

Jahresbericht 2002, 3. Dezember 2002

# Projekt

## Grenzkosten bei forcierten Energie-Effizienzmassnahmen

Autor und Koautoren	M. Jakob, E. Jochem, K. Christen
beauftragte Institution	PSI, CEPE, ETH-HBT
Adresse	CEPE, ETH Zentrum WEC, 8092 Zürich
Telefon, E-mail, Internetadresse	01 632 06 53, martin.jakob@cepe.mavt.ethz.ch, www.cepe.ethz.ch
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	Projekt 38393 / Vertrag 78172
Dauer des Projekts (von – bis)	Januar 2001 – September 2002

### ZUSAMMENFASSUNG

Es wurden die Kosten und Nutzen von energetischen Effizienzinvestitionen in Wohngebäuden (insbesondere Wärmeschutz-Investitionen) als Funktion der zunehmenden Energieeffizienz berechnet, und zwar für Neubauten wie auch für Erneuerungen und für Einfamilien- wie auch für Mehrfamilienhäuser. Diese Effizienzinvestitionen umfassen vorwiegend die Gebäudehülle und Lüftungsanlagen und haben zum Ziel, den Heizwärmebedarf der Gebäude sukzessive zu reduzieren, wobei sich der Bereich von der heutigen Erneuerungs- und Neubauweise über den Minergie- bis zum Passivhausstandard (Minergie P in der Schweiz) erstreckt. Die Kosten-Nutzen-Zusammenhänge wurden für die einzelnen Bauteile, individuelle Gebäudekonzepte und die gesamten Schweiz dargestellt, sowohl nach dem Durchschnitts- wie nach dem reinen Grenzkostenansatz (energie-wirtschaftliche Ebene). Das Erheben der empirischen Daten (insbesondere der Kosten), war ein integrierter und wichtiger Bestandteil des Projekts. Den Grenzkosten wurde hierauf die Nutzen der vermiedenen Wärmekosten gegenüber gestellt und für einige typische Fälle exemplarisch die sogenannten Co-Benefits, die zum Teil privat oder als Gesellschaft realisiert werden. Zu deren Quantifizierung wurden Methoden entwickelt und für Fallbeispiele angewendet; hinzu kommen die vermiedenen externen Kosten. Die Grenzkosten wurden auch für künftige Zeiträume berechnet, wobei sie gemäss ihrem innovativen Anteil mittels der Methode der Erfahrungskurven (Lern- und Skaleneffekte) dynamisiert wurden. Inhaltlich bleibt festzuhalten, dass das zu erschliessende Energieeffizienzpotential von Wärmeschutzmassnahmen an Gebäuden gross ist, sowohl bei Erneuerungen wie auch bei Neubauten. Dieses Potential liegt zu einem grossen Teil im Bereich der Wirtschaftlichkeit, dies um so mehr, wenn mögliche Risiken der Energiepreisssteigerungen, die begleitenden Nutzen (betriebswirtschaftliche Ebene) bzw. die vermiedenen externen Kosten und der Nutzen der induzierten Innovation, zusätzlichen Exportmöglichkeiten miteinbezogen werden.



## Projektziele

Ziel des Projekts war es, den **Grenzkostenverlauf** bei zusätzlichen Energie-Effizienzinvestitionen in Wohngebäuden zu bestimmen, und zwar für den heutigen Zeitpunkt sowie für den Zeitraum der kommenden 20 bis 30 Jahre. Dieser sollte als Grundlage für die Simulation möglicher Realisierungspfade der Energieeffizienzpotenziale in energiewirtschaftlichen Modellen dienen sowie als Informationsbasis für energie- und klimapolitische Massnahmen der Verwaltung oder für die Immobilienbranche genutzt werden können. Ein zentrales Ziel des Projekts war dabei, diesen Grenzkostenverlauf für zusätzliche Energieeffizienzinvestitionen (Wärmedämmung, Fenster, Lüftung, Heizung) empirisch breit und repräsentativ abzustützen und die Unsicherheiten der heutigen diesbezüglichen Kosteninformationen zu verringern. Der neueste Stand der technisch verfügbaren Möglichkeiten, der Baukonzeption und -durchführung sollte dabei wiedergegeben werden. Dabei kommen neueste Berechnungsverfahren zur Kostenermittlung zur Anwendung. Auf diese Weise sollte auch erreicht werden, dass neben dem Bedarf energiewirtschaftlicher Analysen die Akteure des Immobilienmarktes einen genaueren Einblick in diese Kosten- und Nutzenzusammenhänge erhalten und nach Möglichkeit für eine differenzierte Information ihres Zielpublikums nutzen können.

Die neuen Technologien, Werkstoffe, Bearbeitungsverfahren und Baukonzepte, die künftig im Bereich Gebäudehülle oder Heiztechnik zur Anwendung kommen könnten, wurden hinsichtlich der zum Teil erheblichen **Lernpotenziale oder den Potenzialen der Serienfertigung** und der damit möglichen Kostenreduktionen untersucht, da diese in den kommenden 10 bis 20 Jahren von erheblicher energiewirtschaftlicher und klimapolitischer Bedeutung sein könnten. 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). Auch hier liegen nur in Ansätzen monetarisierte Werte dieser Co-Benefits vor, um eine gesamtheitliche Bewertung bei energiewirtschaftlichen Analysen und im Immobilienmarkt zu ermöglichen. Die Kosten (und Nutzen) sollten so differenziert und transparent dargestellt sein, dass sie einerseits die Vielfalt bestehender Gebäude und möglicher Energieeffizienz-Investitionen und Baukonzepte reflektieren, andererseits für neue Erkenntnisse zu Einzelkosten (oder Einzelnutzen) oder für veränderte Annahmen (Zinssatz, Abschreibungsdauer) entsprechende Korrekturen ermöglichen. Dies bedeutete die Entwicklung einer möglichst standardisierten und flexiblen Kostenberechnungs-Methodik.

## Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Im Berichtsjahr 2002 wurde das Projekt mit dem Schlussbericht abgeschlossen [1]. Der Bericht ist zu beziehen bei BBL, Vertrieb Publikationen, 3003 Bern (Nr. 805.054d) oder unter [www.ewg-bfe.ch](http://www.ewg-bfe.ch) bzw. unter [www.cepe.ethz.ch](http://www.cepe.ethz.ch) und enthält eine ca. 30-seitige Zusammenfassung. Aufgrund des umfangreichen Materials können nachfolgend die Ergebnisse nur exemplarisch wiedergegeben werden. Im übrigen wird auf den Schlussbericht [1a], den Jahresbericht 2001 [2], zwei Artikel im Buch zur EWG-Tagung vom 13. September 2002 mit dem Titel **Bauen, Sanieren - wirtschaftlich investieren. Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit im Einklang** [3, 4] sowie weitere Literatur zum Projekt verwiesen (siehe auch Literaturliste).

Der Ende 2001 vorliegende Entwurf des Schlussberichts wurde im Berichtsjahr 2002 ergänzt durch weitere Analysen und eine umfangreiche Dokumentation und Darstellung der empirischen Arbeiten. Nebst den Kosten und Nutzen im Bereich Gebäudehülle und Lüftung wurden die Kosten und Nutzen auf Bauteilebene in einer Systembetrachtung auf verschiedene Gebäudekonzepte übertragen. Dabei wurde das bauphysikalische Zusammenspiel der verschiedenen Bauelemente (Einfluss zunehmender Wärmedämmung oder veränderter Fensteranteile auf den Ausnutzungs-

grad der Solarenergie und der freien Wärme, nach dem Systemnachweisverfahren SIA 380/1), und der Wärmeerzeugung (mögliche Kostenreduktion bei der Wärmeerzeugung bei sukzessive tieferem Heizwärme- bzw. Heizleistungsbedarf) miteinbezogen.

Auf der methodischen Ebene wurden folgende Elemente identifiziert, welche bei einer ganzheitlichen ökonomischen Bewertung zu beachten sind:

- Ökonomische Interpretation der erhobenen Kosten – grosse Streuung zwischen Kosten mit Pioniermarktzuschlägen und best practice Unternehmen.
- Technischer Fortschritt und Kostendynamik – gesetzliche Vorschriften und eine zeitlich beschränkte Förderung beschleunigen den technischen-ökonomischen Fortschritt.
- Künftige Entwicklung der Energiepreise – Investitionen an der Gebäudehülle weisen eine sehr lange Lebensdauer auf, während der verschiedene Faktoren zu Energiepreissteigerungen führen könnten (z.B. eine zunehmende Konzentration der Erdölförderung auf die OPEC-Länder mit zunehmender Marktmacht, CO<sub>2</sub>-Abgaben oder Emissionszertifikate).
- Veränderte Rahmenbedingungen – Bonitätsbewertung: der energetische Zustand der Gebäude könnte in die Bonitätsbewertung der Banken einfließen (Basler Abkommen II, ab 2006), was den energie-effizienten Gebäuden einen Zinsvorteil bringen würde. Eine evtl. rückläufige und eine alternde Wohnbevölkerung sowie allgemein höhere Ansprüche erhöhen die Nachfrage nach qualitativ guten Gebäuden mit hohem Komfort, dies mit entsprechender dynamischer Ertrags- und Wertentwicklung.
- Private und Zusatznutzen: Komforterhöhung durch angenehme Wandtemperaturen oder gut gelüftete Räume, Verbesserung der Sicherheit und vor allem des Lärmschutzes resultieren in eine Wertsteigerung des Gebäudes bzw. eine bessere Vermietbarkeit. Diese können in der selben Größenordnung oder gar höher sein wie die eingesparten Energiekosten.
- Öffentliche Zusatznutzen: Für energiepolitische Überlegungen der öffentlichen Hand in Bund und Kantonen sind auch die vermiedenen externen Kosten durch geringere energiebedingte Emissionen zu betrachten, da sie nicht vernachlässigbare Werte aus wohlfahrtsökonomischer Sicht aufweisen.

Nachfolgend werden exemplarisch einige ausgewählte Einzelergebnisse dargestellt.

## Wärmedämmung

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 (siehe Tabelle 1). Aus energie- und klimapolitischer Sicht ist es also besonders wirkungsvoll, mittels initiiertener Marktstimulation eine Dynamik über den Wettbewerb zur best practice in Gang zu setzen. Bei geeigneter Ausgestaltung können die Lern- und Erfahrungspotenziale aktiviert und die Pioniermarktmargen vermieden werden.

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 (Wand, Dach etc.) in etwa gleich ist, d.h., zu bestimmten Grenzkosten ist der Effizienzgewinn pro m<sup>2</sup> in etwa gleich gross (vgl. Fig. 1). 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 1), denn der Effizienzgewinn pro m<sup>2</sup> erneuerte Fassadenfläche ist wesentlich grösser (z.B. rund 70 kWh<sub>NE</sub>/m<sup>2</sup> bei 12 cm gegenüber 0 cm und rund 80 kWh<sub>NE</sub>/m<sup>2</sup> bei 20 cm gegenüber 0 cm, während es von 12 cm auf 20 cm nur zwischen 7 und 9 kWh<sub>NE</sub>/m<sup>2</sup> Bauteil sind ).

Tabelle 1 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 <sup>2</sup> K)	Investitionskosten (CHF/m <sup>2</sup> )		Brutto-Grenzkosten (Rp/kWh <sub>NE</sub> )		
		Mittel	Best practice	Verglichen mit Referenz EE		Verglichen mit Referenz Instandsetzung IS
				Mittel	Best practice	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

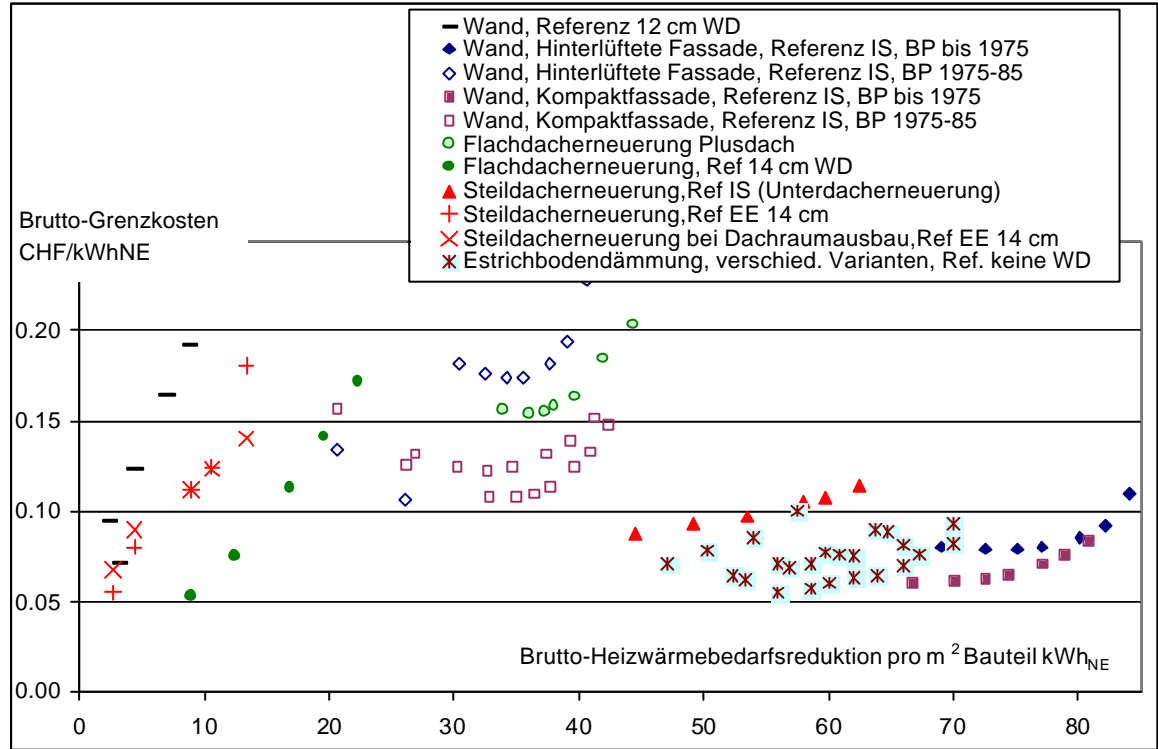


Fig. 1 Zusammenfassende Darstellung der Brutto-Grenzkosten (Durchschnittskostenansatz) für Neubauten und Erneuerungen (Referenzfall: Instandsetzung bzw. heute übliche energetische Erneuerungen), ohne Gegenverrechnung der eingesparten Wärmekosten

### Fenster und Fensterrahmen

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/m<sup>2</sup>K 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. Fig. 2). Grosse Fenster haben sowohl geringere energetische und preisliche Ausgangswerte als auch einen flacher verlaufenden Kostenanstieg bei energetischen Verbesserungen. Ein grosses Passivhaus-Fenster kann zu einem vergleichbaren spezifischen Preis erstanden werden wie ein kleines Standardfenster. Wirtschaftlich attraktiv ist daher das architektonische Element, beim Neubau, gross- statt kleinflächige, hoch effiziente Fenster zu konzipieren.

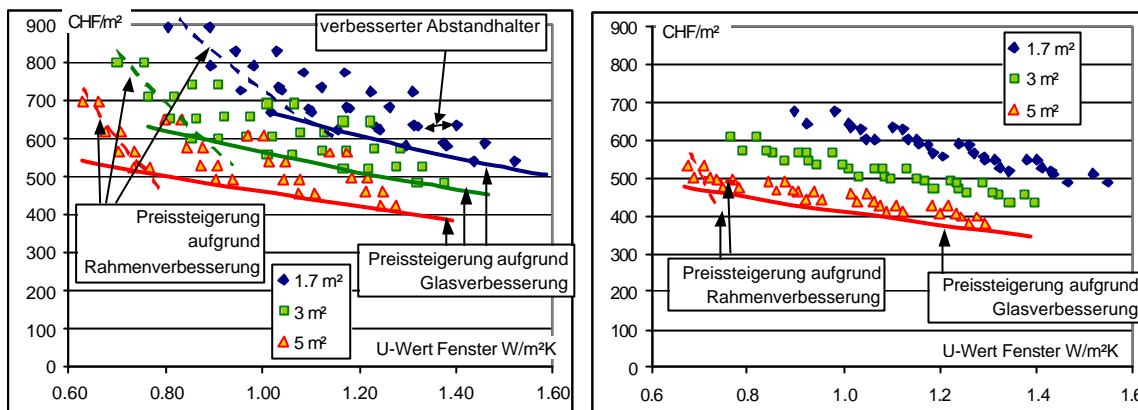


Fig. 2 Investitionskosten von Holzfenstern (linke Fig.) und Kunststofffenstern (rechte Fig.) für verschiedene Fenstergrössen in Funktion des Gesamtfenster-U-Wertes

In den letzten Jahren wurden auch Bestrebungen unternommen, die Fensterrahmen zu verbessern, wobei beim Kunststoff-Fenster die Entwicklung weiter fortgeschritten ist als beim Holz- bzw. Holz-Metallfenster. Die zunehmende Nachfrage nach gut isolierten Fenstern aufgrund der Minergie-Bauweise hat jedoch auch beim Holzfenster ein Angebotssegment induziert, das sich bis zur strengen Anforderung des Passivhausstandards erstreckt.

Bei den Fenstern wurden auch die Einflüsse energetischer solarer Gewinne mit Orientierung und Verschattung der Gebäude und die übrigen Wärmeflüsse im Gebäude mitberücksichtigt.

### 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-Nutzen-Relationen im Vergleich zur isolierten Betrachtung auf Bauteilebene verschieben. 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. Fig. 3).

Die Untersuchung von verschiedenen Neubaukonzepten und Ausgangslagen hat gezeigt, dass die Grenzkostenkurve einen ähnlichen relativen Verlauf aufweisen. Der Grund liegt in einem ähnlichen Verlauf der Grenzkosten der einzelnen Bauteile und Einzelmassnahmen. Es ist daher kosteneffizient, bei allen Bauteilen sukzessive Massnahmen zu ergreifen und nicht nur punktuell bei einigen Bauteilen.

Das Fazit: im Mittelland führen sowohl eine konsequente Wärme-Dämmstrategie als auch eine kombinierte Dämm- und Solargewinnstrategie zu ähnlichen Kosten. Dies gilt für einigermassen verschattungsfreie Situationen, also insbesondere beim Einfamilienhaus und für MFH für Gebiete mit geringer Ausnützungsziffer.

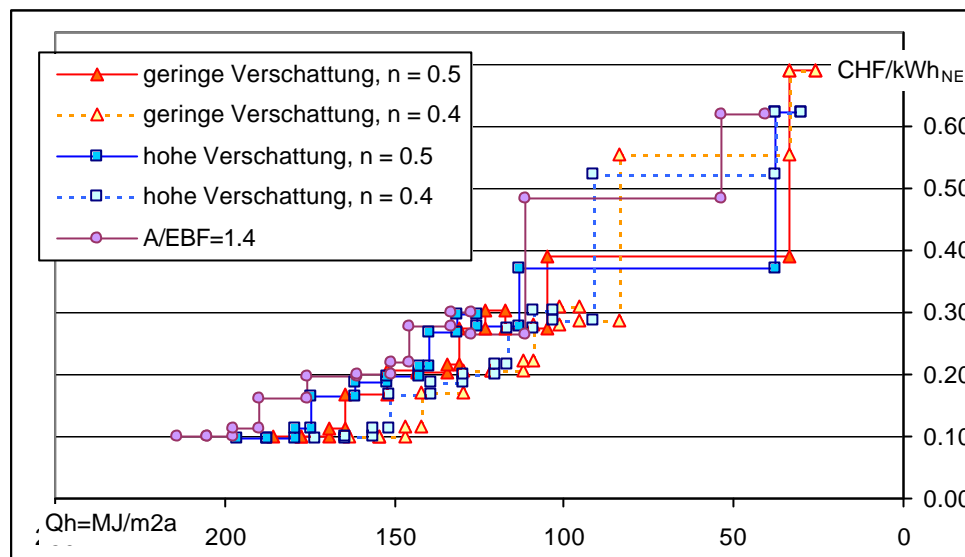


Fig. 3 Bruttogrenzkostenkurve (ohne Berücksichtigung der vermiedenen Wärmekosten und der Kostenreduktion auf Seite Wärmeerzeugung/-verteilung) für verschiedene Ausgangslagen der Verschattung und des Luftwechsels. MFH mit A/EBF=1.1 bzw. 1.4.

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 Einbezug der Wärmebereitstellung. Die Berechnung der Anlagengrösse erfolgte über den Leistungsbedarf, wobei dieser differenziert aufgrund der tatsächlich betrachteten Gebäudekonzepte berechnet wurde. 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. Die Mehrkosten der Wärmeschutz-Investitionen lassen sich jedoch nach derzeitigem Kostenstand bei keinem Anlagentyp gänzlich kompensieren, selbst wenn beim gut ausgeführten Passivhausstand die hydraulische Wärmeverteilung weggelassen wird.

Die ermittelten Gesamtjahreskosten weisen – selbst ohne Berücksichtigung begleitender Nutzen – einen zunächst sehr flachen Verlauf im Bereich der heutigen Bauweise und darunter (z.B. zwischen 250 und 200 MJ/m<sup>2</sup>a) auf (vgl. Fig. 4). Im dargestellten Beispiel kann ohne wesentliche Mehrkosten eine Verbesserung des spezifischen Heizwärmebedarfs  $Q_h$  um 40 bis 60 MJ/m<sup>2</sup>a 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. Um insgesamt über 100 MJ/m<sup>2</sup>a lässt sich der Heizwärmebedarf zu Nettokosten von 2 CHF/m<sup>2</sup> bis 3 CHF/m<sup>2</sup> vermindern, was 20 bis 30 CHF/Monat Mehrkosten für eine Wohnung von 120 m<sup>2</sup> bedeutet. Wird eine Energiepreiserhöhung im Bereich einer CO<sub>2</sub>-Steuer von 210 CHF/t CO<sub>2</sub> veranschlagt, verschiebt sich das wirtschaftliche Optimum weiter nach links hin zu noch geringerem spezifischen Energiebedarf. In Zukunft könnte mit weiteren Lern- und Skaleneffekten die Kostensteigerung in Fig. 4 durchaus moderater verlaufen als hier dargestellt.

Ebenfalls nicht berücksichtigt sind in Fig. 4 die nicht-energetischen Nutzen, die bei weitergehendem Wärmeschutz häufig beobachtet werden (siehe unten). Insofern sind die hier beschriebenen einzelwirtschaftlichen Netto-Kosten unvollständig und könnten zu Fehleinschätzungen führen.

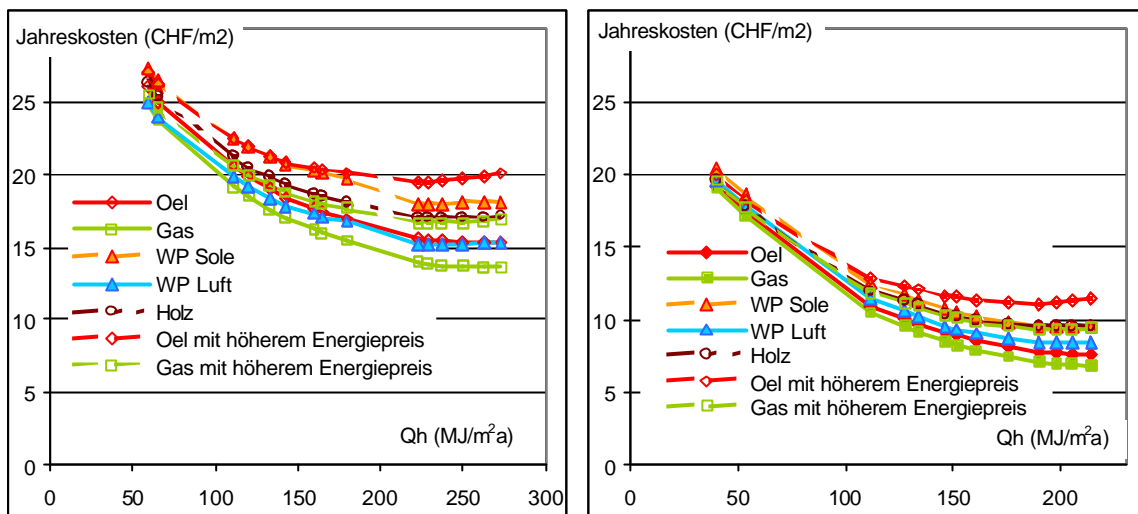


Fig. 4 Jahreskosten CHF/m<sup>2</sup><sub>EBF</sub> unter Berücksichtigung der Kostenreduktion auf Seite Wärmeerzeugung/-verteilung für verschiedene Anlagentypen für EFH (linke Abbildung) und MFH (rechte Abbildung). Höherer Energiepreis bei Öl- bzw. Gasheizungen: Zuschlag in der Höhe von 210 CHF/t CO<sub>2</sub>

### 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:

- 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. Eine Verminderung der Temperaturdifferenz zwischen der Wand eines Raumes und seiner durchschnittlichen Lufttemperatur von etwa 5°C bei *gleichem Behaglichkeitsniveau ermöglicht eine Absenkung der Raumtemperatur* um 1°C. Dieser Effekt führt allerdings nur zu relativ kleinen begleitenden Nutzen von allenfalls einem Rappen je kWh eingesparter 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 Lärminderung kann durch eine Abschätzung der Verminderung der durch den Lärm verursachten Kosten bzw. Mietzinsminderungen erfolgen. Der 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). Umgerechnet auf Nutzen je kWh Nutzenergie kann der Einbezug der begleitenden Nutzen durch Lärminderung Werte bis zu 6 und 8 Rp/kWh annehmen (vgl. Fig. 5).
- Einen ähnlich grossen Einfluss hat der Einsatz von Lüftungsanlagen bei der Verbesserung der Raumluftqualität (vgl. Fig. 5 z.B. in stark belasteten Wohnquartieren durch eine reduzierte Luftwechselrate bei Fenster- und Türsanierungen, durch Filterung der Aussenluft bei Lüftungsanlagen) im Falle einer zu geringen Luftwechselrate in gut wärmedämmten und luftdichten Wohngebäuden (mit zu feuchtem Innenklima, bei starkem Rauchen von Bewohnern, oder hohen Schadstoffkonzentrationen durch Inneneinrichtungen). Für Asthmakranke und andere Menschen mit einer Disposition für Allergien und Erkrankungen der Atmungsorgane er-



geben sich begleitende Nutzen, deren Umfang nicht quantifiziert werden konnte, aber fallweise erheblich sein dürfte (medizinische Behandlung und Lohnausfallkosten).

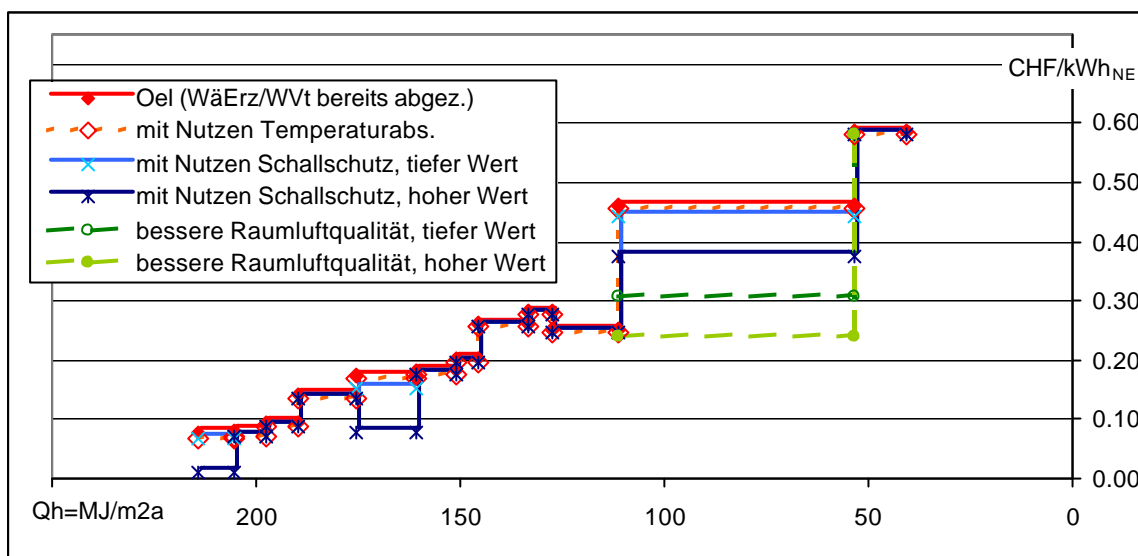


Fig. 5 Grenzkostenkurve von Wärmedämminvestitionen unter Berücksichtigung ausgewählter Co-Benefits (höherer Komfort, Schallschutz, bessere Raumluftqualität durch Lüftungsanlagen), Fallbeispiel mit Ölheizung

Die Nutzen der Co-Benefits werden auch in der Darstellungsform der Jahreskosten sichtbar (vgl. Fig. 6). Insbesondere der steile Kostenanstieg der Lüftungsanlage wird wesentlich flacher, wenn die mit einer Lüftungsanlage verbundenen Zusatznutzen miteinbezogen würden und wenn - fälschlicherweise - nicht alle Kosten allein der Energieeffizienz zugeordnet werden.

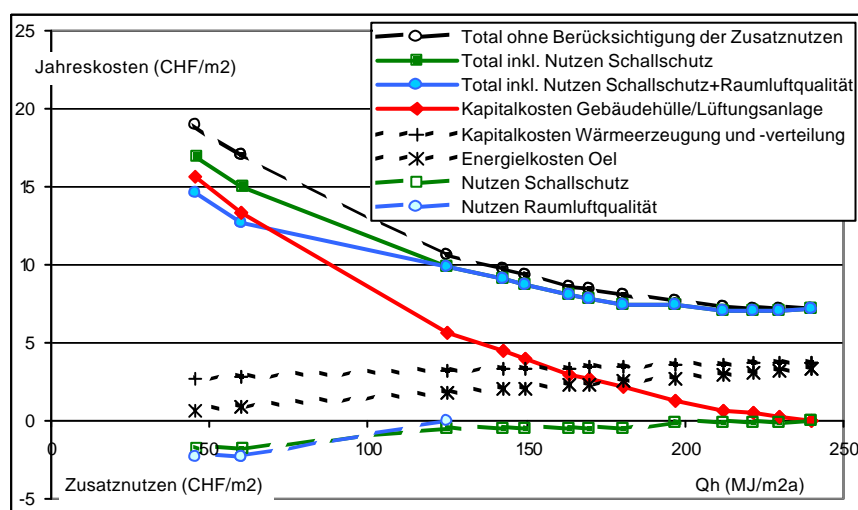


Fig. 6 Gesamte Jahreskosten und ihre Komponenten (Mehrkosten der Energieeffizienzinvestitionen, Mehrkosten der Wärmeerzeugung- und -verteilung) sowie der Zusatznutzen. Beispielhafte Darstellung für einen MFH-Neubau. Annahmen: Realzins 3%, Brennstoffpreis 4.5 Rp/kWh

Im Gegensatz zu den Jahreskosten beginnen die Investitionskosten ab dem energetischen Referenzpunkt sofort zu steigen, wenn auch nur leicht (siehe Fig. 6). 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 diesen Zusammenhängen nicht hinreichend Rechnung trägt.

### Künftige Kosten und Nutzen der Energieeffizienz-Investitionen

Die Analysen der Kostenentwicklung der Wärmeschutzmassnahmen zeigten erhebliche Lern- und Skaleneffekte für die vergangenen drei Jahrzehnte. 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. Die Werte der Degressionskoeffizienten bei Produktionsverdopplung liegen 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, Vakuumisolationstechnik, 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.

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. Fig. 7).

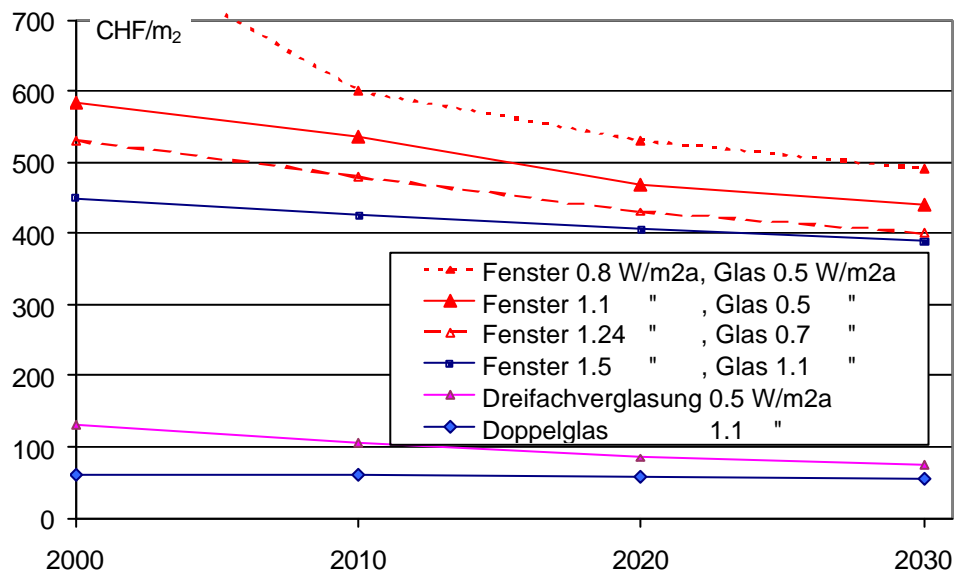


Fig. 7 Künftige Entwicklung der Kosten von Fenstern und Gläsern (Erhebungen und Berechnungen CEPE)

### 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 Neubaufäche und der heutigen Neubaumasse bei den einzelnen Bauteilen. Bzgl. der künftigen Fläche der Neubauten kann auf vorhandene Perspektiven zurückgegriffen werden (z.B. bis ins Jahr 2010 eine Neubaufäche von rund 27 Mio m<sup>2</sup> bei den Einfamilienhäusern und von rund 25 Mio m<sup>2</sup> bei den MFH).

Im Referenzfall beträgt der Nutzenergiebedarf der Gebäude, die bis 2010 neu gebaut werden, rund 7.6 PJ (vgl. Fig. 8). Bis zu Brutto-Grenzkosten von 10 Rp/kWh<sub>NE</sub> lässt sich der Heizwärmebedarf (auf Ebene Nutzenergie) mit Massnahmen an Boden, Dach, Wand und Fenster gesamtschweizerisch bei EFH-Neubauten um rund 1.3 PJ reduzieren. Bis zu Grenzkosten von 20 Rp/kWh<sub>NE</sub> sind es weitere 935 TJ. Ein vergleichsweise grosses Einsparpotential von 1.3 PJ der Heizwärme bietet 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<sub>NE</sub> bis 38 Rp/kWh<sub>NE</sub>, wenn die gesamten Kosten der Lüftungsanlage der Energie zugerechnet würden. Diesen Grenzkosten sind die jeweiligen Grenz-Nutzen für eingesparte Energiebereitstellung und die erzielbaren begleitenden Nutzen gegenüberzustellen.

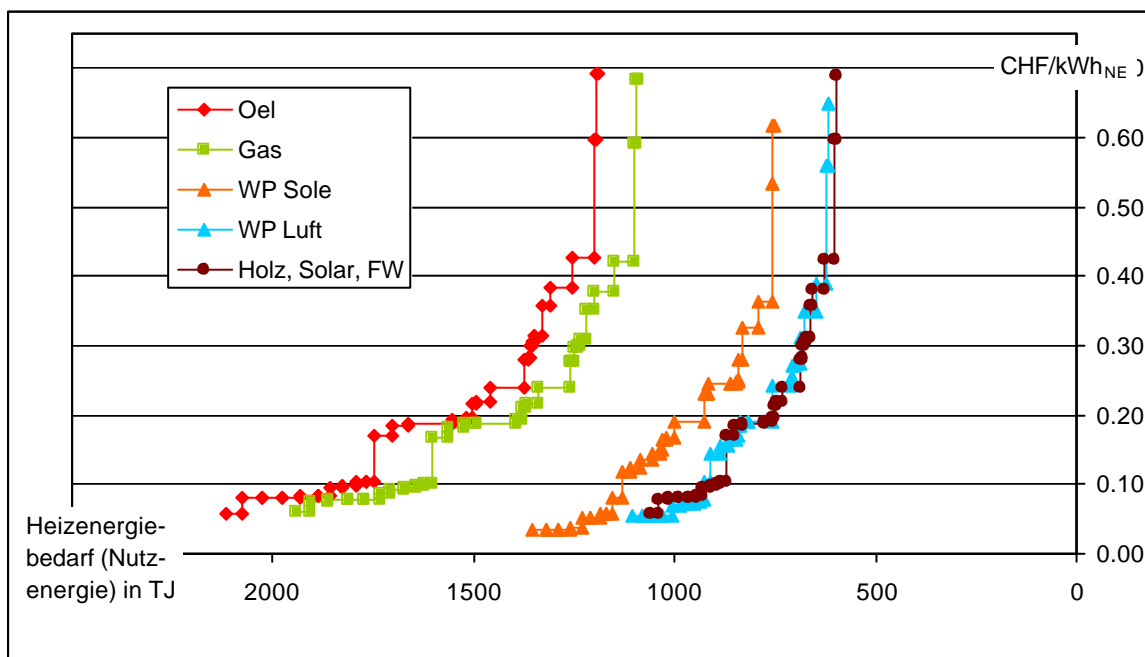


Fig. 8 Gesamtschweizerische Grenzkostenkurven (realisierbares Potential) für den EFH-Neubau 2001 bis 2010, heutiger Kostenstand

Im Bereich der Gebäudeerneuerung sind nebst der Kenntnis des bautechnischen Ausgangszustandes der verschiedenen Gebäudekategorien (Typ, Bauperiode) 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. Trotz dieses Vorbehaltes sind die gesamtschweizerischen Grenzkostenkurven für die Erneuerung der Wohngebäude aufschlussreich, weil ein grosses Energieeffizienzpotential zu relativ geringen Kosten ermittelt wurde, besonders wenn eine ganzheitliche ökonomische Bewertung einschliesslich der begleitenden Nutzen 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 z.B. davon ausgegangen, dass zusätzlich 15% der gesamten Wandflächen wärmedämmend und dass die Fassaden statt mit 12 cm mit 20 cm gedämmt werden (vgl. Fig. 9).

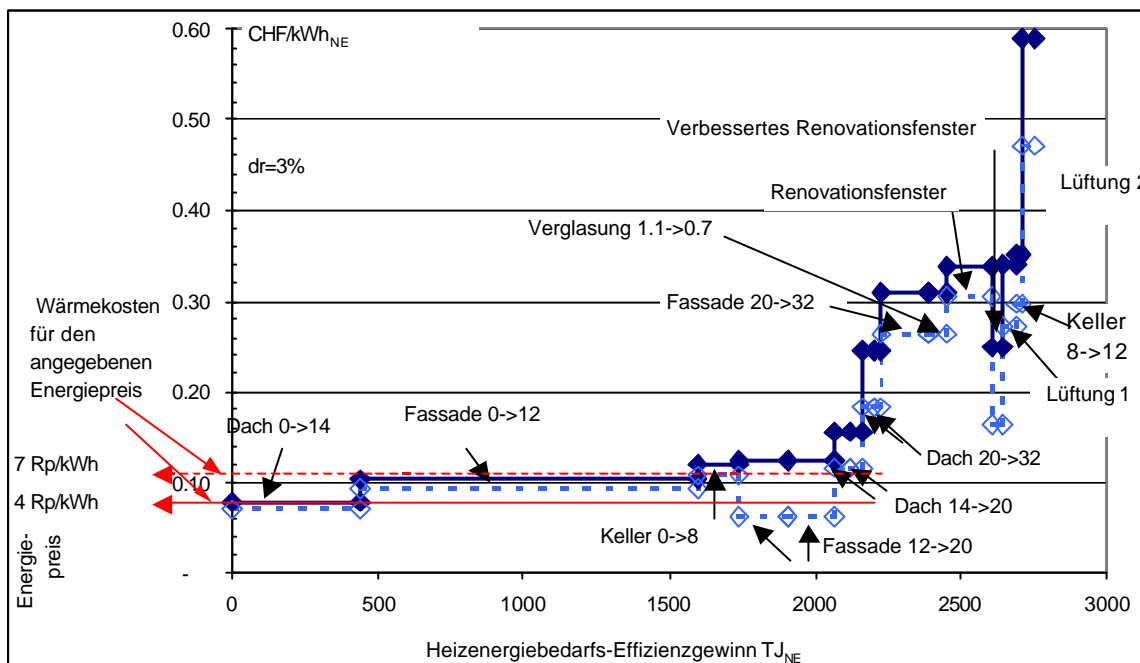


Fig. 9 Grenzkostenkurve der EFH mit Bauperiode 1900 – 1960, mit heutigem Kostenstand (durchgezogene Treppenkurve) sowie mit dynamisierten Kosten (gestrichelte Treppenkurve)

Ein beachtliches Potential an Heizwärmebedarfsreduktion von etwa 1.1 PJ liegt im Bereich von **Brutto**-Grenzkosten bis 11 Rp/kWh<sub>NE</sub> (vgl. Fig. 9). 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<sub>NE</sub> 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.

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 Energiepreiserhöhung angenommen wird. Dies entspricht weiteren 2% des gesamten Heizwärmebedarfs dieser Gebäudegruppe (inkl. nicht-erneuerte Gebäude) bzw. 20% des realisierbaren Erneuerungspotentials.

## Schlussfolgerungen und Fazits

Die vorliegende Analyse des Wohngebäudebestands und die möglichen Wärmeschutz-massnahmen 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 Energiepreisssteigerungen während der langen Nutzungszeiten und begleitende Nutzen in seine wirtschaftliche 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. 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 wärmegeprägter Gebäude gehen zwar nicht in die Wirtschaftlichkeitsberechnungen von Wärmeschutz-massnahmen 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<sub>2</sub>-Abgabe des CO<sub>2</sub>-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 Akteur- 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.

## Nationale Zusammenarbeit

Das Projekt wird von einem Projektteam bearbeitet, welches die zwei *ETH-Institute, Centre for Energy Policy and Economics (CEPE)* und das *Institut für Hochbautechnik (HBT)*, sowie das *Paul Scherrer Institut (PSI)* umfasst. In einzelnen Teilbereichen wurde mit weiteren Institutionen des *ETH Bereichs* bzw. der Fachhochschulen zusammengearbeitet, z.B. im Bereich der Lüftungsanlagen mit der *HTA Luzern*. Im Bereich der Bauphysik und des energie-effizienten Bauens bestanden Kontakte zur *EMPA* und teilweise zur *FHBB*.

Auf der projektbegleitenden Ebene waren nebst dem Bund verschiedene Kantone vertreten, namentlich *ZH, BE; AG; BL; BS, TG* und *VS*.

Die empirischen Erhebungen der Kostendaten sowie der technischen Daten erfolgte in Zusammenarbeit mit Verbänden und Einzelfirmen aus den Bereichen Glasherstellung, Fenster- und Fassadenbau sowie Bedachungen, insbesondere dem *Verband der schweizerischen Bauökonomien (AEC)*, dem *Schweizerischen Fachverband für hinterlüftete Fassaden (SFHF)* und dem *Schweizerischen Verband für Dach- und Wand (SVDW)*. Ergebnisse aus dem Grenzkostenprojekt wurden am **Berner Energieapero** vom 6. Mail [5] sowie an der SVDW-Fachtagung **Energie erhalten und Gewinnen** [6] präsentiert.

## Internationale Zusammenarbeit

Auf der Projektebene wurde mit dem *FhG-Institut für Innovations- und Systemforschung (ISI)* in Karlsruhe und dem *FhG-Institut für Bauphysik (IBP)* in Stuttgart zusammengearbeitet. Die Ergebnisse zur Kostenentwicklung und zum technological learning wurden im April 2002 am **Innovationsworkshop des Fraunhofer ISI in Karlsruhe** präsentiert [7]. Im Januar 2003 werden die Ergebnisse dieses Themenbereichs zudem am IEA-Workshop **Experience curves: a tool energy policy analysis and design** vorgestellt [8] (eingeladene Vorträge).

## Bewertung 2002 und Ausblick 2003

Die formulierten Ziele des Projekts konnten im Berichtsjahr mit der Erstellung des Schlussberichts erreicht werden. Die erhobenen (Kosten-)daten weisen eine gute Repräsentativität auf. Die Resultate der Berechnungen wurden von der Begleitgruppe als plausibel und nützlich beurteilt. Als innovativ kann die Anwendung der Methode des technological learnings auf den Bereich von Effizienzmassnahmen im Gebäudebereich, insbesondere der Wärmedämmungen, Fenster und Lüftungsanlagen, bezeichnet werden.

Die vorliegende Analyse von Gebäudebestand und die möglichen Wärmeschutzmassnahmen mit ihren Kostenstrukturen verdeutlicht eine Komplexität des Untersuchungsgegenstands, der in den bisherigen energiewirtschaftlichen Analysen und Modellen in hohem Masse vereinfacht wurde.

Die Analysen wurden im September 2002 mit dem Schlussbericht abgeschlossen, es ist aber offensichtlich, dass weitere detailliertere Analysen zu den Kosten- und Ertragsrechnungen aus der Sicht der einzelnen Akteure oder zu den begleitenden Nutzen (Co-Benefits) wünschenswert sind, um die Wärmeschutzmassnahmen in Gebäuden sachgerecht bewerten zu können.

Folglich bewarb sich das CEPE in einer Arbeitsgemeinschaft mit econcept, Zürich, erfolgreich um das EWG-BFE-Projekt **Direkte und indirekte Zusatznutzen bei energie-effizienten Wohngebäude** [9], um die im Grenzkostenprojekt in Ansätzen bereits erfolgte Quantifizierung der Co-Benefits zu vertiefen und empirisch breiter abzustützen. Das Projekt startete in der zweiten Jahreshälfte 2002 [9].

Damit die Erkenntnisse des Forschungsprojekts eine **Umsetzung und Anwendung** finden, werden in Zusammenarbeit mit dem Fachjournalisten Thomas Glatthard, Luzern, eine rund zwanzigseitige Broschüre sowie Artikel in Fachzeitschriften erarbeitet. Dieses ebenfalls vom BFE finanzierte Folgeprojekt wird von der selben Begleitgruppe betreut, welche bereits das Grenzkostenprojekt begleitete [10]. In diesem Projekt wird ebenfalls abgeklärt, ob und wenn ja in welche existierenden Energie- und Kostenplanungstools ausgewählte Ergebnisse des Grenzkostenberichts implementiert werden könnten.

## Referenzen

- [1] M. Jakob, E. Jochem, K. Christen: **Grenzkosten bei forcierten Energie-Effizienzmassnahmen bei Wohngebäuden** CEPE, ETH Zürich, im Auftrag des Forschungsprogramms EWG des BFE, Bern, September 2002. Zu beziehen bei BBL, Vertrieb Publikationen, 3003 Bern. Bestellnr. 805.054 d oder unter [www.ewg-bfe.ch](http://www.ewg-bfe.ch) oder unter [www.cepe.ethz.ch](http://www.cepe.ethz.ch).
- [2] M. Jakob: **Projekt Grenzkosten bei forcierten Energiesparmassnahmen – Jahresbericht 2001**, CEPE, ETH Zürich, im Auftrag des Forschungsprogramms EWG des BFE, Bern, Januar 2002, zu beziehen unter [www.ewg-bfe.ch](http://www.ewg-bfe.ch).

- [3] M. Jakob, E. Jochem, 2002, **Grenzkosten bei forcierten Energie-Effizienzmassnahmen**, in: R. Meier, M. Beck, P. Previdoli (Hrsg.), Bauen, Sanieren - wirtschaftlich investieren. Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit im Einklang, Verlag Rüegger, Chur/Zürich, S. 127-143.
- [4] E. Jochem, M. Jakob, 2002, **Technische Entwicklungen zur Energieeffizienz beim Bauen und Renovieren**, in: R. Meier, M. Beck, P. Previdoli (Hrsg.), Bauen, Sanieren - wirtschaftlich investieren. Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit im Einklang, Verlag Rüegger, Chur/Zürich, S. 175-189.
- [5] M. Jakob, **Kosten und Nutzen der Energie-Effizienz bei Wohngebäuden – ein differenziertes Bild**, CEPE, ETH Zürich. In: Dokumentation zum Vortrag am Energieapero an der HTA Bern, Mai 2002
- [6] M. Jakob, **Grenzkosten für höhere Wärmedämmungen - Wo liegt die Kosten-Nutzengrenze**. CEPE, ETH Zürich. In: Fachtagung Steildach "Energie erhalten und Gewinnen", Pfäffikon, 25. April 2002,
- [7] M. Jakob, **Lernkurven am Beispiel der Gebäudetechnik**, Forum Hemmnisabbau "Zukünftige Optionen für die rationelle Energienutzung", Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (Fh-ISI), Karlsruhe, 25.-26. Februar 2002.
- [8] Joint EXTOOL-EXCETP6 Workshop on **Experience curves: A tool for energy policy analysis and design** International Energy Agency (IEA), Paris, 22-24 January 2003
- [9] W. Ott (econcept), M. Jakob (CEPE): **Direkte und indirekte Zusatznutzen bei energieeffizienten Wohngebäuden** Jahresbericht 2002 ([www.ewg-bfe.ch](http://www.ewg-bfe.ch)) sowie Projektbe-schrieb inkl. Teilprojektbeschrieb „Hedonic Pricing“, zu beziehen bei econcept, Zürich oder CEPE, ETH Zürich.
- [10] M. Jakob: **Umsetzung der Ergebnisse des Projekts „Grenzkosten bei forcierten Energie-Effizienzmassnahmen“ – Jahresbericht 2002**, CEPE, ETH Zürich, Dezember 2002, zu beziehen bei [www.ewg-bfe.ch](http://www.ewg-bfe.ch).