen-U-Wert = 1.5 W/m²K			Rahmen-U-Wert = 0.8 W/m²K		
Abstandshalter:		0.07	0.05	0.035	0.07	0.05	0.035
Glas-U-Wert	**1.1**	1.52	1.43	1.37	1.31	1.22	1.16
	0.9	1.38	1.29	1.23	1.17	1.08	1.02
	0.7	1.24	1.15	1.09	1.03	0.94	0.88
	0.5	1.10	1.01	0.95	0.89	0.80	0.74

Quelle: Berechnungen CEPE

4.5.4 Lüftungsanlagen

Die Fülle technischer Lösungen zu einer angemessenen Raumlüftung bei gut gedichteten Fenster- und Türsystemen sind zu zahlreich, um sie in diesem Bericht systematisch einer Analyse zu zukünftigen Kosten zu unterziehen. Die Kosten der Lüftungsanlagen haben lt. Aussagen von Fachleuten in den 1990er Jahren nominell um etwa 20 bis 30 % zugenommen, d.h. inflationsbereinigt zwischen 0 und 10 %. Die Qualität der Geräte hat gegen Ende der 1990er Jahre zugenommen (bessere Wärmerückgewinnung und bessere Ventilatoren). Deutlich abgenommen dagegen (etwa Halbierung) haben die Planungs- und Bauaufsichtskosten in den vergangenen 10 Jahren. Dies dürfte auch durch eine Verschiebung der beteiligten Unternehmen von den klassischen Raumlüftungsfirmen zu den Sanitär- und Heizungs-Installationsfirmen zurückzuführen sein (Systemanbieter). Die technische Demonstrationsphase der Komfortlüftungen ist seit Beginn dieses Jahrzehnts abgeschlossen; noch sind die Stückzahlen gering, aber die Marktdiffusion dürfte in diesem Jahrzehnt beginnen.

Es fehlen wegen der erst begonnenen Marktdiffusionsphase der Komfortlüftungen neben repräsentativen Angaben zur Vergangenheitsentwicklung der Kosten auch Zahlen der installierten Einheiten nach einzelnen Anwendungen (Neubau, Modernisierung) und Techniklinien sowie Wohnungsgrössen (Anzahl der Zimmer).

Die Analyse in Kap. 4.3.10 ergab, dass bei Neubauten mit einer Einsparung von gut 40 bis knapp 70 MJ/m² a an Heizwärme zu rechnen ist und bei Sanierungen mit 50 bis 150 MJ/m² a. Hierzu sind die Investitionskosten mit etwa 60.- bis 130.- CHF je m² Wohnfläche und Unterhaltskosten zwischen 130.- je Wohnung (Mehrfamilienhäuser) bis zu 300.- CHF (Einfamilienhäuser) pro Jahr erheblich; sie weisen bereits darauf hin, dass auch andere Aspekte als Energieeinsparung mit in die Bewertung des Nutzens von Lüftungsanlagen einfliessen müssen, um von angemessenen Kosten für die Lüftungsanlagen sprechen zu können (vgl. Kap. 4.6).

As Beispiel für die Dynamisierung wurden die zentrale Komfortlüftung und die Komfortlüftung pro Wohnung für Neubauten herausgegriffen.

Tabelle 4.5-15 Investitions-Kosten einer zentralen Komfortlüftungsanlage (mit Deckenverteilung) und Wärmerückgewinnung, in Preisen von 2000) 2000-2030

Kostenart	2000	2010	2020	2030
Grundkosten je Wohnung				
- Anteil Geräte mit Steuerung und Schalldämpfer	3'300.-	2'700.-	2'400.-	2'250.-
- Aussenluft, Fortluft	2'000.-	1'760.-	1'610.-	1'500.-
- Projektierung, Bauaufsicht	1'500.-	1'350.-	1'250.-	1'200.-
- Bauleistung	1'000.-	930.-	880.-	840.-
3,2 Zimmer-Wohnungsgrösse				
- Leitungen	1'280.-	1'100.-	1'000.-	930.-
- Auslässe	320.-	300.-	290.-	280.-
- Verteilung über Decke	960.-	860.-	800.-	750.-
Summe	10'360.-	9'000.-	8'230.-	7'750.-

Quelle Kosten Jahr 2000: HTA Luzern, Annahmen und Berechnungen zu den künftigen Kosten: CEPE

Die grössten Kostendegressionen sind infolge wachsender Stückzahlen bei der zentralen Anlage selbst und ihrer Steuerung sowie dem Schalldämpfer zu erwarten (vgl. Tab. 4.5-15). Relativ geringe Lerneffekte sind bei den Projektierungs- und Bauaufsichtsleistungen und moderate Rationalisierungseffekte mit geringerer Kostendegression bei allen übrigen Leistungen zu erwarten. Insgesamt könnten mit diesen Annahmen die Kosten in der jetzigen Dekade um 1.4% jährlich rückläufig sein und zwischen 2020 und 2030 nur um etwa 0,6 % jährlich. Bei langsamer Marktdurchdringung, so wurden die Zahlen kommentiert, könne man allerdings nur bei den Geräten und Auslässen die angenommenen Degressionen erwarten, da bis Ende dieses Jahrzehnts eine erforderliche Qualitätszunahme (Schall, Leckagen, Zugänglichkeit für Reinigung und die Wärmedämmung) die erreichbaren Degressionseffekte kompensieren dürften. Manche der Gesprächspartner erachten diese unterstellte Kostenentwicklung in Tab. 4.5-15 als optimistisch.

4.5.5 Neubauten: Dynamisierung des bottom-up Ansatzes durch neue Technologien

Die zunehmend grösseren Wärmedämmstärken lassen sich vor allem bei skelettartigen Baukonstruktionen in die Gebäudehülle integrieren; hierzu bietet der Holzbau sehr gute Möglichkeiten. Vermehrt dürfte auch im Wohnungsbau die vorgehängte Fassade zur Anwendung gelangen, um so die Vorteile der massiven Tragkonstruktion (Betondecken, Innenwände und von der Fassade zurückgesetzte Stützen) und der Leichtbauweise der Gebäudehülle zu nutzen. Dies bedeutet eine zunehmende Produktion der benötigten Materialien und zusätzliche Lerneffekte bei der Planung und Installation, wie sie im Trend für die Kostenschätzungen angenommen wurden (vgl. Tabelle 4.5-7).

Die transparente Wärmedämmung ist z.T. aus ästhetischer Sicht noch wenig akzeptiert; sie dürfte sich aber bei entsprechenden architektonischen Konzepten und weiter reduzierten Herstellungs- und Installationskosten künftig besser etablieren. Es zeigt sich hier das Problem der erforderlichen Kostenreduktion in einem Pionier- und Einführungsmarkt, der aber durch verschiedene technische Optionen anderer Wärmedämmsysteme (z.B. verbessertes Polystyrol, Vakuum-Isolation) sehr klein bleiben könnte und damit die erforderlichen Kostenreduktionen entlang der Erfahrungskurve nicht erreichen kann. Welches der Systeme und Produkte sich durchsetzen wird, kann im Moment noch nicht abgeschätzt werden. Die Technik der Vakuum-Isolation ist vielversprechend und attraktiv, insbesondere für die Architekten aufgrund der hohen Dämmwirkung bei relativ geringer Dämmstärke bzw. Bautiefe der Paneel-Elemente. Die Themen und Titel der aktuellen Forschungsberichte im Bereich Vakuum-Isolation verdeutlichen in etwa den Stand der Technik im Innovationsprozess. Die Markteinführung hat noch nicht stattgefunden, und deshalb konnten zu dieser technischen Option noch keine Kostenerhebungen und keine zeitliche Dynamisierung durchgeführt werden.

Die neueren Haustechnik-Konzepte mit Kühldecken, Flächenheizungen in Wänden und kombinierten Heiz-Kühl-Systemen (mit Vorlauftemperaturen von 23-25° C) dürften künftig nicht nur im Bürobau, sondern auch im Wohnungsbau Einzug halten und an Bedeutung gewinnen. Kostenseitig wurde diese technologische Entwicklung wegen ihrer geringen Bedeutung in dieser Analyse beim bottom-up Ansatz noch nicht berücksichtigt. Hier sollte man zunächst eine Kostenanalyse für den Nichtwohnbereich machen, um dann auf den Wohnbereich mit besserem empirischen Material schliessen zu können.

4.5.6 Dynamisierung von Neubaukonzepten durch industrielle Vorfertigung

Man kann in der heutigen Bautätigkeit eine zunehmende Tendenz zur Standardisierung beobachten. Dabei unterscheidet sich diese grundsätzlich von der letzten Standardisierungs-Tendenz der 60er- und 70er Jahre. Diese hatte sich aus den Bestrebungen der Moderne

entwickelt und versuchte eine Kostenreduktion durch Rationalisierung im Bausektor. Die Initiative zu dieser Entwicklung ging dabei primär von der Industrie aus; es ging um Steigerung der Quantität bei gleichzeitigem Mangel an Arbeitskräften. Das Ziel waren vorgefertigte Elemente (vgl. die Plattenbauten hierzulande z.B. von Göhner in Greifensee, Rümlang) oder ganzer Häuser (Entwicklung von Fertighäusern durch zahlreiche Hersteller). Der Ort, d.h. der Bauplatz als Bestandteil eines Perimeters, einer bebauten Umgebung, spielte damals kaum eine Rolle für die Projektierung des Objektes.

Heute kommt dem Ort verstärkt eine zentralere Bedeutung im Entwurfsprozess zu. Die Standardisierung findet heute innerhalb einer zunehmenden Individualisierung statt: während sich das Objekt individuell an den örtlichen Gegebenheiten anpasst, sucht man im Innern, d.h. in Tragstruktur und Konstruktion, nach einer Standardisierung. Dies führt wieder zu Typologien zurück, die in der traditionellen Baugeschichte wie auch in der Moderne ihre Anwendung fand: eine klare Trennung von rasterartig gegliederten Tragelementen und dazwischen sich frei bewegenden nicht tragenden raumtrennenden Elementen.

Nebst der Rückbesinnung auf ökonomische Grundrisse liegt das Gewicht heute vor allem auf der Vorfertigung von Bauteilen; diese begründet sich im rationellen Bauprozess: komplexe konstruktive Bauteile werden unter günstigen Rahmenbedingungen in Hallen erstellt, die Bauzeit vor Ort, d.h. der Witterung ausgesetzt, verkürzt sich dabei auf wenige Tage. Die Qualität des Bauwerks kann dadurch erheblich erhöht werden. Die Vorfertigung dürfte jedoch in den nächsten zwei Jahrzehnten kaum zu jenen grösseren Kosteneinsparungen führen, die die Baufachleute sich zum Teil erhoffen. Gerade im Hinblick auf zunehmende Energieeffizienz könnte die Vorfertigung jedoch eine interessante Option sein, wenn z.B. an Stelle einer Wand mit zunehmend aufwändiger Befestigung des Dämmstoffs ein Wandelement tritt, bei dem der Dämmstoff in die Konstruktion des vorgefertigten Elements integriert wird. Ein weiterer Vorteil dieser Bauweise ist die geringere Bautiefe des Wandelements verglichen mit der Massivbauvariante und aussen angebrachter Wärmedämmung.

Das hierfür notwendige Umdenken in Planung und Fertigung fand bis heute vor allem im Holzbau statt, hier wiederum schwergewichtig im Bereich des Einfamilienhauses. Die Standardisierung von Kleinstrukturen ermöglicht trotzdem einen hohen Flexibilitätsgrad in der Umsetzung, was zu einer hohen Diversität führt. Zur weiteren Steigerung der Kosteneffizienz werden die vorgefertigten Strukturen immer grösser, Modulhäuser finden sich immer öfters in Fachzeitschriften besprochen. Diese addierbaren Module führen entsprechend zu einer Reduktion der Diversität, sowohl in der Gestaltung der Grundrisse wie auch im ästhetischen Ausdruck des Hauses.

Der massive Preisdruck auch im Sektor der Massivbauweise ruft auch hier zunehmend nach Standardisierung und Automatisierung. Vereinzelt werden heute bereits auf der Baustelle solche Fertigungsmethoden wie z.B. Mauerwerksroboter angewandt. Doch lassen die heute üblichen Rahmenbedingungen auf dem Bauplatz, bedingt durch Abläufe, Ausführungs- und Projekttypen das in diesen Fertigungsmethoden vorhandene Rationalisierungspotenzial nicht ausschöpfen. Es wird auch hier notwendig sein, eine vollständig neue, prozessorientierte Systemplanung zu entwickeln. Dem stehen allerdings die kleinen Betriebseinheiten der meisten Baufirmen mit wenig qualifiziertem Personal entgegen.

Um hier nicht wieder in die gleiche Entwicklung zu verfallen, die gleichen Fehlern und Schwachstellen zu wiederholen, die in den 1960er und 1970er Jahren zum Verlassen dieser Bauweise geführt haben, ist eine ganzheitliche Problemlösung dringend notwendig; der Anbieter (z.B. Generalunternehmer) präsentiert sich dem Kunden gegenüber zunehmend als fachübergreifender Systemanbieter vollständiger Lösungen. Im Bereich des Marketing hat diese Entwicklung mit der zunehmenden Profilierung der Generalunternehmer als

Totalunternehmer bereits eingesetzt, im Bereich der Fertigung hinkt diese Entwicklung jedoch noch weit hinterher. Betrachtet man gesamtheitlich den Gestaltungsspielraum sowohl im finanziellen wie auch im gestalterisch-konstruktiven Bereich eines Projektes im Zeitablauf von Projektierung bis Ausführung, so liegt das grosse Sparpotenzial vor allem im frühen Stadium der Projektierung. Voraussetzung für eine optimale Ausschöpfung dieses Sparpotenzials ist die intensive Zusammenarbeit in Form eines Know how-Transfers von Planung, Fertigung und Einbau von Elementbauteilen; die Erfahrung der Ausführenden muss ebenfalls integrierender Bestandteil der Planung werden. Der Fertigungsprozess von Bauteilen muss somit entwurfsbestimmend werden, unabhängig, ob es sich um einen Holz- oder Massivbau handelt.

Aufgrund von (vielleicht nicht ganz repräsentativen) Beobachtungen am Immobilienmarkt lassen sich eine zunehmende Nachfrage und vermehrte Angebotsargumente hinsichtlich Minergie-Standard feststellen. "Minergie-Standard ist im EFH-Bereich ein Muss", sagen manche Architekten. Auch bei der öffentlichen Hand wird mancherorts heute dieses Qualitätsmerkmal für Neubauten vorgeschrieben. Derzeit sind etwa 5% der Neubauten mit dem Minergie-Standard vergleichbar. Somit kann man annehmen, dass bis 2010 der Minergie-Standard sich mit einem relativ grossen Anteil bei den Neubauten wird durchsetzen könnten.

Dies hätte erhebliche Auswirkungen auf die Kostendegression bei hocheffizienten Dämm-Materialien und Fenstersystemen, wie sie in Kap. 4.5.1 bis 4.5.3 noch nicht unterstellt wurden. Insofern sind die in diesem Kapitel dargestellten Kostenentwicklungen als relativ konservativ einzuschätzen. Ab 2010 bis 2020 könnte sich zudem der Minergie-P oder der Passivhaus-Standard als häufig gewählte Option im Neubau durchsetzen (in Deutschland sind bereits etwa 1000 Häuser mit diesem Standard gebaut), so dass zusätzliche Mengendegressionen bei den Wärmeschutzinvestitionen, den Dämm- und Fenstersystemen und den Lüftungsanlagen zu erwarten sind. Hierzu quantitative Abschätzungen zu machen, würde ein formalisiertes Kostenmodell erfordern, um alternative Mengen-Kostendegressionen schnell ermitteln zu können. Dies zu entwickeln, lag ausserhalb der hier finanzierten Arbeiten.

4.6 Nicht-energetische Nutzen, Co-Benefits

Erneuerungen von Wohngebäuden werden sehr selten allein im Hinblick auf energetische Verbesserungen vorgenommen, und die Erneuerungen an der Gebäudehülle umfassen in aller Regel mehr als nur energierelevante Massnahmen (z.B. Verschönerung der Fassaden, Badrenovierungen, Ausbau von Dachgauben, Feuchtigkeitsschutz von Kellerwänden). Hinzu kommt, dass Wärmeschutz- und Energieeffizienz-Investitionen häufig in mehrfacher Hinsicht einen *zusätzlichen Nutzen* (Co-benefits) zu den Energiekosteneinsparungen mit sich bringen; diese zusätzlichen Nutzen müssen schon aus betriebswirtschaftlichen Gründen in einem gesamtheitlichen Kontext betrachtet werden (vgl. Ostertag u.a. 1999).

Die ökonomische Bewertung derartiger zusätzlicher Nutzen (z.B. Wertsteigerung des Gebäudes, bessere Vermietbarkeit, Komforterhöhung (angenehme Wandtemperaturen im Winter und Sommer, gut glüftete Räume), Verbesserung der Sicherheit oder Verdunklungsmöglichkeit am Tage, Verbesserung des Lärmschutzes; vgl. Tabelle 4.6-1) wird in einzel- und energiewirtschaftlichen Bewertungen bisher kaum explizit gemacht; sie ist in der Regel auch nur mit erheblichem Mehraufwand möglich und wird selbst vom Investor meist nur teilweise quantitativ, ansonsten lediglich qualitativ in seine Entscheidungen einbezogen (IWÖ 2000); der Eigennutzer zieht seine Präferenzen mit ein, und der Vermieter seine Einschätzung über zusätzlich zu erzielende Mieteinnahmen, die verbesserte Vermietbarkeit oder die Wertsteigerung infolge des erhöhten Wohnkomforts (Müller 2000). Dieses Beispiel zeigt bereits, dass die ökonomischen Bewertungsansätze für private Gebäudebesitzer, Immobiliengesellschaften und Mieter zumindestens in ihrer formalen quantitativen Form verschieden sein können, wenn nicht aus Gründen der Mietgesetzgebung sein müssen (Graf/Sager 1998).

Es gibt weitere Aspekte, z.B. eine Absicherung der Warmmiete gegen langfristig kaum absehbare Steigerungen der Energiepreise (auch wenn sie explizit in den Mietverhandlungen heute selten eine Rolle spielen, wohl aber nach den Ölpreissteigerungen der Jahre 1973 und 1980 von Bedeutunbg waren), verminderte Leerstandsrisiken und damit eine verbesserte Bonität bei den Banken als Kunde für Fremdkapital nach dem Baseler Abkommen, geringere Mieterfluktuation, ökologisches Image des Gebäudeeigners oder der Mieters. Nicht alle diese Aspekte werden im folgenden behandelt, wenngleich sie in der Praxis bei den Entscheidungen der verschiedenen Akteure eine Rolle spielen mögen (z.B. Graf/Sager 1998, ecoplan, 2000).

Für einzelne Bauelemente lassen sich weitere begleitende Nutzen beobachten. Beispielsweise sind beim Fenster weitere Nutzen zu nennen:

- Das verminderte Ausbleichen von Teppichen, Möbeln etc. bei zweifach statt einfach beschichteten Fenstern. Die damage-wighted transmission reduziert sich laut Untersuchungen des Lawrence Berkeley National Laboratory um bis zu 50%.
- Das weniger häufige Auftreten von Kondenswasser am Glasrand bei Glasabstandshaltern aus Aluminium oder Kunststoff oder auf der Fensteroberfläche (bei 0°C Aussentemperatur beträgt die kritische relative Luftfeuchtigkeit, über der Kondensation auftritt, bei einer Doppelverglasung ohne Beschichtung 40%, Argon-Doppelverlasung 60%, bei einer Dreifachverglasung 75%; das Kondensationsrisiko wird also sukzessive reduziert).

Der Einbezug derartiger Nutzen in die formale ökonomische Bewertung scheitert nicht selten an den verfügbaren Informationen zur Quantifizierung dieser Effekte oder ihrer Monetarisierung. Hier ist deshalb noch ein hoher Forschungsbedarf, um im Erneuerungsalltag und der Energiepolitik zu sachgerechten Entscheidungen zu kommen (Brown, BP: „What gets measured, gets managed“).

Tabelle 4.6-1 Beispiele des nicht-energetischen Nutzens von Wärmeschutzmassnahmen und methodische Ansätze zu seiner Monetarisierung

Nicht–energetischer Nutzen	Methodischer Ansatz zur Bewertung
Behaglichkeit durch höhere Oberflächentemperaturen der Wände im Winter und verminderte Zugluft im Fensterbereich	Über zusätzliche Energieeinsparung durch Absenkmöglichkeit der durchschnittlichen Raumtemperatur bei höherer Temperatur der Wand- und Fensterflächen und verminderter Zugluft (v.a. Erneuerung Gebäudebestand)
Geringere Lärmbelastung durch doppelt-/dreifach verglaste Fenster mit indirekter Schalldämmwirkung, evtl. in Verbindung mit kontrollierter Lüftung	Zahlungsbereitschaft zur Lärmvermeidung, differenziert nach Einkommensklassen, Lärmbelastung, Tag/Nacht oder Mehrkosten gegenüber Schallschutzverglasung
Verbesserte Luftqualität durch gewährleistete Lüftung, kontrollierte Feuchtigkeit und Staubreinigung von Zuluft	Für Asthma und ähnliche Krankheiten der Atemwege verminderte Gesundheitskosten (epidemeologische Daten, Krankheitsbehandlungs- und -folgekosten)
Vergrösserung der Nutzfläche, d.h. des Wohnraums bei Dachdämmungen, die mit einem Dachraumausbau verbunden sind.	Geringere wohnflächenbezogene Wärmeverluste und geringere spezifische Heizkosten für die bisherigen Wohnflächen
Grössere und vielfältiger benutzbare **Aussenräume** (verglaste und/oder vergrösserte Balkone und Wintergärten)	Relevant für MFH, sowohl an lärmbelasteten wie normalen Wohnlagen; Befragung von Immobilienbewirtschaftern bzgl. Bewertung des Attributs "Balkon"
Einbruchschutz durch weniger offen stehende Fenster bei Komfortlüftung oder durch Rollladen- bzw. Blendladenschutz	Schätzung über reduzierte Versicherungsprämien, Vergleich mit andern Einbruchschutzmassnahmen

Quelle CEPE

4.6.1 Methodisches Vorgehen

Die Bestimmung des nicht-energetischen Nutzens erfolgt i.a. in einem dreistufigen Verfahren: Identifikation, Quantifizierung und Monetarisierung. Für die Quantifizierung muss zunächst von einem Referenzfall ausgegangen werden, der sich, ähnlich wie die Sanierungsfälle, auf verschiedene Typgebäude oder Modernisierungs- oder Neubaualternativen definieren muss. Deshalb wird zunächst für jede Art des Zusatznutzens (vgl. Tabelle 4.6-1) eine Referenzerneuerung der Gebäudehülle und der Haustechnik definiert, die den technischen Stand und die übliche Investitionspraxis reflektiert (z. B. Putzausbesserung und neue Wandfarbe sowie Installation eines Niedertemperatur-Heizkessels und ‘normale‘ Wärmeschutzverglasung). Der zusätzliche Nutzen einer Zusatzinvestition zählt dann nur insoweit, als er Komforterhöhungen bedeutet oder andere Kosten (z.B. Einbruch- und Diebstahlversicherungen, Krankheitskosten) reduziert.

Die *Quantifizierung des Zusatznutzens* ist teilweise als Zwischenschritt zur Monetarisierung erforderlich desselben (z.B. Behaglichkeitszuwachs, ausgedrückt in einem Raumtemperaturabsenkungspotenzial, verminderter Lärmpegel in Dezibel, verbesserte Luftqualität in der Staub- und Aerosolkonzentration, erweiterte Wohnfläche in m^2), teilweise aber nicht notwendig, insbesondere, wenn es sich um eine Ja-/Nein-Situation handelt (z.B. Komfortlüftung, Rolladen).

Die Monetarisierung des Zusatznutzens erfolgt - wo dies möglich ist - nach den traditionellen Möglichkeiten der ökonomischen Bewertung von Zusatznutzen (Co-Benefits) einer modernen

betriebswirtschaftlichen Kostenrechnung, d.h., entweder durch den Ansatz vermiedener Kosten oder der direkten ökonomischen Bewertung des Zusatznutzens (Ostertag u.a. 1999). Letzterer muss zum Teil auf die Methoden der Zahlungsbereitschaft (Willingness to Pay) oder Willingness to Sell zurückgreifen (z.B. Hohmeyer u.a., 1996).

Allerdings ist ein Teil des absehbaren Zusatznutzens nicht in die private Kostenrechnung mit einzubeziehen (z.B. vermiedene Krankheitskosten durch verminderten Lärm und durch bessere Luftqualität), weil die vermiedenen Kosten von vornherein externalisiert waren (z.B. durch die Krankenversicherung und die Lohnfortzahlung des Arbeitgebers im Krankheitsfall). Es muss daher versucht werden, derartige Unterscheidungen jeweils mit zu berücksichtigen.

Derartige Quantifizierungen und Monetarisierungen müssten für viele unterschiedliche Sanierungs- oder Neubaufälle unterschieden werden, da hierzu aber das Budget dieser Untersuchung nicht angelegt war, beschränkte sich die Monetarisierung exemplarisch auf jene nicht-energetischen Zusatznutzen gewählter Investitionen, die das Kostenbild der zusätzlichen Wärmeschutzmassnahmen merklich verändern oder wo die Monetarisierung relativ einfach möglich war. Zum nicht-energetischen Nutzen gibt es für einige Aspekte bereits eine Literatur (z.B. Korrelation zwischen Wandtemperatur und Behaglichkeitsstufen, zwischen Lärmbelastung und Krankheitshäufigkeit bestimmter Krankheiten und verminderter Leistungsfähigkeit). Diese Literatur wurde nur teilweise ausgewertet.

In einem abschliessenden Schritt werden für die ausgewählten Investitionsfälle die nicht-energetische Nutzen den Grenz- bzw. den Gesamtkosten der betrachteten Investition gegenübergestellt, um die *energierelevanten Netto-Zusatzkosten* zu ermitteln. Diese Ergebnisse dürften nicht nur für die Bewertung der Zusatzmassnahmen aus Sicht der öffentlichen Hand (und nicht nur der Energie- und Klimapolitik, auch der Gesundheitspolitik) von Bedeutung sein, sondern auch für die Wohnungswirtschaft, die Hersteller von Wärmeschutztechnologien und Planer, Architekten und Gebäudeeigner, die ihre Mieter bzw. Kunden mit genaueren Informationen zu den Nettokosten überzeugen können.

4.6.2 Wohnkomfort durch verstärkten Wärmeschutz

Für die Quantifizierung des Zuwachses an Wohnkomfort orientiert sich das vorgeschlagene Konzept an empirischen Untersuchungen zur Behaglichkeit anhand der Temperaturunterschiede zwischen Wand und Raumlufttemperatur sowie der Strömungsverhältnisse im Wohnraum. Schon vor Jahren fand man heraus, dass eine Verminderung der Temperaturdifferenz zwischen der Wand eines Raumes und seiner durchschnittlichen Lufttemperatur von etwa 5°C bei gleichem Behaglichkeitsniveau eine Absenkung der Raumtemperatur um 1°C ermöglicht (Gertis, König, Erhorn, 198?). Zusätzlich wurde festgestellt, dass eine Verminderung der natürlichen Luftumwälzung im beheizten Wohnraum sowie der Luftventilation im Fensterbereich auf eine hygienisch erforderliche Luftwechselrate von 0.3 pro Stunde eine weitere Raumtemperaturabsenkung um etwa ein halbes Grad C bei gleichem Behaglichkeitsniveau erlaubt. (Fanger, ?)

Beispielhaft sei der Zusammenhang zwischen Oberflächentemperatur und U-Wert für verschiedene Fensterqualitäten dargestellt (siehe Tabelle 4.6-2). Daraus wird ersichtlich, dass der Nutzen vor allem zwischen dem Ausgangszustand eines typischen älteren Wohngebäudes ohne bisherige wärmeechnische Erneuerung und der Referenzerneuerung zum Tragen kommt und dass der begleitende Grenznutzen zwischen guten und sehr guten Fenstern bzw. zwischen guten und sehr guten Wärmedämmungen weit weniger deutlich zunimmt.

Tabelle 4.6-2 Oberflächentemperaturen der raumseitigen Scheiben bzw. Wände bei einer Raumlufttemperatur von 20 °C

	U-Wert	Aussentemperatur		
	W/m²K	0°C	-5°C	-11°C
2fach-Isolierglas	3.0	+12°C	+11°C	+8°C
Beschichtetes Wärmeschutzglas	1.3	+17°C	+16°C	+15°C
Beschichtetes Wärmeschutzglas	0.7	+18°C	+18°C	+17°C
Wärmedämmung Wand 8 cm	0.31			+18.8
Wärmedämmung Wand 14 cm	0.20			+19.3

Quelle Glas und Praxis – Kompetentes Bauen und Konstruieren mit Glas

Auf der Basis dieser Erkenntnisse wurden für ausgewählte Investitionsfälle (Minergiestandard gegenüber den jetzigen Bauvorschriften im Neubau) zwei typische Hauswand- und Dachwärmedämm-Investitionen sowie Wärmeschutzverglasung mit Referenz-/Minergie-Standard im Wohngebäudebestand) die jeweils typischen Differenzen für Temperatur und Luftwechselrate ermittelt und dann mittels der vermiedenen Wärmekosten ökonomisch bewertet.

Die Resultate sind privat verrechenbare Nutzen, welche durch eingesparte Wärmemengen, die durch eine entsprechende Raumtemperaturabsenkung (bei gleichem Wohnkomfort) möglich wird, mit 10 bis 50 MJ/m².a oder bei 0.20 bis 1.10 CHF je m² Wohnfläche und Jahr ermittelt wurden; dabei steht der höhere Wert für eine sehr gute Wärmedämmung gegenüber einem nicht isolierten Ausgangszustand und der geringere Wert für den Zusatznutzen des Minergie-Standards gegenüber einem Referenzneubau (Wärmekosten mit jeweils 0.022 CHF/MJ = 8 Rp/kWh angenommen). Der Nutzen mit weniger als 1 Rp/kWh ist relativ gering.

Dieses Fallbeispiel zeigt bereits, dass in vielen Fällen der Grenznutzen der Co-Benefits auch - ähnlich wie der Grenznutzen auf der Energieseite - mit zunehmendem Wärmeschutz deutlich abnimmt (vgl. Abbildung 4.6-1).

4.6.3 Geringere Lärmbelastung

Lärm im Wohnbereich wird heute nicht nur von vielen Bewohnern als grösstes Umweltärgernis relativ zu anderen Umweltbeeinrächtigungen empfunden (Züricher Kantonalbank 1988), sondern ist auch ab einem bestimmten Lärmniveau für viele Krankheitserscheinungen mit beeinflussender Faktor. Beispielsweise sind im Kanton Zürich 14 % der Wohngebäude einem Lärmpegel von mehr als 56 dB ausgesetzt (Tiefbauamt Kanton Zürich, o.J), einem Lärmpegelbereich, ab dem sich viele Menschen gestört fühlen. Die gesundheitlichen Auswirkungen von Lärm reichen von Konzentrations- und Schlafstörungen bis zu psychosomatischen Krankheiten und Herzinfarkt.

Zweifach- oder Dreifachverglasung mit asymmetrischem Glasaufbau und spezielle Glasarten (Giessharz), die Erneuerung von Rolladenkästen sowie mineralisches (schweres) Wärmedämmaterial aus mineralischen Materialien tragen zur Verminderung der Transmission von Lärmenergie in das Innere von Wohngebäuden bei. Eine Quantifizierung der Lärmminderung kann durch Vergleich zwischen Fenstern mit Gläsern unterschiedlicher energetischer und schalltechnischer Qualität bzw. durch unterschiedliche Dämmstärken mineralischen Dämmaterials erfolgen. Der weitaus grössere lärmmindernde Effekt ist vom

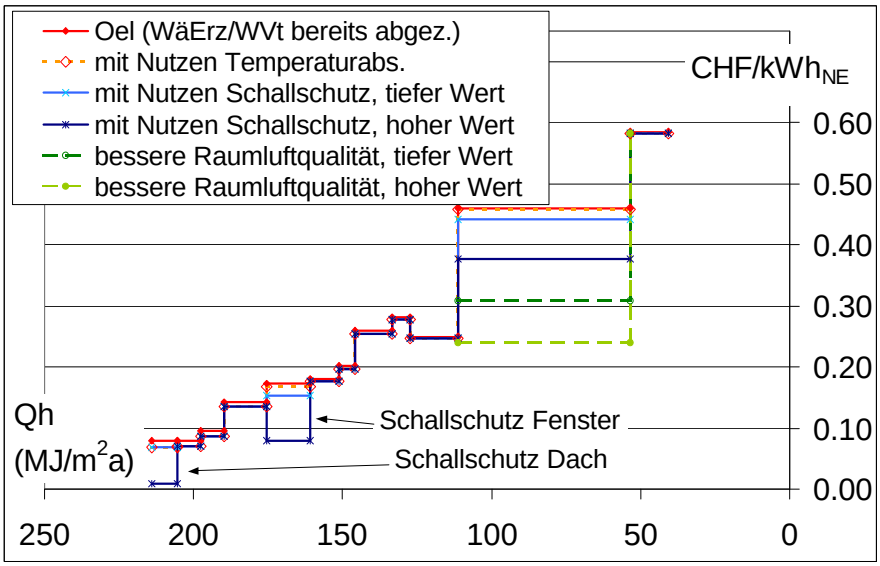
Bereich Fenster und/oder Rolläden zu erwarten, aber auch von Dämmmassnahmen mit mineralischen (schweren) Materialien im Bereich des Daches haben eine relevante Bedeutung (insbesondere gegen Fluglärm oder über weitere Strecken übertragenen Verkehrslärm und Lärm von gewerblichen Produktionsanlagen).

Als Referenzfall wurden wiederum der normale Baustandard für Neubauten sowie die typische Referenzsituation vor Erneuerungsmassnahmen im Bereich Fenster, Rolläden/-kasten und Dächer definiert, die häufig vorkommen. Diese wurden dann mit Fenstern mit erhöhten energie- und/oder schalltechnischen Anforderungen, der energie- und/oder schalltechnischen Rollädenerneuerung und mit verstärkter Wärmedämmung mit mineralischem Material verglichen, um die erzielbare Lärmminderung (z.B. in Dezibel-Jahresstunden, in denen Abwesenheiten von der Wohnung und verminderte Fensteröffnungszeiten im Fall von Wohnungslüftungen mitberücksichtigt wurden) zu quantifizieren. Dadurch wurden die Interaktion und mögliche Synergieeffekte zwischen Wärme- und Schallschutz sichtbar.

Die Monetarisierung wurde über die in der Literatur verfügbaren Kostendaten zu Willingness to Pay-Ansätzen versucht. Die Mietpreisanalysen, die eine Abhängigkeit der Miethöhe vom Lärmpegel mit durchschnittlich 0.9% Minderung je zusätzliches dB für die Schweiz ermittelten (Ecoplan 2000, Zürcher Kantonalbank 1988), führen zu direkten Nebennutzen von Wärmedämm-Massnahmen zwischen 10 Rp pro m^2 Wohnfläche und Monat (1 dB Lärmminderung bei 12 CHF/m^2 und Monat Miete) und 60 Rp pro m^2 und Jahr (4 dB Lärmminderung in Dachwohnungen in Ballungszentren mit hohem Mietzins von 17 CHF/m^2).

Das Problem bei derartigen Monetarisierungen zu den lärmbedingten Mietkostenunterschieden über statistische Methoden ist in der Regel die Tatsache, dass mehrere Einflussfaktoren (z.B. soziales Image des Wohnquartiers, Nähe zu öffentlichen Verkehrsmitteln, wahrgenommene Luftqualität oder die Nähe zu Einkaufsmöglichkeiten, Kindergarten Spaziermöglichkeiten) die Miethöhen mitbestimmen (Schelbert-Syfrig, Maggi, 2000, Ecoplan 2000). Hinzu kommt bei der Ermittlung des Grenznutzens des lärmmindernden Effekts zur Hochschätzung für den Schweizer Gebäudebestand, dass die statistische Zuordnung des Gebäudebestandes nach Erneuerungspotenzial und Lärmexposition nicht bekannt ist und deshalb im erheblichen Umfang Annahmen gemacht werden müssten, um die Grenzkostenverläufe der Wärmeschutzinvestitionen um den Einfluss ihrer lärmmindernden Wirkungen sachgerecht abbilden zu können.

Die gewählten Beispiele zeigen, dass der Schallschutz bei Fenster und Dach die Rentabilität der Wärmeschutzmassnahme entscheidend beeinflussen kann (Abbildung 4.6-1). Umgerechnet auf Nutzen je kWh Nutzenergie ergibt der begleitende Nutzen durch Lärmminderung Werte zwischen 6 und 8 Rp/kWh. Für diese Beispiele reduzieren sich die Grenzkosten auf die Höhe heutiger Wärmekosten.



Quelle: Berechnungen CEPE

Abbildung 4.6-1 Grenzkostenkurve von Wärmedämminvestitionen unter Berücksichtigung ausgewählter Co-Benefits (höherer Komfort, Schallschutz, bessere Raumluftqualität durch Lüftungsanlagen)

Ein Teil der durch zusätzlichen Wärmeschutz vermiedenen externen Kosten durch Lärmminderung, die vermiedenen Krankheits- und Lohnausfallkosten, bleibt allerdings in dieser betriebs- und energiewirtschaftlichen Netto-Kostenrechnung noch weiterhin unberücksichtigt. Hierzu gehören insbesondere vermiedene, lärmbedingte Krankheits- und Berufsunfähigkeitskosten, die nicht vom einzelnen Lärmverursacher, sondern von der Solidargemeinschaft der Versicherten getragen werden und somit als externe Kosten zu bewerten sind (vgl. Kap. 4.7).

4.6.4 Bessere Raumluftqualität

Durch Wärmeschutz bedingte bessere Raumluftqualität dürfte im wesentlichen in zwei typischen Fällen erreicht werden:

- Zum einen wird eine verbesserte Luftqualität im Innern von solchen Wohngebäuden erreicht, die in stark belasteten Wohnquartieren (z.B. sehr verkehrsreiche Strassen) gelegen sind, und zwar entweder durch eine reduzierte Luftwechselrate bei Fenster- und Türsanierungen oder durch Filterung der Aussenluft bei Lüftungsanlagen und/oder dem Ansaugen der Luft von der strassenabgewandten Seite.
- Der andere Fall ist eine zu geringe Luftwechselrate in gut wärmegedämmten Wohngebäuden, die ein zu feuchtes Innenklima (z.B. durch aufsteigende Feuchte) oder durch die Bewohner (starkes Rauchen) bzw. durch die Inneneinrichtung (z.B. synthetische Teppiche, chemikalienhaltige Pressspanmöbel) verursachte relativ hohe Schadstoffkonzentrationen aufweisen, die für Asthmakranke und andere Menschen mit einer Disposition für Allergien und Erkrankungen der Atmungsorgane unverträglich sind.

Zur Quantifizierung der genannten Unterschiede für typische Raumkonzentrationen wurde zunächst eine Literaturanalyse durchgeführt mit dem Ziel, derartige Abhängigkeiten von Konzentration und Luftwechselrate zu erhalten. Die Analysen ergaben, dass es zwar für Laboruntersuchungen und eine Reihe von Einzelfällen entsprechende luft- und wohnungs-

hygienische Untersuchungen gibt, nicht aber hinreichend repräsentative Aussagen, um eine statistische Verteilung zwischen den wärmetechnischen Erneuerungsmöglichkeiten und den lufthygienischen Gegebenheiten ableiten zu können. Ausserdem wurde geprüft, wie häufig man von einer als kritisch anzusehenden Konzentration der Aussenluft (z.B. an viel befahrenen Wohnstrassen) ausgehen kann. Auch hier scheiterte der Ansatz an nicht hinreichend verfügbaren statistischen Daten. Um eigene Schätzungen anhand der für die Schweiz vorhandenen Immissionswerte durchführen zu können, fehlte in diesem Projekt die Zeit.

Die Quantifizierung des zweiten Falls (zu hohe Innenraumkonzentrationen) konnte man aufgrund der fehlenden Daten zum Schadensausmass auch durch den Schadensvermeidungsansatz, d.h. durch Annahmen zu einem häufigeren Lüften durch geöffnete Fenster und den damit zusammenhängenden Mehrbedarf für Heizen, erreichen. Als Referenzfall wurde ein normaler Wärmeschutz (ohne kontrollierte Lüftung) mit etwa 350 bis 400 Mj/m^2 .a unterstellt. Weiterhin wurde unterstellt, dass die zusätzlich erforderliche Heizenergiemenge, die zur Vermeidung zu hoher Innenraumkonzentrationen durch zusätzliche Lüftung über Fenster (per Hand) etwa 15 bis 25 % des Heizenergiebedarfs des Referenzfalls beträgt.

Die Monetarisierung konnte wegen der o.g. fehlenden repräsentativen Daten zur Verteilung der Immissionssituationen über den Gebäudebestand bzw. zu vermiedenen Schäden infolge niedrigerer Innenraumkonzentrationen nicht über verminderte Krankheits- und Lohnfortzahlungskosten erfolgen, sondern nur über die Bewertung der zusätzlich erforderlichen Heizkosten oder der zusätzlichen Nettokosten für die Komfortlüftung abzüglich der verminderten Heizkosten durch vermindertes Lüften über die Fenster. Mit diesem Ansatz über die zusätzlich erforderliche Lüftung würden die Schadensvermeidungskosten bei ca. 1.40 bis 2.40 CHF/m^2 . a liegen und damit für eine 100 m^2-Wohnung etwa 15 bis 30 % der Jahreskosten der Lüftungsanlage bei Mehrfamilienhäusern decken bzw. 8 bis 15 % bei Einfamilienhäusern, die allerdings infolge ihrer Siedlungslage meist keine grösseren Immissionsbelastungen der Aussenluft haben. Die Nutzen der Co-Benefits werden auch in der Darstellungsform der Jahreskosten sichtbar (vgl. Abbildung 4.6-2). Insbesondere der steile Kostenanstieg der Lüftungsanlage wird wesentlich flacher, wenn die mit einer Lüftungsanlage verbundenen Zusatznutzen miteinbezogen werden und wenn - fälschlicherweise - nicht alle Kosten allein der Energieeffizienz zugeordnet werden.

Im Gegensatz zu den Jahreskosten beginnen die Investitionskosten ab dem energetischen Referenzpunkt sofort zu steigen, wenn auch nur leicht (Abbildung 4.6-2). Entscheide, die sich nur auf die Investitionskosten abstützen, führen also nicht zu einer energetisch und ökonomisch optimalen Bauweise. So trivial und so wenig neu diese Feststellung ist, so häufig wird sie in der Realität nicht beachtet, in vielen Fällen wegen des Investor-/Nutzerdilemmas und einer Mietgesetzgebung, die diese Zusammenhänge nicht hinreichend wahrnimmt.

Hinzu kämen auch noch vermiedene externe Kosten durch vermiedene Krankheits- und Lohnausfallkosten. Dieser Nutzen ist im wesentlichen als vermiedene externe Kosten zu bewerten, der aber im Rahmen dieser Analyse nicht weiter zu quantifizieren war.

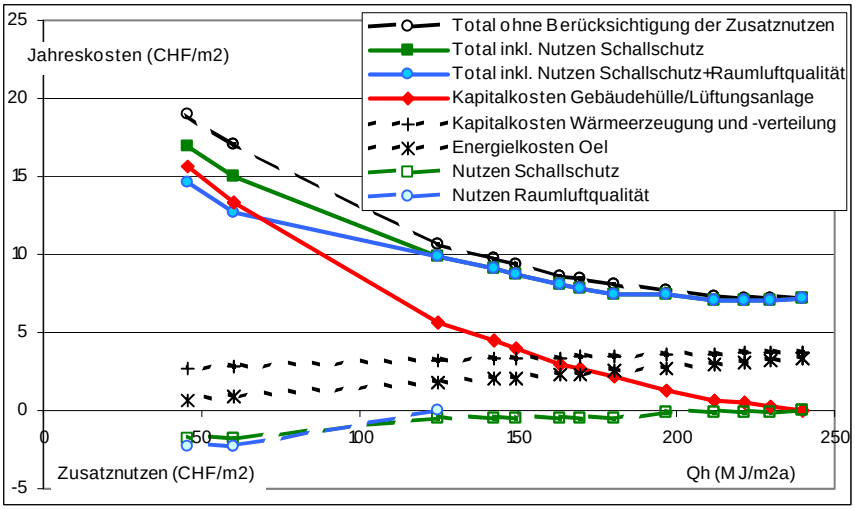


Abbildung 4.6-2 Gesamte Jahreskosten und ihre Komponenten (Mehrkosten der Energieeffizienzinvestitionen, Minderkosten der Wärmeerzeugung- und -verteilung) sowie der Zusatznutzen. Beispielhafte Darstellung für einen MFH-Neubau. Annahmen: Realzins 3%, Brennstoffpreis 4.5 Rp/kWh

4.6.5 Grössere Wohnraumfläche

In diesem Fall sind folgende Fälle angesprochen:

- verglaste Balkone und Terrassen, die als passive Solarenergienutzung hier unterstellt werden, d.h., eine energetisch unsachgemässe Beheizung dieser Flächen wird nicht angenommen. Neben dem Wärmegewinn im Winterhalbjahr hat der Wohnungsnutzer auch einen Wohnraumflächengewinn in den Jahresübergangszeiten und an Regentagen im Sommerhalbjahr.
- Zwischen einer energetischen Erneuerung des Steildachs und dem Ausbau von Dachräumen zu Wohnzwecken ergeben sich häufig Synergieeffekte. Der Dachraumausbau ist ein Auslöser für die energetische Verbesserung im Dachraumbereich und ermöglicht ausserdem eine Finanzierungsmöglichkeit weiterer (energetischer) Erneuerungen am Gebäude, denn die Kapitalisierung der zusätzlichen Mieterträge ist oft höher als die Kosten des Dachraumausbaus, selbst wenn energetisch weitergehende Lösungen zur Anwendung kommen.

Dieser Zusatznutzen, der neben dem Wärmegewinn den Kosten gegenübergestellt werden muss, wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter quantifiziert, beispielsweise über die zusätzlichen Tage, die ein verglaster Balkon bzw. Terrasse pro Jahr genutzt werden kann. Eine Monetarisierung könnte für derartige Fälle anhand typischer Mietpreise (ohne Nebenkosten) je m^2 für die gewählten typischen Wohngebäude erfolgen.

4.6.6 Verbesserte Einbruchssicherung und weitere Nebeneffekte

Dicht schliessende Rollläden, insbesondere wärmegedämmte Rollläden, tragen einerseits zur Energieeinsparung bei, andererseits lassen sie sich auch für andere Funktionen nutzen: als Einbruchssicherung bei Abwesenheit, als Verdunklungsmöglichkeit über Tage und als Sonnen- und Hitzeschutz an heissen Sommertagen. Auch Dreifachverglasungen schützen vor Einbruch besser, und sei es nur aus psychologischen Gründen, dass dreimal die Gefahr von

Lärmentwicklung beim Durchbrechen/Zerschneiden einer Scheibe zu überwinden ist. Ausserdem bieten Fensterhersteller spezielle Einbruchschutzfenster an.

Die Quantifizierung der verbesserten Einbruchssicherheit durch die zwei genannten technischen Wärmeschutzmassnahmen könnte anhand statistischer Auswertungen der Häufigkeit von Einbruchsdelikten bei verschlossenen Fenstern erfolgen. Erste Anfragen bei Gebäudeversicherungen haben gezeigt, dass Informationen zu Fenstereinbrüchen mit und ohne Rollladenschutz bzw. zu der Art der Fenster nur teilweise vorliegen, daher konnten diese Arbeiten nicht im Laufe dieser Analysen zu Ende geführt werden.

Die Monetarisierung der vermiedenen Schäden könnte anhand der durch Rollläden verminderten Einbruchswahrscheinlichkeit und der durchschnittlichen Schadenshöhe durchgeführt werden. Die Monetarisierung der Verdunklungsmöglichkeit wurde mit den Kosten einer alternativ im inneren Fensterbereich möglichen Jalousie oder eines schweren, dunklen Vorhangs ermittelt. Unterstellt man in beiden Fällen eine Installation durch einen Fachmann oder Handwerker, so liegen allein die Verdunklungskosten der Rollladenalternative bei 60 bis 85 % der Rolladenkosten..

Weitere Funktionen von Rolläden und ihre Nebeneffekte (z.B. nächtlicher Lärmschutz, sommerlicher Hitze- und Sonnenschutz) wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht ermittelt. Sie seien hier aber erwähnt, um die multifunktionalen Nutzen mancher Energieeffizienz-investitionen am Beispiel des Rolladen deutlich zu machen und die Notwendigkeit einer vollständigen Nutzenbewertung derartiger Investitionen zu unterstreichen, um gravierende Fehleinschätzungen zu vermeiden.

4.7 Vermiedene externe Kosten durch zusätzliche Wärmeschutzinvestitionen

Nutzen und Kosten von Wärmeschutz- und Energieeffizienz-Investitionen sind in einzelwirtschaftlichen Bewertungen nie vollständig enthalten, wie bereits im vorigen Kapitel mehrfach deutlich wurde. Von besonderer Bedeutung sind in diesem Fall diejenigen externen Kosten der Energienutzung, die durch durch die Energieeinsparung vermieden werden, beispielsweise die verminderten Schäden von Feinstaub-, CO- und SO_2-Emissionen im örtlichen und regionalen Raum und des Treibhauseffektes durch verminderte Treibhausgasemissionen. Im Grunde müssten die durch verminderte energiebedingte Emissionen vermiedenen Schäden durch Wirkungspfad-Simulationen einschliesslich der jeweiligen Standortbedingungen ermittelt werden. Aber gross angelegte Analysen der EU (1999) für europäische Länder und die USA in dem Projekt ExternE haben gezeigt, dass so viele andere Unsicherheiten der Schadensbewertung vorhanden sind, dass man für stationäre Anlagen beispielsweise Durchschnittswerte benutzen kann (vgl.Tab. 4.7-1), die dann über die anlagenspezifischen Emissionsfaktoren und Wandlungswirkungsgrade auf den eingesetzten Brennstoff zurückgerechnet werden können (vgl. Tab. 4.7-2).

Tabelle 4.7-1: Spezifische externe Kosten klassischer Luftschadstoffe aus stationären Quellen in Deutschland in Euro je Tonne Schadstoff (Mittelwert über mehrere Standorte)

Schadstoffart	Euro / t Schadstoff
Feinstaub PM_{10}	9 850
SO_2	4 980
CO	0,4
NO_x	2 920
NMVOC	1 650

Quelle: EU 1999

Die ausgewiesenen Werte sind Medianwerte und hängen von vielen Annahmen zur Quantifizierung und Monetarisierung der jeweiligen Schäden ab (vgl. Infras/Econcept/Prognos, 1996). Dieses Bewertungsproblem verschärft sich noch bei der Bewertung der energiebedingten Treibhausgase infolge ihrer langen Verweilzeit in der Atmosphäre und ihrer weltweiten Verteilung. Diskontiert man beispielsweise in 100 Jahren erwartete Schäden mit 3 % pro Jahr ab, verbleiben nur 5 % der Schadensumme als Gegenwartswert; vielfach werden die gleichen Krankheits- und Todesfälle in Industrieländern und Entwicklungsländern sehr unterschiedlich monetarisiert. So verwundert es nicht, wenn die Angaben zu den externen Kosten um ein bis zwei Grössenordnungen variieren (Ostertag.u.a.,1999; Meier, 1998; IPCC, 2001).

Unterstellt man mittlere Schätzungen der externen Kosten der traditionellen Schadstoffemissionen, so liegen diese zwischen etwa 2 bis 3 Rp/kWh für die Kohle und das leichte Heizöl und bei Erdgas bei 0.5 bis 1 Rp/kWh infolge seines geringen Schwefelgehaltes und der damit verbundenen geringeren SO_2-Emissionen; bei den Schätzungen für die externen Kosten aufgrund der Auswirkungen des Treibhausgaseffektes liegt das Kostenniveau höher, aber die Unterschiede zwischen Kohle und Erdgas sind entsprechend dem Unterschied des Kohlenstoffgehaltes der beiden Energieträger geringer. Unterstellt man diese Medianwerte externer Kosten für die hier betrachteten Wärmeschutzinvestitionen, so verdoppeln sich die

Kosten für heizöl- und kohlebasierte Wärmeerzeugung, und bei Wärme aus Erdgas würden sich die Gestehungskosten aus wohlfahrtsökonomischer Sicht um etwa zwei Drittel erhöhen.

An diesen (groben) Medianwerten wird deutlich, dass die energiewirtschaftliche Bewertung von Wärmeschutz-Investitionen aus dem Blickwinkel der Wohlfahrtsökonomie deutlich anders ausfallen wird als die einzelwirtschaftliche Bewertung. Dies bedeutet auch eine andere Bewertung der Energieeffizienzpolitik und ihrer ökonomischen Instrumente. Gerade die gewaltigen volkswirtschaftlichen Schäden in Österreich, Tschechien, Ostdeutschland, Indien und China im Sommer 2002 weisen auf die Legitimation öffentlicher Anreize für Investitionen zur Emissionsminderung wieder einmal hin. IPCC (2002) geht davon aus, dass diese Hinweise in Zukunft häufiger und deutlicher kommen werden.

Tabelle 4.7-2: Externe Kosten stationärer Energiewandler für Heizöl, Kohle und Erdgas (Medianwerte der Schätzungen in Rp/kWh Brennstoffinput)

Brennstoffart	Schäden konventioneller Schadstoffe	Netto – Schäden durch Klimawandel	Gesamtsumme externer Kosten
Heizöl leicht	1.8 bis 3.6	5.5 bis 6.5	Ca. 7 bis 10
Steinkohle	1.8 bis 3.8	7.5 bis 8.5	Ca. 9 bis 12
Erdgas	0.5 bis 1.2	4 bis 5	4.5 bis 6.2

Quellen: EU 1999, Infras/econcept/Prognos 1996; Friedrich/Krewitt 1997, IPCC 2002, Meier, 1998, Rahl/Spadaro 1999

5 Referenzentwicklung des Gebäudebestands 2000 – 2030

Beim Grenzkostenansatz ist die Definition einer Referenzentwicklung eine unabdingbare Grundlage, denn alle zusätzlichen Investitionen werden jeweils mit ihren zusätzlichen Kosten und Energieeinsparungen abgebildet. Dieses Kapitel berichtet über die Überlegungen und Annahmen zu der diesem Bericht unterstellten Referenzentwicklung, um eine Ausgangsbasis für die weiteren Analysen in Kap. 6 zu legen.

5.1 Die Referenzentwicklung des Gebäudebestandes mit Neubau und Abriss

Wüest & Partner gingen 1994 in ihren Perspektiven davon aus, dass die Neubautätigkeit in den nächsten 30 Jahren markant zurückgehen wird (durchschnittlicher Rückgang bei kleinen MFH – 18%, bei grösseren –10%). Der Sektor der Ein- und Zweifamilienhäuser überrascht durch einen massiven Rückgang (durchschnittlicher Rückgang um die 42%). In der Rezession der 90er Jahre hat sich jedoch gerade dieser Sektor als konstant erwiesen. Ob dieser Trend anhält und auch in näherer Zukunft mit einem weiteren Wachstum zu rechnen ist, kann nicht mit Bestimmtheit gesagt werden; im Immo-Monitoring wird für 2001 und 2002 von einer leichten Trendwende gesprochen.

Die in Tabelle 5.1-1 genannten Werte müssen jedenfalls aus einer langfristigen Perspektive heraus betrachtet werden. Berücksichtigt ist dabei die langfristige Dynamik der Bevölkerungsentwicklung (Altersverteilung, Familienzusammensetzungen), die Haushaltsgrössen (Anzahl Personen pro Haushalt, immer noch leicht fallend) sowie die Flächenbedürfnisse pro Person (weiterhin steigend), die Dynamik des Wohnungs- und Gebäudewechsels (künftig werden z.B. EFH, die heute von nur noch einer oder zwei Personen bewohnt werden, in vielen Fällen wieder von Familien besetzt sein).

Tabelle 5.1-1 Neubau von Energiebezugsflächen (EBF), Jahr 2000 (Ex post) und Prognose bis 2030

Periode	EuZFH	Kleine MFH	Grosse MFH
Jahr 2000	3420	2369	
2001-05	14052	4659	8558
2006-10	12627	4082	7599
2011-15	7912	3947	7603
2016-20	6817	3648	7155
2021-25	5396	3154	6226
2026-30	3853	2777	5423

Quelle Wüest & Partner , 1994, 2000

Bei der Auswertung der Studie lässt sich im Bezug auf die Rückgangs-Quoten sagen, dass diese mit zunehmender Grösse des Objektes abnehmen; d.h., während die kleinen Ein- und Mehrfamilienhäuser einer deutlichen Schwankung unterliegen, charakterisiert sich die Neubautätigkeit der grösseren Mehrfamilienhäusern durch einen langsamen, jedoch konstanten Rückgang. Der Rückgang verläuft über die gesamte Periode nicht linear, sondern nimmt im Laufe der Zeit weiter progressiv zu; der Rückgang der Neubautätigkeit beschleunigt sich also nach diesen Annahmen zunehmend.

Gründe für diesen negativen Trend liegen vielerorts. Wüest & Partner führen unter anderem im Immo-Monitoring 2000 (Band 3, Baumarkt) folgende Gründe an:

> "Der Stellenwert der Bauwirtschaft ist aus gesamtwirtschaftlicher Sicht in den letzten Jahrzehnten gesunken. Tiefgreifende Veränderungen im Arbeitsbereich, neue Technologien und vieles mehr absorbieren in einem zunehmenden Mass das Produktionskapital. Zusätzlich nahm die Mobilität und Flexibilität der Unternehmen aufgrund der Globalisierung überproportional zu, wodurch der Investitionsbedarf im zeitlichen Verlauf dosiert ausfällt: ein Wachstum der Wirtschaft wird nicht mehr einen Bauboom auslösen, wie dies früher der Fall war.
>
> Die Wohnungsnachfrage hat immer mehr ökonomisch und demographisch bedingte Ursachen (Ausbleiben eines Bevölkerungswachstums, Zunahme des Wohlstandes, Umstrukturierung der gesellschaftlich-sozialen Struktur der Bevölkerung, etc.) und reagiert damit stärker auf Veränderungen der konjunkturellen Entwicklung und der Angebotspreise. Die steigende Nachfrage spiegelt ein Bedarf nach mehr Wohnfläche und mehr Wohnqualität: immer weniger Personen leisten sich immer mehr Wohnfläche. Die Umstrukturierung der Gesellschaft, weg von der klassischen Familie mit Kindern (Ideal: Einfamilienhaus auf dem Land), hin zu freien Beziehungsformen (Ideal: Wohngemeinschaften, Lofts etc. im Zentrum der Stadt) ist ein Grund für die verschiedenartigen Rückgangs-Tendenzen: massiver Rückgang im Einfamilienhaus-Sektor, Konstanz im grösseren Mehrfamilienhaus-Sektor. Unterstrichen wird diese Aussage durch eine Verschärfung der regionalen Unterschiede in der Bautätigkeit: während in den Städten (hier vor allem Zürich und Zug) und ihren Agglomerationen eine sehr hohe Bautätigkeit herrscht und in den nächsten Jahren auch zu erwarten ist, stagniert die Bauwirtschaft in den restlichen ländlichen Gebieten auf tiefem Niveau oder sinkt sogar.
>
> Zwar ist für die nächsten fünf Jahre auch in diesen Gebieten mit einem leichten Wachstum zu rechnen, welches jedoch durch oben erwähnte Faktoren gebremst werden wird, wodurch das gesamte Wachstum deutlich tiefer ausfallen wird als in den vergangenen Jahren."

Aufgrund dieser Überlegungen werden die Projektionen von Tabelle 5.1-1 für diesen Bericht im Grundsatz übernommen, wenngleich man in Einzelentwicklungen auch zu anderen Annahmen neigen könnte. Wegen der unterschiedlichen gesamten Investitionskosten und deren Struktur sowie aufgrund der unterschiedlichen Rahmenbedingungen wird bei der Erarbeitung der Grenzkostenkurven zwischen Ein- und Mehrfamilienhäusern unterschieden.

5.1.1 Einfamilienhäuser

Für die Referenzentwicklung müssen für einzelne Wärmedämminvestitionen in den neugebauten Einfamilienhäusern bestimmte Annahmen getroffen werden, um auf dieser definierten Basis weitere Wärmeschutzmassnahmen aufzubauen. Ebenso müssen Marktanteile der neuen Heizanlagen für diese Neubauten festgelegt werden, wenn man die möglichen Verminderungen der Investitionskosten für die Wärmeerzeugung und -verteilung mit berücksichtigen will (vgl. Tab. 5.1-2). Die Angaben sind jeweils für die Periode 2000 bis 2010 gemacht, da man davon ausgehen muss, dass sich im Laufe dieser Dekade die "Referenz"-Praxis verbessert und auch entsprechende Novellierungen der Bauvorschriften durchgeführt werden.

Tabelle 5.1-2 Marktanteile der Heizanlagen bei EFH-Neubauten

	Öl	Gas	El	Holz	FW	WP	Solar
2000-2005	29.2	25.0	3.0	9.5	1.2	31.9	0.1
2005-2010	26.4	26.0	3.0	9.6	1.2	33.5	0.2

Quelle CEPE 2002 („Erdgasbericht")

5.1.2 Mehrfamilienhäuser

Gemäss der Ausgangslage von Wüest & Partner, 1994 sowie CEPE, 2001 werden bis 2010 rund 25 Mio m² EBF in reinen oder gemischt genutzten (mehr als 50% Wohnflächenanteil) Mehrfamilienhäusern erstellt werden. Im Referenzfall mussten detaillierte wärmetechnische Annahmen festgelegt werden (vgl. Anhang). Diese Annahmen wurden möglichst in Übereinstimmung mit der Energiekennzahluntersuchung (Wüest & Partner, 2000), den in diesem Projekt vorgenommenen Auswertungen von Energienachweisen (Kap. 3), den Angaben der Unternehmer bzgl. Dämmstärken und Fensterqualitäten (Kap. 3) und den gesetzlichen Anforderungen, getroffen (SIA 380/1, Musterverordnung der Kantone).

Tabelle 5.1-3 Einzelannahmen zu den MFH-Neubauten in der Referenzentwicklung

	Mittleres MFH	Grosses MFH		Alle Gebäudetypen
	mittel verschattet, Luftwechsel mittel	Verschattung gering	Verschattung hoch	U-Wert
Qh	214	186	196	
EBF	1100	1800		
A/EBF	1.44	1.12		
$A_{Fenster}$/EBF	0.21	0.13		
$A_{Fenster}/A_{Fassade}$	0.26	0.26		
Luftwechsel (1/h)	0.43	0.50		
Wand	654	654		0.28 W/m²K
Fenster klein	133	133		1.52 (Glas 1.1)
Fenster gross	93	93		1.28 (Glas 1.1)
Süd	0.16	0.16		
Ost/West	0.71	0.71		
Nord	0.13	0.13		
Dach	513	840		0.27 W/m²K
Boden	367	600		0.33 W/m²K
Sockel	100	100		0.3 W/mK

Quelle Annahmen CEPE

Wird das MFH mit tiefem bzw. hohem A/EBF zu gleichen Teilen gewichtet, ergibt sich ein durchschnittliches Qh von 203 MJ/m2a. Werden dazu 100 MJ/m²a für das Warmwasser hinzugerechnet und ein Nutzungsgrad von knapp 90% für die Raumwärme und 85% für das Warm-

wasser angenommen, ergibt sich eine EKZ von knapp 350 MJ/m²a, was etwas tiefer ist als die EKZ-Untersuchung von Wüest & Partner, welche 420 MJ/m2a für MFH für die Bauperiode 1996 –1998 angibt. Die oben dargestellten Annahmen sind für die Zeitperiode 2001 bis 2010 möglicherweise etwas zu optistisch. Bei einem mittleren Qh von 203 MJ/m²a beträgt der Heizwärmebedarf dieser Neubauflächen rund 5'100 TJ/Jahr. Dieser teilt sich gemäss Tabelle 5.1-4 auf die einzelnen Heizanlagetypen auf.

Tabelle 5.1-4 Marktanteile der Heizanlagen bei MFH-Neubauten

	Öl	Gas	El	Holz	FW	WP
2000-2005	45.8	42.1	1.4	1.3	2.5	6.9
2005-2010	44.4	43.1	0.9	1.3	3.0	7.5

Quelle CEPE 2002 („Erdgasbericht")

5.2 Die künftigen Erneuerungen im Wohngebäudebestand in der Referenzentwicklung

Ausgehend von den Feststellungen und Fazits zu den Gebäudeerneuerungen im Kapitel zwei wird in diesem Kapitel das Mengengerüst und die bau- und wärmetechnische Charakterisierung der künftigen Erneuerungen beschrieben.

Econcept hat in ihrem Projekt „Ersatz-Neubauen vs Sanieren" Modellrechnungen zu Sanierungs- und Erneuerungszyklen durchgeführt (Econcept 2002a), dies um zu eruieren, welche und wie viele Gebäude wann vor der Frage stehen, ob grundlegend erneuert oder abgebrochen und neu gebaut werden soll. Sichtbar wird hier eine Unterteilung der Bauperiode „vor 1970", die bei Wüest & Partner zusammengefasst ist (Tabelle 5.2-1). Im Mittel sind die Ergebnisse jedoch durchaus vergleichbar (vgl. Tabelle 5.2-2). Die genannten Teil- und Vollerneuerungsraten basieren auf Erneuerungszyklen von 25 resp. 50 Jahren mit oder ohne Streuung um diesen Wert und mit unvollständigem Realisierungsgrad. Der Modellansatz hat vom Ansatz her u.a. auch einen deutlichen Bezug zum Innern des Gebäudes und nicht (nur) zur Gebäudehülle.

Tabelle 5.2-1 Künftige Teil- und Vollsanierungsraten[1] in Anteilen/Dekade für EFH und MFH

		Teilsanierung				Vollsanierung			
		EFH		MFH		EFH		MFH	
		2000-10	2011-20	2001-10	2010-20	2000-10	2010-20	2001-10	2011-20
Gebäude-Erstell-lungsperiode	bis 1970	0.10	0.12	0.07	0.05	0.15	0.11	0.16	0.20
	1971-75	0.37	0.01	0.21	-	-	-	-	-
	1976-80	0.70	0.00	0.70	-	-	-	-	-
	1981-85	0.34	0.36	0.48	0.25	-	-	-	-
	1986-90	-	0.70	-	-	-	-	-	-

Quelle Wüest & Partner , 1994

[1] Wir verwenden hier die Originalbegriffe der zitierten Berichte, obwohl wir in den übrigen Berichtsteilen die Begriffe Instandsetzung und Erneuerung gebrauchen.

Vom Alterungsverhalten und von den Randbedingungen der Bauabläufe her geniesst die Gebäudehülle eine gewisse Unabhängigkeit gegenüber den Renovations- und Erneuerungszyklen im Innern. Eine Erneuerung von Küche und Bad z.B. muss nicht mit einem Fensterersatz, einem Fassadenanstrich oder einer energetischen Dacherneuerung koordiniert werden. Im Gegenteil, gerade private EFH-Besitzer oder Besitzer von MFH mit kleinem Gebäudebestand werden ihre Instandhaltungs- und Erneuerungsinvestitionen eher zeitlich staffeln, da sonst die Finanzbelastung und die finanziellen Risiken durch Investitionsbündelung zu hoch wären.

Tabelle 5.2-2 Anteil der EBF der MFH (nur reine Wohngebäude), die vor der Frage „Neu bauen oder Gesamterneuern" stehen

		Erneuerungsperiode			
		2001 - 2010	2011 - 2020	2021 - 2030	Später oder nie
Gebäude-Erstellungsjahr	Vor 1900	0.31	0.30	0.09	0.30
	1900-20	0.31	0.31	0.09	0.30
	1921-46	0.30	0.32	0.08	0.30
	1947-60	0.12	0.19	0.22	0.48
	1961-70	0.12	0.19	0.03	0.65
	1971-80	-	0.15	0.18	0.67
	1981-85	-	-	-	1.01
	1986-90	-	-	-	1.00
	Vor 1970	0.16	0.20	0.09	0.44

Quelle Neubauen statt Sanieren, Econcept

Die Unterschiede zwischen den einzelnen Bauteilen sowie zwischen Gebäudehülle und Gebäudeinnerem zeigen sich auch beim Vergleich der durchschnittlich kumulierten Anteile von erneuerten Bauteilen im Kanton Zürich (vgl. Tabelle 2.5-2) mit den vorherstehenden Sanierungsraten von Wüest & Partner und Econcept. Die Anteile der energetischen Wand- oder Dacherneuerung der Gebäude 1961-75 liegen einerseits höher als die Anteile für die Vollsanierung, andererseits tiefer als die für die Teilsanierung. Ausserdem sind Unterschiede in der energetischen Erneuerungshäufigkeit der einzelnen Bauteile zu verzeichnen, insbesondere bei den Gebäuden der Bauperiode 1961-75, wo sich Wand, Dach und Fenster erheblich unterscheiden.

Eine gewisse Homogenisierung der Anteile der Fassadenerneuerungen bzgl. der Bauperioden bis 1960 bietet sich also an (Homogenisierung im Vergleich zu Tabelle 5.2-1). Weiter erhärten lassen sich die getroffenen Annahmen, wenn die Auswertung der Haupterhebung des Projekts „Erhebung des Erneuerungsverhaltens bei Wohngebäuden" abgeschlossen sein wird.

5.2.1 Definition der Referenzfälle für 2001 bis 2010

Aufgrund der obigen und den in den vorangegangen Kapiteln dargelegten Vorüberlegungen wurden zunächst zwei Referenzfälle für die Erneuerung von bestehenden Gebäuden definiert: die **Instandsetzung** und die **energetische Erneuerung** (vgl. Tabelle 5.2-3). Die jeweilig quantitativen Werte der beiden Referenzfälle und der Zusatzinvestitionen sind in Kap. 6 angegeben.

Tabelle 5.2-3 Definition der Referenzentwicklung und der Grenzkostenbetrachtung mit verwendeten Begriffen und ihrer Bedeutung

Referenzfall-bezeichnung		Referenzfall	Grenzkostenbetrachtung Energetische oder weitergehende energetische Erneuerung
Instandsetzung	Wand	Farbanstrich, mit oder ohne Putzausbesserung	• Aussenwärmedämmung statt Farbe/Putz • Erhöhte Dämmstärken
	Fenster	Rahmenanstrich und evtl. weitere lokale Massnahmen, siehe auch Erb 2001	• Fensterersatz statt Rahmenanstrich • Ersatz mit energetisch verbessertem Fenster statt mit Standardfenster
	Steildach	Erneuerung des Unterdachs, evtl. inkl. Reparatur / Ersatz der Eindeckung	• Wärmedämmung statt nur Unterdacherneuerung • Erhöhte Dämmstärke
	Flachdach	Erneuerung der Abdichtung, evtl. nur Reparatur	• Erhöhte Dämmstärke
Energetische Erneuerung	Wand	Aussenwärmedämmung	• Verstärkte Aussenwärmedämmung
	Fenster	Fensterersatz, Renovationsfenster (je energetische Standardqualität)	• Ersatz mit energetisch verbessertem Fenster statt mit Standardfenster
	Steildach	V1 Dämmen des Estrichbodens V2 Dämmen des Steildachs oder verstärken der bestehenden WD	• Erhöhte Dämmstärke
	Flachdach	V1 Wärmedämmen beim Erneuern der Abdichtung (Abbruch der bestehenden WD) V2 Verstärken der bestehenden Wärmedämmung über der bestehenden Abdichtung	• Erhöhte Dämmstärke

Quelle CEPE

Aufgrund der unterschiedlichen baulichen und energetischen Voraussetzungen, aber auch aufgrund der unterschiedlichen Instandsetzungs- und Erneuerungsanteile müssen zunächst separate Kostenkurven für die Gebäude der einzelnen Bauperioden erstellt werden, wobei jeweils zwischen EFH und MFH unterschieden wird und hierzu die entsprechenden Annahmen getroffen werden müssen.

5.2.2 Mengengerüst der Referenzentwicklung

Grundlage der folgenden Annahmen bilden die ersten Auswertungen des Projekts zum Erneuerungsverhalten (Jakob, 2002), die Auswertung des Lärmschutzprogramms des Kantons Zürich, die Untersuchungen zum Alterungsverhalten der Bauteile (IP Bau) sowie allgemeine Schätz- und Erfahrungswerte, etwa die Tatsache, dass mengenmässig mehr Fassaden gestrichen werden als aussenwärmegedämmt. Wie bei der Betrachtung der Vollsanierungen, wird auch bei der Gebäudehülle mit einem angenommenen Realisierungsfaktor gearbeitet, d.h. mit der

Annahme, welcher Anteil nur instand gesetzt wird. Gewisse Einschränkungen für z.B. Fassadenerneuerungen bieten auch Bestimmungen der Denkmalpflege[1]. Dieser Effekt ist quantitativ allerdings als relativ gering einzuschätzen (gesamtschweizerisch sind ca. 5% der Gebäude unter Schutz gestellt) und er manifestiert sich für die Periode 2001 bis 2010 zudem noch nicht sehr deutlich (das Potential der Gebäude, die erneuerungsbedürftig sind bzw. die sich erneuern lassen, ist noch gross genug).

Folgende Einzelüberlegungen fliessen als Annahmen in die Analyse ein (vgl. auch Tabelle 5.2-4):

Im Verhältnis zur Fassade wurden bereits überproportional viele Dächer wärmetechnisch verbessert. Bzgl. der nächsten zehn Jahre nehmen wir einen Trendbruch betreffend die Häufigkeit von Dacherneuerungen an, und zwar aus folgenden Gründen:

- Es sind bereits hohe Anteile an Erneuerungen im Dachbereich realisiert, insbesondere auch solche der Eindeckungs-/Unterdacherneuerung (ein mangelhaftes Unterdach ist im Dachbereich ein sehr wichtiges auslösendes Moment).
- Auch das zweite allenfalls auslösende Moment, die Wärmedämmung in der Schräge oder auf dem Dachboden, trat schon häufig in Erscheinung.

Letztere Gebäude sind – zusammen mit dem Dachraumausbau – gleichzeitig das Potential für künftige Dacherneuerungen, weil in diesen Fällen das Unterdach noch nicht erneuert wurde.

Aufgrund der vorangegangenen Überlegungen schlagen die Autoren vor, die Einzelannahmen gemäss Tabelle 5.2-4 zugrunde zu legen. Die Annahmen sind evtl. nach der definitiven Auswertung des Projekts „Erneuerungsverhalten im Bereich Wohngebäude“ nochmals zu prüfen.

---

1 Hinweise dazu ergeben die erhobenen Daten des Lärmschutzprogramms sowie die Anteile der Wohngebäude in den einzelnen Nutzungszonen im Siedlungsgebiet.

Tabelle 5.2-4 Übersicht über die Anteile der Instandsetzung und der energetischen Erneuerung für die einzelnen Bauteile in der Referenzentwicklung, Periode 2001 bis 2010

		Wand		Fenster		Steildach / Estrich		Flachdach		Lüftungs-anlagen	
		Instand-setzung	Erneuerung	Instand-setzung	Erneuerung	Instand-setzung	Erneuerung	Instand-setzung	Erneuerung	Instand-setzung	Erneuerung
Vor 1900	EFH	*0.15*	*0.15*	*k.A.*	*0.15*	*0.10*	*0.08*	*Keine Bedeutung*		-	
	MFH	*0.12*	*0.10*		*0.10*	*0.10*	*0.10*				
1900-60	EFH	*0.15*	*0.15*	*k.A.*	*0.15*	*0.10*	*0.08*			-	*0.002*
	MFH	*0.12*	*0.10*		*0.10*	*0.10*	*0.10*				*0.005*
1961-75	EFH	*0.15*	*0.15*	*k.A.*	*0.15*	*0.10*	*0.08*			-	*0.005*
	MFH	*0.12*	*0.10*		*0.10*	*0.10*	*0.10*	*0.10*	*0.15*	-	*0.01*
1975-85	EFH	*0.12*	*0.06*	*k.A.*	*0.06*	*0.05*	*0.05*	*0.10*	*0.15*	-	*0.005*
	MFH	*0.10*	*0.04*		*0.04*	*0.05*	*0.05*	*0.10*	*0.15*	-	*0.01*

Quelle Annahmen CEPE

Im Referenzfall wird davon ausgegangen, dass Lüftungsanlagen in den kommenden zehn Jahren noch eine relativ geringe Bedeutung haben werden. Sie werden im Fall einer Gesamterneuerung (im Sinn von Wüest & Partner bzw. Econcept) eingebaut werden, jedoch nicht im Lauf einer Teilsanierung).

Weitere zugrunde liegende Annahmen werden im einzelnen in den folgenden Unterkapiteln bzw. im Anhang beschrieben.

5.2.3 Energetische Beschreibung der Referenzentwicklung im allgemeinen

Aus den zusammengefassten Erkenntnissen aus diesem Projekt sowie aus der Literatur ordnen die Autoren den Instandsetzungen bzw. Erneuerungen die energetischen Kennwerte gemäss Tabelle 5.2-5 zu. Die mit „Vor Erneuerung“ überschriebenen Spalten stehen für den Referenzfall der Instandsetzung, bei der im Grenzkostenansatz eine Wärmedämmung mit zunehmender Dämmstärke angenommen wird. Diejenigen mit „Nach Erneuerung“ überschriebenen Spalten für den Referenzfall der energetischen Erneuerung, bei der im Grenzkostenansatz die Dämmstärke erhöht wird.

Viele Gebäude mit Steildächern sind im Dachbereich bereits wärmetechnisch nachträglich verbessert worden, siehe Kap. 2.5. Der Ausgangs-U-Wert ist bei den zu erneuernden Gebäuden deshalb im Durchschnitt nicht mehr so hoch wie im Originalzustand. Bei der Beurteilung der energetischen Wirkung der Massnahmen wird jedoch berücksichtigt, dass diese bestehende WD häufig abgebrochen wird.

Ein Fensterersatz ist– auch verbunden mit einer Innendämmung – mit bauphysikalischen Risiken verbunden (Sturz und Brüstung, vgl. Wärmebrückenkatalog 3, SIA 1993) und lokale Massnahmen sind selten möglich. Zu prüfen ist im Einzelfall, ob der Einbau von Fenstern ohne

Falzdichtung möglich und sinnvoll ist. Wir setzen den Anteil der Fenstererneuerung nicht über den Anteil der Aussenwärmedämmung. Dasselbe gilt für die Bauperiode 1900 bis 1960 (Brüstung bis 1925, Sturz nachher). Es ist auch für die Periode bis 1975 mit solchen Risiken zu rechnen und auch die Erhebung des Lärmschutzprogramms hat solche festgestellt.

Tabelle 5.2-5 Übersicht über die flächenbasierten U-Werte (W/m²K) bei energetischen Erneuerungen, Periode 2001 bis 2010

	Wand		Fenster (ohne Psi-Einbau)		Estrich** / Steildach*		Flachdach		Kellerboden	
	Vor Erneuerung	Nach Erneuerung	Vor Erneuerung	Nach Erneuerung	Vor Erneuerung	Nach Erneuerung	Vor Erneuerung	Nach Erneuerung	Vor Erneuerung	Nach Erneuerung
Vor 1900	1.0		3.0	1.5	0.70	0.29**	unbedeutend		0.75	
1900-60	1.15		2.7	1.5	0.85	0.27*			1.3	
1961-75	0.9	0.27	2.5	1.5	0.80	0.27	0.85	0.25-0.3	1.0	
1975-85	0.7		2.3	1.5	0.50	0.27	0.6	0.25-0.3	0.7	

Zusätzlich sind im Einzelfall Überlegungen zur linearen Wärmeverlustsituation anzustellen, d.h., es sind Annahmen über vorhandene Wärmebrücken, das Referenzverhalten gegenüber diesen Wärmebrücken und im Grenzkostenansatz über die weitergehenden Möglichkeiten zu machen. Dies erfolgte separat für jede Bauperiode. Nachfolgend wird das Vorgehen am Beispiel der Einfamilienhäuser mit Bauperiode 1900 bis 1960 erläutert.

5.2.4 Detaillierte Beschreibung der Referenzentwicklung am Beispiel der EFH der Bauperiode 1900 - 1960

Diese Bauperiode kann für die Einfamilienhäuser wie folgt charakterisiert werden.

- Energiebezugsfläche: 34 Mio m²
- Wandfläche: 20 Mio m²
- Dachfläche: 19 Mio m²
- Aussenwand Backstein, U-Wert 1.0 bis 1.15
- Die Fenster bestehen zu einem Drittel aus EV bzw. DV (grossmehrheitlich) und zu zwei Dritteln aus IV (grossmehrheitlich zweifach)
- EFH: Überwiegend Klappläden, MFH: Rollläden im städtischen Umfeld
- Decken: Holzdecken bis 1925, Stahlbeton nachher
- Fast ausschliesslich Steildächer
- Estrich kalt, evtl. Mansarde, U-Wert Dach 0.9
- Sockel: Hochparterre, z.T. ebenerdig
- Qh=470 MJ/m²a

Beurteilung: Relativ einfache Erneuerungsmöglichkeiten. Die Fensterleibung kann mehrheitlich gedämmt werden (Fensterläden). Die Wärmebrücke an Sockel / Kellerdeckenanschluss kann ebenfalls relativ einfach energetisch erneuert werden, da das Niveau der Kellerdecke meist oberhalb oder auf gleichem Niveau wie das Terrain liegt (im letzteren Fall kann entweder eine kontrollierte WB in Kauf genommen werden (v.a. bei versiegeltem Terrain) oder der Sockel kann ca. 50 cm tief freigelegt werden.

Bauabläufe: Die Bauteile werden eher einzeln erneuert. Da die EFH dieser Periode für heutige Begriffe eher klein dimensioniert sind, insbesondere bei denjenigen um die Nachkriegszeit bis in die 60er Jahre, und ein Generationenwechsel stattfindet, wird der Dachraum – wenn möglich – eher ausgebaut als dass der Dachboden gedämmt wird. Die WB können damit weitgehend erneuert werden.

Im Referenzfall wird angenommen, dass in den nächsten 10 Jahren 15% der Wandfläche wärmegedämmt wird. Bei 10% der Dachflächen wird die Eindeckung repariert oder das Unterdach erneuert. Gleichzeitig wird angenommen, dass bei zusätzlich 8% der Dachfläche eine Wärmedämmung angebracht wird. Es wird damit gerechnet, dass 15% der Fensterfläche durch Renovationsfenster oder neue Fenster ersetzt wird. **Damit beträgt im Referenzfall die kumulierte Heizwärmebedarfsreduktionen für die Gebäude dieser Bauperiode (EFH 1900-1960) 7% bis zum Jahr 2010.**

6 Gesamtschweizerische Grenzkostenkurven des Wärmeschutzes (für Energiesystemmodelle)

Die Grenzkosten für Energiesystemmodelle geben die zusätzlichen Kosten je eingesparte Energieeinheit an, die mit einer jeweils definierten zusätzlichen Energieeffizienzmassnahme verbunden sind. Diese spezifischen Kosten werden mit ihren jeweiligen Einsparpotentialen zu einem Gesamtenergieeinsparpotenzial in einer Abbildung – der Grenzkosten-Potenzialkurve – aufgetragen. Im allgemeinen werden diese Massnahmen nach der Höhe der Grenzkosten geordnet, um auf diese Weise einen kontinuierlich mit den Kosten ansteigenden Kurvenverlauf zu erreichen. Diese Darstellungsweise ist relativ anschaulich, weil den Grenzkosten die jeweiligen (auch für die Zukunft projizierten) Energie- oder Wärmepreise auf der Ordinate gegenübergestellt werden können und somit sehr schnell das wirtschaftliche Energieeinsparpotenzial abgeschätzt werden kann (vgl. Abb. 6.1-1). Bisher waren die Grenzkostenkurven für Wärmedämminvestitionen an Gebäuden nur in sehr vereinfachender Form entwickelt worden, es fehlten wesentliche Differenzierungen wie z. B.:

- die Berücksichtigung der verminderten Wärmeerzeugungsleistung infolge des verminderten Wärmebedarfs eines Gebäudes,
- die Berücksichtigung von Verschattung bei Wohngebäuden, die bei grossem Flächen-/ Volumenverhältnis wie z. B. Einfamilienhäusern bedeutsam sein kann,
- die Berücksichtigung von Lüftungsverlusten, die mit zunehmender wärmetechnischer Qualität an Bedeutung gewinnen,
- die Berücksichtigung von Begleitnutzen (Co-Benefits), welche die Wärmedämmkosten merklich reduzieren können,
- die Berücksichtigung der Kostendynamik für Investitionen – insbesondere neuer Technologien – in der Zukunft, die aufgrund von Lern- und Skaleneffekten die wirtschaftliche Attraktivität von Wärmedämminvestitionen erheblich verbessern können.

Aufgrund der nunmehr vorliegenden empirischen Daten und vorhandenen Simulationsmodelle für Gebäude ist es in diesem Bericht erstmals möglich, die o. g. Vereinfachungen aufzulösen: dabei werden zunächst die Aspekte der Verschattung, der Art der Wärmeerzeugung und der Lüftungsverluste nach dem heutigen Kostenstand behandelt (vgl. Kap. 6.1), wobei bereits die Kosteneinsparung auf Seiten der Wärmeerzeugung und -verteilung mit behandelt wird. Anschliessend wird die Berücksichtigung von Begleitnutzen (vgl. Kap.. 6.2) und der Einfluss der Dynamisierung der Kosten (vlg. Kap. 6.3) wiedergegeben. Schliesslich werden die auf die beheizte Fläche (Energiebezugsfläche EBF) bezogenen Effizienzgewinne mit den in der Schweiz für diesen Fall anzutreffenden Flächen hochgerechnet, um zu einer energiewirtschaftlichen Aussage zu gelangen.

Die Fülle der Varianten und Möglichkeiten kann hier nur angedeutet werden. Die Varianten können als Versuch von Sensitivitätsanalysen verstanden werden, um anhand der Ergebnisse festzulegen, welche Varianten man infolge der geringen Unterschiede der Grenzkosten zusammenziehen und als einen Typ von Massnahmen abbilden kann.

Grundsätzlich sind im folgenden die Kosten-Potenzialkurven so aufgebaut, dass man den spezifischen Wärmebedarfswert je m^2 Wohnfläche aufzeichnet. Dies hat den Vorteil, dass man je nach unterstelltem Investitionsumfang unmittelbar die erzielte Energieeffizienz und den verbleibenden Wärmebedarf des Gebäudes ablesen kann. Wenn man die spezifischen Werte mit der Wohnfläche multipliziert, die in dem jeweiligen Fall (z. B. Neubau von Einfamilienhäusern bis 2010) betroffen sind, erhält man die gewohnten in der Literatur veröffentlichten

Kosten-Potenzialkurven, die insbesondere in prozessorientierten Optimierungsmodellen (bottom up-Modelle) gerne verwendet werden.

6.1 Neubau: heutiger Kostenstand und wichtige Einflüsse für Ein- und Mehrfamilienhäuser

In den nachfolgenden Abschnitten dieses Kapitels werden beim heutigen Kostenstand die für Wärmedämminvestitionen erreichbaren Effizienzpotenziale mit zunehmender Intensität dargestellt. Hierbei werden die Einflüsse von Fensterflächenanteilen, Verschattung (bei Einfamilienhäusern besonders deutlich), der Kostenminderung für die Wärmeerzeugung und der unkontrollierten Lüftung behandelt.

Die gesamtschweizerischen Grenzkostenkurven, ausgedrückt in CHF/kWh$_{NE}$ und in eingesparten PJ, können anhand der bekannten Anteile der Neubau-EBF und der folgenden Grenzkostenkurven auf Gebäudeebene berechnet werden. Hierzu müssen lediglich Annahmen bzgl. der Verschattungssituation und der Gebäudehüllenziffern getroffen werden (letztlich muss einfach die neu zu bauende Dach-, Fassaden- und Fensterfläche etc. bekannt sein); zudem müssen Annahmen zur Beheizungsstruktur gemacht werden, um die verminderten Wärmeerzeugungs- und -verteilkosten berücksichtigen zu können.

6.1.1 Spezifische Grenzkostenkurven auf Gebäudeebene

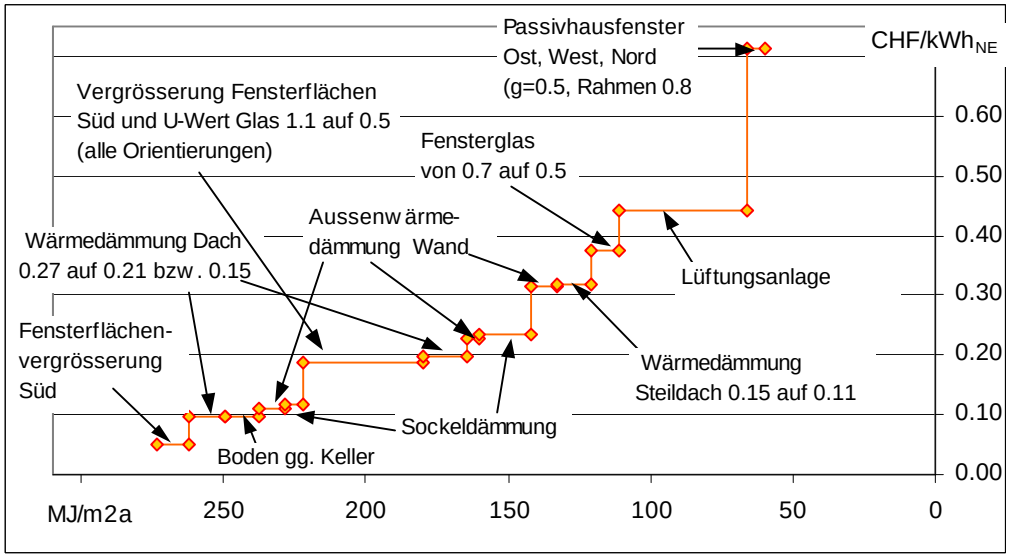
Die Erarbeitung der im folgenden dargestellten spezifischen Grenzkostenkurven dient einerseits dem Aufzeigen der Sensitivität bzgl. Annahmen zum Gebäude und zum anderen bilden sie die Grundlage für die nachfolgende Aggregation auf die gesamtschweizerische Ebene. Es wird wiederum zwischen EFH und MFH unterschieden.

a) Ein- und Zweifamilienhäuser (EFH)

Im folgenden wird zur Erläuterung der einzelnen Einflüsse sukzessive vorgegangen. Untersucht wird:

- ein Gebäude mit Möglichkeit für hohen solaren Gewinn (beschattungsfreie Situation)
- das gleiche Gebäude bei höherer Verschattung bei zunächst gleicher Reihenfolge der Massnahmen
- das gleiche Gebäude mit neu nach stetig steigenden Grenzkosten geordneter Massnahmenreihenfolge
- der Einfluss der möglichen Reduktion der Investitionskosten auf Seite Wärmeerzeugung und –verteilung aufgrund des geringeren Leistungsbedarfs

Bei der angenommenen Situation mit viel Möglichkeiten für solare Gewinne ergibt sich bei einem heutigen Wärmepreis von 8 bis 10 Rp/kWh$_{NE}$ eine Reduktion von etwa 50 MJ/m^{2}a (vgl. Abbildung 6.1-1). Die kostengünstigsten Massnahmen sind die Vergrösserung der Fensterflächen nach Süden sowie zusätzliche Wärmedämmung bei Dach und Keller. Die spezifischen Kosten der Erhöhung der Fensterflächen gegen Süden sind deshalb tief, weil angenommen wird, dass teilweise grösserflächige Fenster eingesetzt werden können, einerseits weil letztere spezifisch kostengünstiger sind und zum anderen wegen der solaren Gewinne. Die zusätzliche Aussenwärmedämmung hat bei ihren verschiedenen Dämmstärken Grenzkosten zwischen 10 und 31 Rp/kWh$_{NE}$.



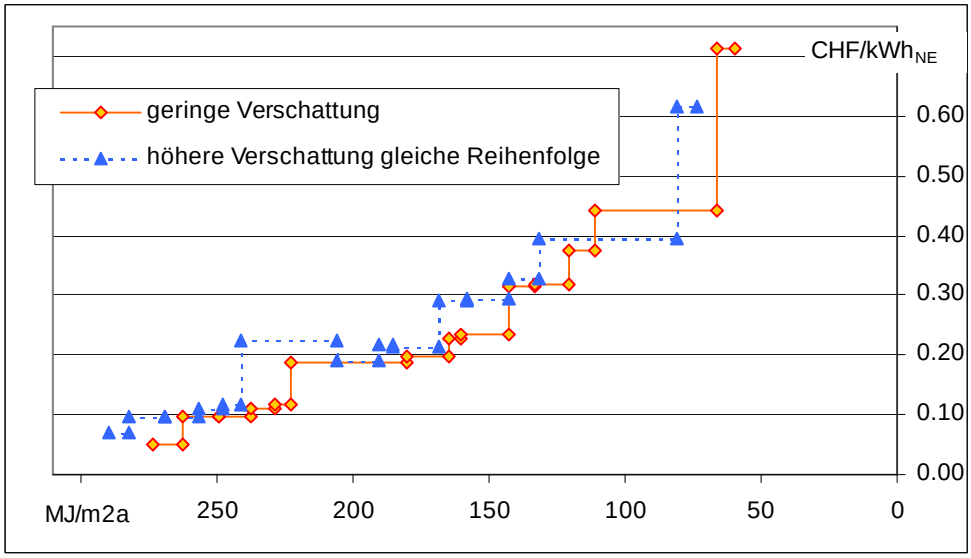
Berechnungen CEPE

Abbildung 6.1-1: EFH- Bruttogrenzkostenkurve (ohne Berücksichtigung der Kostenreduktion auf Seite Wärmeerzeugung/-verteilung) für geringe Verschattung

Die höhere Verschattung des gleichen Gebäudes zeigt einen höheren Jahreswärmebedarf von etwa 15 MJ/m²a im Referenzfall und in einigen Fällen wenig geringere Effizienzpotenziale, die sich insgesamt nicht besonders auswirken (vgl. Abbildung 6.1-2). Der Nachteil der Verschattung bleibt über alle Massnahmen, die das Fenster betreffen, erhalten, aber die Grenzkosen der zuletzt getroffenen Massnahmen liegen niedriger als im Falle geringer Verschattung, weil der Grenznutzen von Wärmedämminvestitionen bei geringeren solaren Gewinnen grösser ist (denn der Ausnutzungsgrad der freien Wärme wird weniger stark reduziert). Betrachtet man die gesamte Palette der Investitionsmöglichkeiten, so kann bei gleichen Bruttogrenzkosten (z.B. bei 30 Rp/kWhNE.a) der spezifische Wärmebedarf mehr reduziert werden (gerade weil die Ausgangslage bei der Verschattung ungünstiger war).

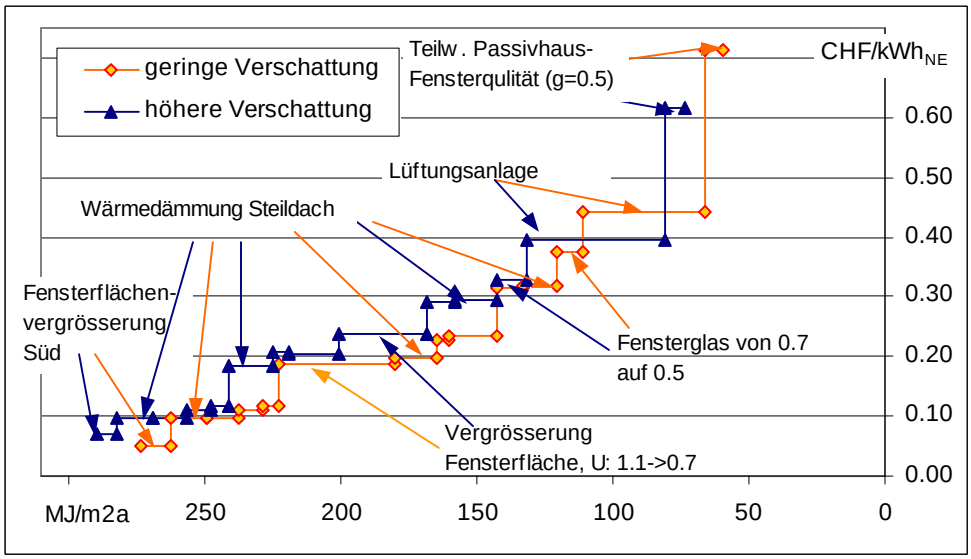
Ausserdem fällt auf, dass einige Massnahmen bei der Situation mit Verschattung andere (bessere) Kosten-Nutzenrelationen haben als jene ohne Verschattung, weil die verschatteten Gebäude mehr Wärme benötigen und daher die Wärmedämmung mehr Nutzen bringt. Bei der Massnahme der Erhöhung der Fensterflächen ist es umgekehrt; wegen der reduzierten solaren Gewinne steigen die spezifischen Grenzkosten leicht an, bleiben aber im Gesamtkontext immer noch relativ kostengünstig und bringen einen vergleichsweise hohen Effizienzgewinn. Ohne diese Massnahme wäre der gesamthaft erreichbare Effizienzgewinn weniger gross; dies gilt für den hier angenommenen Fall einer Verschattung von 40% (b=0.6); eine noch höhere Verschattung der Südfront ist allerdings eher unwahrscheinlich, es sei denn, sie wird bewusst oder unbewusst durch den Planenden vom Gebäude verursacht (bei sehr hoher Verschattung (z.B 70%) wären dann die Grenzkosten stark höher bzw. es wäre je nach Fenstertyp kein Effizienzgewinn mehr zu erreichen, siehe auch Kap. 4.3.6.

Die Ergebnisse kann man neu ordnen (vgl. Abbildung 6.1-3), wenngleich diese Darstellung die schnelle vorgleitende Zuordnung zu einzelnen Massnahmen erschwert.



Berechnungen CEPE

Abbildung 6.1-2: EFH-Bruttogrenzkostenkurve (ohne Berücksichtigung der Kostenreduktion auf Seite Wärmeerzeugung/-verteilung) für geringe Verschattung und für höhere Verschattung (gleiche Massnahmenreihenfolge)

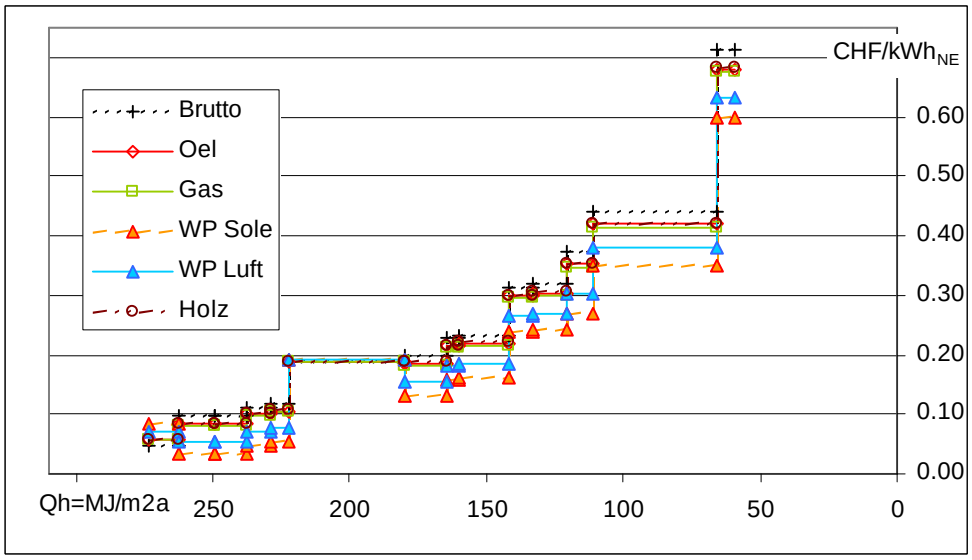


Berechnungen CEPE

Abbildung 6.1-3: EFH-Bruttogrenzkostenkurve (ohne Berücksichtigung der Kostenreduktion auf Seite Wärmeerzeugung/-verteilung) für geringe Verschattung und für höhere Verschattung (Massnahmenreihenfolge gemäss dem Prinzip der ansteigenden Grenzkosten)

Bei höherer Energieeffizienz der Gebäude, also bei tieferem Heizwärmebedarf, kann die Wärmeerzeugung und teilweise auch die Verteilung kleiner dimensioniert werden und damit Investitionskosten eingespart werden (der Zusammenhang zwischen Energieeffizienz des Gebäude, des Wärmeleistungsbedarf, der davon nicht linear abhängt, sowie der entsprechen-

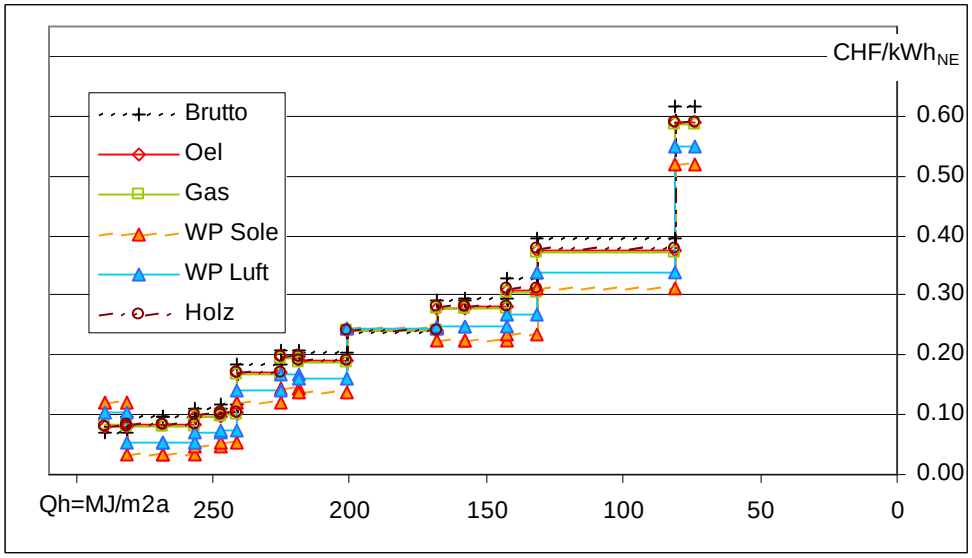
den Kosten, ist in den Kapiteln 4.2.10 und 4.3.12 behandelt). Ausserdem reduziert sich derjenige Anteil der Unterhalts- und Reparaturkosten, der proportional zur Investitionssumme anzunehmen ist (Annahme: diese Unterhaltskosten betragen 0.7% der Investitionskosten pro bei Öl-, Gas- und Holzheizungen, 1% bei WP-Anlagen). Der Einfluss der verminderten Wärmeerzeugungs- und Verteilungskosten ist zwar nicht so gross, dass die Grenzkosten der Wärmedämminvestitionen kompensiert würden, aber es zeigt sich doch eine deutliche Reduktion zwischen 2 und 6 Rp/kWh je nach Wärmeerzeuger. Ein Teil der Massnahmen ist selbst bei heutigen Energiepreisen wirtschaftlich. Bei den Gebäuden mit Wärmepumpen ist eine grössere Verminderung der Bruttogrenzkosten festzustellen (vgl. Abbildung 6.1-4); allerdings sind diese Kosten nicht mit dem Strompreis allein, sondern mit dem Strompreis dividiert durch den Nutzungsgrad (Faktor 2.5 bis über 4) zu vergleichen. Absolut betrachtet haben die Gebäude mit Wärmepumpen denn auch nicht deutlich günstigere Jahresenergiekosten (vgl. auch Kap.4.4). Der Unterschied zwischen nicht oder stark verschatteten Gebäuden ist wiederum der gleiche: die Grenzkosten liegen etwas niedriger, allerdings bei höherem spezifischem Wärmebedarf infolge der fehlenden Solargewinne (vgl. Abbildung 6.1-4 und Abbildung 6.1-5).



Quelle Berechnungen CEPE

Abbildung 6.1-4: EFH-Brutto- und Nettogrenzkostenkurve (mit Berücksichtigung der Kostenreduktion auf Seite Wärmeerzeugung/-verteilung) für geringe Verschattung

Als Fazit lässt sich festhalten, dass bei dem relativ hohen Verhältnis von Aussenfläche zu Energiebezugsfläche (A/EBF-Verhältnis) von 1.8 sich der Passivhausstandard nur mit relativ hohen Nettogrenzkosten realisieren lässt, d.h. auch bei Gegenrechnung der für die Wärmeerzeugung und -verteilung geringeren Leistungen und entsprechender Kostenreduktionen. In der Praxis ist bei den Passivhaus-Einfamilienhäusern der Keller innerhalb des Dämmperimeters, weshalb sich rechnerisch die EBF erhöht und weniger lineare Wärmeverluste entstehen (Sockel). Häufig sind auch sie über 30 cm hinaus gedämmt, und auf lineare Wärmeverluste (bei Fensteranschlüssen) ist ein besonderes Augenmerk zu richten, siehe u.a. die Dokumentationen auf der Website des Passivhaus-Institutes.



Quelle Berechnungen CEPE

Abbildung 6.1-5: EFH-Brutto- und Nettogrenzkostenkurve (mit Berücksichtigung der Kostenreduktion auf Seite Wärmeerzeugung/-verteilung) für höhere Verschattung

Wird auf die Massnahmen der Fensterflächenvergrösserung verzichtet, so wird der maximal zu erreichende Effizienzgewinn geringer, und das Gebäude wäre noch weiter vom Passivhausstandard entfernt (der zu erreichende Wert liegt mit der hier angewandten Berechnungsmethode bei unter 50 MJ/m²a, siehe nähere Ausführungen zur Berechnungsmethodik des Heizwärmebedarfs von Passivhäusern in Kap. 4.2.11). Wird hingegen durch architektonische Massnahmen eine kleinere Gebäudehüllenziffer erreicht, so nähert sich die Grenzkostenkurve derjenigen eines kleinen MFH an, siehe u.a. Abbildung 6.1-6), und die Grenzkosten des letzten Schrittes zum Passivhausstand sinken tendenziell.

b) Mehrfamilienhäuser (grosses Gebäude mit A/EBF=1.12; und mittelgrosse Gebäude)

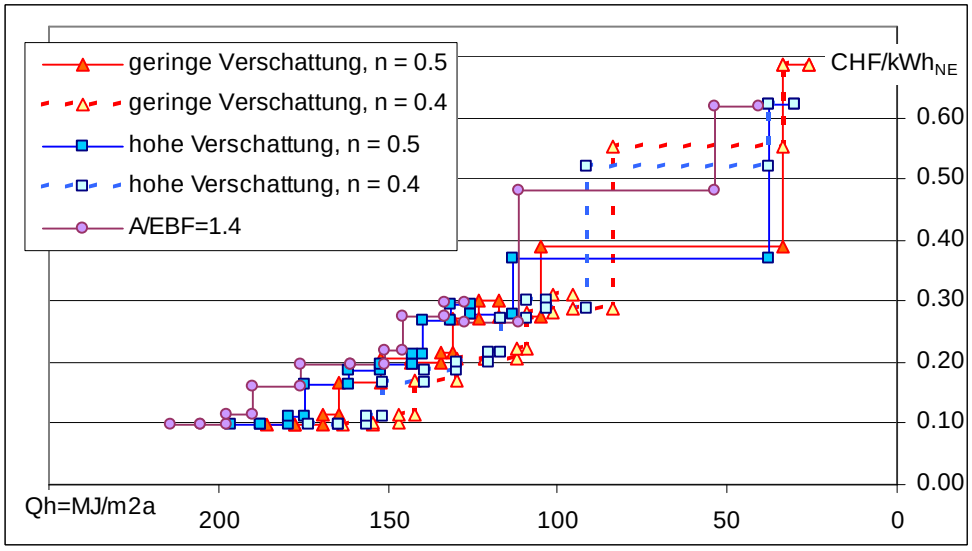
Bei den Mehrfamilienhäusern wurden verschiedene Relationen der Aussen- zur Energiebezugsfläche unterschieden. Ausser der Verschattung als Parameter wurde auch die Luftwechselrate zusätzlich modifiziert, um diesen Einfluss auf die Energieeinsparpotenziale und die Grenzkosten zu dokumentieren.

Bei den Beispielberechnungen für Mehrfamilienhäuser wurde von einer Ost-West-Ausrichtung der Gebäude ausgegangen, nicht zuletzt, um eine bei den EFH nicht vorkommende Dimension abzubilden. Je mehr sich das (kleine) MFH dem Charakter eines EFH-Hauses angleicht (z.B. von Süd nach Nord durchgehende Wohnungen, Südausrichtung), desto eher kann auf die Grenzkostenergebnisse der EFH zurückgegriffen werden (es verändert sich aufgrund der anderen Flächenverhältnisse allenfalls das Potential der einzelnen Massnahmen).

Allgemein kann jedoch davon ausgegangen werden, dass bei einem Teil der Mehrfamilienhäuser, insbesondere bei grösseren, die Fensterflächenanteile (pro Fassadenfläche bzw. pro EBF) gegen Süden nicht ganz so gross wie beim Einfamilienhaus gewählt werden können, weil zum einen nicht alle Gebäude gegen Süden ausgerichtet werden können und zum anderen der Wärmeaustausch (der solaren Gewinne) innerhalb des Gebäudes aufgrund der Raumunterteilung der Wohnungen und Gänge geringer ist als bei Einfamilienhäusern. Dadurch wird der

Ausnutzungsgrad der freien Wärme geringer und das Risiko von Überhitzungen für einzelne Wohnungen grösser.

Erwartungsgemäss führt eine geringere Luftwechselrate zu einem geringeren spezifischen Wärmebedarf eines Gebäudes und daher bei den gleichen Investitionsmassnahmen zu höheren Grenzkosten bei den Lüftungsanlagen (wie auch bei den übrigen Massnahmen), denn der Ausnutzungsgrad der freien Wärme sinkt stärker. Diese Grenzkostenunterschiede werden aber erst bei Grenzkosten über 20 Rp/kWh$_{NE}$ deutlich und könnten – erst auf diesem relativ höheren Kostenniveau die Entscheidungen beeinflussen (vgl. Abbildung 6.1-6); am interessantesten auf Seiten der Kostenminderung ist natürlich das verschattete Gebäude (b=0.6 gegen Süd/Ost/West) mit der höheren Luftwechselrate, was in der Praxis auch die häufigste Variante sein dürfte, insbesondere im städtischen Umfeld.



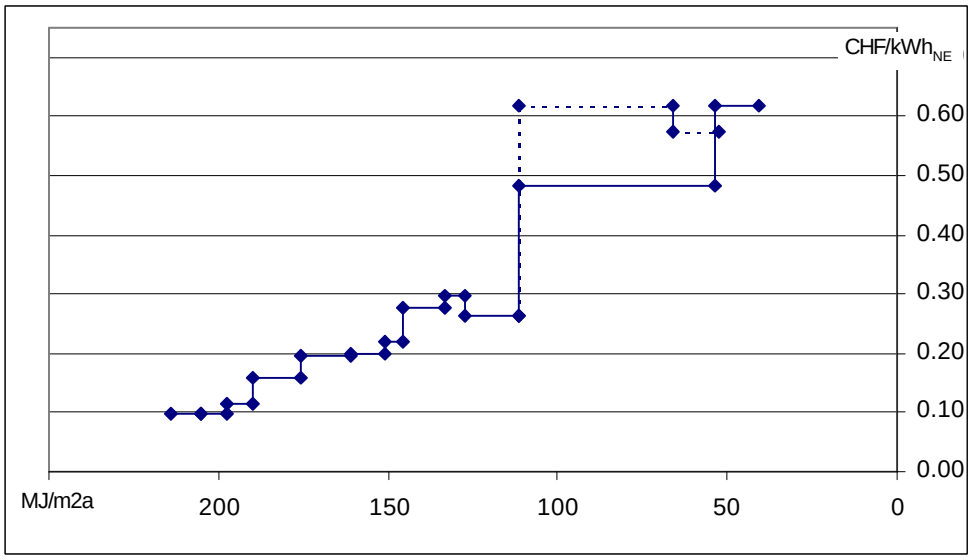
Berechnungen CEPE

Abbildung 6.1-6: MFH-Bruttogrenzkostenkurve (ohne Berücksichtigung der Kostenreduktion auf Seite Wärmeerzeugung/-verteilung) für verschiedene Ausgangslagen der Verschattung und des Luftwechsels

Spezifische Grenzkosten und Effizienzpotential bei Lüftungen sind sehr abhängig von der Annahme bzgl. des Referenzfalls und der Effizienz der Lüftungsanlage (d.h., nicht nur der Wärmerückgewinnungsgrad der Anlage ist entscheidend, sondern auch, welcher Anteil des Luftwechsels über die Anlage läuft und welcher Anteil durch Undichtigkeiten bei Fenstern und Türen (Personen gehen auch in solchen Gebäuden ein und aus) im Wärmetauscher der Lüftungsanlage gar nicht rückgewinnbar ist. In Abbildung 6.1-6 wird dies illustriert, indem die Grenzkosten nicht nur für den Optimalfall mit einem verbleibenden energetischen Luftwechsel von 0.13/h dargestellt werden, sondern exemplarisch auch mit einem solchen von 0.2/h.

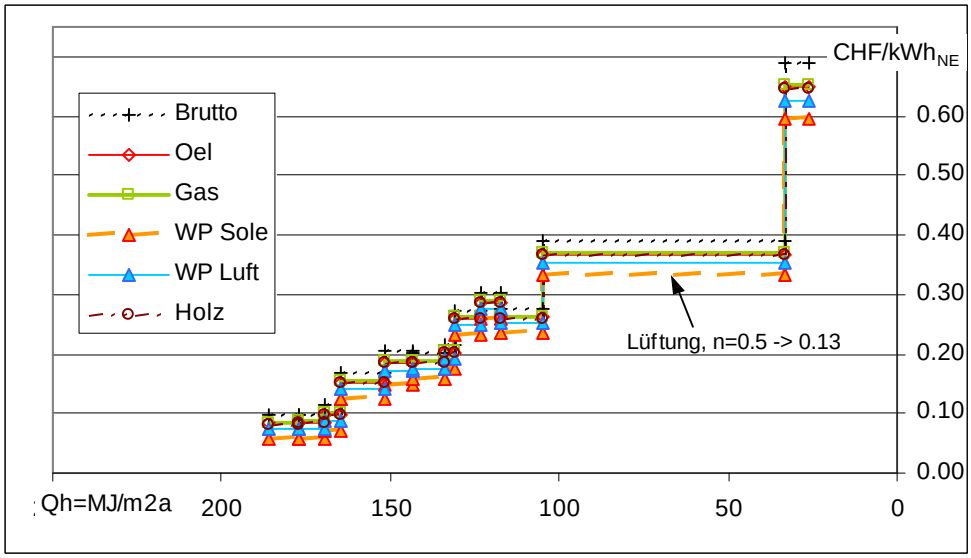
Deutlich ersichtlich ist der hohe Einfluss der Luftwechselrate n auf den spezifischen Wärmebedarf auch im Referenzfall (ohne Lüftung). Die relative Bedeutung steigt zudem bei zunehmender Wärmedämmung an (vgl. Abb. 6.1-8 bis 6.1-12). Am Grenzkostenvergleich zeigt sich auch, dass die kontrollierte Lüftung in hoch wärmegedämmten Gebäuden eine zunehmende Aufmerksamkeit haben muss. Hierbei sind nicht nur Kostenprobleme zu überwinden, sondern

auch mangelnde Akzeptanz und mangelnde Kenntnisse bei Bauherren und Gebäudenutzern zur kontrollierten Lüftung von Wohngebäuden



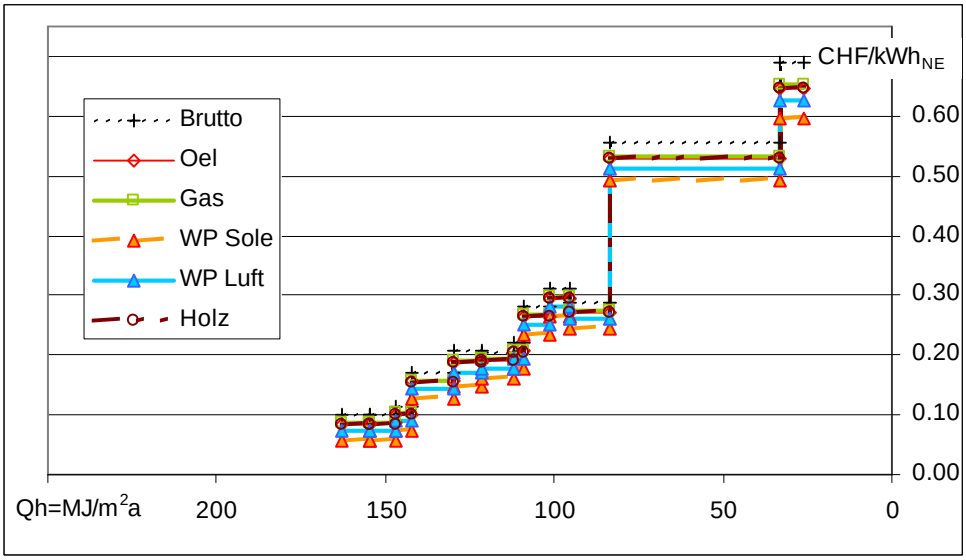
Berechnungen CEPE

Abbildung 6.1-7: Sensitivität der MFH-Bruttogrenzkostenkurve (ohne Berücksichtigung der Kostenreduktion auf Seite Wärmeerzeugung/-verteilung) bzgl. Lüftungseffizienz der Komfortlüftung für das MFH mit A/EBF=1.4



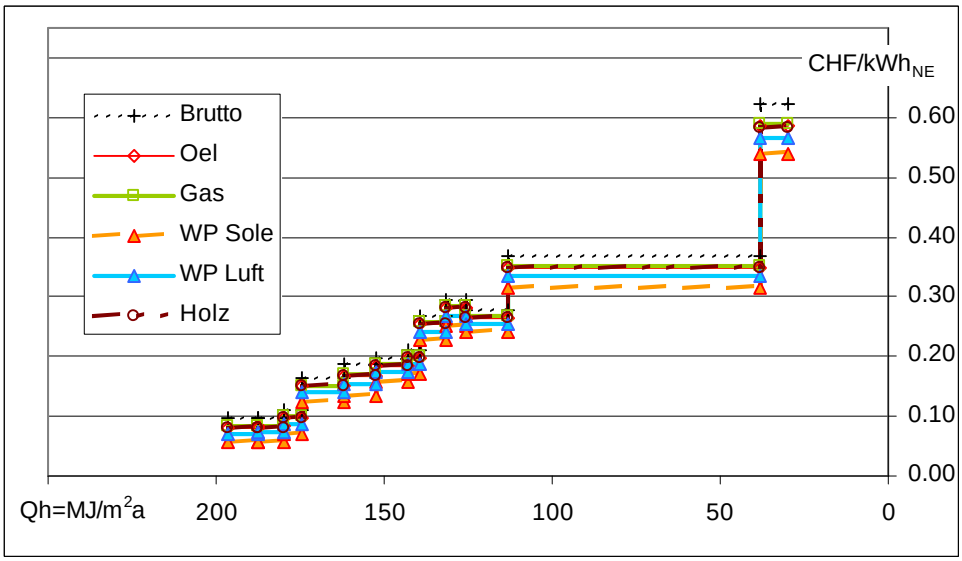
Berechnungen CEPE

Abbildung 6.1-8: MFH-Grenzkostenkurve unter Berücksichtigung der Kosteneinsparung auf Seiten der Wärmeerzeugung/-verteilung, geringe Verschattung, „hoher“ Luftwechsel im Referenzfall



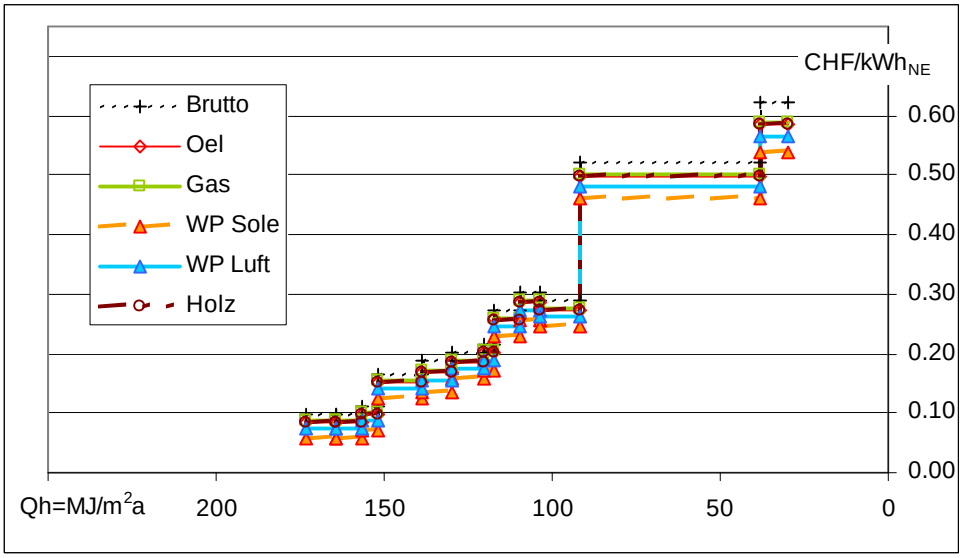
Berechnungen CEPE

Abbildung 6.1-9: MFH-Grenzkostenkurve unter Berücksichtigung der Kosteneinsparung auf Seiten der Wärmeerzeugung/-verteilung, geringe Verschattung, niedriger Luftwechsel im Referenzfall



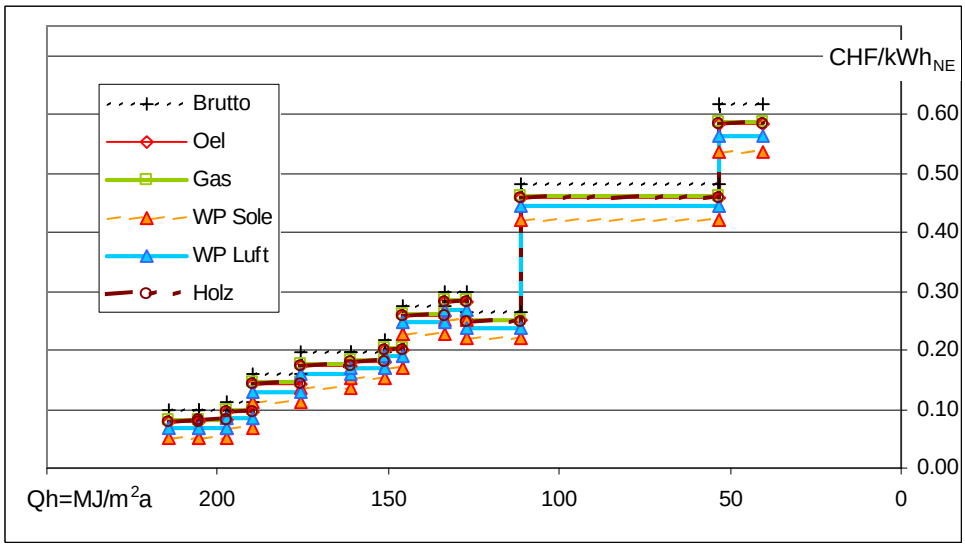
Berechnungen CEPE

Abbildung 6.1-10: MFH-Grenzkostenkurve unter Berücksichtigung der Kosteneinsparung auf Seiten der Wärmeerzeugung/-verteilung, hohe Verschattung, „hoher“ Luftwechsel im Referenzfall



Berechnungen CEPE

Abbildung 6.1-11: MFH-Grenzkostenkurve unter Berücksichtigung der Kosteneinsparung auf Seiten der Wärmeerzeugung/-verteilung, hohe Verschattung, tiefer Luftwechsel im Referenzfall



Berechnungen CEPE

Abbildung 6.1-12: MFH-Grenzkostenkurve unter Berücksichtigung der Kosteneinsparung auf Seiten der Wärmeerzeugung/-verteilung, mittlere Verschattung, mittlerer Luftwechsel im Referenzfall, mit einem Verhältnis A/EBF=1.44

Fazit für die Analysen im Bereich der Mehrfamilienhäuser:

Gemessen an dem spezifischen Wärmebedarf verschiedener Mehrfamilienhäuser, typisiert nach Merkmalen wie A/EBF, Luftwechselrate, Verschattung und Gebäudeausrichtung, ist die Ausgangslage (die Referenzbasis) der Grenzkostenberechnung sehr unterschiedlich. Dieser

Referenzfall bestimmt nicht unerheblich die Grenzkosten der weiterhin unterstellbaren Wärmedämminvestitionen. Denn je höher der spezifische Wärmebedarf im Referenzfall durch Verschattung, Ausrichtung und hohes A/EBF-Verhältnis ist, desto geringer sind bei den gleichen Wärmedämminvestitionen die Grenzkosten infolge ihrer grösseren Wirkung.

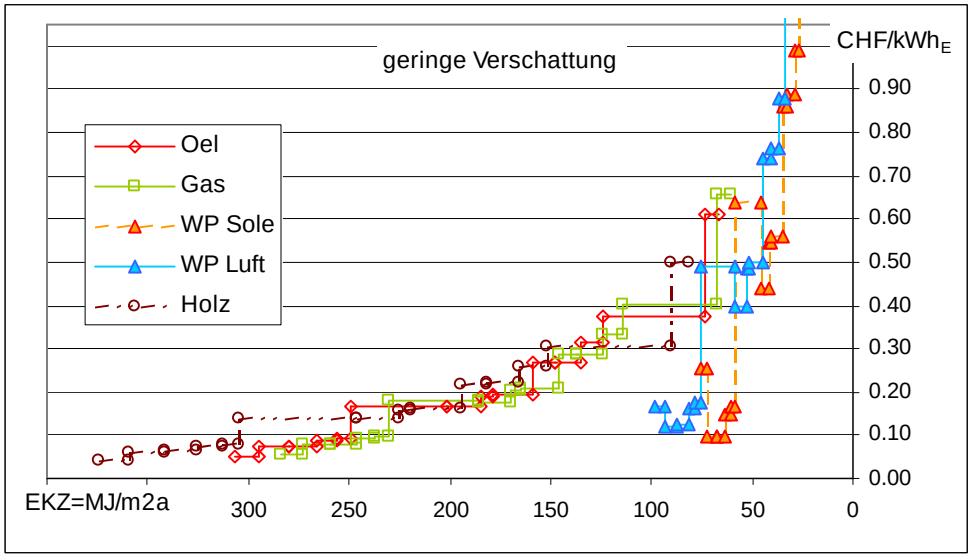
Auch bei den Mehrfamilienhäusern sind die Kostenminderungen bei Anrechnung der verminderten Investitionskosten auf Seiten der Wärmeerzeugung und -verteilung bei den gering gedämmten Gebäuden relativ am grössten (bis zu knapp 50 %), aber dieser kosten-vermindernde Einfluss verliert bei zunehmender Intensität der Wärmedämminvestitionen an Bedeutung. Erst eine völlige Abkehr von der Warmwasserheizung würde das Bild der Nettogrenzkosten noch deutlich günstiger ausfallen lassen. Bei allen Beispielen lässt sich rechnerisch der Passivhausstandard mit Lüftungsanlagen und Wärmerückgewinnung erreichen; bei den Beispielen für grosse Gebäude (A/EBF = 1.1) u.U. sogar mit Dämmstärken unter 30 cm und ohne gedämmte Fensterrahmen, was sich besonders kostensenkend wegen der (heute noch) hohen Grenzkosten dieser Massnahmen auswirkt.

a) Exkurs: Betrachtung auf Ebene Endenergie

Obwohl zwischen Netto-Grenzkosten Unterschiede zwischen den verschiedenen Heizanlagetypen bestehen, sind die Grenzkostenkurven auf der Ebene der Nutzenergie (Heizwärmebedarf) recht ähnlich. Dies gilt nur noch bedingt, wenn die Grenzkostenbetrachtung auf der Ebene der Endenergie gemacht wird, wie die Abbildung 6.1-13 aufzeigt. Der Hintergrund dieses Phänomens ist unmittelbar einsichtig, wenn man sich vor Augen hält, dass der Endenergieverbrauch bei Anlagen mit schlechterem Wirkungsgrad (z.B. Holz mit 73%) grösser ist bzw. bei WP mit einem Nutzungsgrad von 2.5 bis über 4 wesentlich kleiner. Im selben Mass unterscheiden sich auch die Differenzen des Endenergieverbrauchs zwischen den verschiedenen Effizienzstufen des Gebäudes. Werden die im wesentlichen sehr ähnlichen Kosten durch diese unterschiedlichen Differenzen dividiert, entstehen naturgemäss sehr unterschiedliche spezifische Werte. Besonders eindrücklich ist dies bei der WP, für die angenommen wird, dass der Nutzungsgrad bereits im Referenzfall (heutiger Neubaustandard) über 2.5 (Luft) bzw. 3.5 (Sole) beträgt (zur Abhängigkeit der Nutzungsgrade in Funktion der Gebäudeenergieeffizienz siehe weitere Ausführungen im Kap 4.3.12). Entsprechend sind die Grenzkosten um etwa diesen Faktor höher. Etwas kompensiert wird der Effekt, weil die Nutzungsgrade bis Gebäude mit dem tiefsten Bedarf ansteigen (Sole-WP auf 4.3) und dadurch die gesamte Endenergieverbrauchdifferenz entsprechend zunimmt (um gut 20%).

Zu beachten ist in diesem Zusammenhang aber auch, dass jetzt nicht mehr die Wärmekosten, sondern direkt der Energiepreis (unter Berücksichtigung der Langfristigkeit) als Vergleich heranzuziehen ist. Der Strompreis pro kWh liegt mit 12 Rp/kWh$_e$ bis über 25 Rp/kWh$_e$ denn auch deutlich höher als der Energiepreis für fossile Energieträger (1990er Jahre: 5 bis 8 Rp/kWh).

Zu berücksichtigen ist bei der Interpretation der Grenzkostenkurven auf Endenergieebene auch, dass die Heizanlage eine rund zwei bis dreimal kürzere Lebensdauer hat als die betrachteten baulichen Effizienzinvestitionen und die Gebäudeeffizienz eher auf der Ebene der Wärmekosten beurteilt werden sollte.



Quelle Berechnungen CEPE

Abbildung 6.1-13 Spezifische Grenzkostenkurve für EFH-Neubauten inkl. Darstellung der Co-Benefits

b) Fazit der Grenzkostenbetrachtungen im Neuau

Insgesamt zeigt sich bereits an diesen Kostenbeispielen heutiger Preisbasis (d.h. ohne Dynamisierung der Kosten für Wärmeschutz und ohne begleitende Nutzen), dass *eine differenzierte Grenzkostenbetrachtung für energiewirtschaftliche Energiesystemanalysen erforderlich* ist, und zwar sowohl die Unterscheidung nach Ein- und Mehrfamilienhäusern als auch nach weiteren einflussreichen Merkmalen. Welche man letztlich zur Differenzierung der Grenzkosten heranzieht, hängt von ihrer Häufigkeit im gesamtschweizerischen Gebäudebestand ab. Die bisher übliche, sehr vereinfachende Grenzkostendarstellung lief Gefahr, volkwirtschaftlich attraktive Wärmedämmoptionen in einem Teil des Schweizer Neubausegmentes oder Gebäudebestandes zu verbergen.

6.1.2 Aggregation der Grenzkostenkurven auf die gesamtschweizerische Ebene

Die Aggregation auf die gesamtschweizerische Ebene erfolgt anhand der spezifischen Grenzkostenkurven (Kap. 6.1.1) sowie der gesamtschweizerisch zu bauenden Neubauflächen (Kapitel 5). Betrachtet wird zunächst die Periode 2001 bis 2010. Unter Umständen muss in Erwägung gezogen werden, die Aggregation in Fünfjahresschritten vorzunehmen, denn die Dynamik der Grenzkosten insbesondere im Bereich der Fenster ist beachtlich, siehe Kapitel 6.3.

Bei der Aggregation auf gesamtschweizerische Grenzkostenkurven ist zwischen einem theoretischen und einem realisierbaren Potential zu unterscheiden. Beim realisierbaren Potential wird berücksichtigt, dass die Einführung der effizientesten Produkte, Bauweisen und Erfahrungen etc. am Markt nicht unmittelbar erfolgen kann, sondern gemäss der Charakteristik eines Diffusionsprozesses erst mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung erfolgen kann. In dieser Phase haben die Unternehmen und die Planenden einen Lern- und Erfahrungsprozess durchzumachen. Dies gilt insbesondere für Dämmstärken über 20 cm (kleinere Unternehmen haben auch für über 16 cm kaum Erfahrungen, wie eine spontane Umfrage kürzlich bei einer Tagung

zeigte) und Lüftungsanlagen mit WRG. Es ist darauf hinzuweisen, dass es sich bei den Annahmen in Tabelle 6.1-1 um relativ grobe Expertenschätzungen handelt.

Nicht berücksichtigt ist beim Unterschied zwischen theoretischem und realisierbarem Potential die Wirtschaftlichkeit. Diese würde mit der Ausschöpfbarkeit des realisierbaren Potentials beschrieben und ist vom allgemeinen wirtschaftlichen, energie- und umweltpolitischen Rahmenbedingungen (insbesondere den Energiepreisen) sowie den Präferenzen der Bauleistungsnachfragenden bestimmt (nicht alle Wirtschaftsakteure entscheiden nach rein wirtschaftlichen Kriterien, zudem können die Methoden und Systemgrenzen für Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen sehr unterschiedlich sein).

Tabelle 6.1-1 Annahmen zu den Realisierungsanteilen der verschiedenen Massnahmen im Neubaubereich, Zeitperiode 2001 –2010

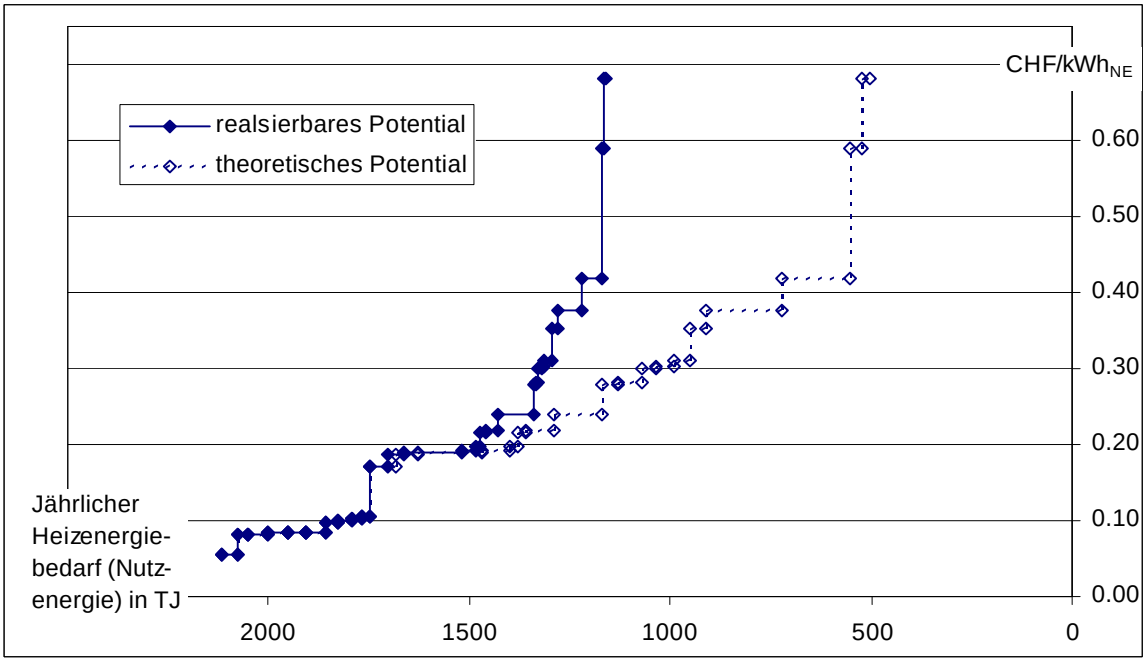
Massnahmen	Realisierungsanteil
Mehr Fensterfläche im Süden (inkl. teilweise grosse statt kleine Fenster)	100%
Wärmedämmung Steildach, Verbesserung des U-Werts von 0.27 auf 0.21	100%
Dämmung Boden (mit Bodenheiz.) gegen Keller, Verbesserung U-Werts von 0.33 auf 0.26	100%
Aussenwärmedämmung Wand. U-Wert von 0.28 auf 0.23	100%
Sockeldämmung + 50 cm tiefer, U-Wert$_{lin}$ von 0.3 auf 0.2	100%
Vergrösserung Fensterfläche-Süd von 15m2 auf 35 m2, Fensterglas U-Wert von 1.1 auf 0.7 für alle Orientierungen	90%
Wärmedämmung Steildach, Verbesserung des U-Werts von 0.21 auf 0.15	70%
Aussenwärmedämmung Wand. U-Wert von 0.23 auf 0.2	70%
Sockeldämmung, Verbesserung , U-Wert$_{lin}$ von 0.2 auf 0.12	50%
Wärmedämmung Steildach, Verbesserung des U-Werts von 0.15 auf 0.11	20%
Aussenwärmedämmung Wand. U-Wert von 0.2 auf 0.15	10%
Fensterglas U-Wert von 0.7 auf 0.5 (g=0.5), alle Orientierungen	50%
Lüftungsanlage mit WRG	30%
Fenster an West/Ost/Ost-Fassade auf Passivhausfensterqualität (g=0.5, Rahmen=0.8)	20%

Quelle Annahmen CEPE

Im folgenden wird die Aggregation getrennt nach EFH und MFH dargestellt.

a) Ein- und Zweifamilienhäuser

Zur Aggregation der Grenzkostenkurven werden Annahmen der relativen Gewichte der betrachteten Gebäudetypen bzw. –lagen notwendig. Bei den Einfamilienhäusern wird angenommen, dass die Anteile für die unverschattete Lage (b=0.9 nach Süden bzw. je 0.7 nach Ost und Westen) bzw. für verschattete Lage (b=0.7 nach Süden bzw. je 0.5 nach Ost und Westen) je 50% betragen.



Quelle Berechnungen CEPE

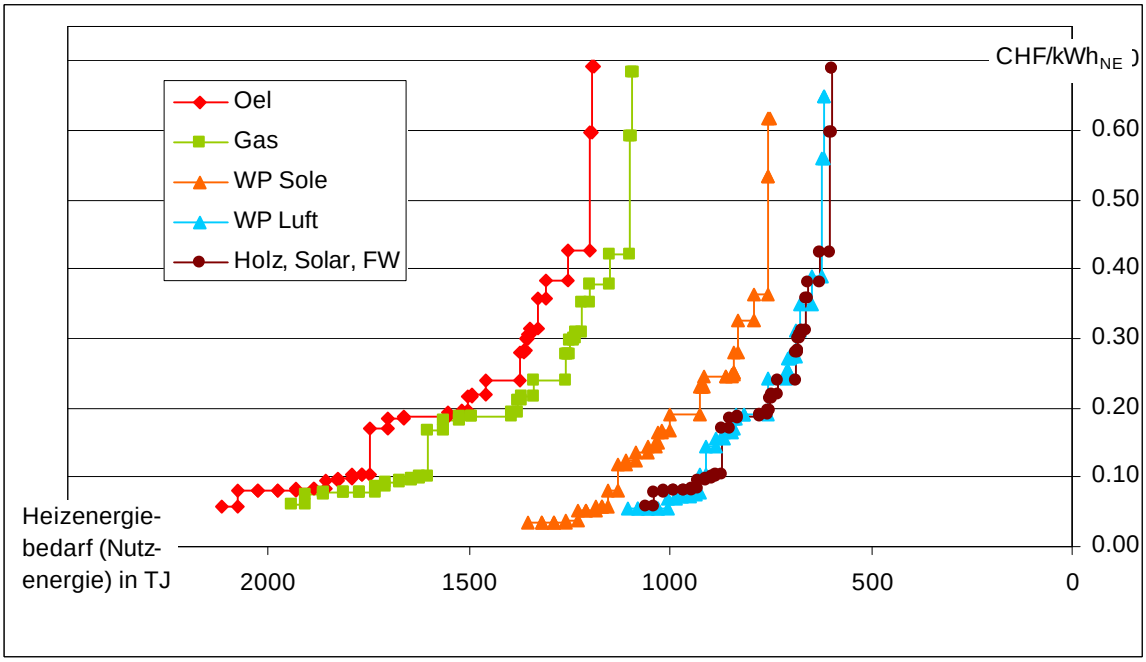
Abbildung 6.1-14 Unterschied zwischen realisierbarem und theoretischem Potential bei der aggregierten gesamtschweizerischen Grenzkostenkurve für EFH-Neubauten, Zeitperiode 2001 bis 2010, am Beispiel der mit Öl beheizten Gebäude

Die Nettogrenzkostenkurven sind unterschiedlich für die Gebäude mit verschiedenen Heizanlagen. Um dies bei der Darstellung der gesamtschweizerischen Grenzkostenkurve zu berücksichtigen, gäbe es grundsätzlich zwei Möglichkeiten:

- Die spezifischen Grenzkostenkurven werden nach den Marktanteilen der Heizanlagen in Neubauten gewichtet und zu einer einzigen Grenzkostenkurve aggregiert
- Es werden separate Grenzkostenkurven für die Gebäude mit den unterschiedlichen Heizanlagen erstellt.

Der Transparenz halber wurde zunächst die zweite Variante durchgeführt. Dazu wurden die Marktanteile der Heizanlagen in EFH-Neubauten gemäss Tabelle 5.1-2 zugrunde gelegt. Diese basieren auf Modellrechnungen des CEPE und stützen sich auf die BFE-Energieperspektiven, wobei Aktualisierungen insbesondere im Bereich der WP vorgenommen wurden.

Eigentlich hat im EFH-Neubau die WP als gesamtes den höchsten Marktanteil und müsste dem zufolge (im Referenzfall) auch den höchsten Heizwärmebedarf haben. Bei den WP wurde jedoch zwischen zwei Typen unterschieden (Sole und Luft, Wasser weist einen Anteil von unter 10% auf und kann methodisch der Sole-WP zugeschlagen werden), so dass Öl im Referenzfall mit dem höchsten Verbrauch erscheint (die Kurve beginnt ganz links), dicht gefolgt von Erdgas. Obwohl von Auge betrachtet die Grenzkostenkurven dieser Anlagetypen flacher erscheinen, ist dies nicht so; relativ gesehen ist der zu realisierende Effizienzgewinn bei gleichen Grenzkosten vergleichbar, dies gemäss den Abbildungen mit den spezifischen Grenzkostenkurven, siehe weiter oben.



Quelle Berechnungen CEPE

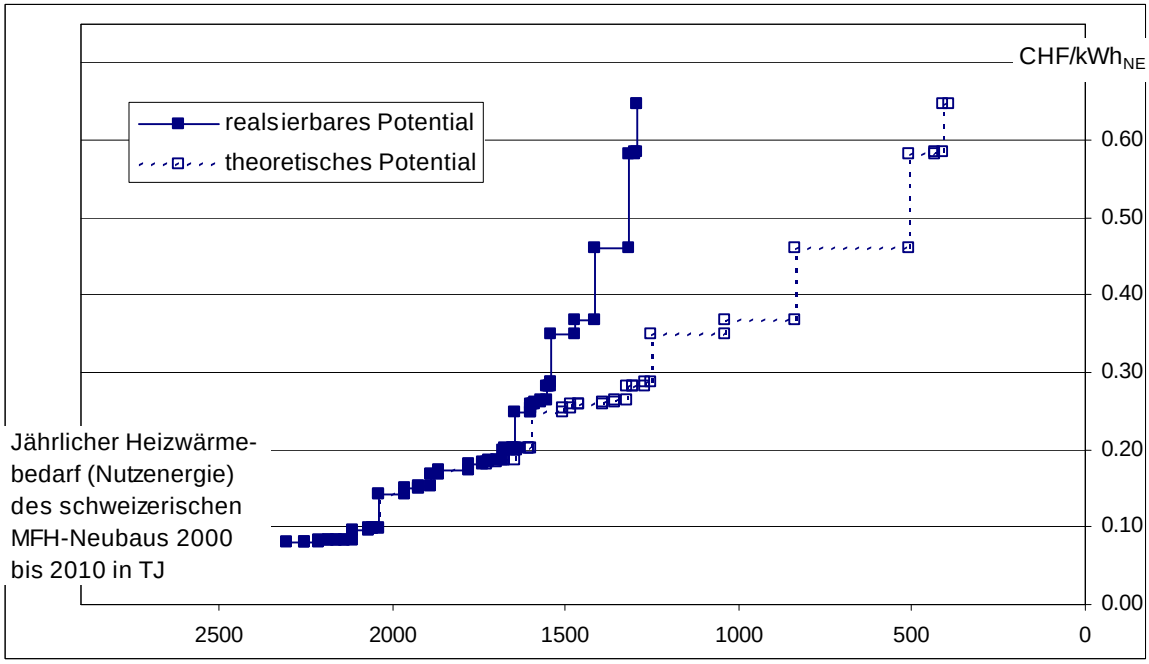
Abbildung 6.1-15 Gesamtschweizerische Grenzkostenkurven (realsierbares Potential) für den EFH-Neubau des Zeitraums 2001 bis 2010, (Marktanteil Anlagetypen gemässTabelle 5.1-2), heutiger Kostenstand

Im Referenzfall beträgt der Nutzenergiebedarf der Gebäude, die bis 2010 neu gebaut werden, rund 7600 TJ. Bis zu Grenzkosten von 10 Rp/kWh$_{NE}$ lässt sich der jährliche Heizwärmebedarf (auf Ebene Nutzenergie) mit Massnahmen an Boden, Dach, Wand und Fenster gesamtschweizerisch bei EFH-Neubauten um rund 1300 TJ reduzieren. Bis zu Grenzkosten von 20 Rp/kWh$_{NE}$ sind es weitere 935 TJ. Ein vergleichsweise grosses Potential der Heizwärmebedarfsreduktion bietet der Einbau von Lüftungsanlagen. 1300 beträgt dieses Potential theoretisch, wenn in allen MFH eine Lüftungsanlage eingebaut würde. Gemäss der Annahme in Tabelle 6.1-1 liegt der realisierbare Anteil bis 2010 jedoch nur bei 30% des Wertes. Die Grenzkosten betragen je nach Situation und Wärmeerzeugung 23 Rp/kWh$_{NE}$ bis 38 Rp/kWh$_{NE}$, wenn die gesamten Kosten der Lüftungsanlage der Energie zugerechnet würden.

b) MFH

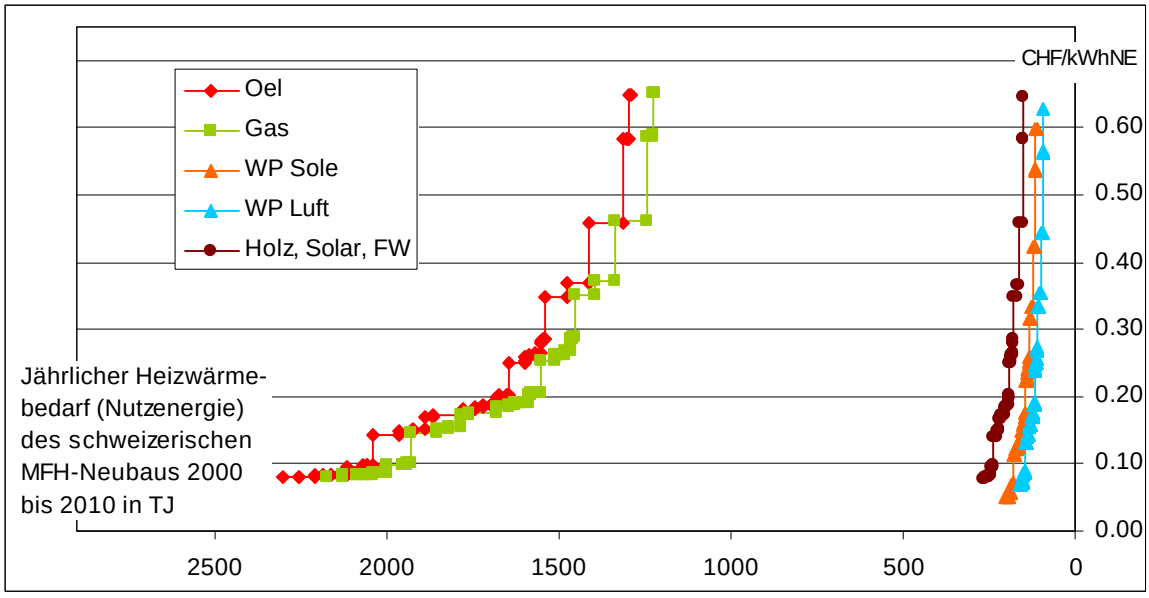
Gemäss der Ausgangslage von Wüest & Partner, 1994 sowie CEPE, 2001 werden bis 2010 rund 25 Mio m^2 EBF in reinen oder gemischt genutzten (mehr als 50% Wohnflächenanteil) Mehrfamilienhäusern erstellt werden. Im Referenzfall beträgt der Heizwärmebedarf dieser Flächen rund 5600 TJ/Jahr.

Wie bei den EFH ist auch hier zwischen einem theoretischen und einem realisierbaren Potential zu unterscheiden (Abbildung 6.1-16 am Beispiel der Gebäude mit Öl-Anlagen) und die Kostenkurven werden für die Gebäude mit verschiedenen Heizanlagetypen separat dargestellt (Abbildung 6.1-17). Die Grenzkostenkurve der Heizanlagen mit geringem Potential erscheinen optisch steiler, sind es aber relativ gesprochen nicht (siehe vorangehendes Kapitel).



Quelle Berechnungen CEPE

Abbildung 6.1-16 Unterschied zwischen realisierbarem und theoretischem Potential bei der aggregierten gesamtschweizerischen Grenzkostenkurve für MFH-Neubauten, Zeitperiode 2001 bis 2010, am Beispiel der mit Öl beheizten Gebäude



Quelle Berechnungen CEPE

Abbildung 6.1-17 Gesamtschweizerische Grenzkostenkurven (realsierbares Potential) für MFH-Neubauten der verschiedenen Anlagetypen (Marktanteile Anlagen gemäss Tabelle 5.1-4), Zeitraum 2001 bis 2010, heutiger Kostenstand

6.2 Integration der Co-Benefits in die Grenzkostenkurven

Wie im Kapitel 4.6 an einigen Stellen angetönt, konnten die begleitenden Nutzen der Energieeffizienzmassnahme im Verlaufe dieses Projekts nicht in der gebotenen Differenziertheit und repräsentativ für die relevanten Fälle quantifiziert und monetarisiert werden. Nachfolgend werden die Co-Benefits exemplarisch für einen Fall, nämlich für MFH an lärmiger Lage, in die Grenzkostenkurve eingearbeitet.

Die Co-Benefits fallen nicht gleichermassen für alle Effizienzinvestitionstypen an und die Nutzen verteilen sich auch nicht gleichmässig über die Spannbreite der Energieeffizienzgewinne. Im allgemeinen ist von stark abnehmendem Grenznutzen auszugehen.

Für die Darstellung in Abbildung 6.2-1 wurden folgende Annahmen getroffen:

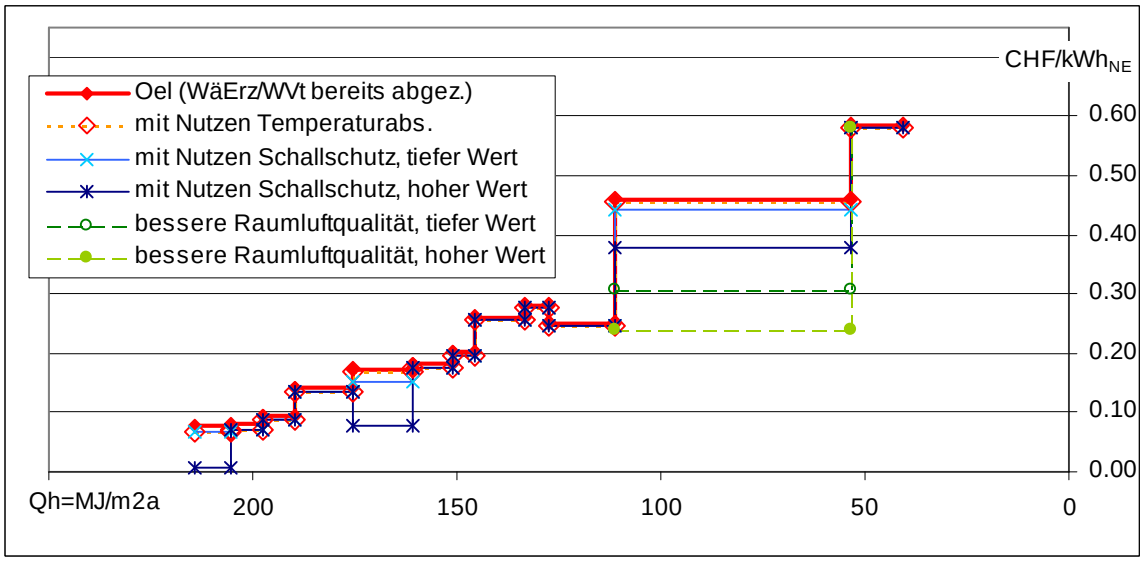
- Temperaturabsenkung: Es wird gemäss Kap. 4.6 von einem Nutzen von 0.2 CHF/m²a ausgegangen, wobei der Nutzen auf die ganze Effizienzeinsparung verteilt wird, allerdings nicht linear, sondern mit exponentiell abnehmendem Nutzen (bei 50 MJ/m²a ist schon ca. die Hälfte des Nutzens erreicht. Der Nutzen könnte u.U. spezifisch nach einzelnen Massnahmen differenziert werden: bei grossflächigen Fenstern gegen Süd ist aus energetischen Gründen eine Dreifachverglasung nicht notwendig oder u.U. sogar kontraproduktiv (wenn nicht auf einen hohen g-Wert geachtet wird), aber aus Komfortgründen am Abend oder bei Abwesenheit der Sonne ist eine Dreifachverglasung trotzdem angezeigt, denn diese weist höhere Oberflächentemperaturen auf und verursacht weniger Kaltluftabfälle.
- Lärm: Die Kosten der Lärmbelastung in Form von Mietzinsreduktionen bzw. Gebäudewertverminderungen sind für die Schweiz recht gut bekannt. Weniger klar ist, um wie viel diese Kosten durch Energieeffizienzmassnahmen (besser schalldämmende Fenster, Lüftungen) vermindert werden können (diese Verminderung der Kosten entspricht den Co-Benefits der Massnahmen). Angenommen wird im folgenden, dass die Lärmkosten insgesamt bereits im Referenzfall um 50% verringert werden (heute marktübliche Fenster weisen bereits ein gutes Schalldämmmass auf). Die restlichen Kosten können durch weitergehende Energieeffizienzmassnahmen um weitere 50% reduziert werden. Die gesamte Lärmkostenreduktion beträgt also 25%, was als konservative Annahme bezeichnet werden kann. Die Höhe des Nutzens und die Annahmen bzgl. der Zuordnung auf die einzelnen Energieeffizienzmassnahmen ist in Tabelle 6.2-1 dokumentiert.
- Der Nutzen der verbesserten Raumluftqualität wird mit 15% bis 30% der Jahreskosten angenommen (aus Kap. 4.6 übernommen).

Durch diese Aufzählung wird auch verdeutlicht, dass es sich um Nutzen für einen Neubau an eher lärmigem (tiefer Wert) bis sehr lärmigem (hoher Wert) Standort handelt. Die Nutzen von anderen Gebäuden können davon beträchtlich abweichen. Beispielsweise werden die Lärmkosten bei Gebäuden mit alten Fenstern wohl höher sein und damit auch das Nutzenpotential der Energieeffizienzmassnahmen (ein neues Fenster gegenüber einem solchen alten mit Doppel- oder Einfachverglasung ohne Dichtung bringt eine vergleichsweise hohe Reduktion des Schallpegels).

Tabelle 6.2-1 Lärmkosten bei Neubauten sowie Lärmkostenreduktion (=Co-Benefits) durch Energieeffizienzmassnahmen

	Lärmkosten, tiefer Wert (1dB)	Lärmkosten, hoher Wert (4dB)
Total	0.05 CHF/m²/Monat 0.60 CHF/m²/Jahr	0.30 CHF/m²/Monat 2.40 CHF/m²/Jahr
Reduktion der Lärmkosten durch Energie-effizienzinvestitionen, total	0.30 CHF/m²/Jahr	1.80 CHF/m²/Jahr
Davon:		
Dreifach- statt Zweifachverglasung	20%	20%
Verstärkte Dachdämmung (gilt v.a. für Gebäude in Flughafennähe)		8%
Lüftungsanlage und Dreifachverglasung	80%	80%

Quelle Annahmen CEPE



Quelle Berechnungen CEPE

Abbildung 6.2-1 Spezifische Grenzkostenkurve für MFH-Neubauten (mit A/EBF=1.44) inkl. Darstellung der Co-Benefits

Die Ergebnisse (Abbildung 6.2-1) zu den Grenzkostenkurven mit Enbezug der Co-Benefits verdeutlichen folgendes:

- Der ökonomische Nutzen der angenommen Temperaturabsenkung (z.B. von 21° auf 20°C) ist am Anfang am grössten (ca. 0.01 CHF/kWhNE) und nimmt im Verlauf der zunehmenden Energieeffizienz stark ab. Die Grenzkostenkurve beginnt dadurch auf einem tieferen Level und endet auf dem gleich hohen Niveau wie die Grenzkostenkurve ohne Einbezug des Temperaturabsenkungszusatznutzens (recall: die Grenzkosten in diesem Kapitel messen sich am unmittelbar vorangehenden Effizienzniveau).

- Vergleichsweise hoch sind die Nutzen der Energieeffizienzinvestitionen im Lärmbereich, besonders für Standort mit hoher Lärmbelastung. Die Grenzkosten der Lüftungsanlage werden so z.B. um rund 4% bis zu 18% reduziert. Es ist aber an dieser Stelle auch zu betonen, dass es sich sowohl beim totalen Anteil der Lärmkosten, welcher Energieeffizienzinvestitionen reduziert werden kann, als auch bei der Zuordnung zu den einzelnen Effizienzmassnahmen, um grobe Schätzungen bzw. Annahmen handelt (die eigentlichen Lärmkosten sind hingegen empirisch recht gut abgestützt). Die geneigten Lesenden werden mit der Offenlegung der Annahmen jedoch in die Lage versetzt, die Auswirkungen anderer Annahmen abzuschätzen.

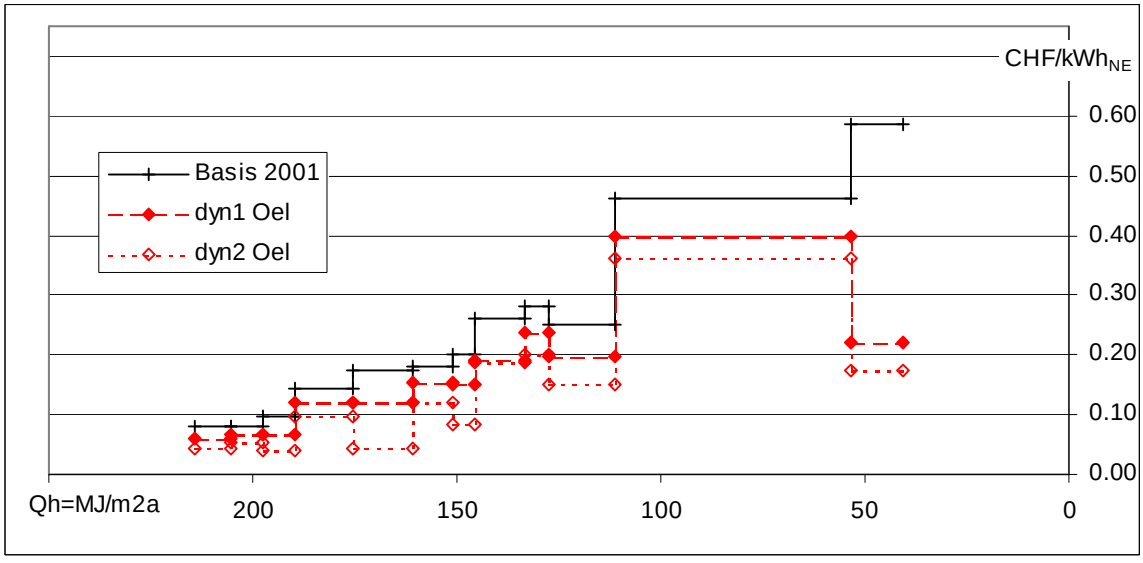
Der Nutzen der verbesserten Raumluftqualität reduziert entsprechend den Annahmen die Grenzkosten der Lüftungsanlage um einen ähnlich hohen Betrag.

6.3 Grenzkosten mit Einschluss der Lern- und Skaleneffekte (dynamisierte Kosten)

Gerade bei neuen Technologien, wie sie bei Wärmedämminvestitionen heute realisiert werden bzw. in Zukunft zur Anwendung kommen, spielen Kostensenkungspotenziale zur richtigen Einschätzung energiepolitischer Massnahmen eine zentrale, bisher zu wenig in den energiewirtschaftlichen Analysen betrachtete Rolle.

6.3.1 Beispiel einer Grenzkostenkurve mit dynamisierten Kosten

Für ein typisches Mehrfamilienhaus mit einem A/EBF-Verhältnis von 1.4, einer mittleren Verschattung, einer Ölheizung und mittlerem Referenzluftwechsel wurden zwei dynamisierte Kostenentwicklungen berücksichtigt (vgl. Abbildung 6.3-1). Zugrunde gelegt wurden die Annahmen zur Kostenreduktion gemäss Kapitel 4.5. Dabei bezieht sich die in der Abbildung mit „dyn1“ bezeichnete Kurve im wesentlichen für das Jahr 2010 und die dem „dyn2“ bezeichnete auf das Jahr 2020.



Berechnungen CEPE

Abbildung 6.3-1: Brutto-Grenzkostenkurve für MFH-Neubauten mit dynamisierten Kosten am Beispiel eines Gebäudes mit Öl-Heizung und mittlerer Verschattung und Luftwechselrate

Es ist jedoch zu betonen, dass die Dynamik nicht von der Zeit an und für sich bestimmt wird, sondern von den Absatzmengen, also von der Nachfrage und somit beeinflusst werden kann, siehe dazu das folgende Kapitel 6.3.2. Auch aus diesem Grund sind die Abbildungen nicht mit den Jahreszahlen beschriftet.

Von besonderem Einfluss sind nach den bisherigen Ergebnissen die Kostensenkungspotenziale im Fensterbereich, wo sich die Grenzkosten in einigen Fällen halbieren (vgl. Abbildung 6.3-1). Dieses erhebliche Kostensenkungspotential ist darin begründet, dass effizientere Fenster bzw. Verglasungen heute erst in kleinen Serien oder gar in Einzelanfertigungen hergestellt werden, was mit realen betrieblichen Zusatzkosten verbunden ist (kurzfristige Umstellung der Fertigungssysteme). Bei längerfristig nachhaltiger Nachfrage von energieeffizienteren Fenstern kann jedoch der Vorteil des hohen Wertschöpfungsanteils des industriell gefertigten Fenstersystems ausgeschöpft werden. Es sind noch erhebliche Kosten-Reduktionspotenziale – analog zur Vergangenheit mit den früheren Produktgenerationen für Fenster – aufgrund der weiteren Automation und Serienfertigung zu erwarten (vgl. Kap. 4.5).

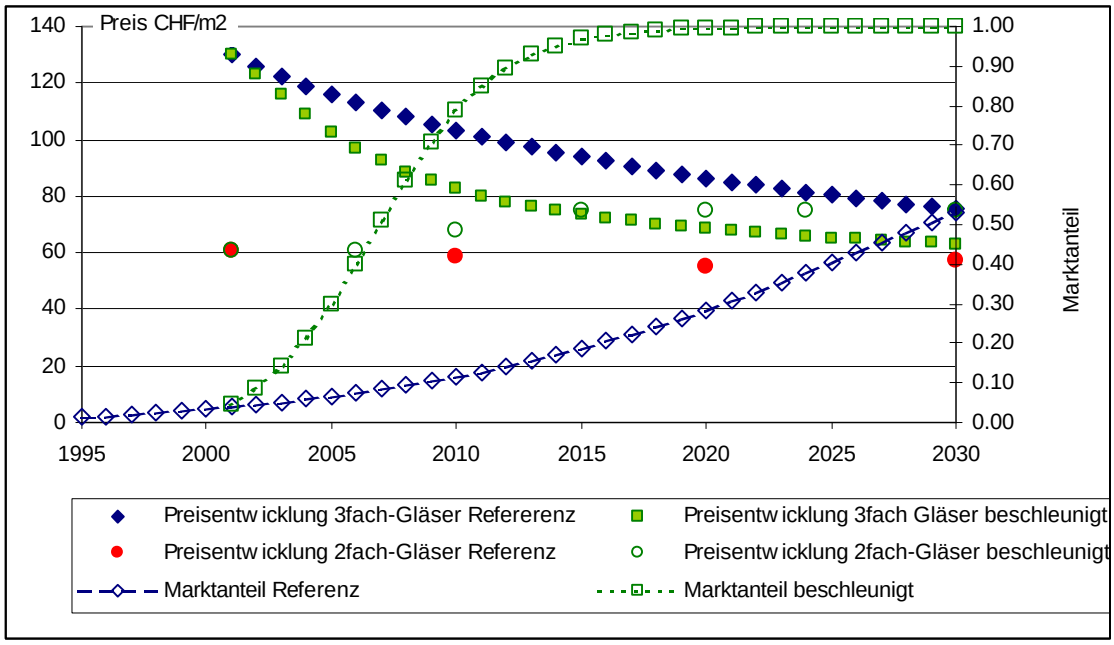
Die Dynamik der Grenzkosten ist ausserdem in der Arithmetik begründet: Nehmen wir z.B. an, die Kostendifferenz betrage heute 200 CHF/m2 bei einem Preisniveau von 500 CHF/m^2 und die Dynamik führe für das effizientere Fenster zu einer Kostenreduktion von 15% und für das „normale“ zu einer solchen von 10%, dann beträgt die Kostendifferenz anschliessend noch 145 CHF /m^2. Die Kostendifferenz (und diese ist ja für den Grenzkostenansatz relevant) reduziert sich damit um beinahe 30%. Bei kleineren Kostendifferenzen ist der Effekt noch ausgeprägter (und natürlich auch bei grösserem Unterschied der Dynamik).

Die deutlich (infolge der Dynamisierung) reduzierten Brutto-Grenzkosten sind ein Hinweis, dass eine gezielte Energiepolitik (längerfristige Ankündigung von verschärften Bauvorschriften, finanzielle Anreize für Neubauten und tiefgreifende Sanierungen, Information über langfristig erwartete Energiepreissteigerungen) diese Kostenreduktionspotentiale zeitlich deutlich früher realisieren könnte, als wenn man diese Prozesse allein den Marktentwicklungen überliesse; letztere sind grundsätzlich nicht in der Lage, die Notwendigkeiten des heutigen Handelns aus den sehr langfristigen Entwicklungen des Klimawandels und der weltweiten Brennstoffmärkte abzuleiten.

6.3.2 Dynamik der Kosten in Funktion der Marktentwicklung bzw. des Marktumfeldes (bzw. der energiepolitischen Rahmenbedingungen)

Die Dynamik der Kosten kann nicht unabhängig von Annahmen zur Marktentwicklung betrachtet werden. Die Marktentwicklung von energieeffizienten Bauleistungen und Produkten hängt von energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen, baulichen Anforderungen, der Rolle von Qualitätslabeln wie Minergie etc. ab. Am Beispiel der Verglasungen wird im folgenden verdeutlicht, wie sich die Preise bzw. Kosten von energieeffizienten Lösungen gegenüber dem Standard entwickeln, einmal in der Referenzentwicklung und einmal bei einer beschleunigten Einführung.

Die energieeffizientesten Verglasungen sind heute noch teurer als die weit am Markt verbreiteten, weil sie sich erst am Beginn des Innovationszyklus befinden und die Lern- und Skaleneffekte erst bevorstehen. Sie haben deshalb eine höhere Fortschrittsrate als die Verglasungen der Standardqualität. Da sie zudem ein viel kleineres kumuliertes Produktionsvolumen aufweisen, erfolgt die Verdoppelung des kumulierten Produktionsvolumens im zeitlichen Ablauf wesentlich schneller, dies selbst in der Referenzentwicklung. Deshalb verringert sich der Preisunterschied im Zeitablauf deutlich. Innerhalb von zehn Jahren (vgl. das Jahr 2010 in Abbildung 6.3-2) würde sich der Preis**unterschied** um mehr als ein Drittel verringern, obwohl sich der Preis der energieeffizienteren Verglasung nur um 20% nach unten entwickelt hat.



Quelle CEPE

Abbildung 6.3-2 Vergleich der Preisentwicklung von Wärmeschutzverglasungen zwischen der Referenzentwicklung und einer beschleunigten Einführung (Annahmen zur Entwicklung der Marktanteile siehe rechte Skala).

Wird nun durch geeignete Rahmenbedingungen ein Umfeld geschaffen, dass die Markteinführung der energieeffizienteren Lösungen beschleunigt, so erfolgt die Verdoppelung entsprechend früher und der Preis der energieeffizienteren Lösungen bewegt sich schneller nach unten. Entsprechend kann sich der Preisunterschied markant früher verringern, wie dies in Abbildung 6.3-2 exemplarisch veranschaulicht wird. In vier bis fünf Jahren wäre bereits der Preisstand erreicht, der in der Referenzentwicklung erst in zehn Jahren zu verzeichnen wäre. Und der Preisunterschied würde sich bei der beschleunigten Einführung innerhalb von zehn Jahren nicht nur um ein Drittel (wie bei der Referenzentwicklung) verringern, sondern um mehr als siebzig Prozent.

6.3.3 Wahl der Dämmstärke in der dynamischen Betrachtungsweise

Wie erwähnt ist es nicht die Zeit, welche die Dynamik bestimmt, und sinkende Kosten bedeuten nicht, dass mit Effizienzinvestitionen zugewartet werden soll, im Gegenteil. Ein weiteres Argument für die Wahl von effizienteren Lösungen ist ein unmittelbares und bezieht sich sehr direkt auf die betriebswirtschaftlichen Ebene. Wird nämlich heute nicht zukunftsorientiert investiert und muss zu einem späteren Zeitpunkt nachgebessert werden, so entstehen wesentlich höhere Kosten, wie das Rechenbeispiel in Tabelle 6.3-1 zeigt wo eine Verstärkung der Wärmedämmung zu einem späteren Zeitpunkte zu 3 bis 5 mal höheren Grenzkosten und auch zu beinahe doppelt so hohen Gesamtkosten führt.

Tabelle 6.3-1 Vergleich der Grenzkosten einer direkten forcierten Wärmedämmung mit einer nachträglich angebrachten Verstärkung der Wärmedämmung

		Dämmstärke cm	U-Wert W/m²K	Kosten CHF/m²	Grenzkosten **Rp/kWh$_{NE}$**
Referenz	Fassadendämmung heute	12	0.28	120	
Verstärk heute	Fassadendämmung heute	direkt auf 24	0.18	140 - 160	
	Differenz zu Referenz		0.10	20 - 40	**12 - 23**
Verstärkt nachträglich (25 Jahre später)	Fassadendämmung später	nachträglich von 12 auf 24	0.10	115	
	Differenz zu Referenz			100 - 115	**56 - 66**

Quelle CEPE

6.4 Erneuerung des Gebäudebestandes 2001 bis 2010

Aufgrund der unterschiedlichen baulichen und energetischen Voraussetzungen, aber auch aufgrund der unterschiedlichen Instandsetzungs- und Erneuerungsanteile werden zunächst separate Kostenkurven für die Gebäude der einzelnen Bauperioden erstellt. Es wird jeweils zwischen EFH und MFH unterschieden.

6.4.1 EFH der Bauperiode 1900 bis 1960

Wiederum sind zwei Referenzfälle zu unterscheiden:

- Instandsetzung (keine Wärmebedarfsreduktion)
- Energetische Erneuerung

Im Referenzfall der energetischen Erneuerung beträgt die kumulierte Heizwärmebedarfsreduktionen für die Gebäude dieser Bauperiode (EFH 1900-1960) 7% bis zum Jahr 2010.

Im Fall der weitergehenden energetischen Erneuerungen (Grenzkostenansatz) wird davon ausgegangen, dass zusätzlich 15% der Wandflächen wärmegedämmt und die Fassaden statt mit 12 cm mit 20 cm gedämmt werden. Beim Dach wird angenommen, dass die Eindeckung nicht nur repariert und das Unterdach nicht nur erneuert wird, sondern dass ausserdem eine Wärmedämmung angebracht wird. Dies betrifft 1.9 Mio m^2 innerhalb der nächsten 10 Jahre. Und bei 1.5 Mio m^2 Dacherneuerungen, bei denen im Referenzfall eine Wärmedämmung angebracht wird, wird diese von 14 cm auf 20 cm verstärkt.

In der Tabelle 6.4-1 sind die im Referenzfall realisierten Heizwärmebedarfsreduktionen sowie Grenzkosten und die zu diesen Kosten realisierbaren Heizwärmebedarfsreduktionen auf der Ebene des Gebäudes zusammengestellt.

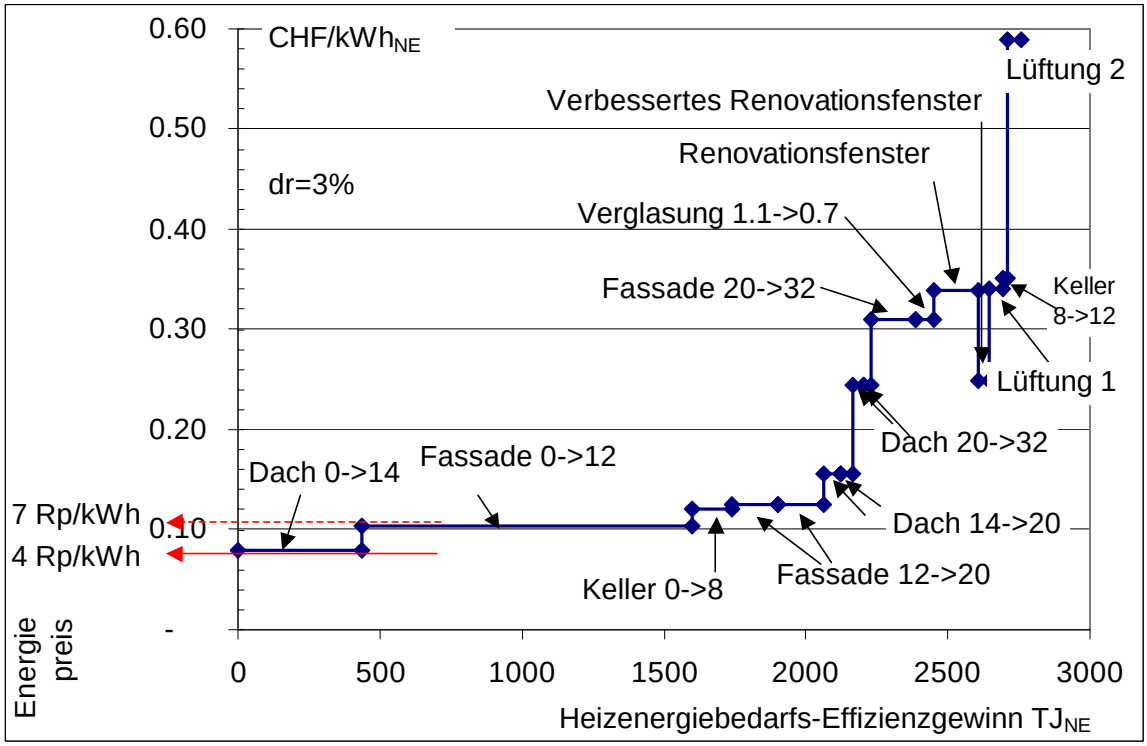
Ein beachtliches Potential an Heizwärmebedarfsreduktion liegt im Bereich von Brutto-Grenzkosten bis 11 Rp/kWh_{NE}. Um weitere 9% zusätzlich zur Referenzentwicklung könnte der Heizwärmebedarf des Gesamtbestandes der EFH der Periode 1900 bis 1960 zu diesen Kosten reduziert werden. Mit Brutto-Kosten zwischen 9% bis 13 Rp/kWh_{NE} könnten weitere 3% des Heizwärmebedarfs reduziert werden. Von diesen Kostenangaben sind die eingesparten Kosten auf Seite Wärmeerzeugung und –verteilung abzuziehen. Langfristig sind dies 2 bis 5 Rp/kWh für die Anlagen und für die Energiekosten 4 bis 6 Rp/kWh bei Energiepreisen der vergangenen Jahre und 8 bis 12 Rp/kWh für künftige Energiepreise.

Anschliessend reduziert sich das jeweilige Reduktionspotential der weitergehenden Massnahmen und die Grenzkosten beginnen markant anzusteigen.

Tabelle 6.4-1 Übersicht über die Annahmen und Berechnungsresultate zur Grenzkosten

Bauteil	Referenz	Weitergehende Erneuerung	Beschreibung	Anteil 2001-2010	U-Wert W/m²K Von	U-Wert W/m²K nach	delta Qh	Fr/kWh
Wand	RW0		Instandsetzung der Fassade, Putzausbesserung	0.15	1.0	1.0		
		RW0->EW1	Wärmedämmung 12 cm, Leibung 2 cm mit Kompaktfassade.	0.15	1.0	0.3	150	0.10
		EW1->EW2	Wärmedämmung 20 cm statt 12 cm, Leibung 4 cm	0.15	0.3	0.2	21	0.13
	RW1		Wärmedämmung 12 cm mit Kompaktfassade oder hinterlüfteter Fassade	0.15	1.0	0.3	150	
		RW1->EW2	Wärmedämmung 20 cm statt 12 cm, Leibung 4 cm	0.15	0.3	0.2	21	0.13
		RW2->EW3	Wärmedämmung 30 cm statt 20 cm, Leibung 4 cm	0.15	0.2	0.15	10	0.31
Fenster	RFe0		Evtl. Rahmenanstrich / keine Massnahme		2.3	2.3		
		RFe0->EFe1	Fensterersatz oder Renovationsfenster, Glas 1.1, Rahmen konventionell	0.1	2.3	1.5	30	0.34
		EFe1->EFe2	Verbesserte Verglasung, Glas 0.7, verbesserter KS-Rahmen	0.1	1.5	1.15	8	0.25
	RFe1		Fensterersatz oder Renovationsfenster, Glas 1.1, Rahmen konventionell	0.15	2.3	1.5	30	
		RFe1->EFe1	Verbesserte Verglasung, Glas 0.7	0.15	1.5	1.15	8	0.31
		EFe1->EFe2	Verbesserte Verglasung, Glas 0.5, verbesserte Rahmen	0.15	1.15	0.9	0	N.A.
Dach	RD0		Reparatur Eindeckung /Erneuerung des Unterdachs	0.10	0.85	0.85		
		RD0->ED1	Wärmedämmung des Dachs von oben, 14 cm auf die Sparren	0.10	0.85	0.27	85	0.08
		ED1->ED2	Wärmedämmung des Dachs von oben, 20 cm statt 14 cm	0.10	0.27	0.19	11	0.16
		ED2->ED3	Wärmedämmung des Dachs von oben, 32 cm statt 20 cm	0.10	0.19	0.14	7	0.24
	RD1		Wärmedämmung des Dachs von oben, 14 cm auf die Sparren	0.08	0.85	0.27	85	
		RD0->ED2	Wärmedämmung des Dachs von oben, 20 cm statt 14 cm	0.08	0.27	0.19	11	0.16
		ED2->ED3	Wärmedämmung des Dachs von oben, 32 cm statt 20 cm	0.08	0.19	0.14	7	0.24
Kellerdecke		EK0->EK1	Wärmedämmung 8 cm statt 0 cm	0.10	0.8	0.29	27	0.12
			Wärmedämmung 12 cm statt 8 cm	0.10	0.29	0.24	3	0.35
Lüftung			Nach Einbau von dichten Fenstern	0.02			93	0.72

Mit den Anteilen der Referenzerneuerungen bzw. der weitergehenden Erneuerungen gemäss Grenzkostenansatz Tabelle 6.4-1 sowie mit den Energiebezugsflächen gemäss Tabelle 5.2-2 lässt sich anschliessend die gesamtschweizerische Grenzkostenkurve erstellen, siehe Abbildung 6.4-1. Bzgl. der Anteile wird zunächst angenommen, dass diese für die weitergehenden Massnahmen gleich sind wie für die Anteile der Referenzerneuerung.



Quelle Berechnungen CEPE

Abbildung 6.4-1 Aggregierte Grenzkostenkurve des Gebäudebestandes der EFH der Bauperiode von 1900-1960 für die Periode 2001 bis 2010

6.4.2 Bauperiode 1961 - 1975

Vom Grundsatz und Charakter her dürfte die Grenzkostenkurve für diese Bauperiode ähnlich verlaufen wie diejenige der Periode 1900 bis 1960, zumindest bei den EFH. Die Ausgangslage (Flächen-U-Werte) ist ähnlich. Einzig die Wärmebrücken, die in dieser Periode häufig sind, schmälern das Effizienzpotential. Angenommen wird dabei, dass zwischen 2001 und 2010 vorwiegend diejenigen Fassaden energetisch erneuert werden, welche bis zu Beginn der Periode noch keine energetische Erneuerung erfahren haben.

Die Berechnung der Grenzkostenkurven erfolgt nach Drucklegung dieses Berichts; die Resultate können auf Anfrage beim CEPE erhalten werden.

6.4.3 Bauperiode 1976-1985

Aufgrund ihres Alters kommen die Gebäude der Bauperiode 1976-1985 bzgl. der Gebäudehülle in die erste Erneuerungsphase (mit Ausnahme der Flachdächer und teilweise der Fenster, welche schon früher erneuert wurden oder werden mussten).

Möglicherweise hat hier die energetische Erneuerung z.B. der Fassaden als Referenzfall eine geringere Bedeutung als für die vorangegangenen Bauperioden. Es ist vielmehr anzunehmen, dass, um im Fassadenbereich zu bleiben, häufig die Putzerneuerung bzw. der Fassadenanstrich den Referenzfall bildet.

Gemäss Abbildung 4.3-61 im Kapitel 4.3.11 (Zusammenfassung der Grenzkosten für die verschiedenen Investitionsmassnahmen) ist das Heizwärmereduktionspotential der energetischen Erneuerungen gegenüber den Instandsetzungen geringer, weil in der Bauperiode 1975-1985 von einem besseren energetischen Ist-Zustand, einem tieferen U-Wert, ausgegangen werden muss. Und auch die Grenzkosten sind entsprechend höher. Die Grenzkosten gegenüber der Referenz „Energetische Erneuerung“ sind in der selben Grössenordnung.

Die Berechnung der Grenzkostenkurven erfolgt nach Drucklegung dieses Berichts; die Resultate können auf Anfrage beim CEPE erhalten werden

6.5 Erneuerung des Gebäudebestandes mit dynamisierten Kosten und technischen Kennwerten am Beispiel der Einfamilienhäuser der Bauperiode 1900 - 1960

Ein Teil der Einfamilienhäuser der Bauperiode wird wohl erst in zehn Jahren erneuert werden, typischerweise bei einem Generationenwechsel der Bewohnerinnen und Bewohner. Damit sind die dynamisierten Kosten anzuwenden. Die entsprechende Grenzkostenkurve ist in Abbildung 6.5-1 dargestellt (gestrichelte Kurve).

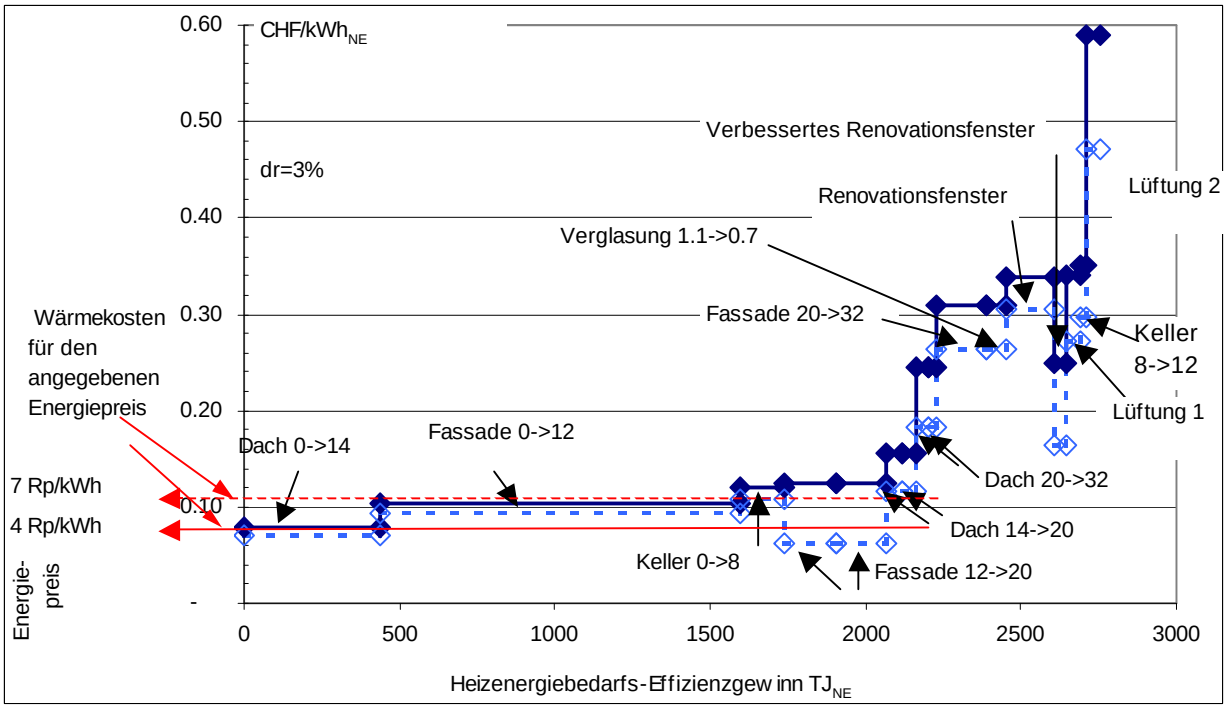


Abbildung 6.5-1 Grenzkostenkurve der EFH mit Bauperiode 1900 – 1960, mit heutigem Kostenstand (durchgezogene Treppenkurve) sowie mit dynamisierten Kosten (gestrichelte Treppenkurve)

Auffallend ist, wie unterschiedlich die Grenzkosten der verschiedenen Massnahmen aufgrund der Dynamisierung reagieren. Dies hat zum einen mit der unterschiedlichen Dynamisierung in den einzelnen Bereichen zu tun, zum anderen wiederum mit Zahlenarithmetik, siehe dazu auch die Erläuterungen beim Neubau. Folgende Unterscheidungen können gemacht werden:

- Eine geringe Dynamik ist bei denjenigen Grenzkostenelementen festzustellen, welche vom Typ „Vollkosten“ sind. Darunter fällt die Fassadendämmung, wenn der Referenzfall keine Dämmung beinhaltet oder den Einbau einer Lüftungsanlage.
- Eine hohe Dynamik weisen die Grenzkostenelemente auf, welche auf Differenzkosten zwischen einer sich stark dynamisch entwickelnden und einer sich weniger dynamisch entwickelnden Effizienzinvestition basieren, z.B. Hocheffizienzfenster und Referenzfenster oder hohe Dämmstärke vs. heute übliche Dämmstärke.

Im dynamisierten Ansatz fallen nebst dem bereits grossen Potential weitere rund 500 TJ Effizienzgewinn in den Bereich der Wirtschaftlichkeit, dies selbst dann, wenn keine starke Energiepreissteigerung angenommen wird. Das entspricht weiteren 2% des gesamten Heizwärmebedarfs dieser Gebäudegruppe bzw. 20% des realisierbaren Erneuerungspotentials.

7 Schlussfolgerungen, Empfehlungen und Grenzen der Untersuchung

Angesichts der Fülle des empirischen Materials und darauf aufbauender Ergebnisse dieser Arbeit sind die Schlussfolgerungen zahlreich; sie sind deshalb an dieser Stelle auch selektiv wiedergegeben und auf wesentliche Aussagen beschränkt (vgl. Kap. 7.1). Weitere Fazits - nicht zuletzt für Baufachleute und Planende – sind in den Kapiteln 2 und 4.1 (Energiepreise, Methode der Wirtschaftlichkeitsrechnung), 4.2 (energetische, bauphysikalische Aspekte), 4.3 (Kosten und Nutzen des Wärmeschutzes auf Bauteilebene), 4.4 und 6 (Kosten- und Nutzen von verschiedenen Neubaukonzepten) zu finden. Die sich anschliessenden Empfehlungen (vgl. Kap. 7.2) werden im wesentlichen aus den Schlussfolgerungen abgeleitet und wurden teilweise mit Vertretern der Bau- und Wohnungswirtschaft als wichtige Akteure und Zielgruppen diskutiert; sie sind seitens der Autoren auch als Anregung für Massnahmen und Geschäftsstrategien der betroffenen Wirtschaftszweige gedacht (vgl. Kap. 7.2).

Die Schlussfolgerungen und Empfehlungen stehen im Kontext der hier möglichen Erhebungen und Analysen sowie auch mancher Annahmen infolge fehlender weitergehender Informationen, z.B. über zukünftige Entwicklungen in Technik, Wirtschaft und Politik. Daher erschien es den Autoren notwendig, auf manche als wichtig erscheinende Grenzen und Unsicherheiten dieser Analyse hinzuweisen (vgl. Kap.7.3)

7.1 Schlussfolgerungen

Die Schlussfolgerungen sind im folgenden in technische, betriebs- und wohnungswirtschaftliche sowie energiewirtschaftliche und methodische Aspekte strukturiert; da es zwischen den genannten Bereichen erhebliche Interdependenzen gibt, sind diese auch jeweils in einem der vier Bereiche angesprochen.

7.1.1 Energietechnische Aspekte

Rückblick: *25 Jahre grosse technische Fortschritte bei real konstanten Kosten und Brennstoffpreisen*

(1) Der technische Fortschritt der Wärmeschutztechnologien war in den letzten 30 Jahren ganz erheblich (vgl. Kap.2, 3, und 4.5), insbesondere

- bei den *Fenstersystemen* um durchschnittlich mehr als 3 % jährlich vor allem infolge Beschichtungstechnik, Dreifachverglasung, Edelgasbefüllung, teilweise auch infolge Fensterrahmenkonstruktion und Wärmedämmung des Fensterrahmens,
- bei den *Dämm-Massnahmen* durch dickere Dämmstärken (beginnend von 4 bis 6 cm Mitte der 1970er Jahre bis heute zwischen 12 und 30 cm) und bessere Wärmedämmeigenschaften (durch verbesserte Polystyrole, die Hochleistungskerndämmung und Vakuumelemente, wobei letztere sich in der Demonstrationsphase befinden).

Diese technischen Fortschritte sind in der politischen Diskussion kaum wahrgenommen, zumal da die realen Brennstoffpreise von heute denen Mitte der 1970er Jahre gleichen. Die technischen Fortschritte bei Fenstern und Wärmedämmung konnten - nach einer Reife- und Lernzeit von jeweils etwa 10 bis 15 Jahren - bei leicht sinkenden realen Kosten infolge von Lern- und Skaleneffekten realisiert werden. Beispielsweise wurde die Verarbeitungszeit zur Herstellung von Fenstern in den vergangenen 20 Jahren um zwei Drittel verringert. Das jährliche Produktionsvolumen von Fenstersystemen ist seit drei Jahrzehnten relativ konstant, während die Produktion von Wärmedämm-Material wegen

der zunehmenden Dämmstärken kontinuierlich gestiegen ist. Die Werte der Degressionskoeffizienten bei Produktionsverdopplung liegen im - auch ansonsten - häufig beobachteten Bereich zwischen 0.8 und 0.9, je nach Stand der einzelnen Investitionsmassnahmen in ihrem Innovationszyklus.

(2) Dieser schnelle energietechnische Fortschritt führte deshalb zu Neubaustandards und zu einer Erneuerungspraxis sowie zu einer *energiewirtschaftlichen Referenz-Entwicklung aus heutiger Sicht, die man Anfang der 1980er Jahre als eine technische Super-Sparentwicklung bezeichnet hätte* (typische Werte heute: 12 bis 14 cm Dämmstärke bei Fassaden und Dächern, Fensterglas mit einem U-Wert von 1.1 und Fenstersysteme mit einem U-Wert von 1.4 W/m^2K; vgl. Kap.3).

(3) Als verursachend für diese beeindruckende Entwicklung sind verschiedene zusammenspielende Faktoren zu nennen:

- Die beiden Ölpreissteigerungen in den Jahren 1973 und 1980 waren ein zentraler Anlass.
- Normen und Gesetzgebungen zur Energienutzung in Gebäuden sowie Aktivitäten und Empfehlungen seitens des Bundes, der Kantone und verschiedenere Verbände, insbesondere dem SIA im Bereich der Gebäudehülle im Gefolge der Brennstoffpreissteigerungen.
- Der Antrieb der bauleistungserbringenden Unternehmen und Planer, zum einen die Energieeffizienz ihrer Produkte und Dienstleistungen zu verbessern (sei es mit dem Ziel des Wettbewerbsvorteils oder aus den gleichen oben erwähnten Motiven wie die Bauträgerschaften, ihren Kunden) und zum anderen, die Produktivität kontinuierlich zu erhöhen durch bessere Organisation der Arbeitsabläufe, Investitionen in effizientere Produktionsmittel, Innovationen etc.
- Teilweise mag zu dieser Entwicklung auch das geweckte Bewusstsein der Bauträgerschaften (private Bauherren von Einfamilienhäusern, Investierende in den Mehrfamilienhausbau) für ökologische Zusammenhänge (Luftschadstoffe, Klima, Ressourcenknappheit) beigetragen haben .

Wärmeschutzinvestitionen und Lüftungssysteme: heutige Praxis und Ausblick auf Morgen

(4) Beim *Bau neuer Wohngebäude* lässt sich ein erhöhter Wärmeschutz mit einem Heizwärmebedarf des Minergiestandards und darunter relativ kostengünstig durch bauliche und konstruktive Massnahmen erreichen, d.h. durch richtige Orientierung und Öffnung des Gebäudes zur solaren Energienutzung, durch eine kompakte Bauweise (ein günstiges Aussenflächen/Volumen-Verhältnis) und eine angepasste Haustechnik. Diese konstruktiven Möglichkeiten beim Neubau werden häufig noch zu wenig genutzt, gemäss vorliegender Erhebungen auch recht unterschiedlich in einzelnen Kantonen.

(5) Statistische Analysen zum *Heizwärmebedarf neuer Wohnbauten und seiner Abhängigkeit von den Baukosten* zeigen eine geringe Steigerung der Kosten im Bereich der Bedarfswerte zwischen 450 und 100 MJ/m^2.a. Sie zeigen auch einen wesentlich stärkeren Einfluss anderer Faktoren auf die Baukosten, wie z.B. Komfortausstattung, Heizsystem und Bauform. Methodisches Fazit: Um hier genauere Angaben zum kausalen Zusammenhang zwischen Heizwärmebedarf und Baukosten aus einer gesamtsystemaren Sicht machen zu können, müsste das Sample für derartige Analysen entsprechende Variablen aufweisen und sehr gross sein. Da derartig grosse Sample und insbesondere die Daten zu einzelnen Merkmalen wie z.B. zu Ausstattung, Ausbau etc. für eine statistische Analyse nicht zur Verfügung stehen, musste in dieser Arbeit mit

Einzelanalysen gearbeitet werden. Inhaltlich stützen die Daten und die Analysen die These, dass die einzelanalytisch festgestellten Mehrkosten nur so hoch sind, als dass sie weitgehend durch die Reduktion anderer Kostenkomponenten (Ausstattung, Materialwahl etc.) und/oder kosteneffizientes Planen und Bauen kompensiert werden können.

(6) Wenngleich die *Wärmedämm-Investitionen an Fassaden mit Wandstärken von 12 bis 14 cm* heute wesentlich fortschrittlicher als vor 10 oder 20 Jahren und auch bei Erneuerungen als kosteneffizient angesichts der langen Nutzungszeiten (und auch angesichts der in dieser Periode zu erwartenden Brennstoffpreissteigerungen) zu bewerten sind, so werden diese bei den Renovierungszyklen von Fassaden und Dächern unzureichend durchgeführt: der Anteil der energieeffizienten Erneuerungen an allen Erneuerungen beträgt je nach Bauteil ca. 25 bis 45 %; d.h., es handelt sich aus wohnungswirtschaftlicher und klimapolitischer Sicht um einen *typischen Fall verpasster Gelegenheiten ("lost opportunities")*.

(7) Erfreulich ist, dass heute in relativ vielen Fällen der *Dacherneuerung* (je nach Besitzverhältnissen, Kantonen und Baujahren sowie Haustypen) - im Durchschnitt etwa gut die Hälfte - auch eine Wärmedämmung vorgenommen wird; allerdings beträgt die Dämmstärke *im Durchschnitt nur 14 cm*.

(8) Ein *Grossteil der Wärmebrücken "verschwindet" bei der energetischen Erneuerung* der Flächen oder verursacht - entgegen der gängigen Meinung - nicht oder kaum höhere Kosten, besonders wenn die Gebäudehülle integral und zeitgleich erneuert wird. Nicht sanierbare Wärmebrücken reduzieren jedoch das insgesamt erschliessbare Energieeinsparpotenzial.

(9) Die Verminderung des Heizwärmebedarfs durch den *Einsatz von Lüftungsanlagen* ist wegen der Vielfalt der technischen Lösungen und insbesondere des durch Lüftungsverhalten unklaren Referenzfalles nur mit einem Unschärfebereich zu bestimmen; die Minderung des Heizwärmebedarfs dürfte im vorsichtigen Fall mindestens 45 bis 120 MJ/m² a betragen, d.h. rd. 140.- CHF bis 370.- CHF je Wohnung (160 m² als hier benutzter Wert) und Jahr. Bei zuvor sorglosen Lüftungsgewohnheiten kann der Nutzen auch noch höher ausfallen (vgl. Kap. 4.2.6 und 4.3.11).

7.1.2 Betriebs- und wohnungswirtschaftliche sowie planerische/architektonische Aspekte

Betriebswirtschaftliche Bewertung

(10) Auf der betriebswirtschaftlichen Ebene wurden die Kosten für Wärmeschutz-Massnahmen jeweils im Vergleich zu einer *Referenz-Investition* ermittelt, d.h., sie sind beim Neubau als Zusatzkosten gegenüber der Baunorm SIA 380/1 bzw. gegenüber der heutigen Neubauweise zu verstehen; desgleichen bei der Erneuerung einerseits gegenüber der reinen Instandsetzung (z.B. Putzerneuerung/Fassadenanstrich ohne Wärmedämmung) und andererseits gegenüber einer energetischen Referenzerneuerung; sie werden in Kap.4.3 auch als "Grenzkosten auf Durchschnittskostenbasis" bezeichnet.

Die Ergebnisse für die *Bruttogrenzkosten* (d.h. *ohne Abzug der möglichen Kosteneinsparung auf Seiten der Wärmeerzeugung und -verteilung sowie ohne Berücksichtigung der Co-Benefits*) liegen bei:

- ca. 7 bis 15 Rp je eingesparte kWh_{NE} für *Wärmedämm-Massnahmen an Fassaden* mit Dämmstärken zwischen 14 und 16 cm,

- ca. 7 bis 20 Rp je eingesparte kWh_{NE} bei *neuen effizienteren Fenstersystemen* je nach Verglasung, Verschattungssituation und Orientierung. Besteht die architektonische Möglichkeit, grösserflächige statt kleinflächige Fenster einzusetzen, kann sogar eine Kostenreduktion bei gleichzeitig geringerem Energiebedarf erreicht werden.
- für *neue Wohngebäude* mit einem Heizwärmebedarf von 120 - 170 MJ/m^2a bei etwa 8 bis 22 Rp/kWh_{NE}.

Damit liegen die Zusatzkosten heute üblicher Wärmeschutz-Investitionen am unteren Spektrum in der Höhe der heutigen Wärmekosten (ca. 8 bis 10 Rp/kWh) bzw. übersteigen sie am oberen Spektrum um das Doppelte bis das Dreifache (weitergehende Wärmedämmung, Fenster). Da über eine Nutzungszeit von 40 bis 50 Jahren bis zur nächsten Erneuerung gerechnet und von einer Energiepreissteigerung von mindestens 25 % bis zur Zeitperiode 2020 - 2030 ausgegangen werden muss (vgl. Kap.4.1.1), wäre ein *mittlerer Wert von 11 bis 14 Rp/kWh ein angemessener Durchschnittspreis für die eingesparten Wärmemengen heutiger Wärmeschutz-Investitionen*. Dieser energetische Nutzen ist allerdings in den meisten Fällen nur ein Teil derjenigen Nutzen, die mit Wärmeschutz- und Lüftungsanlagen-Investitionen verbunden sind (vgl. Ziff. 13).

(11) *Bei Dämmstärken grösser 16 cm* beobachtet man *bei Fassaden heute eine überproportionale Preissteigerung* der meisten befragten Unternehmen. Diese kostenseitige Barriere für rentable Investments in grössere Dämmstärken ist nur zu einem Teil vom zusätzlichen Material- und Arbeitseinsatz her zu erklären. Hinzu kommen nach Einschätzung der Autoren *Lern-, Angst- und Pioniermarkt-Aufschläge* der ausführenden Firmen; diese könnten auf geeignete Weise relativ zügig vermindert werden (z.B. durch Information in Baufachzeitschriften und Bausparkassenjournalen, berufliche Fortbildung). Diese hohen Kostenunterschiede der Investitionskosten scheinen auch ein Grund zu sein, dass es in der Praxis zu erheblichen Differenzen in der Einschätzung der Rentabilität derartiger Wärmedämminvestitionen mit sehr dicken Dämmstärken kommt.

Die *Grenzkosten reagieren sehr sensitiv auf derartige Unterschiede* der Investitionskosten-Angaben; so liegen in einem durchgerechneten Beispiel die Grenzkosten, berechnet mit den Kostenangaben des besten Unternehmens, um rund die Hälfte niedriger als jene Grenzkosten, die aufgrund des Mittelwertes der Kostenangaben der befragten Unternehmen ermittelt wurden.

(12) Das *knappe betriebswirtschaftliche Ergebnis* der Wärmeschutz-Investitionen deutet bereits *das Dilemma ihrer heutigen (oberflächlichen) ökonomischen Bewertung* in der Baupraxis an: denn häufig nicht in diese Bewertung mit einbezogen werden folgende reale Veränderungen, die durch die Investition selbst induziert werden, oder absehbare Veränderungen der Rahmenbedingungen während der Nutzungszeit der Investitionen:

- *zukünftige Wertsteigerungen des Wohngebäudes,* wenn das entsprechende Wohngebäude infolge der Erneuerung ein *geringeres Leerstandsrisiko und geringere Heizkosten bzw. ein höheres Komfortniveau für den Eigennutzer (vgl. Ziff. 40) aufweist*
- *indirekte Nebennutzen (Co-benefits) für den Eigentümer und/oder den Nutzer des* Wohngebäudes (vgl. Ziff. 13);
- *zukünftige Energiepreissteigerungen*, die nicht nur aus einer Verknappung kostengünstig zu fördernder Erdöl- oder Erdgasreserven und einem Produktionsmaximum der globalen Erdölförderung in den nächsten 20 bis 30 Jahren resultieren werden, sondern auch aus einer ab 2005 denkbaren CO_2-Abgabe bis maximal 4. bis 5. Rp/kWh Erdgas bzw. Heizöl gemäss des CO_2-Gesetzes (maximal 210.-CHF/ t CO_2) und eventuell

weiteren treibhausgasbedingten Preisaufschlägen durch den CO_2-Zertifikatehandel nach 2008 im Rahmen der ersten Verpflichtungsperiode des Protokolls von Kyoto.

(13) Die *indirekten positiven Nebeneffekte* (geringere möglich werdende Raumtemperatur infolge höherer Oberflächentemperaturen an Innenfenstern und -wänden und geringerem Luftzug, zum Teil Lärmminderung durch Fenster, Rolladen und Dachwärmedämmung, geringeres Krankheitsrisiko infolge besserer Innenraumluft durch Lüftungsanlagen, angenehmere Innenraumtemperaturen bei sommerlichen Hitzeperioden, Diebstahlsicherung durch Rolläden, bessere Vermietbarkeit und Bonität, Wertsteigerung des Wohngebäudes) sind zum Teil schwer und zum Teil nur mit weiterer Forschung zu quantifizieren (sie treffen auch nicht überall zu), zum Teil schwer oder nur in Schwankungsbreiten zu monetarisieren und deshalb nicht einfach mit den Zusatzkosten verrechenbar. Sie schlagen sich als unterschiedliche Gebäudemerkmale allerdings bereits heute in unterschiedlichen Miethöhen nieder. Diese indirekten Nutzen können nach überschlägigen Schätzungen - je nach spezieller Fallkonfiguration - *10 bis 50 % der zusätzlichen Wärmedämmkosten kompensieren. Sie sind deshalb in den meisten Investitionsfällen nicht vernachlässigbar* und müssten deshalb in den Wirtschaftlichkeitsberechnungen mit einbezogen werden (vgl. Kap. 4.6).[1]

(14) Bei der Wahl der Dämmstärke oder der Qualität des Fenstersystems muss der Investor berücksichtigen, dass *nachträgliche, d.h. ausserhalb des Re-Investitionszyklus erfolgende Zusatzinvestitionen* (z. B. wegen Energiepreissteigerungen infolge einer eventuellen CO_2-Abgabe gemäss CO_2-Gesetz ab 2005 oder des CO_2-Zertifikatehandels ab 2008) *wesentlich höhere Grenzkosten verursachen werden (ca. Faktor 2 bis 5)*. Die Autoren weisen darauf hin, dass aus gesamtwirtschaftlicher und klimapolitischer Sicht es sich bei unzureichender Nutzung der wirtschaftlichen Potenziale des Wärmeschutzes im Re-Investitionszyklus um hohe Risiken (sunk cost) handelt.

Wohnungs- und bauwirtschaftliche Aspekte

(15) Die *schnelle technische Entwicklung und Kostensenkung bzw. -Stabilität* (in realen Preisen) der Wärmeschutzinvestitionen in den letzten 20 bis 30 Jahren sind auf erhebliche Lern- und Skaleneffekte in den letzten 30 Jahren zurückzuführen; heute absehbare oder derzeit bereits realisierte weitere technische Verbesserungen der Wärmeschutztechnik (z.B. verbessertes Polystyrol, Hochleistungskerndämmung, Vakuumisolation, Dämmung und Edelgasnutzung und selektivere Beschichtungen in Fenstersystemen sowie Einsatz von verbesserten Abstandshaltern) werden derzeit noch in sehr kleinen Mengen produziert und installiert. Mit zunehmender Anwendung und grösseren Stückzahlen werden auch für diese Technologien - ähnlich wie in der Vergangenheit - erhebliche Kostenreduktionen in den nächsten 20 bis 30 Jahren erwartet (vgl. Kap.4.5). Diese *Kostendynamik durch Lern- und Skaleneffekte* mit Kostendegressionskoeffizienten zwischen 0.8 und 0.9 (*10 bis 20 % Kostenreduktion bei jeder Verdopplung der kumulierten Produktion bzw. Installationsfälle*) wurde bis heute weder für die Vergangenheit richtig wahrgenommen und kommuniziert, noch wird sie bei langfristigen Strategieüberlegungen der Investoren oder der Energiepolitik bewusst ins Kalkül und als *valables Argument für zeitlich begrenzte Innovationszuschüsse* herangezogen.

[1] Eine entsprechende Analyse wurde vom BFE/EWG im April 2002 vergeben.

(16) Verstärkte Wärmedämmung bei Mietwohngebäuden - sei es im Neubau oder bei Erneuerungen - erhöhen den *Gebäudewert* nicht nur um die zusätzlichen Investitionsaufwendungen, sondern auch um eine Prämie des *verminderten Risikos von Leerständen sowie höherer akzeptierter Bruttomieten* (= Warmmiete). Bessere langfristige Vermietbarkeit führt auch zu *verbesserter Bonität des Gebäudebesitzers* beim Rating der Hausbank (gemäss Basler Abkommen II) und damit zu geringeren Kapitalkosten (in Höhe bis zu einem Prozentpunkt der Zinsen). Diese Effekte auf den cash flow – einerseits geringere Kapitalkosten und andererseits erhöhte Sicherheit der Mieteinkommen – müssen Wohnungswirtschaft und einzelne Hausbesitzer nach Auffassung der Autoren mit in ihre Wirtschaftlichkeitsberechnungen einbeziehen, wenn sie keine Fehleinschätzung der Investitionen forcierter Wärmedämmung machen wollen. Entsprechende Informationen in speziellen Kommunikationskanälen der Verbände der Wohungswirtschaft und Hauseigentümer sowie berufliche Fortbildung erscheinen geeignete Massnahmen

Planerische und architektonische Aspekte

(17) Mit dem vorliegenden Bericht erhält der Planer und die Architektin eine Grundlage und Datenbasis, die anregt, *Neubauten und Gebäudeerneuerungen energie- und kosteneffizient zu optimieren*; im Neubau wird das architektonische Spektrum des kosten- und energieeffizienten Bauens aufgezeigt, insbesondere auch bzgl. der neuen Möglichkeiten im Fensterbereich *(hohe g-Werte) und im Holzsystembau*.

(18) Indem nicht nur die Mittelwerte, sondern die ganze Spannbreite und damit auch die *Kosten von best practice* (d.h. ohne Preisaufschläge für Lern-, Angst- und Pioniermarkt-Effekte für avancierte technische Lösungen) dargestellt wird, erhalten die *Bauleistungsbesteller sowie die -lieferanten eine Informationsbasis, um energieeffiziente Lösungen möglichst kostengünstig zu realisieren.*

(19) Bei der energetischen Erneuerung der Gebäudehülle sind *architektonische Ansprüche* (die durchaus berechtigt gestellt werden, nota bene) nur in wenigen Fällen ein Hindernis. Oft ist es im Gegenteil so, dass *die Gebäude- bzw. Fassadenerneuerung neue architektonische Gestaltungselemente und -möglichkeiten eröffnet*. Selbst bei denkmalgeschützten Gebäuden bestehen architektonische und bauliche Möglichkeiten, den Heizwärmebedarf der Gebäude zu reduzieren, wie einige realisierte Demonstrationsobjekte zeigen.

(20) Gegen eine *energetische Erneuerung* und für einen *Abriss bestehender Wohngebäude* sprechen oft nicht die Bautechnik oder Kosten der Gebäudehüllenerneuerung, sondern die Kosten der Erneuerung im Gebäudeinnern, um den zeitgemässen Ansprüchen nach Grundrissaufteilung etc. gerecht zu werden. Welche der beiden Varianten, ob die Erneuerung der Gebäude oder der Ersatzneubau, vorzuziehen ist, muss im Einzelfall und unter Einbezug verschiedenster Faktoren (wirtschaftliche, ökologische, soziale und gesellschaftliche) entschieden werden. Beide Varianten bieten die Möglichkeit der Erneuerung und Wiederbelebung von Siedlungsstrukturen und der Schaffung von lebenswerten Wohnsituationen[1].

[1] Mehr zum Thema Erneuerung bzw. Abriss und Ersatzneubau ist im EWG/BFE Projekt "Neubauen vs Sanieren", erarbeitet von Econcept, Zürich, nachzulesen.

7.1.3 Energiewirtschaftliche und klimapolitische Schlussfolgerungen

(21) Die *wirtschaftlichen Energieeffizienzpotenziale* (zu heutigen Energiepreisen) werden derzeit *bei Neubauten* in der Regel realisiert; knapp 10 % der Neubauten erreichen Minergiestandard. Dieser Standard ist angesichts des in den kommenden Jahrzehnten zu erwartenden Anstiegs der Brennstoffpreise und der begleitenden Nutzen dieses Wärmedämm-Standards als wirtschaftlich effizient anzusehen.

(22) Bei *Gebäudesanierungen* dagegen werden derzeit die *betriebswirtschaftlich rentablen Wärmeschutz-Potenziale* (selbst jene rentablen Potenziale unter Auschluss der begleitenden Nutzen) in einem hohen Umfang *nicht oder nur unzureichend genutzt*. Am ehesten werden mögliche *Wärmeschutz-Investitionen bei der Dacherneuerung sowie beim Fensteraustausch* getätigt (vgl. Kap.3.2). Die Gründe zu diesen verpassten Chancen wurden zwar von den Autoren nicht erhoben, sind aber hinreichend bekannt durch mehrere Untersuchungen in der Schweiz und im Ausland: fehlende Kenntnisse über die bestehenden Potenziale bei den Gebäudeeigentümern, Architekten und auch bauausführenden Unternehmen; fehlende Investitionsmittel und andere Finanzierungsprobleme, die übliche Praxis der Nettomieten, die Mietgesetzgebung mit beschränkter Überwälzbarkeit der Zusatzkosten trotz hoher Nutzen für die Mieter, fehlende Kenntnisse über Lebenszyklus-Kostenanalysen bei Bauherren, Architekten und Planern und der häufige Wettbewerb der bauausführdenden Firmen über die reinen Investitionskosten führen zu mangelnder Transparenz der Kosten und Nutzen sowie zu Fehlentscheidungen, die erst bei der nächsten Erneuerungsphase in 25 bis 40 Jahren korrigiert werden können ("lost opportunities"). *Faktisch fehlen* nach Auffassung der Autoren V*orschriften für den Fall der Fassaden-, Dach- und Fenstersanierung zur Offertenerstellung, zum Einbezug von begleitenden Nutzen und zum Bau selbst sowie eine Anpassung der Mietgesetzgebung an die technischen und wirtschaftlichen Gegebenheiten und Chancen*, dies nicht nur in der Schweiz, sondern weltweit.

(23) Die Ergebnisse zu den *Grenzkostenkurven* decken wegen der Vielzahl möglicher Fälle nur exemplarisch einen Teil der möglichen Fälle ab. Die Grenzkosten von *Lüftungsanlagen* sind zwar relativ hoch, vergleichbar den reinen Grenzkosten der Wärmedämmung von 20 cm auf 30 cm, aber im Unterschied dazu erschliesst die Lüftung ein grosses energiewirtschaftliches Potenzial und in erheblichem Umfang durch die Verbesserung der Luftqualität in den Wohnräumen direkte Nutzen aus privater und gesamt- sowie wohlfahrtsökonomischer Sicht (insbesondere Vermeidung von Erkrankungen der Atmungswege und von Allergien sensibler Personen).

(24) Unter den o.g. Vorbehalten weiterer Analysen zu den *Kostenschätzungen (Kostendegression, Einbezug der Co-Benefits*) sind auch die ermittelten Grenzkostenkurven für energiesystemanalytische Arbeiten zu verstehen (vgl. Kap. 6.1). Allerdings sind diese Aspekte nach Vorliegen dieser Informationsbasis relativ einfach zu berücksichtigen, da die in den Abbildungen dargestellten anlegbaren Wärmepreise bzw. die auf der Ordinate ablesbaren Kosten um jene Nutzen ergänzt werden können, die monetarisiert sind. Zieht man diese Bewertungsdimension *begleitender Nutzen* mit ein, fällt ein relativ grosses zusätzliches Energieeffizienzpotenzial in den Bereich wirtschaftlich positiver Bewertung. Beispielsweise erhöht sich das Potenzial für die gewählten Investitionsoptionen im Bereich der MFH-Neubauten an lärmigen Standorten um 230 bis 400 TJ/a oder 4 % bis 8 % des Energiebedarfs der Neubauten einer Zehnjahresperiode. Bei der *Gebäudeerneuerung* könnten die Co-Benefits eine noch *markantere Verschiebung der Wirtschaftlichkeit* ergeben, d.h., der Minergie-Standard für bestehende Gebäude ist aus gesamtwirtschaftlicher Sicht angesichts der langen Erneuerungszyklen von 30 bis 50

Jahren nach Ansicht der Autoren auf seine Optimalität bei den heutigen technischen Möglichkeiten von best practice zu überprüfen.

(25) Mit den in diesem Bericht erarbeiteten Grundlagen lassen sich die CO2-Vermeidungskosten im Gebäudebereich berechnen und mit denjenigen in anderen Bereichen vergleichen. Erste Abschätzungen zeigen, dass *im Gebäudebereich ein vergleichsweise grosses Reduktions- bzw. Vermeidungspotenzial zu relativ tiefen Kosten zu erschliessen* ist.

(26) Ein wesentlicher Beitrag des Wohngebäudebereichs zum *Reduktionsziel des CO2-Gesetzes* (für Brennstoffe im Jahre 2010 -15 % gegenüber 1990, und dieser Beitrag muss angesichts des hohen Brennstoffanteils der Wohngebäude am Brennstoffbedarf der Schweiz sein) *ist nur möglich, wenn nicht nur die neue Baunorm SIA 380/1 beim Neubau mehr als erfüllt* wird, sondern *die zur Erneuerung anstehenden Wohngebäude in erheblichem Umfang wärmegedämmt und mit modernster Heiztechnik ausgestattet* werden. Dies gilt insbesondere auch unter dem Aspekt der für die Zukunft erwarteten geringeren Neubautätigkeit (falls nicht ein Umschwung des Investitionsverhaltens der Gebäudeeigentümer von der Erneuerung zum Abriss und Neubau für Gebäude bestimmter Bauperioden erfolgt).

(27) Auf gesamtwirtschaftlicher Ebene ist zu bedenken, dass bei einer Technologieführerschaft von schweizerischen Technologieproduzenten (z.B. bei den Fenstersystemen, Lüftungsanlagen) auch durch die *Exporte in benachbarte Länder die Skaleneffekte der inländischen Produktion verbessert bzw. beschleunigt* werden könnten. Die neue Energiesparverordnung (für Neubauten zwischen 250 und 350 MJ/m^2.a) sowie die aufkommende Passivhausbauweise in Deutschland beispielsweise geben hierzu unmittelbar Gelegenheiten und Ansatzpunkte.

(28) Während die in Kap. 4.2 genannten Kosten- und Nutzenaspekte lediglich aus dem einzelwirtschaftlichen Blickwinkel behandelt sind (und dabei nur auf den energetischen Nutzen beschränkt), sind aus umwelt und klimapolitischer Sicht weitere Kostenaspekte in die ökonomische Bewertung miteinzubeziehen. Nach dem derzeitigen Stand der Erkenntnisse über externe Schäden bei der Produktion, dem Transport und der Umwandlung von fossilen Energieträgern belaufen sich die *externen Kosten ohne Einbezug der klimarelevanten Schäden* auf rd 1 Rp je kWh beim Erdgas und auf 2.0 bis 3.0 Rp/kWh beim Heizöl und *mit Einbezug klimarelvanter Schäden oder Adaptionsmassnahmen* (wie z. B. verstärkter Muren- und Lawinenschutz, verstärkter Hochwasser- und Sturmschutz), auf 5 bis 6 Rp/kWh für Erdgas und auf 7 bis 10 Rp/kWh für Heizöl. Bei der Abschätzung dieser externen Kosten gibt es nicht nur Unsicherheiten bzgl. der Eintrittswahrscheinlichkeit und der Grösse des Schadenumfangs, sondern auch in der ökonomischen Bewertung eines lang in der Zukunft liegenden Schadens (z.B. Zulässigkeit der Deflationierung langfristiger Schäden, monetäre Bewertung von Toten).

(29) Betrachtet man die in Ziffer (12) genannten Energiepreissteigerungen, die in Ziffer (13) genannten positiven Nebeneffekte und in Ziffer (27) angedeuteten Aussenhandels- und Kosteneffekte sowie die in Ziffer (28) angesprochenen externen Effekte, so wird deutlich, dass auch *Wärmedämm-Investitionen mit einem Minergie-Standard* unter Einschluss dieser genannten Kosten *aus gesamtwirtschaftlicher Sicht auch heute schon" rentabel" sein können und zu einem viel grösseren Ausmass zu wirtschaftlichen Nutzen beitragen, als die betriebswirtschaftlichen Analysen selbst unter Einschluss erwarteter Energiepreissteigerungen und begleitender Nutzen (Co-benefits) suggerieren.*

7.1.4 Methodische Anmerkungen

(30) Methodisch und datenseitig gestaltete sich die Bestimmung der Grenzkosten der Wärmeschutz-Investitionen als schwierig und aufwändig. Der grossen Varianz der bestehenden Gebäude, der Vielfalt möglicher Investitionen konnten jedoch durch einen *bauteilorientierten Ansatz* begegnet werden. Mangelnde Kostendaten zwangen zu *Erhebungen bei Unternehmen und Bauökonomen*, welche nicht zuletzt deshalb aufwändig waren, weil eine grosse Vielfalt von Bauteilen, Neubauvarianten und Erneuerungsmöglichkeiten abzudecken war.

(31) *Die Vielfalt der Gebäudetypen, die der Gebäudeeigner und ihrer Investitionsmotive*, die verschiedenen Investitionsoptionen nach Art, Ort und Energieeffizienz machen es allerdings aufwändig, eine für energiewirtschaftliche Analysen geeignete präzise Datenbasis aufzubauen und Zukunftsaussagen zu erarbeiten, ohne in bedeutendem Umfang *vereinfachende Typisierungen* anhand vorhandener Informationen und Indikatoren zu machen.

(32) Die *Vielfalt möglicher Wärmeschutz-Investitionen* erforderte zwar einen partialanalytischen, einzeltechnologischen Ansatz der ökonomischen und energetischen Bewertung und eine Typisierung für eine begrenzte Anzahl von Investitionsfällen nach Gebäudealter, Massnahmenkonfiguration und -tiefe. Die Analysen haben aber gezeigt, dass die *Grenzkosten für die verschiedenen Bereiche der Gebäudehülle (bei gleichem Referenzfall) recht ähnlich verlaufen und energiewirtschaftliche Rechnungen deshalb gegenüber einem grossen Teil der Annahmen relativ robust* sind.

(33) Die Analyse der *Preis- und Kostenentwicklung* der Wärmeschutz-*Investitionen für die vergangenen 20 bis 30 Jahre* ist wegen mangelnder (zugänglicher) Dokumentation aufwändig und *nur für wesentliche Kostenanteile machbar*. Hinzu kommt der Mangel an hinreichend differenzierten Preisindices, um die jeweils nur nominell vorhandenen Kostendaten auf ein einheitliches Basisjahr (hier das Jahr 2000) zu normieren und damit die Ausgangsbasis zur Bestimmung der Degressionskoeffizienten für Erfahrungskurven ableiten zu können.

(34) Der empirische Ansatz, *Kosten-Degressionskoeffizienten der Erfahrungskurven* anhand von kumulierten Produktionsmengen zu ermitteln, führt zu einem erheblichen Recherchier- und Schätzaufwand einzelner technischer Komponenten und Dienstleistungen, die in dieser Detaillierung nicht in der Produktionsstatistik auftauchen. Auch hier sind die erforderlichen Befragungen aufwändig und bedürfen Interview-Partnern mit einem Marktüberblick über zwei bis drei Jahrzehnte, denn historische Daten zu Preisen und Mengen liegen in den wenigsten Unternehmen schriftlich oder in aufbereiteter Form vor.

(35) Die methodischen Schwierigkeiten und der enorm hohe Aufwand für die Ermittlung der Grenzkostenkurven wurde zum Zeitpunkt der Offertenstellung zu dieser Arbeit nicht zuletzt deshalb unterschätzt, weil bisher die Bedeutung der Nebennutzen (Co-Benefits) in den ökonomischen Bewertungen nicht beachtet bzw. unterschätzt wurden und es eine Dynamisierung der Kosten im Bereich der rationellen Energienutzung im Gebäudebestand weltweit noch nicht gibt. Die bisherigen Dynamisierungen der Kosten beziehen sich ausschliesslich auf Energiewandler, insbesondere im Bereich der erneuerbaren Energien

7.2 Empfehlungen für Energiepolitik, die Wohnungs- und die Bauwirtschaft

(36) Da infolge der Zielsetzungen des Schweizer CO_2-Gesetzes und der Verpflichtungen der Schweiz im Kyoto-Protokoll eine marktkonforme Steuerung über die Energiepreise hochwahrscheinlich ist, die Re-Konzentration der Erdölproduktion im politisch latent instabilen Nahen Osten wegen der weltweiten Verteilung der Erdölressourcen unvermeidlich ist und das Produktionsmaximum der globalen Erdölförderung zwischen 2020 und 2030 erwartet wird, ist mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit mit höheren Brennstoffpreisen in den nächsten Jahrzehnten zu rechnen, d.h. während der nächsten Nutzungsperiode der heute und morgen erstellten und renovierten Wohngebäude. Die Wohnungs- und Baupolitik sollte daher schon heute diesen sich *abzeichnenden Energiepreissteigerungen wegen der langen Re-Investitionszyklen im Wohngebäudebereich Rechnung tragen*

(37) Die vorliegende Studie zeigt durch eine Reihe wichtiger Fakten, dass eine *intensivere Energiepolitik im Bereich der Gebäude* nicht nur technisch möglich und bei sorgfältiger Analyse der ökonomischen Wirkungen *wirtschaftlich vernünftig* ist, sondern dass dies wegen der sehr langen Re-Investitionszyklen auch klima-, *wirtschafts- und beschäftigungs-politisch als geboten* erachtet werden könnte:

- Weitere wärmetechnische Verbesserungen im Bereich der Gebäudeneubauten und Erneuerungen sind heute deutlich absehbar (Mineregiestandard und Passivhaus-standard im Neubau und bei Erneuerungen). Diese absehbaren Verbesserungen werden – ähnlich wie in der Vergangenheit – mit real etwa stagnierenden Kosten zunehmend realisierbar sein (*etwa 2 bis 3 % jährliche Verbesserungen bei gleichen realen Kosten).*

- Jüngste Berechnungen des CEPE im Rahmen von detaillierten Energiebedarfsanalysen bis 2010 weisen darauf hin, dass die *mittelfristigen Ziele der Schweizer Energie- und Klimapolitik* (CO_2-Gesetz und Kyoto-Verpflichtungen) sowie die langfristigen Visionen des ETH-Rates (Reduktion des pro Kopf Energiebedarfs um zwei Drittel bis Mitte des Jahrhunderts gegenüber heute) *nur erreichbar sind, wenn die in diesem Bericht identifizierten wärmetechnischen Effizienzpotenziale bei Neubauten und Erneuerungen auch weitgehend realisiert* werden. Andernfalls muss wegen der hohen Bedeutung der Emissionen aus dem Raumwärmebereich und der langfristigen Re-Investitionszyklen mit einer Zielverfehlung gerechnet werden.

- Das *hohe technologische und Kostensenkungspotenzial* der Wärmeschutz-Investitionen *der nächsten Jahrzehnte* führt ausserdem zu einer weiteren positiven ökonomischen Bewertung der Energieeffizienzoptionen in einer längerfristigen Perspektive. Denn die Grenzkostenkurven der in 2010 und 2020 zur Erneuerung oder als Neubau anstehenden Wohngebäude werden geringere Herstellkosten haben als die heutigen (vgl. Kap. 6.2). Da ein Teil dieser Kostenminderungen durch mengenabhängige Lern- und Skaleneffekte erreicht wird, sind *Anreize zur Beschleunigung und Realisierung dieser Skaleneffekte* – auch zur Ausweitung von Exporten dieser Güter und Dienstleistungen – gesamtwirtschaftlich sinnvoll.[1] .

[1] Ein sehr anschauliches Beispiel dieser Wirkungsdynamik ist die Förderung der Windkraftkonverter in Dänemark und Deutschland in den 80er und 90er Jahren, so dass heute Anlagengrössen über 3 MW zu Stromerzeugungskosten unter 8 Rp/kWh möglich werden, die Anfang der 80er Jahre schon allein technisch gescheitert waren

- Wenngleich die vorliegende Arbeit zu gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen keine Analysen durchführte, so möchten die Autoren doch auf die Beschäftigungswirkungen hinweisen. Zur *Sicherung der Beschäftigung (und speziell in den ländlichen Gebieten)* kann eine forcierte Energieeffizienzpolitik in der Schweiz beitragen, denn anstelle der Importe der Brennstoffe (mehr als 90 % des Bedarfs) entsteht zusätzlich Nachfrage nach den industriell gefertigten Wärmeschutzprodukten sowie nach inländisch erzeugten Planungs-, Bau- und Finanzierungsleistungen. Nach Abzug der kontraktiven Effekte im Brennstoffbereich entstehen nach den heutigen Erkenntnissen netto etwa 50 zusätzliche Arbeitsplätze je eingesparte PJ.

(38) Aus diesen Gründen werden der Bau- und Wohnungspolitik auf Ebene des Bundes und der Kantone folgende Empfehlungen nahegelegt:

- Bund und Kantone sollten prüfen, wie der längerfristige Prozess zu *weiteren Novellierungen der Baustandards bei Neubauten in Richtung Minergiestandard und Passivhausstandard beschleunigt* werden könnte. Denn die erreichbare Kostendegression bei verbessertem Wärmeschutz verläuft im wesentlichen über die produzierten bzw. installierten Mengen.

- Bei Erneuerungen und Renovierungsarbeiten sollte man gleiche Wärmedämmstandards intensiv empfehlen. Hierzu bedarf es heute *verbesserter Information und beruflicher Fortbildung , die Aspekte der begleitenden Nutzen und verpasster Chancen bei unzureichendem Wärmeschutz deutlich hervorhebt*, aber auch *finanzieller Anreize* (z. B. der Halbierung oder Wegfall der Mehrwertsteuer für Wärmedämmprodukte, hocheffizienter Heizungs- und Lüftungsanlagen, Zinsvergünstigung für Wärmeschutz-Investitionen mit einem Mindeststand oder ein entsprechender Investitionszuschuss für private Hausbesitzer), um diesen Prozess verstärkter Nutzung der Energieeffizienzpotenziale zu realisieren. Ebenso wäre eine Anpassung der Mietgesetzgebung, so dass das Investor-Nutzer-Dilemma entschärft werden kann.

- Auch wenn im Moment eine entgegenlaufende Entwicklung im Gang ist, sehen die Autoren als weiteres unterstützendes Instrument die *individuelle Wärmeverbrauchsmessung und -abrechnung* pro Wohnung in (neuen und auch in bestehenden) Mehrfamilienhäusern, um die Markttransparenz für den Wärmedämmzustand der Wohnungen zu verbessern. Diese Massnahme hätte auch eine unmittelbare Folge auf das Energieverbrauchsverhalten (erfahrungsgemäss im Durchschnitt etwa 8 bis 15 %, wenn gleichzeitig Thermostatventile eingebaut werden). Um einen Anreiz für besonderes energieeffiziente Gebäude zu schaffen und nicht zuletzt aus bauphysikalischen Gründen könnte bei Gebäuden mit sehr niedrigem Heizwärmebedarf auf diese Massnahme verzichtet werden (BS und evtl. andere Kantone praktizieren bereits diese Regelung).

(39) Die Werte der *verschiedenen* Zusatznutzen *(Co-Benefits)* - typisiert nach den verschiedenen Fällen - zu erhärten und sie gegenüber Hauseigentümern, Bauherren, Wohnungsbau-gesellschaften und Mietern zu *kommunizieren*, erscheint schon aus betriebs- und wohnungswirtschaftlicher Sicht geboten, um gravierenden Fehleinschätzungen und Unterlassungen derartiger "forcierter" Wärmeschutz-Investitionen vorzubeugen und ihre häufigere Umsetzung sowie Akzeptanz infolge der verbesserten Kosten-Nutzen-Relation zu fördern. Um zu diesem Themenbereich eine aktuelle Informationsbasis und sachlich korrekte Wirtschaftlichkeitsberechnungen zur Verfügung zu haben, sollte entsprechendes *Lehrmaterial für die Ausbildung und berufliche Fortbildung* erstellt werden. Weiterhin wird wegen der Vielzahl möglicher Fälle

empfohlen, eine entsprechend *differenzierte Software* für die Beratung bei Neubau und Erneuerung zu entwickeln.

(40) Die wohnungswirtschaftlichen Aspekte zum Thema *Wertsteigerung und Verminderung von Leerständen durch exzellenten Wärmeschutz* sowie zu einer verbesserten Einschätzung der Bonität der Gebäudebesitzer könnten für spezielle Zielgruppen (Wohnungsbaugesellschaften, Liegenschaftsverwaltungen, Einzelhausbesitzer, Banken) als Information aufbereitet und über geeignete Kommunikationskanäle und in Weiterbildungsveranstaltungen kommuniziert werden.

(41) Um die wohnungswirtschaftlichen Implikationen von Wohnungsbauerneuerungen mit exzellentem *Wärmeschutz im Kontext von Re-Vitalisierungen von Siedlungsgebieten* zu demonstrieren, wird das Minergieprogramm als ein schweizweites Demonstrationsprogramm als sehr wichtig seitens der Autoren bewertet, das die sehr positiven Erfahrungen derartiger Wärmeschutzmassnahmen im grösseren Kontext der Re-Vitalisierung von Siedlungsgebieten (z. B. Teilverkauf von Wohnungen zur Re-Finanzierung eines Teils der Modernisierungsmassnahmen sowie zur Veränderung und Stabilisierung der Bewohnerstrukturen, z.B. wie in Ludwigshafen) ebenfalls aufgreifen und verbreiten könnte..

(42) Die Ergebnisse dieses Projekts zu den Zusammenhängen der *Kosten und Nutzen von Wärmeschutz- und Energieeffizienz-Investitionen im Bereich der Bauleistungen und Bauprodukte* könnten zu einer Planungsgrundlage für Architekten, Kostenplaner und Wohnungsbaugesellschaften *handbuchartig oder als Software aufgearbeitet* werden. Ausserdem ist die Einarbeitung der Kostendaten in bestehende Kostenplanungs-, Bewirtschaftungs- oder Optimierungstools bzw. deren Erweiterung um die Komponente der weitergehende Energieeffizienz und begleitender Nutzen ins Auge zu fassen. Zu nennen sind die Produkte des CRB, OGIP, EPIQUR sowie weitere Produkte, die aus IP Bau hervorgingen.

7.3 Grenzen und Unsicherheiten der vorliegenden Analyse

Obwohl die Erhebung der Daten zu den Kosten der Wärmeschutzmassnahmen an Gebäuden in der vorliegenden Form einmalig sein dürfte, verbleiben Grenzen bzgl. genauer Aussagen über die zukünftigen wirtschaftlichen Potenziale der Wärmeschutzes und Energieeffizienz in Wohngebäuden.

(43) Die *Kostenangaben bei hohen Dämmstärken* sind infolge der den Autoren unbekannten Angst-, Lern- und Pioniermarkt-Preisaufschlägen nur mit gewissen Abstrichen verwendbar. Die *Kostendegression* könnte bei schneller Marktdurchdringung der hohen Dämmstärken *deutlich schneller verlaufen*, als hier angenommen.

(44) Die *technischen und kostenbezogenen Fortschritte* im Bereich der neuen Dämm-Materialien (Polystyrolprodukte, Hochleistungskerndämmung, Vakuumdämmung), Fenstersysteme mit neuen Beschichtungen, Folien, Rahmenverbundmaterialien, Vakuumgläsern) sind heute noch zum Teil schwer einschätzbar. Die Kostenschätzungen wurden in diesem Bericht relativ konservativ gewählt oder noch nicht durchgeführt.

(45) Die moderaten Perspektiven zur *Entwicklung der Brennstoffpreise*, die diesen Analysen zugrunde gelegt wurden, könnten sich als Fehleinschätzung erweisen, wenn die politisch latent instabile Situation im Nahen Osten zu merklichen längerfristigen Förderbeschränkungen führen sollte. Allerdings kann an den dynamisch angelegten Grenz-

kostenkurven leicht ersehen werden, in welchem Umfang sich die Energieeinsparpotenziale bei grösseren Energiepreissteigerungen erhöhen würden.

7.4 Weiterer Forschungsbedarf

Weiterer Forschungsbedarf besteht auf verschiedenen Ebenen, sowohl auf der „Hardware", also in der Praxis des Bauens und Erneuerns, wie auch auf der analytischen Ebene im Bereich der Energie-, Wohnungs- und Bauwirtschaft. Zu nennen sind u.a.

- Messkampagnen zur *Bestimmung des Luftwechsels und der Innenraumqualität* für verschiedene Gebäudetypen sowie für verschiedene soziale Bewohnergruppen (Bildung, Raucher/Nichtraucher, sensible Personengruppen für Lärm, Erkrankungen der Atmungswege und Allergien);
- Sozialwissenschaftliche Begleitforschung bei Neubauten und Erneuerungen mit Minergie- und Passivhausstandard *zur Akzeptanz der verschiedenen Zielgruppen* (private Bauherren, Wohnungsbaugesellschaften, Mieter, die während der Erneuerung die Wohnungen bewohnen) für die Bau- und Investitionsentscheide und nach durchgeführten Wärmeschutz-Investitionen.
- Analyse der Kostendegressionspotentiale von Lüftungsanlagen (zentrale und dezentrale) sowie von neuen Wärmedämmsystemen (Hochleistungskerndämmung, transluzente Wärmedämmung, Vakuumisolation) sowie neuer Verglasungstypen und Fenstersysteme (Verglasungen mit Folien, Vakuumgläser, Rahmen mit Verbundmaterialien etc.) unter Einbezug optionaler Entwicklungen der Baustandards, Erneuerungen, Exportmengen
- Entwicklung eines Konzepts zum Einbezug begleitender Nutzen von Wärmeschutz-Investitionen in software gestützte Kosten-Nutzenkalkulationen und Erarbeitung einer entsprechenden Datenbank für Architekten und Immobiliengesellschaften und private Bauträgerschaften.
- Entwicklung eines Policy-Bündels für Massnahmen auf Bundes- und kantonaler Ebene sowie für Wohnungswirtschaft und Hausbesitzer sowie Baufachleute, um die Erneuerungsrate mit hohem Wärmeschutz wesentlich zu erhöhen.

8 Literaturverzeichnis

Aebischer, B., et al., (2002): „CO_2 -Reduktionspotential Erdgas. Projektphase 1: Referenz-Szenario. In Zusammenarbeit mit der Schweizerischen Gasindustrie“, CEPE-Bericht, Zürich

Afjei et al., (1999): „Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe. Zwischenberichte Phasen 1 bis 4“, i.A. Bundesamt für Energie, Bern und Zürich, 1996 bis 1999

Barreto, L., (2001): „Technological Learning in Energy Optimasation Models and Deployment of Emerging Technologies”, Thesis, ETH Zürich

Basler & Hofmann, (1992): „Energiesparpotentiale und Energiesparkosten im Raumwärme und Warmwasserbereich“, Sozio–ökonomische Energieforschung, BEW, Bern

Belz, Frank-Martin, (2000): „Ökologie und Wettbewerbsfähigkeit in der Baubranche: Erfolgreiche Vermarktung von Niedrigenergiehäusern jenseits der Öko-Nische“, IWÖ-Diskussionsbeitrag Nr. 81, IWÖ, Hochschule St. Gallen

Belz, Egger, (2001): „Nutzen und Kosten von Niedrigenergiehäusern: Empirische Ergebnisse einer explorativen Studie“, in der Markt, 40. Jahrgang, Nr. 156, S. 3 - 14

BFE, Bundesamt für Energie (Hrsg.), (1996): „Arbeitsberichte zu den Energieperspektiven der Szenarien I bis IV 1990 bis 2030 (insb. Anhänge zu den Kostenkurven)“, Prognos AG, Basics AG, Fachgruppe Energieanalysen ETHZ, Forschungsprogramm Energiewirtschaftliche Grundlagen, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern

BFE, Bundesamt für Energie, (2000): „Schweizerische Gesamtenergiestatistik“, Sonderdruck aus Bulletin SEV/VSE, Nr. 16. August 2000

BFS, **Bundesamt für Statistik**, (1993): „Gebäude und Wohnungen“, Eidgenössische Volkszählung 1990, Band 9, Bau und Wohnungswesen, Bern

BFS, **Bundesamt für Statistik**, (1996): „Wohnen in der Schweiz“, Eidgenössische Volkszählung 1990, Bern

BFS, Bundesamt für Statistik, (1997): „Der schweizerische Baupreisindex – Detailkonzept“, Bern

BFS (Bundesamt für Statistik), **BUWAL** (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landwirtschaft) (1997), „Lärm“, in: Umwelt in der Schweiz, S. 127 – 138, zu beziehen bei EDMZ, Bern

BFS, Bundesamt für Statistik, (1999): „Bau- und Wohnbaustatistik der Schweiz, Bauinvestitionen, Bauausgaben und –vorhaben 1998-99 Wohnbautätigkeit 1998“, BFS, Neuchâtel

BFS, Bundesamt für Statistik, (2000a): „Schweizerischer Baupreisindex, Oktober 1998=100 – Ergebnisse vom Oktober 1999“, BFS, Neuchâtel

BFS Bundesamt für Statistik, (2000b): „Preisstatistik 2000, Inventar der preisrelevanten politischen Massnahmen“, BFS Aktuell, Neuchatel

Binz, A. (2001): „Der nächste Schritt MINERGIE-P?“, Vortrag gehalten anlässlich der Minergie-Messe am 8.11.01 in Bern, Fachhochschule beider Basel, Liestal

Binz et al., (2002): „MINERGIE und Passivhaus: Zwei Gebäudestandards im Vergleich – Schlussbericht“, i.A. Bundesamt für Energie, zu beziehen bei EMPA ZEN, Dübendorf

BKKZ, (1998): P. Meyer, K. Christen, A. Hüttenmosser: „Baukosten-Kennzahlensystem – Benchmark für Neubau, Kostenrichtwerte für Gebäudeerneuergung“, Professur für Lehrstuhl für Architektur und Baurealisation, ETH Zürich

Bürgi, H.P., (2000): „Kosten und Nutzen im MINERGIE–Haus“, MINERGIE Agentur Bau, Bern

BUWAL/BFS, (1997): „Umwelt in der Schweiz 1997 – Daten, Fakten, Perspektiven“, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft und Bundesamt für Statistik, Bern

BWO, Silvio Graf, Daniel Sager, (1998a): „Mietzinsgestaltung und Finanzierung der Erneuerungsinvestitionen bei Wohnimmoblien“, ZHW und CS Ecnomic Research, i.A. Bundesamt für Wohnungswesen, Winterthur und Zürich

BWO, Integrated Financial Business Consulting AG, (1998b): „Lage und Zukunft der Wohnbaufinanzierung in der Schweiz“, i.A. Bundesamt für Wohnungswesen, Zürich und Grenchen

Christen, K., Meyer–Meierling, P., (1999): „Optimierung von Instandsetzungszyklen und deren Finanzierung bei Wohnbauten“, ETH Zürich

Denkmalpflege, (2002): „Mündliche Auskunft eines Vertreters der Eidgenössischen Kommission für Denkmalpflege“, Bern

Econcept, FHBB, (2002a): „Neubauen statt Sanieren - Schlussbericht“ i.A. BFE/BWO/ARE, Bern

Econcept, (2002b): „Grundlagen für freiwillige CO_2-Vereinbarungen und Verpflichtungen im Gebäudebereich - Markt-, Interessen- und Akzeptanzanalyse“, i.A. Energieagentur der Wirtschaft (EnW), Bundesamt für Energie, Bern, Hauseigentümerverband (HEV), Zürich

Ecoplan, (1998): „Externe Lärmkosten des Verkehrs – Schlussbericht Vorstudie I“, Dienst für Gesamtverkehrsfragen, Bern

Ecoplan, (2000): „Externe Lärmkosten des Verkehrs: Hedonic Pricing Analyse - (Vorstudie II)”, Dienst für Gesamtverkehrsfragen, Bern

Empa, (2000): Verschiedene Teil- und Abschlussberichte des Forschungsprogramms „Rationelle Energienutzung in Gebäuden“, Dübendorf

EMPA, (2001): „EUROKOBRA Wärmebrückenatlas auf PC“, bauphysikalisches Programm zur Berechnung der thermischen Verluste von Wärmebrücken, Abteilung Bauphysik, Dübendorf

Enquête, (2000): „Anhörungen 2000“, Enquête-Kommission

Erb, M., Eicher, H.P., Dr. Eicher + Pauli AG, Liestal et al, (2000): „Feldanalyse von Wärmepumpenanalgen“, in: „Energie- und Umweltforschung im Bauwesen – 11. Schweizerisches Status-Seminar 2000“, Zentrum für Energie und Nachhaltigkeit im Bauwesen, ZEN (Hrsg.), EMPA, Dübendorf

Erb, M., Eicher, H.P., Dr. Eicher + Pauli AG, Liestal, (2001): „Sanierung von einfach und doppeltverglasten Fenstern”, Bundesamt für Energie, Bern, zu beziehen bei Forschungsprogramms „Rationelle Energienutzung in Gebäuden“, ZEN, EMPA, Dübendorf

Erhorn, H., Szerman, M. und Gertis, K. (1986): „Wie beeinflusst die Heizkörperanordnung im Raum die thermische Behaglichkeit und den Wärmeverlust?“ Bauphysik 5

ETSAP, news 5 (GENIE), (1998): „Down the Learning Curve with Emerging Technologies”

Fanger. P.O. (1970), Thermal Comfort, McGraw Hill Book Company, New York, Düsseldorf.

Federal Statistical Office Germany, (1996): „The construction of abatement curves. Methodological steps and empirical experiences”, Wiesbaden

Gantner, U., **Jakob**, M. und Hirschberg, S., (1999): „Methoden und Analysen - Grundlagen sowie ökologische und ökonomische Vergleiche von zukünftigen Energieversorgungsvarianten der Schweiz“, Schlussentwurf, Beitrag zum VSE-Projekt „Dezentral - Möglichkeiten, Grenzen und Auswirkungen einer verstärkt dezentralen Stromproduktion aus nicht erneuerbaren Energieträgern“, Arbeitsmaterial, Villigen

Garrett, D.E., (1989): „Chemical Engineering Economics”, v. Nostrand Reinhold, New York

Glas Trösch AG, (2000): „Glas und Praxis“, Bützberg

Glas Trösch AG, (2001): „Lärmschutz wird immer wichtiger“, in Gesundheits- und Umwelttechnik Nr. 4, S. 14 – 15

Graf, S., **Sager**, D., (1998): „Mietzinsgestaltung und Finanzierung der Erneuerungsinvestitionen bei Wohnimmobilien“, i. A. des Bundesamtes für Wohnungswesen, Zürcher Hochschule Winterthur und Credit Suisse Economic Research Zürich

Gutschner, (1997): „Entwicklung eines Ansatzes zur Ermittlung des ertragskriterium-differenzierten photovoltaischen Flächenpotentials im schweizerischen Gebäudepark“, Institut für Geographie, Universität Freiburg

Haari, R., (1988): „Wie Eigentümer ihre Mietwohnungen erneuern“, COPLAN, i.A. Bundesamt für Wohnungswesen, Arbeitsbericht Nr. 16, Bern

Haller, A., Humm O., Voss K., (2000): „Renovieren mit der Sonne – Solarenergienutzung im Altbau“, Ökobuch Staufen bei Freiburg

Hieber, W.L.; (1992): „Lern- und Erfahrungskurven-Effekte und ihre Bestimmung in der flexibel automatisierten Produktion“, Franz Vahlen Verlag, München

Hohmeyer, K. K., Katell, S., (1981): „Basic-Cost Engineering”, M. Dekker New York/Basel

Humm, O., (1997): „NiedrigEnergieHäuser – Innovative Bauweisen und neue Standards“, Ökobuch, Staufen bei Freiburg

Humm, O., (1998): „NiedrigEnergiehäuser und PassivHäuser – Konzepte, Planung, Konstruktion, Beispiele“, Ökobuch, Staufen bei Freiburg

IAE, Internationale Energieagentur, (2000): „Energy Prices and Taxes, 3rd Quarter 2000”, S. 266, Paris

IEPE, Institut d'Economie et de Politique de l'Energie, , (2000): „World Energy under the Pressure of Emerging Countries: the Asian Energy Thurst and its Consequences for Europe. Shared Analysis Project”, Vol. III, EU Brüssel

INFRAS/ECONCEPT/PROGNOS, (1996): „Die vergessenen Milliarden“, Verlag Paul Haupt, Bern

Intep, (1995): „Kostenkurven im Haushaltsbereich – Zwischenbericht zu Handen der Expertensitzung vom 12.5.95“, Zürich

IPCC, Intergovernmental Panel om Climate Change, , (Hrsg.), (2001): „Third Assessment Report of Working Group III, Chapt. 8 :Cost and Co-Benefits. Final Draft“, RIVM Bilthoven, Niederlande

IWK (Hrsg.), (1997): H. Reichenbach, J. Hubler: „Investitionskosten Gas–WKK–Anlagen in bestehenden Gebäuden“, im Auftrag des PSI, IWK, Zürich

IWÖ (Hrsg.), (2000): F.-M. Belz, D. Egger: „Nutzen und Kosten von Niedrigenergiehäusern: Empirische Ergebnisse einer explorativen Studie“, IWÖ-HSG (Institut für Wirtschaft und Ökologie Universität St. Gallen, St. Gallen

IWU, Institut für Wohnen, (2001): „Energetische Gebäudesanierung und Wirtschaftlichkeit“, Baustein l und 2, Darmstadt

Jakob, M., Primas, A., Jochem E., (2002):. „Erneuerungsverhalten bei Wohngebäude – erste Auswertungen der Haupterhebung“, CEPE-WP Nr. 9, CEPE, ETH Zürich

Jochem, E., **Dickmann**, J., (2001): „Überlegungen zu einer sachgerechten Handhabung von Kostenangaben für Energiesystem-Modelle mit langfristigen Zeithorizonten“, Arbeitspapier im Rahmen des IKARUS-Projektes, Berlin-Karlsruhe

Kölbel, H.: **Schulze**, J., (1982): „Projektierung und Vorkalkulation in der Chemischen Industrie“, Springer Berlin

Kypreos, S., (1998): „New Modelling Developments and Applications with MARKAL”, IEA/ETSAP Workshop Berlin May

Ladner, H. (1998): „Vom Altbau zum NiedrigEnergiehaus – Energietechnische Gebäude-sanierung in der Praxis“, Ökobuch Staufen bei Freiburg

LESO (Hrsg.), (1996): F. Leresche, J.P. Eggimann: „Berechnung der thermischen Bilanz eines Gebäudes – Beschrieb des Programms LESOSAI 4“, LESO-PB, EPFL, Lausanne

Lutiger, (2001): „Analyse Gebäudetechnik und erneuerbare Energien“, ZIG-HTA Luzern, anzufragen bei K. Hildebrand, HTA Luzern

Mattsson, N., (1997): „Internalizing technological development in energy systems models. Thesis.", Chalmers University of Technology, Göteborg, Schweden

Mattson, (1998): „GENIE: An Energy System Model with Uncertain Learning", IEA/ETSAP Workshop Berlin May

Mayer, E. (1985): "Bei welchen Luftbewegungen zieht es?" IBP-Mitteilungen 12, Nr. 101

McDonald, A., **Schrattenholzer**, (2001): „Learning rates for energy technologies", Energy Policy 29 (2001), S. 255-261

Meier, R., (1998): „Sozioökonomische Aspekte von Klimaänderungen und Naturkatastrophen in der Schweiz", Hochschulverlag ETH Zürich

Messner, Sabine (1997): „Endogenized Technological Learning in an Energy Systems Model", IIASA, RR-97-15, Laxenburg, Österreich

Messner, S., (1998): „Approaches to Handle Uncertainty and Technological Dynamics in Energy Models", Joint Forum /ETSAP Workshop Berlin May

Metron, (1998), „Energietechnische Gesamtsanierungen und MieterInnen-Vermieter-Verhältnis", im Auftrag des Bundesamts für Energie, Bern

Minergie (Hrsg.), (1998a): H.P. Bürgi, P. Raaflaub: „Gebäudesanierung nach Minergie-Standard – Übersicht, Beispiele, Grundsätze: ein Leitfaden", Bern

Minergie, (1998b): Fraefel: „Das Minergie-Haus – Planungshilfe für Baufachleute", Hrsg. Kanton ZH (AWEL) und Kanton BE

Neij, Lena, (1997): „Use of experience curves to analyse the prospects for diffusion and adoption of renewable energy technology", Energy Policy 23(1997)13, p.1099-1107

Niedrigenergie 97–99, (1998): Diverse Berichte über Niedrigenergiegebäude, u.a. R. Fraefel „Passives Niedrigenergie-MFH in Russikon", Grünigen

Ostertag, K., Jochem, E., Schleich, J., Walz, R. et al.., (1998): „Energiesparen – Klimaschutz, der sich rechnet", Kap.6: „Transaktions– und Programmkosten. ISI Karslruhe", DIW Berlin

Prognos (Hrsg), (1997): P. Hofer: „Der Energieverbrauch der Privaten Haushalte in Szenario IV – Arbeitsbericht", Basel

Prognos (Hrsg.), (1999): P. Hofer: „Analyse- und Prognosemethode, Modellstrukturen und ausgewählte Ergebnisse. Dokumentation im Rahmen des Projektes Energieperspektiven der Haushalte", i.A. des BFE, Bern

Prognos, (2000): Prognos AG: „Energetische und klimatische Auswirkungen der Förderabgabe und der Abgabe gemäss Grundnorm", i.A. Bundesamt für Energie, Bern

Prognos, (2001): Szenarien zu den Initiativen „Strom ohne Atom" sowie „Moratorium Plus". Prognos AG, im Auftrag des Bundesamtes für Energie, Forschungsprogramm Energiewirtschaftliche Grundlagen, Bern.

PSI, Gantner, U., und Hirschberg, S., (1999): „Entwicklung der Nutzung regenerativer Energiequellen in der Schweiz“, Beitrag zum Schlussbericht der SATW–Arbeitsgruppe „CH 50 % – Eine Schweiz mit halbiertem Verbrauch an fossilen Energien“

PSI, Gantner, U., Jakob, M., und S. Hirschberg, S., (2000a): „Methoden und Analysen – Grundlagen sowie ökologische und ökonomische Vergleiche von zukünftigen Energieversorgungsvarianten der Schweiz“, Beitrag zum VSE–Projekt „Dezentral – Möglichkeiten, Grenzen und Auswirkungen einer verstärkt dezentralen Stromproduktion aus nicht erneuerbaren Energieträgern“, zu erscheinen als PSI–Bericht

PSI, Gantner, U., Jakob, M., und S. Hirschberg, S., (2000b): „Perspektiven der zukünftigen Energieversorgung in der Schweiz unter Berücksichtigung von Nachfrage–orientierten Massnahmen – Ökologische und ökonomische Betrachtungen, Hintergrundpapier zu "Energiespiegel – Facts für die Energiepolitik von morgen" Nr. 1 und Nr. 2, Villigen

Rahl, A.; Spandaro, J.V., (1999): „Environmental Damages and Costs:an Analysis of Uncertainties”, Environment International, Vol.25(1), S. 29-46

Ressort WB: Diverse Vorträge, Forum „Treffpunkt der Entscheidungsträger“, Energie 2000 Ressort Wohnbauten, http://www.e2000.ch/Wohnbau, 1997-2000

Rouvel, L; Elsberger, M.; Heckler, R., (1999): „Klimaschutzpotenziale im Bereich Raumwärme“, in: G. Stein, H.-F. Wagner (Hrsg.): Das IKARUS-Projekt: Klimaschutz in Deutschland. Strategien für 2000 – 2020. Springer Berlin/Heidelberg, S. 123-154

Seebregts, A.J. et al., (1999): „Endogenous Technological Change in Energy Systems Models – Synthesis of Experience with ERIS, MARKAL, and MESSAGE”, ECN report ECN-C-99-025 April 1999. (EU TEEM project), also published in Int. J. of Global Energy Issues. Vol 14(2000)1-4, p.48-64

Schembra, M., **Schulze**, J., 1993: „Schätzung der Investitionskosten bei der Prozessentwicklung“, Chem. Ing. Technik 65 1, S. 41-47

Schuler et al., (1994).: „La construction du parc immoblier en Suisse – approche typologique de l’habitat“, EPFL Lausanne

Schweizer Bau Dokumentation, (1994): „Zürcher Index der Wohnbaukosten“, B lauen

SFHF, (1998): „Bestimmung der wärmetechnischen Einflüsse von Wärmebrücken bei vorgehängten hinterlüfteten Fassaden – Richtlinie, Ausgabe 1998“, In: SFHF-Richtlinien „Alles über hinterlüftete Fassaden“, SFHF (Hrsg), Dietikon

SIA, (1988): „SIA.Norm 380/1, Energie im Hochbau“, Ausgabe 1988, Zürich

SIA, Brunner C.U., Nänni J., (1993): „Wärmebrückenkatalog 3 – Altbaudetails“, SIA Dokumentation D0107, Zürich

SIA, Kommission SIA 380/1 (1999): „Festsetzung der Grenz- und Zielwerte für den Heizwärmebedarf in der neuen Norm 380/1 Thermische Energie im Hochbau“, Zürich

SIA, (2000): „SIA Norm 380/1, Thermische Energie im Hochbau“, Entwurf, Zürich

SIA, (Hrsg), (2001a): „SIA Norm 380/1”, Ausgabe 2001, Zürich

SIA, (Hrsg), (2001b): „Thermische Energie im Hochbau – Leitfaden zur Anwendung der Norm SIA 380/1“, Ausgabe 2001, sia Dokumentation **D 0170**, Zürich

Stein, H.-G., (1988): „Kostenführerschaft als strategische Erfolgsposition“, in: Henzler, H.A. (Hrsg.): Handbuch strategische Führung, Wiesbaden S.397-426

Tiefbauamt Kanton Zürich, (2002).: „Lärmbelastung im Kanton“, Raum, Landschaft,Umwelt, S. 8 - 12

UNDP/World EnergyCouncil/UNDESA, (2000): „World Energy Assessment. Chapt. 6. End-use energy efficiency”, New York

Viriden, (2001): „Mutschellenstr. 103 – Eine mustergültige Sanierung“, Synthesebericht des Pilot- und Demonstrationsprojekts, zu beziehen bei Viriden+Partner, Zürich

Vollzug BE, (1998): „Evaluation – Vollzug der Energiegesetzgebung; Untersuchung an 50 neuen und sanierten Wohnbauten mit Baubewilligung sei 1993“, WEA Kt. BE

Wene, C.O.; (2000): „Experience Curves for Energy Technology Policy”, IEA/OECD, Paris

Widmer, U., (2001): „Heiliger Krieg gegen die Fakten – Zum Statistischen Jahrbuch der Schweiz 2000“, Bundesamt für Statistik (BFS), Neuchâtel

Williams, R. Jr., (1947): „'Six-Tenth Factor' Aids in Approximating Costs”, Chem. Eng., 54, S. 124-125

Wüest et al., (1994): Wüest und Partner: „Basisdaten und Perspektiven zur Entwicklung des Gebäudebestandes 1990 – 2030“, i.A. BEW, Bern, Zürich

Wüest und Partner., (1998a): Wüest und Partner AG: „Bauen, Markt und Energie – eine Standortbestimmung“, i.A. Flumroc AG, Flums und Zürich

Wüest und Partner, (1998b): „Energieplanungsbericht 1998 – Kontrollrechnung Sanierungstätigkeit“, i.A. des AWEL, Baudirektion des Kantons ZH, Zürich

Wüest und Partner, (2000): Wüest und Partner AG: „Immo–Monitoring 2000, Bände 1 bis 3“, Zürich

Wüest und Partner, (2000): „Erhebung der durchschnittlichen Energiekennzahlen für Neubauten in 13 Kantonen“, i.A. Forschungsprogramm Energiewirtschaftliche Grundlagen (EWG), Bundesamt für Energie (BFE), Bern

Wüest und Partner, (2001): Wüest und Partner AG, „Immo–Monitoring 2001, Bände 1 bis 3“, Zürich

Zürcher Kantonalbank (1988): „Wertvolle Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft 3“, Zürich S.24-36

Viele Informationen stammen ausserdem aus Expertengesprächen und Interviews, welche nicht alle im einzelnen zitiert werden

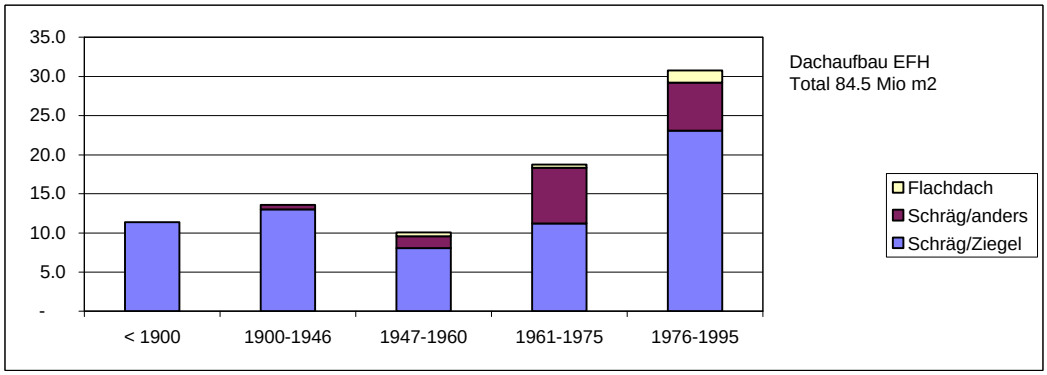
9 Abkürzungsverzeichnis

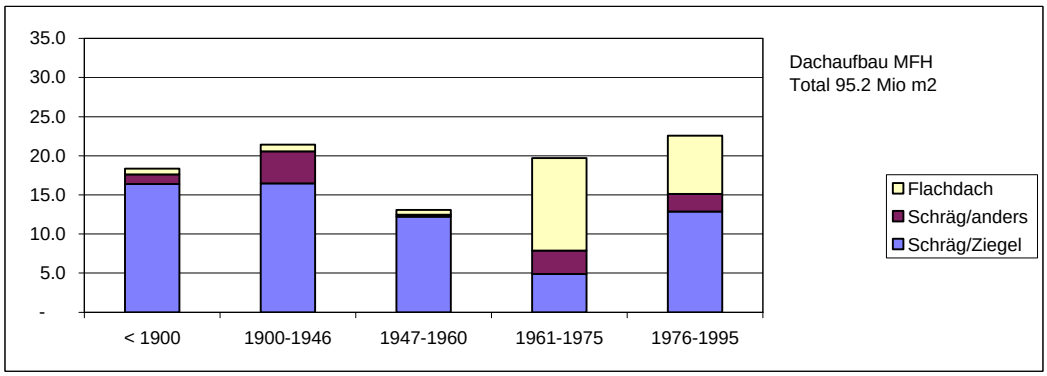
a	Annuitätenfaktor
A_F	Rahmenfläche (A_{Frame})
A_g	Glasfläche
A_W	Fensterfläche (A_{window})
A/EBF	Gebäudehüllenziffer. Verhältnis der Gebäudehüllenfläche zur Energiebezugsfläche (EBF), wobei die Bauteile gegen das Erdreich bzw. gegen unbeheizte Räume mit einem Faktor < 1 gewichtet werden.
CEPE	Centre for Energy Policy and Economics, ETH Zürich
CHF	Schweizer Franken
dB	Dezibel, Masseinheit des Schalldämmpegels
DS	Dämmstoff
dr	Discount rate (Realzinssatz)
DV	Doppelverglasung
EBF	Energiebezugsfläche
EBF_i	EBF bezogen auf das Innenmass gemäss deutscher Berechnungsart
EE	Endenergie („Verbrauch“ an (kommerziellen) Energieträgern. Endenergie = Nutzenergie + Umwandlungs- und Verteilverluste
EFH	Einfamilienhaus
EKZ	Energiekennzahl
EMPA	Eidgenössische Material Prüfanstalt
EV	Einfachverglasung
fg	Gewinnfaktor freie Wärme gemäss SIA 380/1
g-Wert	Gesamtenergiedurchgangswert bei Gläsern (als Anteil)
GJ	Gigajoule
HEL	Heizöl Extraleicht
HF	Hinterlüftete Fassaden
HF 1 bis 9	Bezeichnung der befragten Unternehmen aus dem Bereich der hinterlüfteten Fassaden
HTA	Hochschule für Technik und Architektur
IV	Isolierverglasung
kWh_{NE}	kWh Nutzenergie
kWh_{EE}	kWh Endenergie
Lambda	Wärmeleitfähigkeit (W/mK)
MFH	Mehrfamilienhaus
Minergie	Label für energie-effiziente Gebäude und (andere energetische Anwendungen)

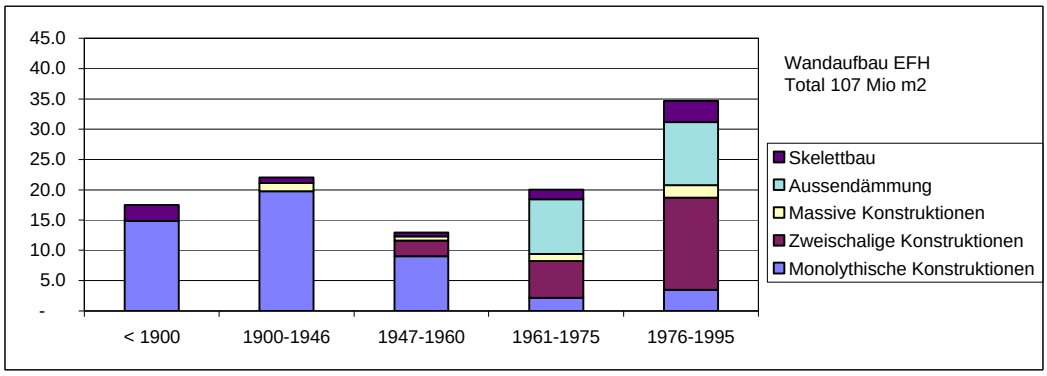
Minergie-P	Vorschlag für eine zusätzliche, erhöhte Anforderung des Minergie-Labels, qualitativ ähnlich zum Passivhausstandard
MuKEn	Muster Verordnung der Kantone im Energiebereich
MJ	Megajoule
NE	Nutzenergie (Energiebedarf, um den angestrebten Nutzen zu erfüllen. Bsp. Raumwärme: Energiebedarf für die Aufrechterhaltung der gewünschten Temperatur in den Räumen.)
NT	Niedertemperatur
PH	Passivhaus
Psi	Linearer Wärmedurchgangskoeffizient (W/mK)
Qh	Heizwärmebedarf des Gebäudes nach alter Berechnungsnorm (SIA 380/1 1988) bzw. Heizwärmebedarf nach neuer Berechnungsnorm (SIA 380/1 2001). Qh ist eine Nutzenergiegrösse.
SFHF	Schweizerischer Fachverband für hinterlüftete Fassaden
SVDW	Schweizerischer Verband für Dach und Wand
SIA	Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein
SIA 380/1	Norm „Energie im Hochbau“ (Ausgabe 1988) bzw. „Thermische Energie im Hochbau (Ausgabe 2001)
TD	Thermodübel
U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient (W/m^2K), Wärmeleistung pro m^2 durch ein Bauteil pro K Temperaturdifferenz
UD	Unterdach
UK	Unterkonstruktion
WB	Wärmebrücken
WD	Wärmedämmung
WLB	Wärmeleistungsbedarf (W/m^2_{EBF} oder kW)
WP	Wärmepumpe
WRG	Wärmerückgewinnung

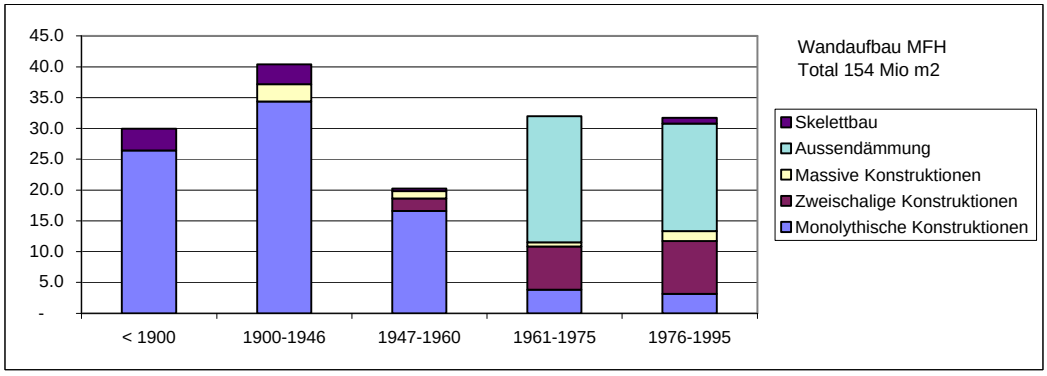
Anhänge

A Wand- und Dachflächen im Wohngebäudebestand









Quelle Wüest und Parnter

B Erhebung Fenster

B.1 Erhebungskonzept Fenster

Pro kleines oder mittleres Unternehmen wurden Fensterpreise für 4 Fensterqualitäten gemäss einer der 22 Kombinationen in Tabelle B.1-1 (Holzfenster) bzw. Tabelle B.1-2 (Kunststoffenster) abgefragt. Mit Anz. ist bezeichnet, an wieviele verschiedene Unternehmen die jeweilige Kombination verschickt wurde.

Nicht abgedeckt in dieser Darstellung sind die innovativen Unternehmen, u.a. jene, welche in der Lage sind, Fenster gemäss Passivhausstandard herzustellen. Diese wurden vorgängig telefonisch kontaktiert und nach den technischen Möglichkeiten befragt.

Ebenfalls nicht mittels dieses Versuchsplans abgedeckt sind die grössten Unternehmen der Branche. Bei diesen wurden mehr als nur vier verschiedene Fensterqualitäten abgefragt.

Tabelle B.1-1 Detail des statistischen Versuchsplans für Holz- und Holzmetallfenster

		Fensterqualität A			Fensterqualität B			Fensterqualität C			Fensterqualität D		
K	Anz.	U_g	U_F	dB	U_g	U_F	dB	U_g	U_F	dB	U_g	U_F	dB
1	2	1.1	1.6	32	0.7	1.4	32	0.5	1.4	32	0.5	1.4	36
2	2	0.7	1.2	32	0.7	1.2	40	0.5	1.0*	32	0.5	1.2	40
3	4	1.1	1.6	32	1.1	1.6	40	0.5	1.6	32	0.5	1.6	40
4	2	1.1	1.4	32	1.1	1.2	32	1.1	1.0*	32	0.7	1.0*	32
5	3	1.1	1.4	32	1.1	1.4	36	1.1	1.0*	32	0.7	1.0*	40
6	2	1.1	1.6	32	0.5	1.4	32	0.5	1.0*	32	0.5	1.0*	36
7	4	0.7	1.6	32	0.7	1.6	40	0.7	1.4	36	0.5	1.2	32
8	2	1.1	1.4	36	0.7	1.2	36	0.7	1.0*	36	0.5	1.0*	36
9	6	1.1	1.6	36	1.1	1.6	40	0.7	1.6	32	0.5	1.4	32
10	6	1.1	1.4	32	0.7	1.4	32	0.7	1.2	36	0.5	1.2	32
11	3	0.7	1.6	36	0.7	1.6	40	0.7	1.4	32	0.5	1.2	40
12	2	1.1	1.4	32	1.1	1.0*	36	0.5	1.4	32	0.5	1.4	40
13	3	1.1	1.4	32	1.1	1.4	36	1.1	1.0*	36	0.5	1.0*	32
14	5	1.1	1.4	32	0.7	1.4	36	0.7	1.4	40	0.5	1.0*	40
15	5	1.1	1.6	36	0.7	1.4	36	0.7	1.2	32	0.7	1.0*	36
16	4	1.1	1.6	32	0.7	1.6	32	0.7	1.2	32	0.7	1.2	40
17	4	1.1	1.6	36	1.1	1.6	40	0.7	1.2	40	0.5	1.2	40
18	3	0.7	1.4	32	0.7	1.4	40	0.7	1.2	40	0.5	1.2	36
19	2	1.1	1.2	32	1.1	1.2	40	0.5	1.4	32	0.5	1.4	40
20	4	1.1	1.6	40	1.1	1.4	40	1.1	1.2	32	0.7	1.0*	32
21	4	0.5	1.6	32	0.5	1.4	32	0.5	1.2	36	0.5	1.0*	32
22	4	1.1	1.4	40	0.7	1.6	32	0.7	1.6	40	0.5	1.2	32

Gemäss der Verfügbarkeit von Adressen und weil die Kunststoffensterhersteller weniger klein strukturiert sind, war die Anzahl Anfragen im Bereich Kunststoff kleiner als im Bereich der Holz und Holzmetallfenster.

Tabelle B.1-2 Detail des statistischen Versuchsplans für Kunststoffenster

K	Anz.	Fensterqualität 1			Fensterqualität 2			Fensterqualität 3			Fensterqualität 4		
		U_g	U_F	dB	U_g	U_F	dB	U_g	U_F	dB	U_g	U_F	dB
1	1	1.1	1.9	32	0.7	1.6	32	0.5	1.6	32	0.5	1.6	36
2	3	0.7	1.4	32	0.7	1.4	40	0.5	1.2*	32	0.5	1.4	40
3	1	1.1	1.9	32	1.1	1.9	40	0.5	1.9	32	0.5	1.9	40
4	3	1.1	1.6	32	1.1	1.4	32	1.1	1.2*	32	0.7	1.2*	32
5	1	1.1	1.6	32	1.1	1.6	36	1.1	1.2*	32	0.7	1.2*	40
6	2	1.1	1.9	32	0.5	1.6	32	0.5	1.2*	32	0.5	1.2*	36
7		0.7	1.9	32	0.7	1.9	40	0.7	1.6	36	0.5	1.4	32
8	2	1.1	1.6	36	0.7	1.4	36	0.7	1.2*	36	0.5	1.2*	36
9	1	1.1	1.9	36	1.1	1.9	40	0.7	1.9	32	0.5	1.6	32
10	1	1.1	1.6	32	0.7	1.6	32	0.7	1.4	36	0.5	1.4	32
11	2	0.7	1.9	36	0.7	1.9	40	0.7	1.6	32	0.5	1.4	40
12	1	1.1	1.6	32	1.1	1.2*	36	0.5	1.6	32	0.5	1.6	40
13		1.1	1.6	32	1.1	1.6	36	1.1	1.2*	36	0.5	1.2*	32
14		1.1	1.6	32	0.7	1.6	36	0.7	1.6	40	0.5	1.2*	40
15		1.1	1.9	36	0.7	1.6	36	0.7	1.4	32	0.7	1.2*	36
16	2	1.1	1.9	32	0.7	1.9	32	0.7	1.4	32	0.7	1.4	40
17	1	1.1	1.9	36	1.1	1.9	40	0.7	1.4	40	0.5	1.4	40
18	1	0.7	1.6	32	0.7	1.6	40	0.7	1.4	40	0.5	1.4	36
19		1.1	1.4	32	1.1	1.4	40	0.5	1.6	32	0.5	1.6	40
20		1.1	1.9	40	1.1	1.6	40	1.1	1.4	32	0.7	1.2*	32
21	1	0.5	1.9	32	0.5	1.6	32	0.5	1.4	36	0.5	1.2*	32
22		1.1	1.6	40	0.7	1.9	32	0.7	1.9	40	0.5	1.4	32

KOMBI	GLAS	RAHME	SCHALL	GLAS	RAHME	SCHALL	GLAS	RAHME	SCHALL	GLAS	RAHME	SCHALL
1	1.1	1.9	32	0.7	1.6	32	0.5	1.6	32	0.5	1.6	36
2	0.7	1.4	32	0.7	1.4	40	0.5	1.2*	32	0.5	1.4	40
3	1.1	1.9	32	1.1	1.9	40	0.5	1.9	32	0.5	1.9	40
4	1.1	1.6	32	1.1	1.4	32	1.1	1.2*	32	0.7	1.2*	32
5	1.1	1.6	32	1.1	1.6	36	1.1	1.2*	32	0.7	1.2*	40
6	1.1	1.9	32	0.5	1.6	32	0.5	1.2*	32	0.5	1.2*	36
7	0.7	1.9	32	0.7	1.9	40	0.7	1.6	36	0.5	1.4	32
8	1.1	1.6	36	0.7	1.4	36	0.7	1.2*	36	0.5	1.2*	36
9	1.1	1.9	36	1.1	1.9	40	0.7	1.9	32	0.5	1.6	32
10	1.1	1.6	32	0.7	1.6	32	0.7	1.4	36	0.5	1.4	32
11	0.7	1.9	36	0.7	1.9	40	0.7	1.6	32	0.5	1.4	40
12	1.1	1.6	32	1.1	1.2*	36	0.5	1.6	32	0.5	1.6	40
13	1.1	1.6	32	1.1	1.6	36	1.1	1.2*	36	0.5	1.2*	32
14	1.1	1.6	32	0.7	1.6	36	0.7	1.6	40	0.5	1.2*	40
15	1.1	1.9	36	0.7	1.6	36	0.7	1.4	32	0.7	1.2*	36
16	1.1	1.9	32	0.7	1.9	32	0.7	1.4	32	0.7	1.4	40
17	1.1	1.9	36	1.1	1.9	40	0.7	1.4	40	0.5	1.4	40
18	0.7	1.6	32	0.7	1.6	40	0.7	1.4	40	0.5	1.4	36
19	1.1	1.4	32	1.1	1.4	40	0.5	1.6	32	0.5	1.6	40
20	1.1	1.9	40	1.1	1.6	40	1.1	1.4	32	0.7	1.2*	32
21	0.5	1.9	32	0.5	1.6	32	0.5	1.4	36	0.5	1.2*	32
22	1.1	1.6	40	0.7	1.9	32	0.7	1.9	40	0.5	1.4	32

B.2 Beschreibende Statistik

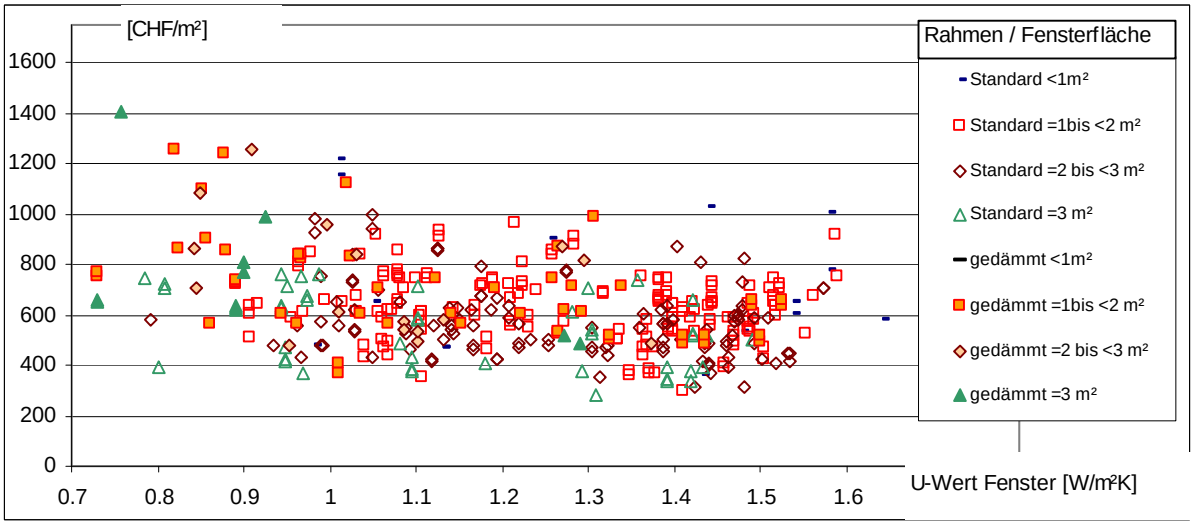


Abbildung B.2-1 Spezifische Fensterpreise (CHF/m2) in Abhängigkeit der Fenster-U-Werte für Fenster mit Holzrahmen, aufgeteilt nach Rahmenqualität (Standard oder gedämmt) und Fenstergrössenklassen.

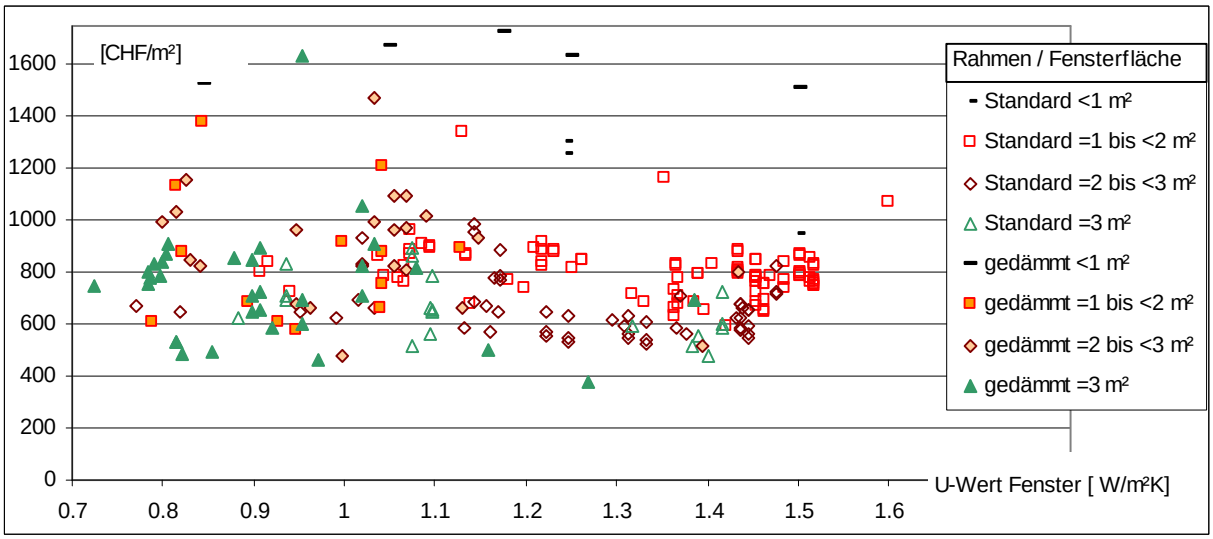


Abbildung B.2-2 Spezifische Fensterpreise (CHF/m2)in Abhängigkeit der Fenster-U-Werte für Fenster mit Holz-Metallrahmen aufgeteilt nach Rahmenqualität (Standard oder gedämmt) und Fenstergrössenklassen.

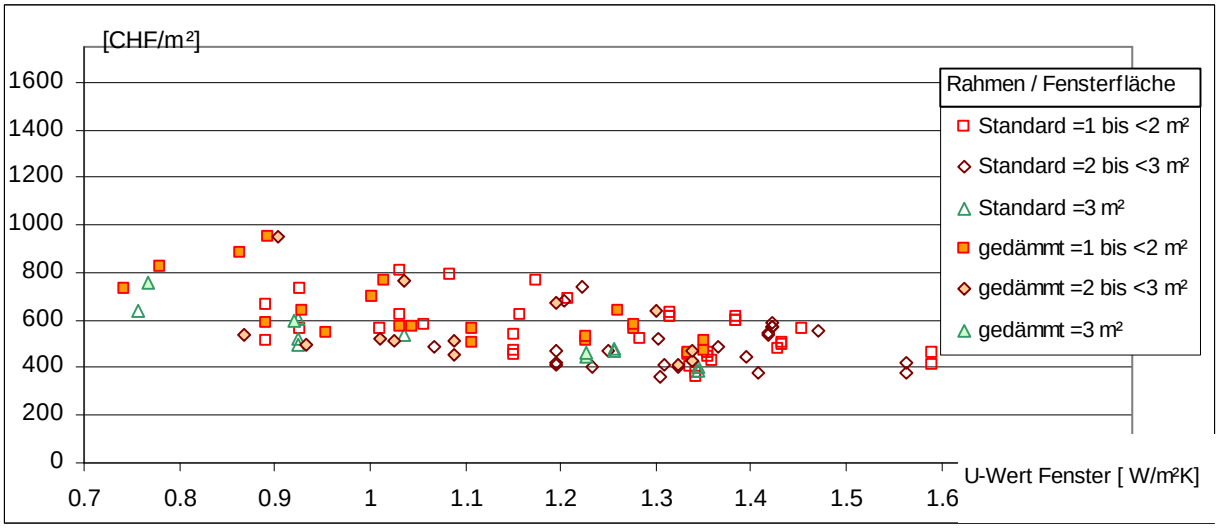


Abbildung B.2-3 Spezifische Fensterpreise (CHF/m2)in Abhängigkeit der Fenster-U-Werte für Fenster mit Kunststoffrahmen aufgeteilt nach Rahmenqualität (Standard oder gedämmt) und Fenstergrössenklassen.

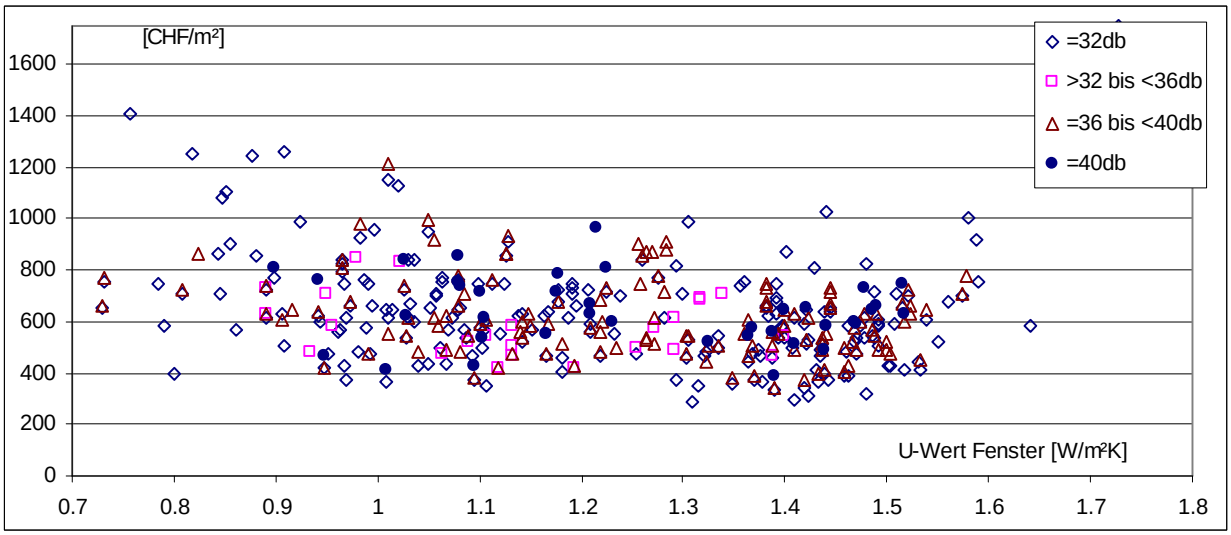


Abbildung B.2-4 Spezifische Fensterpreise (CHF/m2)in Abhängigkeit der Fenster-U-Werte für Fenster mit Holzrahmen, aufgeteilt nach Schalldämm-Klassen.

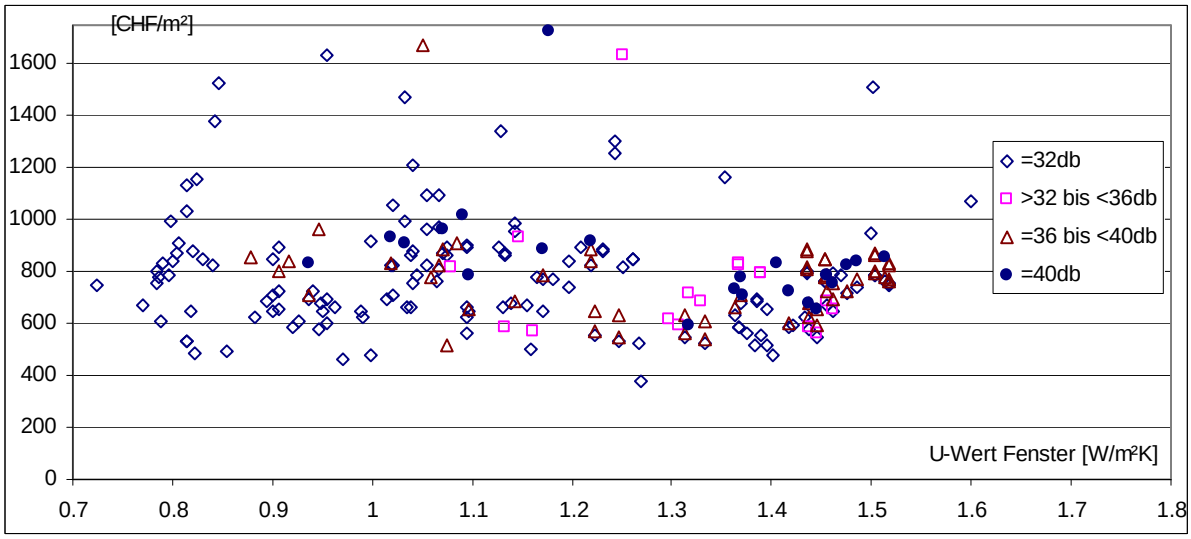


Abbildung B.2-5 Spezifische Fensterpreise (CHF/m2) in Abhängigkeit der Fenster-U-Werte. für Fenster mit Holz-Metall-Rahmen, aufgeteilt nach Schalldämm-Klassen

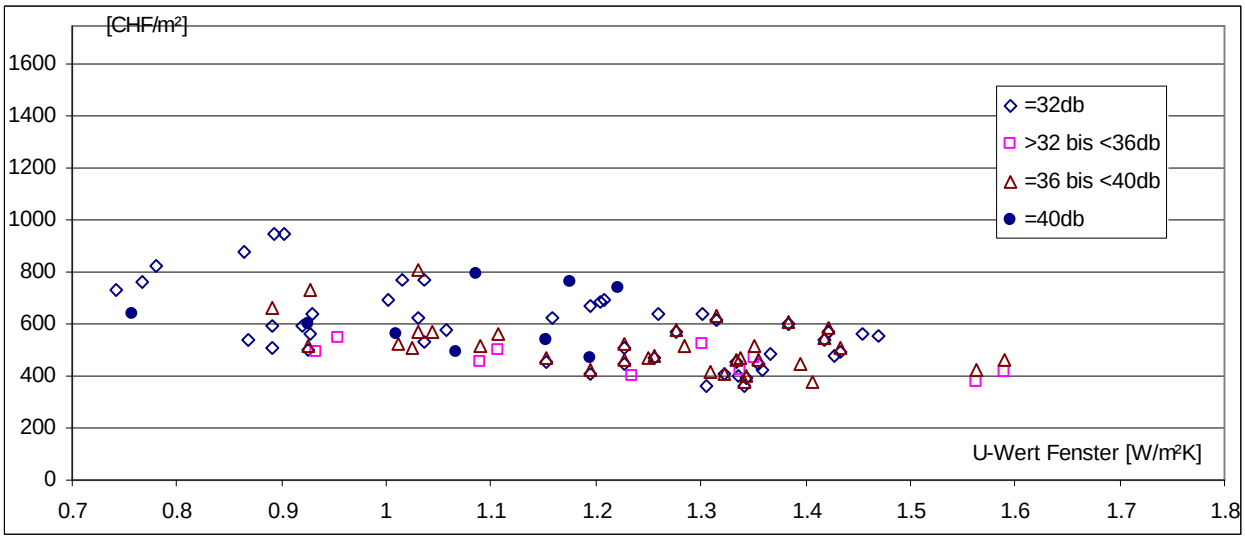


Abbildung B.2-6 Spezifische Fensterpreise (CHF/m2) in Abhängigkeit der Fenster-U-Werte. für Fenster mit Kunstoffrahmen, aufgeteilt nach Schalldämm-Klassen

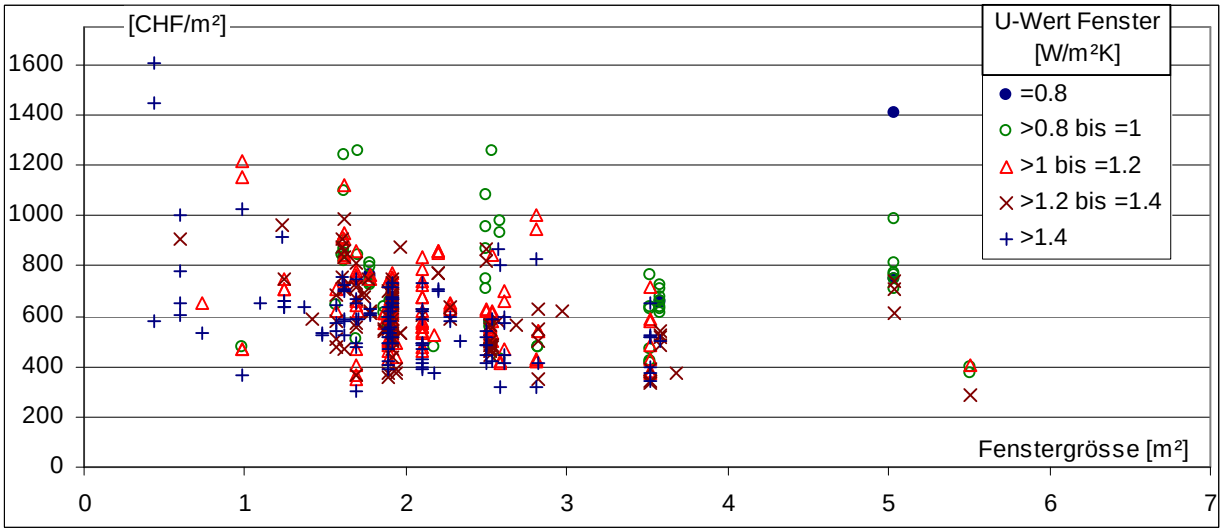


Abbildung B.2-7 Spezifische Fensterpreise (CHF/m2) in Abhängigkeit ihrer Fenstergrösse für Fenster mit Holzrahmen, aufgeteilt nach Fenster-U-Wert-Klassen.

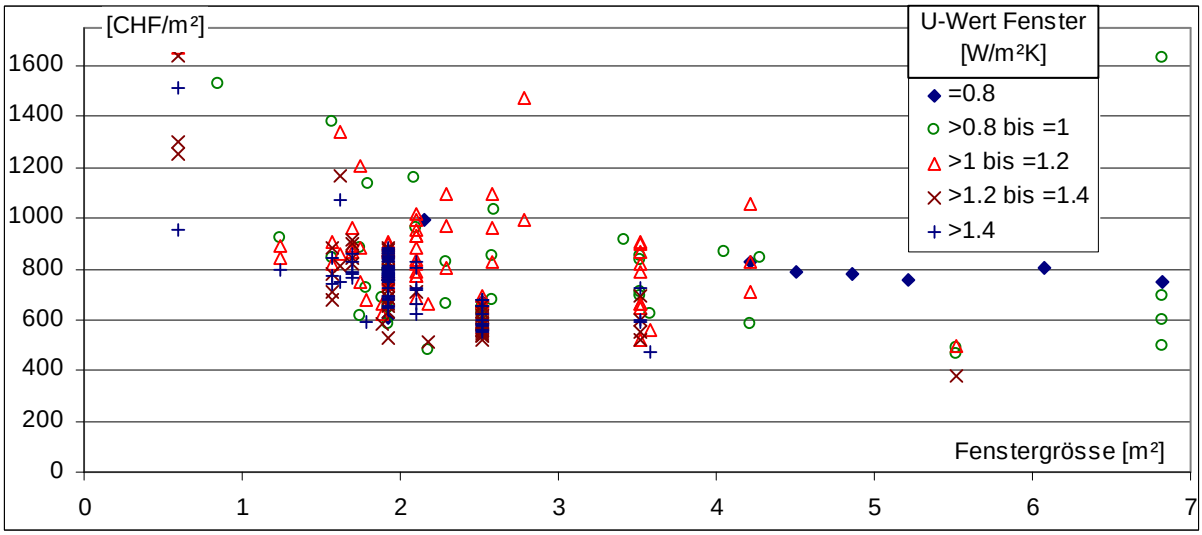


Abbildung B.2-8 Spezifische Fensterpreise (CHF/m2) in Abhängigkeit ihrer Fenstergrösse für Fenster mit Holz-Metallrahmen, aufgeteilt nach Fenster-U-Wert-Klassen.

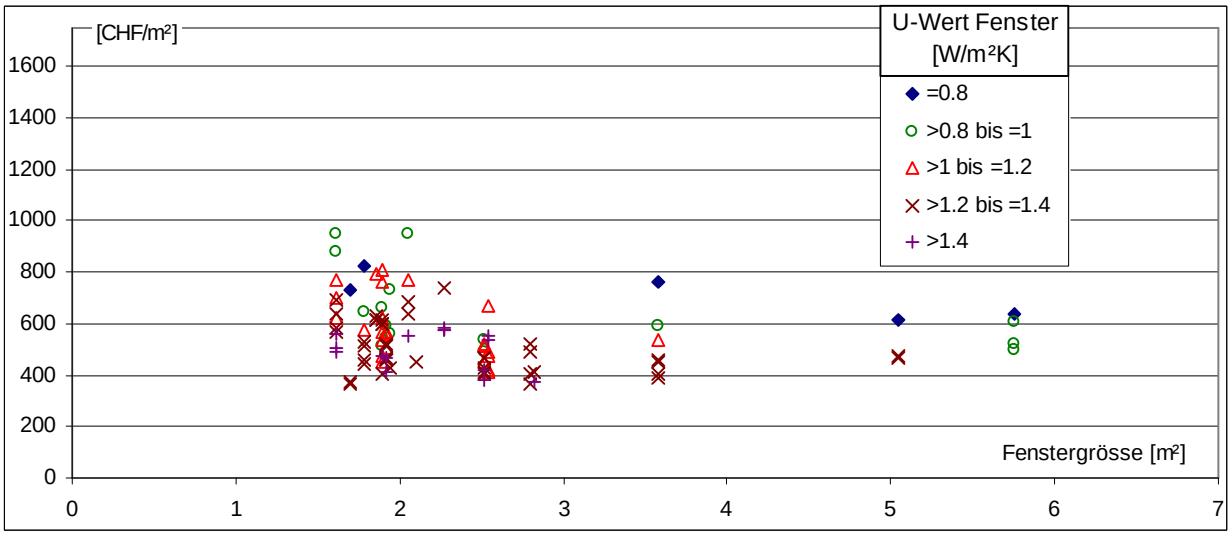


Abbildung B.2-9 Spezifische Fensterpreise (CHF/m2) in Abhängigkeit ihrer Fenstergrösse für Fenster mit Kunstoffrahmen, aufgeteilt nach Fenster-U-Wert-Klassen.

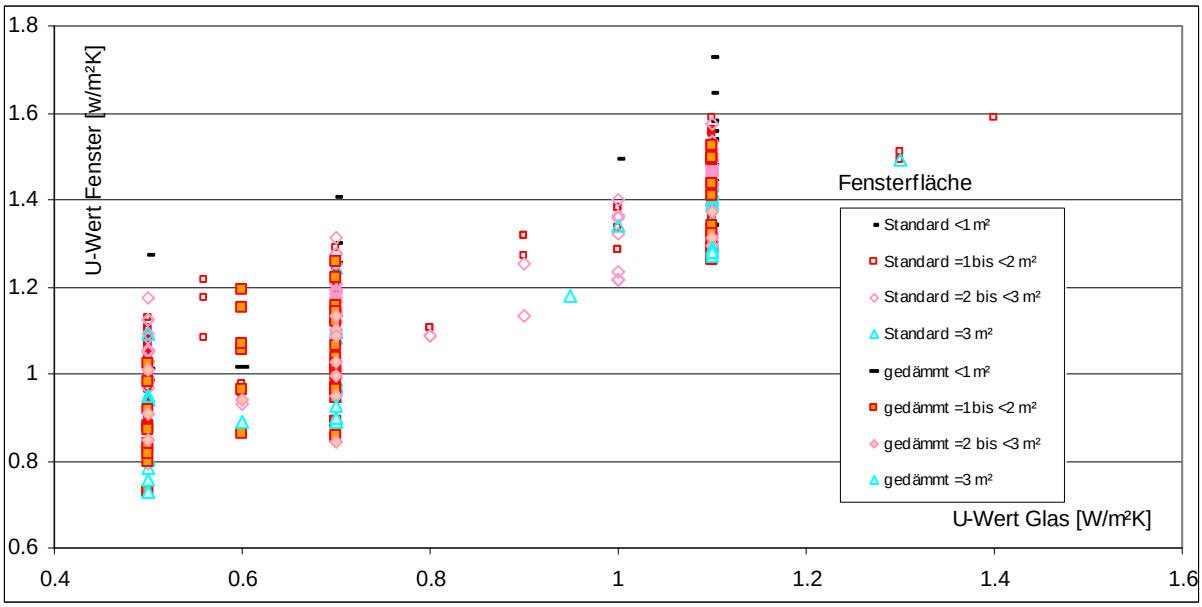


Abbildung B.2-10 Der U-Wert des Fensters in Abhängigkeit des U-Wertes des Glases. Hier berücksichtigte Daten stammen von Fenstern mit Holzrahmen. Die Punkte werden zusätzlich in Gruppen bezüglich ihrer Fensterfläche dargestellt.

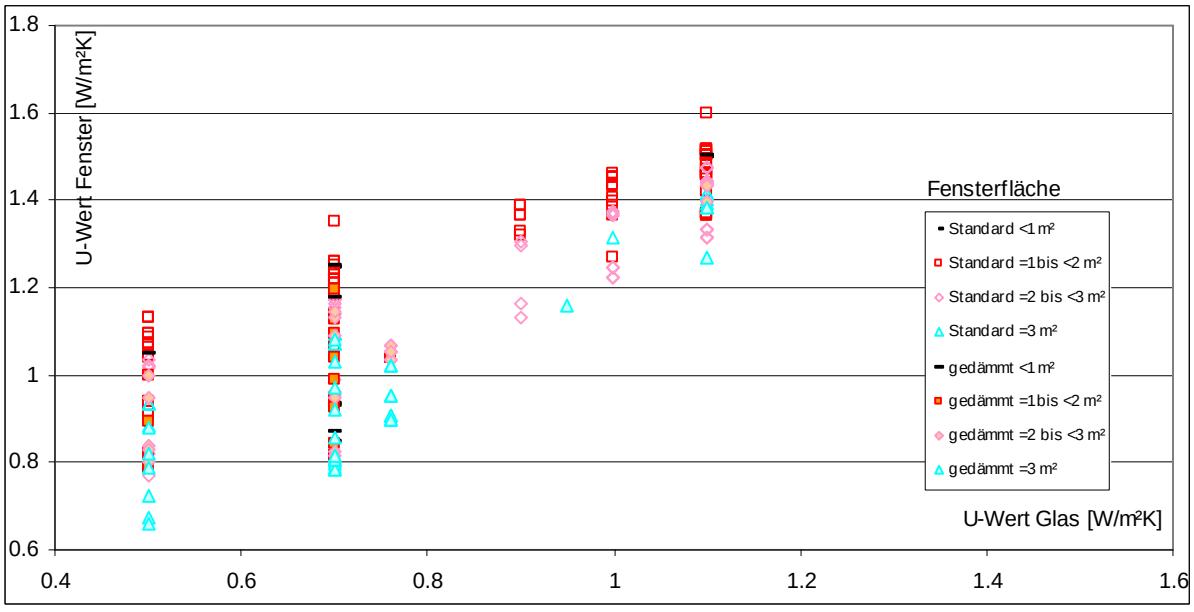


Abbildung B.2-11 Der U-Wert des Fensters in Abhängigkeit des U-Wertes des Glases. Hier berücksichtigte Daten stammen von Fenstern mit Holz-Metallrahmen. Die Punkte werden zusätzlich in Gruppen bezüglich ihrer Fensterfläche dargestellt.

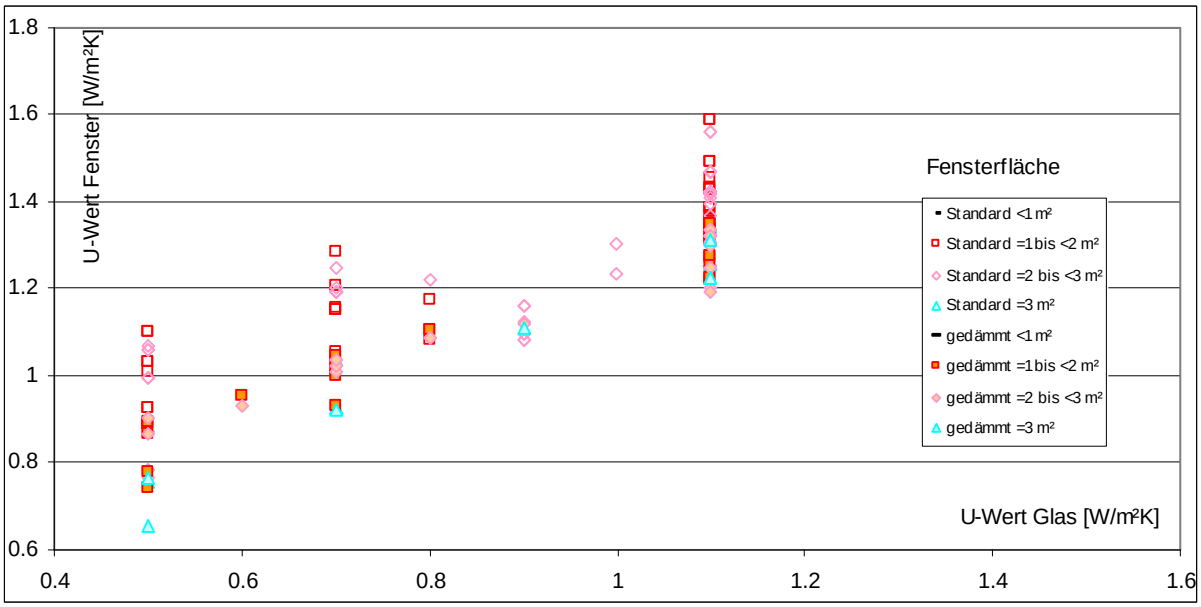


Abbildung B.2-12 Der U-Wert des Fensters in Abhängigkeit des U-Wertes des Glases. Hier berücksichtigte Daten stammen von Fenstern mit Kunststoffrahmen. Die Punkte werden zusätzlich in Gruppen bezüglich ihrer Fensterfläche dargestellt.

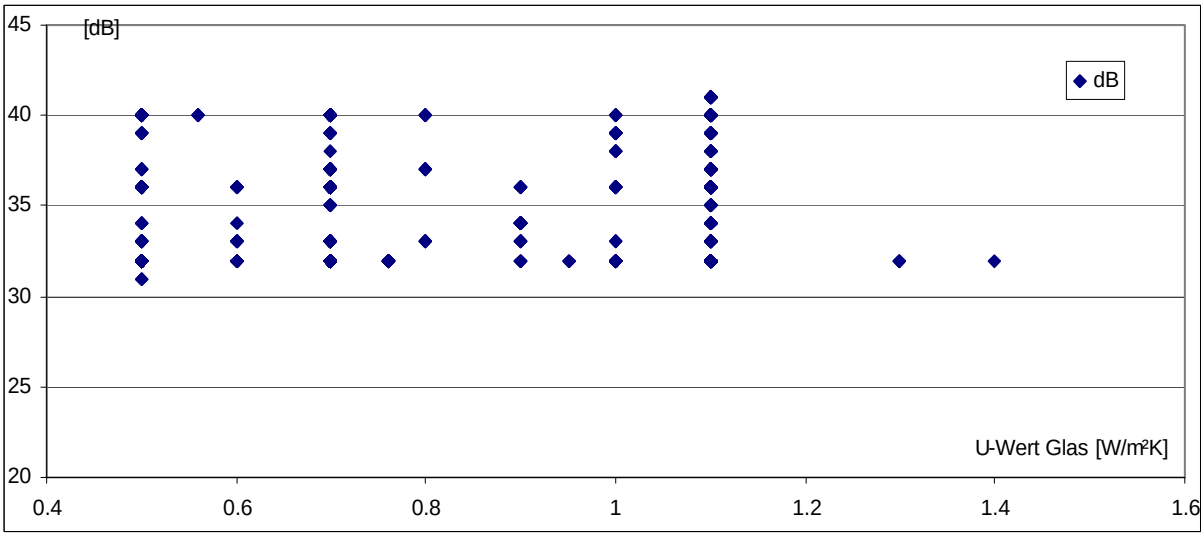


Abbildung B.2-13 Das Schalldämmmass in Abhängigkeit des U-Wertes des Glases.

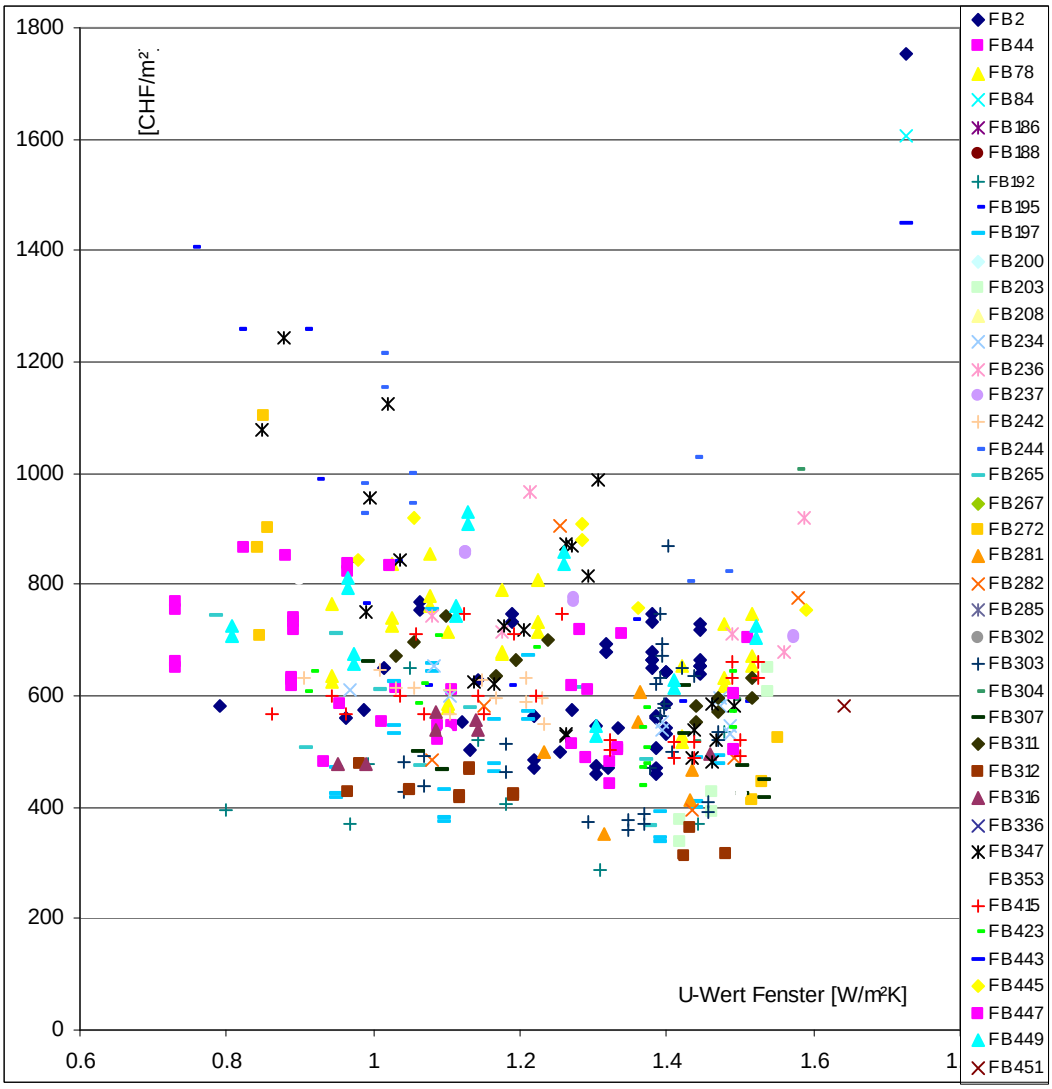


Abbildung B.2-14 Quadratmeter-Fensterpreise der einzelnen Fensterbauer in Abhängigkeit der U-Werte der Fenster. Die hier dargestellten Werte stammen von Fenstern mit Holzrahmen.

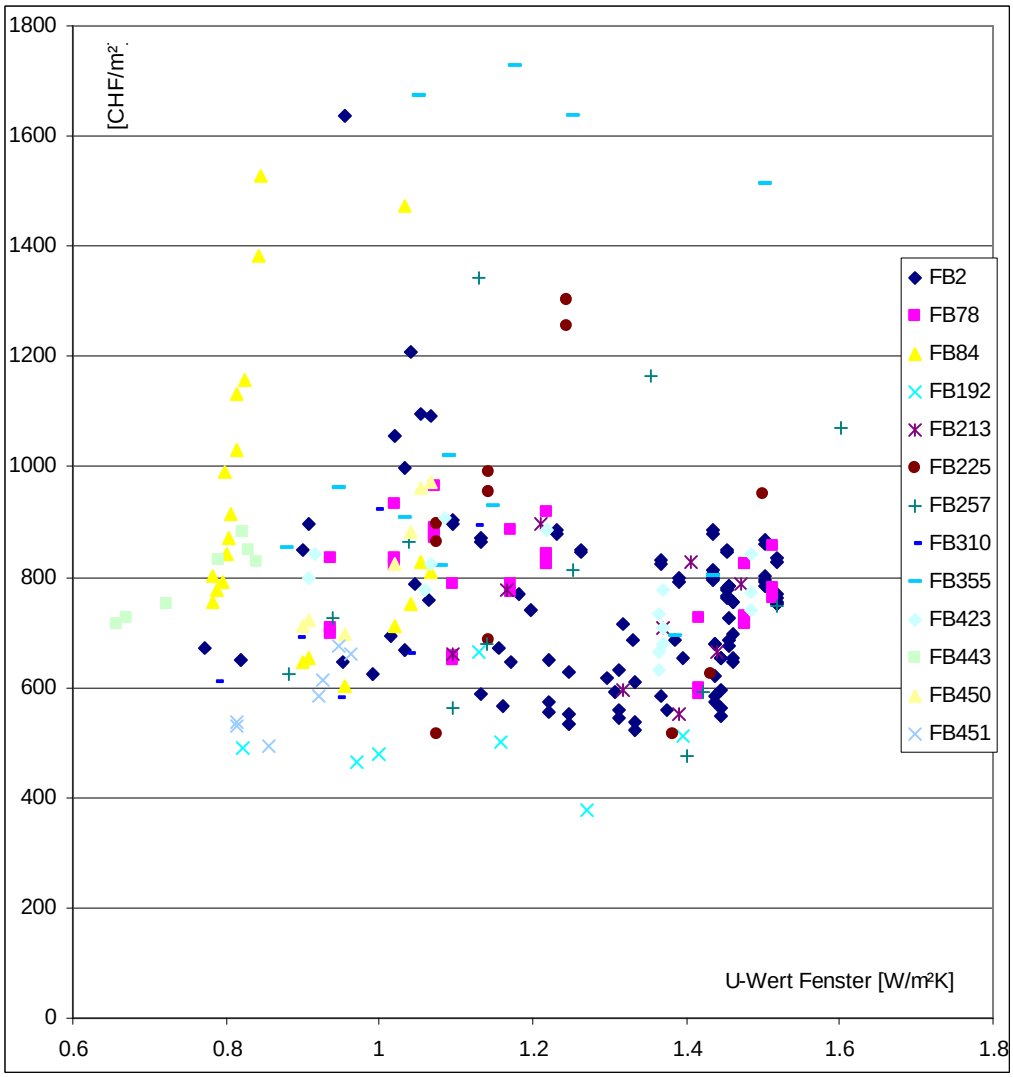


Abbildung B.2-15 Quadratmeter-Fensterpreise der einzelnen Fensterbauer in Abhängigkeit der U-Werte der Fenster. Die hier dargestellten Werte stammen von Fenstern mit Holz-Metallrahmen.

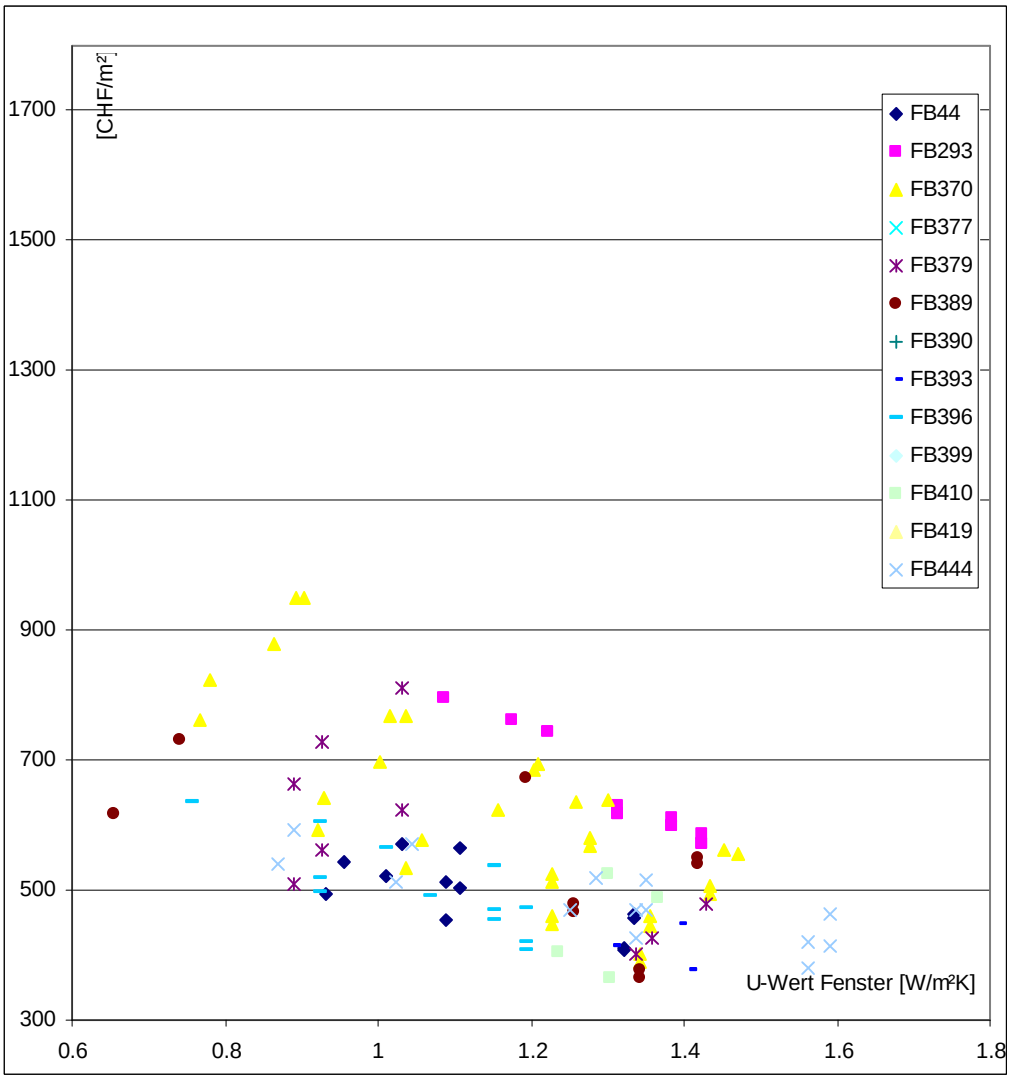


Abbildung B.2-16 Quadratmeter-Fensterpreise der einzelnen Fensterbauer in Abhängigkeit der U-Werte der Fenster. Die hier dargestellten Werte stammen von Fenstern mit Kunststoffrahmen.

C Heizwärmebedarf in Funktion verschiedener Einflussfaktoren

C.1 Energiebilanz von Fenstern, Sensitivitätsrechnungen

Tabelle C.1-1 Energiebilanz unterschiedlicher Fensterqualitäten bei verschiedenen Einbausituationen (MJ/$m^2_{Fenster}$a), ohne Berücksichtigung der linearen Verluste der Fensterleibungen. Werte in fett: am Markt weit verbreitete Fenstertypen.

	Beschattungsfaktor=0.9 fg= 0.94 bis 0.96				Beschattungsfaktor =0.7 fg 0.96 bis 0.97				Beschattungsfaktor =0.5 fg 0.97 bis 0.98			
	Süd	Ost	West	Nord	Süd	Ost	West	Nord	Süd	Ost	West	Nord
Referenzfenster, g=0.65	172	-115	-95	-304	35	-192	-176	-341	-108	-272	-261	-381
Referenzfenster, g=0.57	97	-157	-139	-324	-25	-226	-212	-358	-153	-298	-288	-394
Dreifachglas U=0.7	136	-96	-80	-249	24	-159	-147	-280	-93	-225	-216	-312
Dreifachglas U=0.5, g=0.42	83	-106	-93	-231	-10	-159	-149	-257	-105	-213	-205	-283
Dreifachglas U=0.5, g=0.5	160	-63	-47	-210	52	-124	-112	-240	-60	-187	-178	-271
Rahmen 0.8, Glas Referenz	162	-91	-74	-258	40	-160	-146	-292	-86	-231	-221	-327
Rahmen 0.8, Glas U=0.7	201	-30	-14	-182	89	-93	-80	-213	-26	-158	-149	-245
Passivhausfenster* (g=0.42)	176	-12	1	-136	84	-64	-54	-161	-10	-117	-110	-188
Passivhausfenster (g=0.5)	253	31	46	-115	146	-29	-17	-144	35	-92	-83	-175

Quelle Berechnungen CEPE mittels Entech, Monatsmethode, Fensteranteil A_{Fe}/EBF=0.2 (50% Süd, je 16 bzw. 17% für Ost/West bzw. Nord), Rahmenanteil Fenster 30%, **Gebäudehülle heutiger Baustandard,** interne Wärmegewinne gemäss Standardnutzung EFH,

Tabelle C.1-2 Energiebilanz unterschiedlicher Fensterqualitäten bei verschiedenen Einbausituationen (MJ/$m^2_{Fenster}$a), ohne Berücksichtigung der linearen Verluste der Fensterleibungen. Werte in fett: am Markt weit verbreitete Fenstertypen.

	Beschattungsfaktor=0.9 fg= 0.81 bis 0.87				Beschattungsfaktor =0.7 fg 0.85 bis 0.90				Beschattungsfaktor =0.5 fg 0.89 bis 0.93			
	Süd	Ost	West	Nord	Süd	Ost	West	Nord	Süd	Ost	West	Nord
Referenzfenster, g=0.65	95	-158	-141	-325	-10	-217	-203	-354	-130	-285	-275	-387
Referenzfenster, g=0.57	39	-190	-174	-341	-60	-246	-233	-368	-170	-308	-298	-398
Dreifachglas U=0.7	78	-129	-115	-265	-11	-179	-167	-290	-111	-235	-227	-317
Dreifachglas U=0.5, g=0.42	41	-130	-118	-243	-35	-173	-164	-264	-119	-220	-213	-287
Dreifachglas U=0.5, g=0.5	101	-96	-83	-226	17	-144	-133	-250	-78	-197	-189	-276
Rahmen 0.8, Glas Referenz	95	-129	-114	-276	0	-182	-170	-303	-107	-243	-233	-332
Rahmen 0.8, Glas U=0.7	134	-68	-54	-201	49	-116	-105	-224	-47	-170	-162	-251
Passivhausfenster* (g=0.42)	124	-41	-30	-150	52	-82	-73	-170	-27	-127	-120	-192
Passivhausfenster (g=0.5)	180	-10	3	-135	101	-54	-44	-157	12	-105	-97	-182

Quelle Berechnungen CEPE mittels Entech, Monatsmethode, Fensteranteil A_{Fe}/EBF=0.2 (50% Süd, je 16 bzw. 17% für Ost/West bzw. Nord), Rahmenanteil Fenster 30%, **Wärmedämmung äquival. Passivhaus (rund 30cm),** interne Wärmegewinne gemäss Standardnutzung EFH, mit WRG, **energetisch wirksamer Lüftungsverlust 0.15/h** Gewinn/Verlust<0.85

Bei der nachfolgenden *Tabelle C.1-3* wird der Einfluss eines höheren Glasanteils (geringerer Rahmenanteil) ersichtlich, indem die Werte dieser Tabelle mit denjenigen in Tabelle 4.2-17 verglichen werden. Hinweis: *Die Werte in Tabelle C.1-3 sind nur für die Sensitivität des höheren Glasanteils zu verwenden (ceteris paribus Berechnung);* realistischerweise ist ein so tiefer Glasanteil eher bei grösserflächigen Fenstern zu erreichen. Diese haben bei den angenommenen g-Werten jedoch einen tieferen Gesamtfenster-U-Wert. Die Energiebilanz von grossflächigen Fenstern mit entsprechend hohem Glasanteil ist in Tabelle Tabelle 4.2-18 im Haupttext zu finden (Gebäudehülle Minergiequalität) und in Tabelle C.1-4 für eine Gebäudehüllenqualität gemäss heutiger Bauweise.

Tabelle C.1-3 *Energiebilanz unterschiedlicher Fensterqualitäten bei verschiedenen Einbausituationen (MJ/m2Fenstera), kleine Fenster (1.7 m²), Sensitivität hoher Glasanteil (85%pro Fenster) ohne Berücksichtigung der linearen Verluste der Fensterleibungen. Werte in fett: am Markt weit verbreitete Fenstertypen.*

	Beschattungsfaktor=0.9 fg= 0.83 bis 0.87				*Beschattungsfaktor =0.7 fg 0.85 bis 0.90*				*Beschattungsfaktor =0.5 fg 0.89 bis 0.93*			
	Süd	*Ost*	*West*	*Nord*	*Süd*	*Ost*	*West*	*Nord*	*Süd*	*Ost*	*West*	*Nord*
Referenzfenster, g=0.65	***225***	***-85***	***-64***	***-289***	***100***	***-155***	***-138***	***-324***	***-47***	***-238***	***-225***	***-364***
Referenzfenster, g=0.57	***158***	***-122***	***-103***	***-307***	***39***	***-190***	***-174***	***-340***	***-96***	***-266***	***-254***	***-378***
Dreifachglas U=0.7	***190***	***-65***	***-48***	***-234***	***82***	***-127***	***-112***	***-264***	***-42***	***-196***	***-186***	***-298***
Dreifachglas U=0.5, g=0.42	***137***	***-76***	***-61***	***-216***	***42***	***-129***	***-118***	***-242***	***-62***	***-188***	***-179***	***-271***
Dreifachglas U=0.5, g=0.5	*211*	*-34*	*-18*	*-196*	*107*	*-93*	*-79*	*-225*	*-11*	*-159*	*-149*	*-257*
Rahmen 0.8, Glas Referenz												
Rahmen 0.8, Glas U=0.7	*246*	*-4*	*13*	*-170*	*142*	*-63*	*-49*	*-199*	*22*	*-131*	*-120*	*-232*
Passivhausfenster (g=0.42)*	*222*	*14*	*28*	*-123*	*131*	*-37*	*-26*	*-148*	*31*	*-94*	*-86*	*-176*
Passivhausfenster (g=0.5)	*290*	*52*	*69*	*-104*	*193*	*-3*	*11*	*-131*	*80*	*-66*	*-56*	*-163*

Quelle *Berechnungen CEPE mittels Entech, Monatsmethode, Fensteranteil A /EBF=0.2 (50% Süd, je 16 bzw. 17% für Ost/West bzw. Nord), Rahmenanteil 15%, **Wärmedämmung äquival. Minergie (rund 20cm),** interne Wärmegewinne und Lüftungsverluste gemäss Standardnutzung EFH*

Tabelle C.1-4 Energiebilanz (MJ/$m^2_{Fenster}$a) **grossflächiger Fenster (5 m²) mit hohem Glasanteil von 85%** für unterschiedlicher Fensterqualitäten bei verschiedenen Einbausituationen, ohne Berücksichtigung der linearen Verluste der Fensterleibungen

U_w		Beschattungsfaktor=0.9 fg= 0.87 bis 0.9				Beschattungsfaktor =0.7 fg 0.91 bis 0.94				Beschattungsfaktor =0.5 fg 0.94 bis 0.96			
		Süd	Ost	West	Nord	Süd	Ost	West	Nord	Süd	Ost	West	Nord
1.28	**Referenzfenster, g=0.65**	**328**	**7**	**29**	**-204**	**192**	**-69**	**-51**	**-242**	**38**	**-157**	**-143**	**-285**
1.28	**Referenzfenster, g=0.57**	**255**	**-34**	**-14**	**-224**	**128**	**-106**	**-90**	**-260**	**-13**	**-185**	**-174**	**-299**
0.94	**Dreifachglas Ug=0.7**	**304**	**41**	**59**	**-132**	**188**	**-24**	**-10**	**-164**	**60**	**-97**	**-86**	**-200**
0.77	**3fach-WS, Ug=0.5, g=0.42**	**255**	**37**	**52**	**-107**	**155**	**-19**	**-7**	**-134**	**47**	**-80**	**-71**	**-164**
0.77	3fach-WS, Ug=0.5, g=0.5	333	81	98	-85	222	19	33	-116	100	-51	-40	-150
1.17	U_{Rahmen} 0.8, Glas Referenz	285	-3	17	-192	159	-73	-58	-227	19	-152	-141	-266
0.83	U_{Rahmen} 0.8, 3fach-WS, Ug=0.7	333	72	90	-100	219	8	22	-132	92	-64	-53	-167
0.66	*PH*-fenster (g=0.42)*	285	69	84	-74	187	13	25	-101	80	-47	-38	-131
0.66	PH-fenster (g=0.5)	362	112	129	-53	254	51	65	-83	132	-18	-8	-117

Quelle Berechnungen CEPE mittels Entech, Monatsmethode, Fensteranteil A_{Fe}/EBF=0.2 (50% Süd, je 16 bzw. 17% für Ost/West bzw. Nord), Rahmenanteil 15%, Wärmedämmung Gebäudehülle ähnlich heutige Bauweise (U-Wert=0.3), interne Wärmegewinne und Lüftungsverluste gemäss Standardnutzung EFH,

C.2 Heizwärmebedarf in Funktion der Fensterflächen

Nachfolgend die Gebäude-Heizwärmebedarfe in Funktion der Fensterflächen für Gebäude mit Gebäudehülle der Passivhausqualität (Annahme: U-Wert=0.15 W/m²K). Die Annahme bei den Sensitivitätsrechnungen von Abbildung C.2-1 bis Abbildung C.2-4 ist, dass die Fläche pro Fenster **nicht** ändert in Funktion des zunehmenden Fensterflächenanteils (und damit auch nicht die U-Werte sowie die Glasanteile pro Fenster. Aufgezeigt wird also der Effekt von mehr Fenstern der gleichen Fläche. [Eine Sensitivitätsrechnung, bei der gleichzeitig realistische Annahmen über die zunehmende Fläche pro Fenster und entsprechend höhere Glasanteile und tiefere U-Werte (von 1.7 m² zu 5 m² ergibt sich immerhin eine Verbesserung um ca. 0.2 W/m²K bis 0.25 W/m²K) in Funktion des zunehmendem Fensterflächenanteils getroffen werden, ist noch ausstehend].

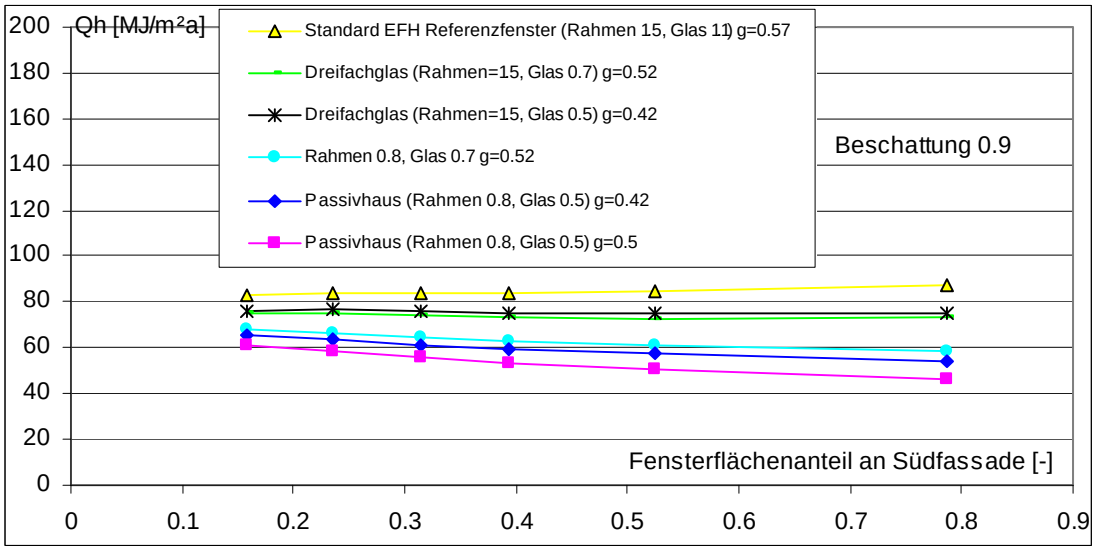


Abbildung C.2-1 Der Heizwärmebedarf Qh in Abhängigkeit der Fensteranteile an der Südfassade für verschiedene Fensterqualitäten. Ausgangslage ist ein Einfamilienhaus mit Wand-U-Wert von 0.15 W/m²K, energetisch wirksamen Luftwechsel von 0.15 und einer Beschattung von 0.9.

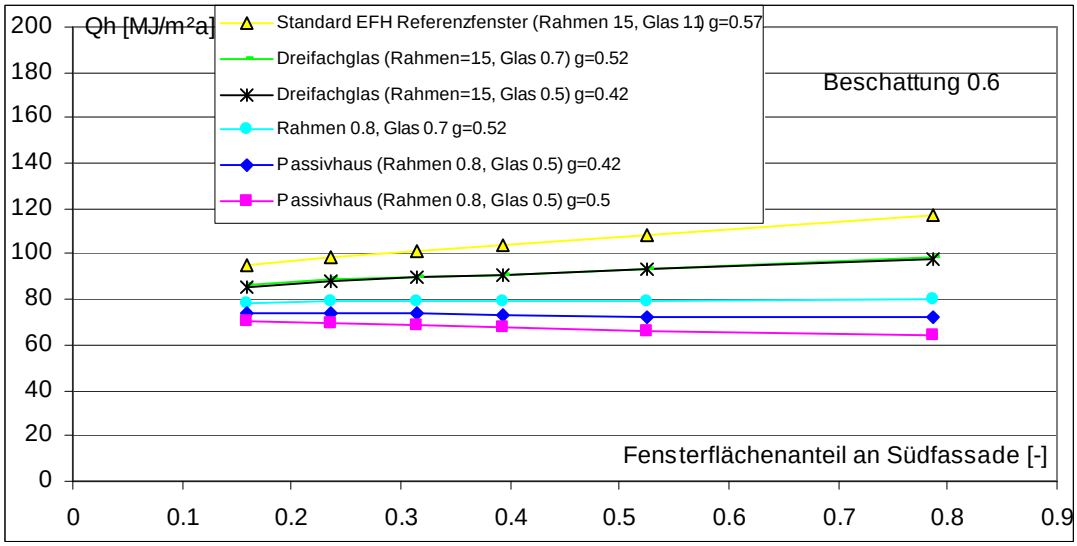


Abbildung C.2-2 Der Heizwärmebedarf Qh in Abhängigkeit der Fensteranteile an der Südfassade für verschiedene Fensterqualitäten. Ausgangslage ist ein Einfamilienhaus mit Wand-U-Wert von 0.15 W/m²K, energetisch wirksamen Luftwechsel von 0.15 und einer Beschattung von 0.6.

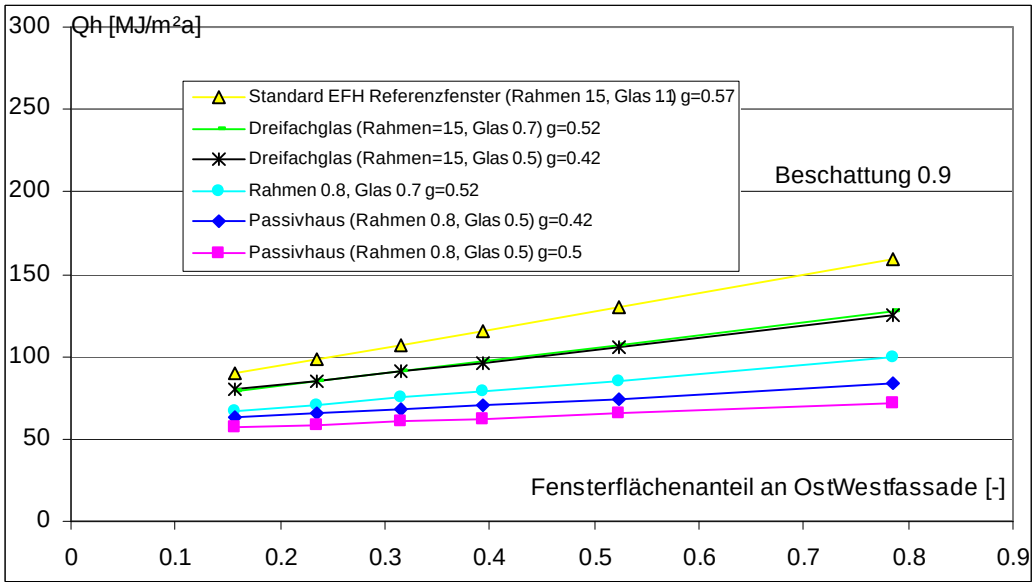


Abbildung C.2-3 Der Heizwärmebedarf Qh in Abhängigkeit der Fensteranteile an der Ost- und Westfassade für verschiedene Fensterqualitäten. Ausgangslage ist ein Einfamilienhaus mit Wand-U-Wert von 0.15 W/m²K, energetisch wirksamen Luftwechsel von 0.15 und einer Beschattung von 0.9.

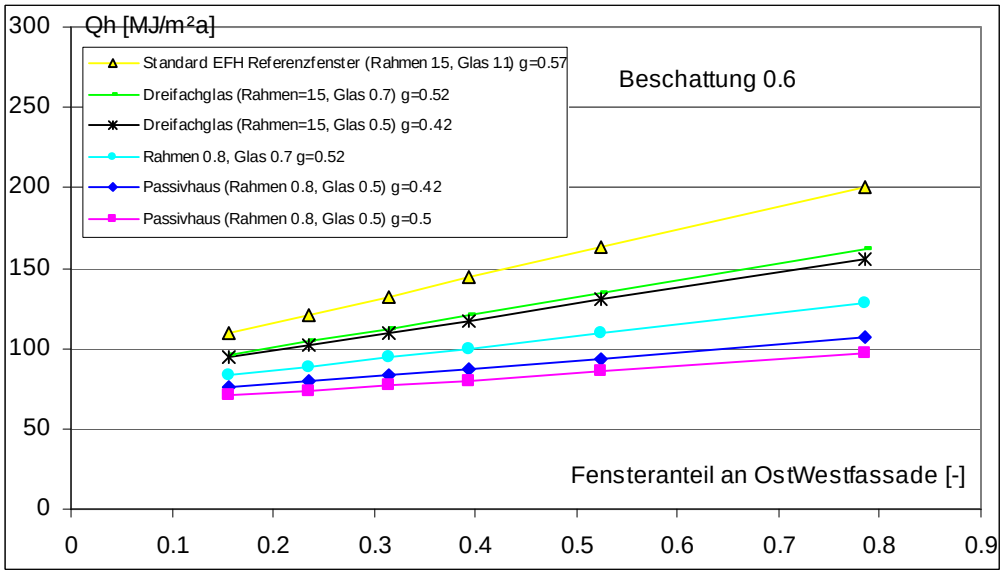


Abbildung C.2-4 Der Heizwärmebedarf Qh in Abhängigkeit der Fensteranteile an der Ost- und Westfassade für verschiedene Fensterqualitäten. Ausgangslage ist ein Einfamilienhaus mit Wand-U-Wert von 0.15 W/m²K, energetisch wirksamen Luftwechsel von 0.15 und einer Beschattung von 0.6.

C.3 Sensitivitätsrechnungen: Grenzkosten der Vergrösserung der Fensterflächen

Fall 3b Wechsel zu grösserflächigen Fenstern

Tabelle C.3-1 Grenzkosten der Vergrösserung der Fensterflächenanteile bei gleichzeitigem Wechsel von kleinflächigen zu grossflächigen Fenstern, Südorientierung (Fallbeispiel **Wand gemäss heutiger Bauweise**, U-Wert$_{Wand}$=0.28 W/m2K), gemessen am kleinflächigen Fenster der jeweiligen Qualität

Süden	Beschattungssituation			
	0.9	0.7	0.5	0.3
Referenzfenster (Rahmen 1.5, Glas 1.1) g=0.65	0.08	0.10	0.16	0.67
Referenzfenster (Rahmen 1.5, Glas 1.1) g=0.57	0.08	0.10	0.18	
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.7) g=0.52	0.09	0.11	0.16	0.36
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.42	0.11	0.13	0.19	0.35
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.5	0.12	0.14	0.19	0.33
Rahmen 0.8, Glas 1.1 g=0.57	0.13	0.17	0.30	
Rahmen 0.8, Glas 0.7 g=0.52	0.15	0.18	0.25	0.55
Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.42	0.18	0.23	0.32	0.65
Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.5	0.18	0.22	0.29	0.55

Quelle Erhebungen, Auswertungen und Grenzkostenberechnungen: CEPE

Tabelle C.3-2 Grenzkosten der Vergrösserung der Fensterflächenanteile bei gleichzeitigem Wechsel von kleinflächigen zu grossflächigen Fenstern, Ost- und West-orientierung (Fallbeispiel **Wand gemäss heutiger Bauweise** -Wand, U-Wert$_{Wand}$=0.28 W/m^{2}K), gemessen am kleinflächigen Fenster der jeweiligen Qualität

	Beschattung 0.9		Beschattung 0.7	
	Ost	West	Ost	West
Referenzfenster (Rahmen 1.5, Glas 1.1) g=0.65	0.27	0.23	0.48	0.39
Referenzfenster (Rahmen 1.5, Glas 1.1) g=0.57	0.32	0.27	0.72	0.53
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.7) g=0.52	0.24	0.22	0.33	0.30
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.42	0.26	0.24	0.34	0.31
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.5	0.26	0.24	0.33	0.31
Rahmen 0.8, Glas 1.1 g=0.57	0.49	0.42	1.01	0.78
Rahmen 0.8, Glas 0.7 g=0.52	0.36	0.33	0.49	0.45
Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.42	0.43	0.39	0.57	0.52
Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.5	0.40	0.38	0.51	0.48

Quelle Erhebungen, Auswertungen und Grenzkostenberechnungen: CEPE

Tabelle C.3-3 Grenzkosten der Vergrösserung der Fensterflächenanteile bei gleichzeitigem Wechsel von kleinflächigen zu grossflächigen Fenstern, Südorientierung (Fallbeispiel **Passivhauswand**, U-Wert$_{Wand}$=0.15 W/m2K), gemessen am kleinflächigen Fenster der jeweiligen Qualität

Süden	Beschattungssituation			
	0.9	0.7	0.5	0.3
Referenzfenster (Rahmen 1.5, Glas 1.1) g=0.65	0.06	0.07	0.13	3.38
Referenzfenster (Rahmen 1.5, Glas 1.1) g=0.57	0.05	0.07	0.15	
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.7) g=0.52	0.07	0.09	0.14	0.41
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.42	0.09	0.11	0.17	0.40
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.5	0.10	0.12	0.17	0.35
Rahmen 0.8, Glas 1.1 g=0.57	0.11	0.16	0.30	
Rahmen 0.8, Glas 0.7 g=0.52	0.13	0.17	0.25	0.71
Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.42	0.17	0.22	0.33	0.89
Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.5	0.17	0.21	0.30	0.67

Quelle Erhebungen, Auswertungen und Grenzkostenberechnungen: CEPE

Tabelle C.3-4 Grenzkosten der Vergrösserung der Fensterflächenanteile bei gleichzeitigem Wechsel von kleinflächigen zu grossflächigen Fenstern, Ost- und West-orientierung (Fallbeispiel **Passivhauswand** -Wand, U-Wert$_{Wand}$=0.15 W/m^{2}K), gemessen am kleinflächigen Fenster der jeweiligen Qualität

	Beschattung 0.9		Beschattung 0.7	
	Ost	West	Ost	West
Referenzfenster (Rahmen 1.5, Glas 1.1) g=0.65	0.27	0.22	0.74	0.48
Referenzfenster (Rahmen 1.5, Glas 1.1) g=0.57	0.35	0.27	6.58	1.12
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.7) g=0.52	0.23	0.20	0.36	0.31
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.42	0.25	0.23	0.37	0.33
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.5	0.26	0.24	0.35	0.32
Rahmen 0.8, Glas 1.1 g=0.57	0.63	0.49	3.93	1.60
Rahmen 0.8, Glas 0.7 g=0.52	0.39	0.35	0.59	0.52
Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.42	0.47	0.43	0.71	0.63
Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.5	0.44	0.40	0.60	0.54

Quelle Erhebungen, Auswertungen und Grenzkostenberechnungen: CEPE

D Lüftungsanlagen

D.1 Grenzkosten der Lüftungsanlagen bei höheren Baukosten

Sind die baulichen Voraussetzungen gemäss **Tabelle 4.3-46** nicht erfüllt, ist mit Mehrinvestitionen zu rechnen. Tabelle D.1-2 (Referenzfall tiefe Luftwechsel) und Tabelle D.1-1 (Referenzfall hohe Luftwechsel) zeigen die entsprechenden Grenzkosten.

Tabelle D.1-1 Spezifische Grenzkosten der Nutzenergiereduktion CHF/kWh$_{NE}$ von Lüftungsanlagen bei ungünstigen baulichen Voraussetzungen (Mehrkosten gemäss **Tabelle 4.3-46**), ohne Berücksichtigung der nicht-energetischen Nutzen, Referenzfall tiefe Luftwechselraten gemäss **Tabelle 4.2-13**.

Ausgangslage	Bestehende EFH, alte Fenster		Bestehende EFH, neue Fenster (nach 1990)	Bestehende MFH, alte Fenster		Bestehende MFH, neue Fenster (nach 1990)
gleichzeitige Massnahme	keine	neue Fenster	-	keine	neue Fenster	-
Komfortlüftung zentral, mit WRG				0.54	0.44	0.56
Komfortlüftung pro Wg, mit WRG	0.59	0.38	0.52	0.58	0.48	0.61
Einzelraum-Komfortlüftung	1.00	0.66	1.11	0.79	0.60	0.85

Quelle: Berechnungen CEPE aufgrund der Tabellen zu Lufterneuerungen im Referenzfall und für die Lüftungsanlagen im Hauptberichtsteil

Tabelle D.1-2 Spezifische Grenzkosten der Nutzenergiereduktion CHF/kWhNE von Lüftungsanlagen bei ungünstigen baulichen Voraussetzungen (Mehrkosten gemäss **Tabelle 4.3-46**), ohne Berücksichtigung der nicht-energetischen Nutzen, Referenzfall hohe Luftwechselraten gemäss **Tabelle 4.2-14**.

Ausgangslage	Bestehende EFH, alte Fenster		Bestehende EFH, neue Fenster (nach 1990)	Bestehende MFH, alte Fenster		Bestehende MFH, neue Fenster (nach 1990)
gleichzeitige Massnahme	keine	neue Fenster	-	keine	neue Fenster	-
Komfortlüftung zentral, mit WRG				0.30	0.24	0.39
Komfortlüftung pro Wg, mit WRG	0.33	0.22	0.34	0.33	0.26	0.43
Einzelraum-Komfortlüftung	0.46	0.32	0.56	0.37	0.29	0.52

Quelle: Berechnungen CEPE aufgrund der Tabellen zu Lufterneuerungen im Referenzfall und für die Lüftungsanlagen im Hauptberichtsteil

E Liste der Daten liefernden Unternehmen

E.1 Fassaden und Dämmstoffe

- BWT Bau AG, E. Hitz, Luegislandstr. 26, 8051 Zürich
- Neba-therm, K. Hubschmid, Aarburgerstr. 1, 4600 Olten/SO
- Flumroc AG, Hans Winteler, Industriestr. 8, 8890 Flums/SG
- Flumroc AG, Kurt Frei, Industriestr. 8, 8890 Flums/SG
- Ernst Schweizer AG, Walter Baumgartner, Hagenholzstrasse 70, 8050 Zürich
- Gadola AG, Arthur Jörke, Willikon 35, 8618 Oetwil am See
- Gadola AG, Markus Gadola, Willikon 36, 8619 Oetwil am See
- Sarna Granol, Alex Kaiser, Hochhaus, 6060 Sarnen
- Sarna Granol, Ruedi Kistler, Hochhaus, 6061Sarnen
- Röfix AG, Jack Hautle, Herberriedstrasse, 9466 Sennwald
- Röfix AG Dietikon, R. Scharpf, Mossmattstrasse 30, 8953 Dietikon
- Marmoran AG, M. Baumann, Herr Schön, Industriestrasse 10, 8603 Volketswil
- EPS, Herr Suter, Bahnhofstrasse 61, 6403 Küssnacht am Rigi
- Carbotech, Herr Dinkel, Eulerstr. 68, 4051 Basel/BS
- Greutol AG, Peter Plangger, Libernstrasse 28, 8112 Otelfingen
- STO AG, Bruno Aellig, Südstrassse 14, 8172 Niederglatt
- ZZ Wancor, Herr Spitznagel, Althardstrasse 5, 8105 Regensdorf
- Dycherhoff, Herr Baioni, Steinacker 17, 4565 Recherswil/SO
- Contraco AG, Jean-Pierre Feuz, Grundrebenstrasse 27, 8932 Mettmenstetten
- Bramit AG, E. Mendel, Ladhuebstrasse 20, 9303 Wittenbach
- Fassag Fassadenbau AG, A. Maeder, Hohlstrasse 610, 8048 Zürich
- Diethelm, T. Peter, Spilhof 1, 5626 Hermetschwil
- Ickler SA, C.A. Huguenin, Hôtel-de-Ville 107, 2300 La Chaux-de-Fonds
- Foamglas, Pittsburgh Corning (Schweiz) AG, W. Trittenbach, Schöngrund 26, 6343 Rotkreuz
- Spaltenstein Hoch+Tiefbau AG, Karl Signer, Siewerdtstrasse 7, 8050 Zürich
- Eternit AG, Ch. Weder, 8867 Niederurnen/GL

E.2 Dach

- Ledermann Ulrich, entreprise de couverture, 2612 Cormoret
- Reusser Gottfried, Jungfrauweg 1, 3114 Wichtrach
- Junker-Dräyer Werner Dachdeckergeschäft, Hauptstrasse 14, 3251 Ruppoldsried
- Neuhaus Bedachungen AG, Einschlagweg 67, 3400 Burgdorf
- R. + M. Fischer AG, Bedachungen Lehenmattstrasse 55, 4052 Basel

- Buchli GmbH, Bedachungen, Bollweilerstrasse 21, 4055 Basel
- Jauslin, Flachdach AG, Sonnenmattstrasse 12, Postfach 429, 4132 Muttenz
- Hübscher AG Laufen, Bedachungen, St. Martinsweg 21, 4242 Laufen
- Kaufmann Holz und Bau AG, Im Kohlacker 397, 4323 Wallbach
- Dachtechnik, Andreas Escher, Oristalstrasse 85, 4410 Liestal
- Ritter Matthias, Bedachungen Geissbrunnen 51, 4457 Diegten
- Brunner Heinz, Bedachungen Kirchenfeld 469, 4712 Laupersdorf
- Meyer Adelbert, Bedachungen, Sängeliweg 27, 4900 Langenthal
- Christoffel Rageth dipl. Dachdeckermeister, Zelgweg 3, 5034 Suhr
- Grütter Bedachungen AG, Sandstrasse 22, 5712 Beinwil a.S.
- Ruedi Distel AG, Spenglerei & Bedachungen, Moosmattstrasse 20c, 6005 Luzern
- Brundach, Brun Christoph, Gewerbe Badhus 6, 6022 Grosswangen
- Werth AG, Kernserstrasse 11, 6056 Kägiswil
- Leo Ohnsorg AG, Bedachungen + Bauspenglerei, Hasenbergstrasse 5, 6312 Steinhausen
- Annen Holzbau AG, Herr Koch, Aeschi, Postfach 63, 6410 Goldau
- Moser Florian, Spenglerei/Bedachungen, Voa Nova 6, 7078 Lenzerheide
- Camastral Roger, Bedachungen, Salietstrasse 10, 7203 Trimmis
- E. Eisenhut, Inh. Staudacher + Söhne AG, Fröhlichstrasse 54, 8008 Zürich
- Süssmann AG, Bauabdichtungen, Herr A. Fluor, In Büngerten 46, Postfach, 8046 Zürich
- Alfred Gehring AG, Glattalstrasse 27, 8052 Zürich
- Hans Notter AG, Hüttenwiesenstrasse 3, 8108 Dällikon
- Ueli Brunner AG, Bedachungen & Fassaden, Hallauerstrasse 38, 8213 Neunkirch
- Gebrüder Looser, Fabrikstrasse 3, 8340 Hinwil
- K. Steiner AG, Bedachungen, Reitweg 2, 8400 Winterthur
- Willy Beyeler & Söhne AG, Hauswiesenweg 4, 8404 Winterthur
- Dachmarder GmbH, Bedachungen / Fassadenbau, Winterthurerstrasse 69, 8472 Seuzach
- Erne Bedachungs AG, Dorfstrasse 88, 8542 Wiesendangen
- Signer Dach AG, Sunnebergweg 5, 8634 Hombrechtikon
- Häni Martin, Burgstrasse 61, 8706 Meilen
- Diethelm Bedachungen GmbH, Schulhausstrasse 5, 8832 Wilen
- Eternit AG, Postfach, 8867 Niederurnen
- Schnider Markus Bedachungen & Fassadenbau, Birchstrasse 2b, 8906 Bonstetten
- Grob AG, Bedachungen / Fassadenbau, Lerchentalstrasse 2, 9016 St. Gallen
- Kurt Büchler AG, Ibergstrasse 16, 9220 Bischofszell
- Breu Bedachungen GmbH, Rutlenstrasse 5, 9413 Oberegg
- Näf Emil Bedachungen, 9633 Bächli/Hemberg

- Brändle Heinz Bedachungen AG, Schwarzenboden, 9656 Alt St. Johann
- Meyer & Salamon AG, Herr Salamon, 8915 Hausen
- Rösti-Bedachungen, Lenk, Herr Hsp. Rösti
- Matthias Ritter Bedachungen, Geissbrunnen 51, 4457 Diegten
- Leo Ohnsorg AG, Leo Ohnsorg jun, Steinhausen
- Markus Schnider Sägerei Zimmerei, Birchstrasse 3, 8906 Bonstetten
- Arthur Müggler & Co Bedachungen + Fassaden, Alte Landstrasse 65, 9450 Altstätten
- Ziegelei Rapperswil, L. Gasser AG, Heinz Reber, 3255 Rapperswil
- HG Commerciale, Christian Röthenmund, Staufacherquai 46, 8039 Zürich
- Bäeriswyl AG, René Spicher, Ried PF 16, 1716 Plaffeien
- Isofloc-Zellulosedämmstoff, Herr Wyss, St. Urbanstrasse 34, 4900 Langenthal BE
- Fritz Looser Söhne, Dachdecker u. Kaminfegergeschäft, Fehrenstr. 18, 8030 Zürich
- Wagner Bedachungen + Fassadenbau AG, E. Mosimann, Hardstrasse 78b, 5430 Wettingen
- Markus Schmid, Eschenmoos, 9413 Oberegg
- Bio Bau Zentrum (BBZ) AG, St. Urbanstrasse 34, 4902 Langenthal
- Beda Kälin, Bedachungen, Nauerstrasse 1, 8847 Egg
- Aarebau + Beratungs AG, Güterstrasse 2, Postfach 76, 5014 Gretzenbach
- E. Rüegg & Sohn AG, Dachdeckergeschäft, Scheuchzerstrasse 188, 8057 Zürich
- Mächler Dachbau GmbH, Adletshausen, Postfach 146, 8627 Grüningen
- Groog + CO, Bedachungen – Fassadenbau, Juraweg 17, 4803 Vordemwald
- Sahli AG, Dachdeckergeschäft, Gimmerz, 3283 Kallnach
- Huwiler Bedachungens AG, Rebbergstrasse 32, 5610 Wohlen
- Röllin, Dächer & Fassaden AG, Industriestrasse 9, 6345 Neuheim

E.3 Glas

- Glas Trösch, U. Moor, Industriestr. 29, 4922 Bützberg
- Glas Trösch, Erich Trösch, Industriestr. 29, 4922 Bützberg
- Pilkington, B. Gandola, Zentrumstr. 2, 4806 Wikon
- Pilkington, R. Flury, Zentrumstr. 2, 4806 Wikon
- Sofraver, Michel Grandchamp, 1754 Rosé /FR
- Giesbrecht, Kreuzlingen

E.4 Grosse und/oder innovative sowie zufällig ausgewählte Fensterfirmen

- 4B Bachmann AG, Kurt Kriesi, Thomas Walther, Herr Arnold An der Ron 7, 6280 Hochdorf
- 4B Bachmann AG, Ivo Bachmann, Zürichstrasse 81, Postfach 1033, 8134, Adliswil
- EgoKiefer AG, Norbert Buschor, Paul Hutter, Schöntalstrasse 2, 9450 Altstätten
- EgoKiefer AG, A. Gross, Bachstrasse 15, Postfach, 8038 Zürich

- Dörig Fenster Service AG, HR Kurz, Postfach, 9016 St.Gallen-Mörschwil
- EgoKiefer AG, Herr Rhyner, Herr Eugster, 8038 Zürich
- Hunkeler AG Luzern, Rolf Hunkeler, Zürichstrasse 85a, 6000 Luzern
- Klarer Fenster AG, R. Gredig, Gröblistrasse 14, 9014 St.Gallen
- Lehmann Arnegg AG, Fensterfabrikation, Daniel Lehmann, 9212 Arnegg
- Wenger A.+E. AG, Fensterbau, A. Wenger, Postfach 20, 3638 Blumenstein
- Fensterfabrik Albisrieden, Urs Frei, 8047 Zürich
- Kicon AG, Herr Widmer, Postfach, Weststrasse 14, 8570Weinfelden
- Pophaus AG, Viktor Eggenschwiler, Passwangstrasse 15, 4226 Breitenbach
- Lederbauer, Eberschwang 81, A-4906
- Häring, Müller, Bachmatten 9, 4435 Niederdorf
- Aerni Fenster AG, Fredy Kaufmann, 4422 Arisdorf
- Renggli AG, W. Meier, Gläng, 6247 Schötz
- Renggli AG, Herr Renggli, Gläng, 6247 Schötz
- AG für Holzindustrie, Daniel Martig, Alte Dorfstrasse 7, 3073 Gümligen
- Erne AG, Holzbau, Peter Humm, Werkstrasse 3, 5080 Laufenburg
- Scherrer Schreinerei AG, Bernhard Scherrer, Dorf 8, 9527 Niederhelfenschwil
- Schreinerei Schwab, Fensterfabrik, Rudolf Schwab, Bielstrasse 13, 3232 Ins
- Wirz AG, Fensterfabrik, H. von Allmen, Freiburgstrasse 359, 3018 Bern
- Wüst Schreinerei AG, Ernst Roth, Chr.Schnyderstr. 11, 6210 Sursee
- Aerni Fenster AG, Frau Jung, Klosterstrasse 44, 9403 Goldach
- EHRSAM FENSTERSYSTEME, B. Ehrsam, Postfach, 5430 Wettingen
- KFG Kunststoff-Fenster Gaeng GmbH,Herr Flückiger, Unt. Zollgasse 108, 3063 Ittigen
- KFT GmbH Pfaffnau, Fritz Wechsler, Brunnmatt 495, 6264 Pfaffnau
- Schär Werner, Mario Affrini, Galgenfeldweg 11, 3006 Bern
- Steme, Markus Meyer, Sandackerweg 35, 4704 Niederbipp

- Hekler AG, Beat Hekler, Hönggerstrasse 118, 8037 Zürich
- Auderset, Othmar AG, Brüelmatt 233, 3212 Gurmels
- Baumgartner G. AG, A. Meier, Flurstrasse 41, 6332 Hagendorn
- Berther H, Schreinerei, Hans B. Berther, Hellgasse 10, 6460 Altdorf
- Bresga Fenster AG, D. Bregenzer, Luxburgstrasse 8, 9322 Egnach
- DEMA Werk AG Holzbau, W. Hedinger, Postfach, 7402 Bonaduz
- HTI-Holzbau AG, Herr Spycher, Untere Bönigstr. 48, 3800 Interlaken
- Hasler Fenster AG, Herr Hasler, Oberwilerstr. 73, 4106 Therwil
- Holzbau Bucher AG, Fensterfabrik, Josef Röthlin, Untergasse 11, 6064 Kerns

- Könitzer + Hofer AG, Fensterfabrik, Peter Könizer, Vechigenstrasse 4, 3076 Worb
- Küng AG, Fensterfabrik, Peter Küng, Grünmattstrasse 8, 6032 Emmen
- Muesmatt AG Bern, Frau Sahli, Alpenstrasse 40, 3052 Zollikofen
- Parquet + Holzbau AG, Christian Oswald, Weissensteinstr. 4, 3008 Bern
- Roth Pius, Pius Roth, Im Latschget 199, 4204 Himmelried
- Rüegsegger Peter AG, Herr Peter Rüesegger, Fabrikstrasse 74, 3800 Interlaken
- Rütti AG, Fensterfabrik, Urs Altermatt, Falkensteinerstr. 18, 4710 Balsthal
- Scandella Tista, Gian-Reto Scandella, Bröl 72A, 7357 Müstair
- Schmid Fritz, Schreinerei, Fritz Schmid, Allmend, 3714 Wengi/Frutigen
- Tributsch AG, Fensterfabrik, Willi Tributsch, Stutzenbühlstr. 2, 9242 Oberuzwil
- Fab Kunststoff-Fenster AG, Peter Meier, Glütschbachstrasse 43A, 3661 Uetendorf
- Locher Walter Schreinerei, Walter Locher, Schönenwerderstrasse 43, 5742 Kölliken
- Polyfen, Herr Odermatt, via Rivapiana 20 (Locarno), 6648 Minusio
- F plus GmbH, Martin Eggimann, Thunstrasse 111, 3006 Bern
- Fahrni & Co AG, Klaus Kiener, Bernstrasse 84, 3250 Lyss
- CMA Constructeurs métalliques, Rue Wilhelm Kaiser 4, 1700 Fribourg
- Bisang AG, Beat Bisang, Talstrasse 12, 6403 Küssnacht am Rigi
- Blumer Technofenster AG, Sepp Signer, Kasernenstr. 88a, 9100 Herisau
- Fenster Imboden AG, Christoph Herber, Eichli 19, 6370 Stans
- Gasser + Siegrist Holzbau AG, M. Siegrist, Untere Zollgasse 110, 3063 Ittigen
- Haller Jörg AG, Fenster, Jörg Haller, Haldenstrasse 163, 5728 Gontenschwil
- Hess Paul, Paul Hess, Schönhaldenstr. 12, 8272 Ermatingen
- Mosimann Holzbau AG, Sonnenweg 22, 3098 Köniz
- Müller Fenster AG, Herr Müller, Niesenweg 16, 3063 Ittigen
- Schmid-Fenster, Josef Schmid, Battenhusstrasse 18, 9062 Lustmühle
- Schneider AG Schreinerei, Roland Artmann, Meierhofweg 9, 4133 Pratteln

E.5 Verschiedene

- Minergie-Agentur Bau c/o Bürgi&Raaflaub, Bern
- Jeker Blanckarts Architekten SIA, H. Jeker, R. Martin, 4002 Basel
- Lärmschutzprogramm des Kantons ZH, R. Schuchter
- Energieberatung Stadt Zürich, Herr Keel, Zürich
- Bauamt Gemeinde Spreitenbach, W. Muri, Spreitenbach
- Luzerner Kantonalbank, Herr Birrer, Luzern
- Bauamt Gemeinde Illnau, W. Felix, Illnau-Effretikon
- Stadt Baden, Herr Burkart, Baden

- Bauamt Stadt Luzern, Herr Theiler, Luzern
- Bauamt Zofingen
- Stadt Thun, Herr Dähler, Herr Gugger, Thun
- Energie Thun, Herr Hänni Thun
- Bauamt Widen

Bundesamt für Energie BFE
Worblentalstrasse 32, CH-3063 Ittigen • Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. 031 322 56 11, Fax 031 323 25 00 • office@bfe.admin.ch • www.admin.ch/bfe

BBL, Vertrieb Publikationen Bestellnummer: 805.054 d 09.2002/200
Vertrieb: BBL, Vertrieb Publikationen, 3003 Bern, www.bbl.admin.ch/bundespublikationen