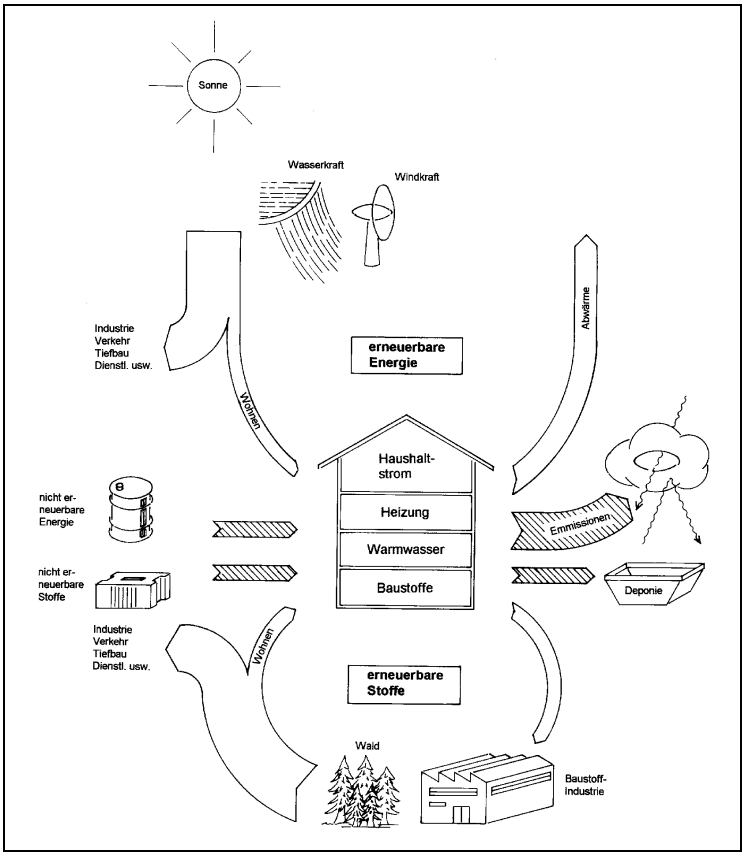
Bundesamt für Energie
Office fédéral de l'énergie
Ufficio federale dell'energia
Uffizi federal d'energia

Forschungsprogramm "Rationelle Energienutzung in Gebäuden"

Ökologische Nachhaltigkeit im Wohnungsbau

Eine Bewertung von Erneuerungsstrategien



Armin Binz
Markus Erb
Gerold Lehmann

Fachhochschule beider Basel
Institut für Energie
Muttenz

April 2000

Bundesamt für Energie IKEA-Stiftung Migros-Genossenschafts-Bund Kantone Basel-Stadt und Basel-Landschaft

Zu dieser Arbeit

Der vorliegende Bericht wurde von Mitarbeitern des Instituts für Energie der Fachhochschule beider Basel verfasst:

- Prof. Armin Binz, Projektleitung
- Markus Erb, Sachbearbeitung
- Gerold Lehmann, Sachbearbeitung

Die Arbeit ist sachbezogen und zeigt konkrete Handlungsmöglichkeiten auf. Die Autoren hoffen, dass mit dem Bericht ökologische Themen bei der Planung und Bewirtschaftung von Wohnraum stärkeren Einzug erhalten werden. Für den Inhalt der Studie sind allein die Studiennehmer verantwortlich.

Dank

Die Autoren danken allen Beteiligten, die die vorliegende Arbeit in irgendeiner Form unterstützt haben:

- Dem Auftraggeber und den Geldgebern
- Allen LiegenschaftsbesitzterInnen, die Unterlagen Ihrer Objekte zur Verfügung gestellt haben
- Rolf Frischknecht, esu-services, für die Beratung bei der Wahl methodischer Annahmen
- Alexander Wokaun, PSI Würenlingen, für die Unterstützung beim Teil ‘Die 2’000-Watt-Gesellschaft’
- Jürg Nipkov, Büro Arena, für Abklärungen im Bereich Haushaltstrom
- Adrian Regenass-Stöckli, für diverse Kritik und Anregungen
- Diversen Baustoff-Herstellern und Fachleuten, für die Mitarbeit und Bedienung mit spezifischer Information

Auftraggeber und Finanzierung

Bundesamt für Energie

Finanzielle Unterstützung

IKEA-Stiftung Schweiz
Migros-Genossenschafts-Bund
Kanton Basel-Stadt
Kanton Basel-Landschaft

Bezug

Zentrum für Energie- und Nachhaltigkeit
im Bauwesen, c/o EMPA
Überlandstrasse 129
CH-8600 Dübendorf
Tel. 01 823 47 95
www.empa.ch/zen

Fachhochschule beider Basel
Institut für Energie
St. Jakobs-Strasse 84
CH-4132 Muttenz
Tel. 061 467 45 45
www.fhbb.ch/energie

Institut für Energie

Das IfE ist besonders auf Fragen der Energieeffizienz ausgerichtet: Der Akzent liegt bei anwendungsorientierter Forschung und Entwicklung in Zusammenarbeit mit Partnern aus der Wirtschaft und der öffentlichen Hand. Bei Mess- und Berechnungsdienstleistungen für Dritte werden regionale Planungsbüros unterstützt. Die Hauptaufgabe ist aber die Aus- und Weiterbildung, insbesondere mit dem Nachdiplomstudium Energie: eine Ausbildung, die als Teilzeitstudium absolviert werden kann.

Kurzfassung

Die Energie- und Stoffflüsse von fünf für die schweizerische Bausubstanz typischen Wohnbauten werden über die ganze Lebensdauer der Gebäude detailliert berechnet. Dabei werden jeweils fünf Erneuerungsvarianten untersucht. Vom Verzicht auf Sanierung über minimale, durchschnittliche und fortschrittliche energetische Sanierung bis hin zu Abbruch und Erstellung eines Ersatzneubaus wird analysiert, wie gross die Stoffflüsse und der durchschnittliche jährliche Gesamtenergieverbrauch sind. Insbesondere die Gegenüberstellung der Grauen Energie für die verschiedenen baulichen Eingriffe zu den Einsparungen an Heizenergie, lässt interessante Schlussfolgerungen zu. Die Arbeit hilft mit, die Bedeutung der Grauen Energie zu klären und liefert Grundlagen zur Diskussion über die Frage, wann Abbruch und Ersatzneubau eine ökologisch wünschbare Alternative zur Sanierung darstellen kann.

Abstract

The flows of energy and material of five typical Swiss residential buildings are calculated in detail over the whole life cicle period. Five different renewal and maintenance strategies are analysed for each building. Starting from leaving the house untouched to minimal, usual and exemplary energetic improvement up to the case of demolition and rebuilding it, the yearly material and total energy flows are examined. The comparison of energy demand for heating versus the amount of energy to improve the building energetically (materials, transport, labour) is of particular interest. The study helps to judge the relevance of embodied energy and gives a basis to discuss the circumstances when demolition and rebuilding might be the ecologically better alternative to retrofitting.

Resumé

Les flux d'énergies et des matériaux de cinq maisons multifamiliales, représentatives du parc suisse, sont calculés en détail pour la durée totale de vie des immeubles. Pour chaque bâtiment cinq stratégies différentes de rénovation sont étudiées. On commence par laisser la maison intacte pour passer à une amélioration énergétique minimale, moyenne et poussée jusqu'à en arriver à la démolition et au remplacement de l'immeuble. Pour toutes ces variantes l'importance des flux des matériaux et la totalité de la consommation annuelle moyenne sont analysées. La comparaison entre l'énergie grise nécessaire aux améliorations diverses des bâtiments et les économies de chauffage obtenues est d'un intérêt particulier. Cette étude aide à juger l'importance de l'énergie grise et permet de discuter dans quelles circonstances une démolition et une reconstruction présentent une alternative écologique souhaitable à la rénovation.

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung 9

2 Anlass und Ziel der Arbeit 17

2.1.1 Hintergrund ... 17
2.1.2 Ziele ... 17

3 Begriffe 19

4 Methodik 21

4.1 Einführung 21
4.1.1 Nachhaltiges Bauen und Wohnen ... 22
4.1.2 Funktionalität der Simulationssoftware ... 23
4.1.3 Szenarien ... 24
4.2 Programmmodule 25
4.2.1 Gebäudemodul ... 25
4.2.2 Betriebsenergiemodul ... 27
4.2.3 Baustoffmodul ... 28
4.2.4 Angebotsmodul ... 33
4.2.5 Holzmodul ... 35
4.2.6 Bilanzmodul ... 39

5 Beschrieb der untersuchten Objekte 41

5.1 Einleitung 41
5.2 Sanierungen 42
5.2.1 MFH Allmendstrasse 221 - 225 in Basel (Objekt 1) ... 42
5.2.2 EFH Bündtenweg 15 in Hölstein (Objekt 2) ... 43
5.2.3 MFH Isabellenweg 3 - 7in Biel (Objekt 3) ... 44
5.2.4 MFH Muttenzerstrasse 91 in Pratteln (Objekt 4) ... 45
5.2.5 MFH Schänzlistrasse 32/34 in Solothurn (Objekt 5) ... 46
5.3 Neubauten 46
5.3.1 Neubau Mehrfamilienhaus (Objekt N_mfh) ... 47
5.3.2 Neubau Einfamilienhaus (Objekt N_efh) ... 49

6 Definition der Sanierungspakete 51

6.1 Sanierungspakete 51
6.1.1 Einleitung ... 51
6.1.2 Unsanierter Zustand (Variante U) ... 51
6.1.3 Minimale Eingriffsintensität (Variante A) ... 51
6.1.4 Durchschnittliche Eingriffsintensität (Variante B) ... 52
6.1.5 Fortschrittliche Eingriffsintensität (Variante C) ... 52

7 Analyse verschiedener Gebäudetypen 53

7.1 Einleitung und Kurzinformation 53
7.1.1 Ausgangslage ... 53
7.1.2 Fragestellung ... 53
7.1.3 Die wichtigsten Erkenntnisse ... 53
7.2 Einfluss der vorhandenen Bausubstanz 54
7.2.1 Grundlagen ... 54
7.2.2 Totale Nachfrage an nicht erneuerbarer Primärenergie (PE_{ne}) ... 54
7.2.3 Totale PE_{ne}-Nachfrage über die Gebäudelebensdauer ... 55
7.2.4 Graue Energie für Unterhalt und Erneuerung ... 56
7.2.5 Schlussfolgerungen ... 57
7.3 Analyse der zeitlichen und baulichen Dynamik 58

7.3.1 PE_{ne}-Nachfrage über die Lebensdauer ... 58
7.3.2 Eindringintensität verschiedener Sanierungspakete ... 59
7.4 Bilanzierung der Stoffflüsse 61
7.4.1 Bewertung nach Stoffkategorien (Sanierungen + Neubauten) ... 61
7.5 Wann ist Nachhaltigkeit erreicht? 63
7.5.1 Strenge Nachhaltigkeit ... 63
7.5.2 Gegenüberstellung der untersuchten Objekte ... 63
7.5.3 Bilanzausgleich mit Photovoltaik-Fläche ... 64
7.5.4 Systemgrenze Schweiz anstelle Europa (UCPTE-Raum) ... 64
7.6 Unterschiedliche Wohnungsgrössen beim Neubau 66
7.6.1 Grundlagen ... 66
7.6.2 Berechnungen und Kommentar ... 66
7.6.3 Schlussfolgerungen ... 66
7.7 Szenarien beim Haushaltsstromverbrauch 67
7.7.1 Grundlagen ... 67
7.7.2 Berechnungen und Kommentar ... 67
7.7.3 Schlussfolgerungen ... 68

8 Parameterstudien 69

8.1 Massivbau versus Leichtbau 69
8.1.1 Einleitung und Kurzinformation ... 69
8.1.2 Lebensdauern der beiden Bauweisen ... 70
8.1.3 Graue Energie von Massiv- und Leichtbau ... 70
8.1.4 Bewertung nach Stoffkategorien (Massiv- und Leichtbauten) ... 71
8.1.5 Graue Energie versus Heizenergie ... 72
8.2 Produktevarianz bezüglich Grauer Energie 74
8.2.1 Einleitung und Kurzinformation ... 74
8.2.2 Backstein aus unterschiedlichen Werken und Kalksandstein ... 75
8.3 Gebäudehülle 77
8.3.1 Einleitung und Kurzinformation ... 77
8.3.2 Balkone, Balkonverglasungen ... 78
8.3.3 Dämmstärken ... 78
8.4 Wärmeschutzverglasungen 81
8.4.1 Grundlagen ... 81
8.4.2 Heizperiode von Oktober bis April ... 82
8.4.3 Heizperiode nur Dezember und Januar ... 83
8.5 Gebäude- und Bauteillebensdauer 84
8.5.1 Einleitung und Kurzinformation ... 84
8.5.2 Variable Gebäudelebensdauer ... 85
8.5.3 Variable Bauteillebensdauer ... 86
8.6 Holzbau und Holztrocknung 87
8.6.1 Einleitung und Kurzinformation ... 87
8.6.2 Holztrocknung ... 88
8.6.3 Holzbauarten ... 88
8.6.4 Stoffflüsse von Holzbauarten ... 91
8.7 Metallbauteile 92
8.7.1 Einleitung und Kurzinformation ... 92
8.7.2 Graue Energie von Metallbauteilen ... 93
8.7.3 Maximales Metallrecycling ... 94
8.7.4 Küchen ... 95
8.8 Energieflüsse pro Quadratmeter oder pro Kopf 97
8.8.1 Einleitung und Kurzinformation ... 97
8.8.2 Fläche oder Bewohner als Bezugsgrösse ... 98
8.8.3 Variierung der Nettogeschossfläche pro Person ... 99

9 Kriterien nachhaltiger Entwicklung im Wohnungsbau 101

10 Vergleichsbetrachtungen 105

10.1 Wärmedämmvorschriften der Behörden 105
10.2 MINERGIE® 106
10.3 Die 2'000-Watt-Gesellschaft 108
10.4 Weiterer Forschungsbedarf 110

11 Definitionen und Annahmen 111

12 Literaturverzeichnis 115

1 Zusammenfassung

Das Wichtigste in Kürze:

Ob Genossenschaftswohnung aus den fünfziger Jahren, Wohnblöcke aus den sechziger Jahren oder Renditeobjekte aus den siebziger Jahren: Mit vielen anderen bestehenden Wohnbauten ist ihnen gemeinsam, dass sie nicht mehr den heutigen Wohnvorstellungen und –ansprüchen genügen und dass ihr Betrieb, insbesondere ihre Beheizung eine übermässige Belastung für die Umwelt darstellt. In der hier dokumentierten Arbeit wurde untersucht, wie die verschiedenen möglichen Erneuerungsstrategien aus der Sicht der ökologischen Optimierung zu beurteilen sind. Da der Energieverbrauch für Erstellung und Betrieb von Gebäuden den absolut dominierenden Faktor der Umweltbelastung darstellt, lassen sich aus den Untersuchungen verlässliche Hinweise auf die ökologische Nachhaltigkeit von Bauentscheiden im Wohnungsbau ableiten.

Die detaillierte Berechnung aller Energieflüsse an verschiedenen bestehenden Wohnbauten infolge Erstellung, Sanierung und Unterhalt sowie durch den Betrieb, haben interessante Resultate geliefert. Sie haben gezeigt, dass es durchaus sein kann, dass der Abbruch eines Gebäudes und die Erstellung eines energetisch optimierten Neubaus aus energetischer, und damit im wesentlichen auch aus ökologischer Sicht, vorteilhafter als die Sanierung des Gebäudes ist. Dies trifft insbesondere dann zu, wenn entweder die Voraussetzungen für die energetische Sanierung schwierig sind oder für die Realisierung eines zeitgemässen Wohnwertes sehr intensive Umbauarbeiten nötig sind. Intensive Eingriffe sind nötig, wenn das Gebäude bis in die Rohbaustruktur in schlechtem Zustand ist (Risse in der Tragstruktur), wenn es von der Bauweise her undicht ist (z.B. alte Holzbauweise), wenn noch keine Zentralheizung vorhanden ist etc. Die energetische Optimierung wird eingeschränkt (oder übermässig verteuert) durch Faktoren wie komplizierte oder kleinteilige Gebäudehülle, auskragende Betonplatten (Balkone, Flachdach) oder knappe Platzverhältnisse für Wärmeschutzmassnahmen etc.

Als Faustregel kann gelten, dass die Variante Abbruch und Ersatzneubau dann „ökologisch wünschbar“ sein kann, wenn der Endenergiebedarf für den Betrieb des sanierten Gebäudes (Heizung, Warmwasser, Haushaltstrom) mehr als 40 bis 60 MJ/m^{2}a über demjenigen eines Ersatzneubaus liegen würde. Wenn der Neubau also beispielsweise dem MINERGIE-Standard entspricht, mit einem Endenergieverbrauch Wärme von höchstens 160 MJ/m^{2}a für Heizung und Warmwasser, sollte mit der Sanierung ein Wert von 200 bis 220 MJ/m^{2}a nicht überschritten werden. Diese Überlegungen haben nur Gültigkeit, wenn bei der Variante Abbruch und Ersatzneubau die derzeitigen Möglichkeiten der Bauabfallverwertung so gut wie möglich ausgeschöpft werden.

Der Energieverbrauch von Wohngebäuden für Betrieb, Herstellung der Baustoffe und Bauteile und Werterhaltung sowie die dabei anfallenden Stoffflüsse sind von grosser ökologischer Relevanz. Die Veränderung der Bauwirtschaft, hin zu einer nachhaltigen Entwicklung, führt vor allem über eine optimale **Sanierung der bestehenden Bausubstanz**. Es ist aber nicht auszuschliessen, dass **Abbruch und Neubau** eines Wohngebäudes die energietechnisch und ökologisch bessere Variante sein kann als die Erhaltung und energietechnische Optimierung eines bestehenden Gebäudes. Mittels quantitativer Analyse unterschiedlicher Erneuerungsstrategien an verschiedenen bestehenden und neu zu erstellenden Gebäuden wird diese Frage geklärt. Die vorliegende Arbeit untersucht die ökologischen Aspekte von Sanierungs- und Erneuerungsstrategien von Wohnbauten. Die zur Nachhaltigkeit gehörenden Aspekte der Sozial- und Wirtschaftsverträglichkeit werden nur implizite und qualitativ beachtet, ebenso andere Aspekte, welche in der Praxis massgeblich die Wahl der Erneuerungsstrategie beeinflussen, wie örtliche baurechtliche Rahmenbedingungen, Schutzwürdigkeit, architektonischer Ausdruck etc.

Die Voruntersuchungen im Rahmen einer Diplomarbeit am Nachdiplomstudium Energie der FHBB haben gezeigt, dass der **Energieverbrauch für Herstellung und Betrieb** von Wohnbauten die zentrale Beurteilungsgrösse des Umweltaspektes der Nachhaltigkeit darstellt. Die Arbeit fokussiert daher auf die Energieflüsse der Prozesse Bau, Betrieb und Entsorgung. Das an der Diplomarbeit entwickelte Rechenprogramm zur Berechnung dieser Energieflüsse wurde überarbeitet und erweitert. Es erlaubt, mit vernünftigem Aufwand Bau- und Sanierungsvarianten von Wohnbauten zu erfassen oder mehrere Varianten einander gegenüber zu stellen. Das Programm ist darauf angelegt, Wohngebäude in parametrisierter Weise zu erfassen. Gebäudedaten wie Länge, Breite, Anzahl Geschosse, Fensterfläche pro Fassade usw. können detailliert eingegeben werden und sind mit den übrigen Gebäudeeigenheiten wie Anzahl Küchen oder Trennwände verknüpft. Es ist dadurch besonders einfach, Sensitivitätsanalysen durchzuführen, indem die relevanten Parameter variiert werden. Den Bauteilen können detailliert dargestellte Konstruktionen zugewiesen werden, so dass das Gebäude bis in die Details stofflich und energetisch beschrieben ist. Ein Programmmodul für Baustoffe liefert spezifische Daten wie Primär- oder Endenergiebedarf eines Baustoffes, Transportdistanzen zur Baustelle und die Art der Rezyklierbarkeit oder des Ressourcenpotentiales des Baustoffes. Damit können die Stoffflüsse und die damit verbundene Graue Energie durch Erstellung und periodischen Ersatz von Gebäudeteilen über die ganze Lebenszeit des untersuchten Gebäudes berechnet werden. Die Betriebsenergie wird durch ein erweitertes und differenziertes Rechenmodell auf der Basis der Empfehlung SIA 380/1 ermittelt.

Das Hauptziel der Arbeit bestand darin, durch beschreibende und vergleichende Analyse von Sanierungsvarianten verschiedener typischer Wohnbauten herauszufinden, welche Sanierungsstrategien aus ökologischer Sicht am wünschenswertesten sind und welche Massnahmen am effizientesten zu einer ökologischen Verbesserung der Wohnbausubstanz beitragen. In zweiter Linie sollte aber auch untersucht werden, was ökologische Nachhaltigkeit im Wohnungsbau bedeuten könnte. Um strenge Nachhaltigkeit zu erreichen, darf die Energienachfrage (Verbrauch) eines Gebäudes ein bestimmtes Angebot aus nur erneuerbaren Energiequellen nicht überschreiten. Im Rahmen der vorliegend dokumentierten Arbeit wurde die einfache Annahme getroffen, dass für den Wohnungssektor auch in Zukunft der gleiche Prozentsatz des Gesamtenergieverbrauchs eingesetzt werde wie bisher. Allerdings stehen in einer nachhaltig wirtschaftenden Gesellschaft nur noch die erneuerbaren Energiequellen zur Verfügung, also ein Bruchteil des heutigen Verbrauchs. Daraus ergibt sich ein **nachhaltiges Energieangebot** für den Wohnbausektor als Ganzes, das auch pro Kopf, pro Wohnung oder pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche ausgedrückt werden kann. An diesem nachhaltigen Energieangebot können die Resultate der verschiedenen Sanierungsvarianten gemessen werden. Eine gewisse Tücke ergibt sich aus der Tatsache, dass die erneuerbaren Energien saisonal und örtlich unterschiedlich anfallen und unterschiedliche Wertigkeiten besitzen. Um den Bedarf an Elektrizität im Winter mit Photovoltaik abzudecken muss im Sommer erzeugte Elektrizität mit schlechtem Wirkungsgrad gespeichert werden (z. B. in Pumpspeicherwerken). Umgekehrt kann mit Strom Umweltwärme für Heizzwecke nutzbar gemacht werden (Wärmepumpen). Zur Beurteilung der Frage der Nachhaltigkeit wurde deshalb in der Arbeit eine Verrechnungsmodell der verschiedenen Energieträger entwickelt, die sogenannte Bilanzzahl elektrisch, B_{el}. Mit ihr wird das Energieangebot und die Energienachfrage mit bestimmten Umwandlungswirkungsgraden auf Elektrizität pro Kopf oder pro m^2 Energiebezugsfläche umgerechnet.

Entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse hat die Wahl der **geographischen Systemgrenzen**. Wird die Schweiz als Betrachtungsraum gewählt, ist Nachhaltigkeit vor allem wegen der rund viermal grösseren Stromproduktion aus Wasserkraft einfacher zu erreichen als wenn mit dem europäischen Strommix (UCPTE) gerechnet wird. Dann nämlich kann mit keiner der betrachteten Erneuerungsstrategien strenge Nachhaltigkeit erreicht werden. Dies kann jedoch - je nach Gebäude und gewähltem zeitlichen Szenario - mit dem Zubau von 1 bis 26 m^2 Photovoltaikfläche pro Kopf ausgeglichen werden.

Wichtig erscheint in diesem Zusammenhang auch die Berücksichtigung der **zeitlichen Dynamik**. Da Gebäude äusserst langlebige Güter sind, werden sich über die betrachtete Zeitspanne, nämlich die Lebensdauer eines Gebäudes, viele der beteiligten Prozesse verändern. Beispielsweise kann davon ausgegangen werden, dass das Angebot an erneuerbaren Energien zunehmen wird. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, werden Betrachtungen entweder im Szenario IST oder im Szenario SOLL gemacht.

- Im **Szenario IST** wird von heutigen durchschnittlichen Prozessen ausgegangen. Beim zu erwartenden Energieangebot über die Lebensdauer wird mit den heute vorhandenen Technologien und Nutzungsmöglichkeiten erneuerbarer Energien gerechnet. Bei der Nachfrage an Betriebsenergie werden die heute üblichen Technologien eingesetzt und die Baustoffe werden mit heutigen Produktions- und Recyclingwerten hergestellt.

- Im **Szenario SOLL** dagegen sind all diese Werte optimiert. Es wird also das Gebäude ab dem geplanten Eingriff bis zum Rückbau bilanziert. Das Angebot an erneuerbaren Energien stellt das mittelfristig zu erwartende Potential in diesem Bereich dar. Zum Beispiel kann mit einer kleinen Produktionssteigerung bei der Wasserkraft, einer gesteigerten Nutzung von Windenergie oder eines vermehrten Einsatztes von Biomasse gerechnet werden. Bei der Betriebsenergie und den Baustoffen werden verbesserte Technologien eingesetzt, dessen Entwicklung und Einbau über die betrachtete Zeit zu erwarten ist.

Um möglichst allgemeingültige Aussagen machen zu können, **wurden fünf Untersuchungsobjekte** ausgewählt, die als repräsentativ für den schweizerischen Sanierungsmarkt gelten. Sie weisen keine Besonderheiten auf, unterscheiden sich aber in Grösse, Konstruktion, Alter und Wohnungsstruktur:

- Ein Einfamilienhaus (Baujahr 1957)
- ein Hochhaus mit 60 Wohnungen (Baujahr 1969)
- ein Mehrfamilienhaus aus der Jahrhundertwende (Baujahr 1898)
- ein freistehendes Mehrfamilienhaus (Baujahr 1956)
- und ein beidseitig angebautes Stadthaus (Baujahr 1932).

Die Quantifizierung von Energie- und Stoffflüssen einer Gebäudesanierung setzt die genaue Projektierung einzelner Sanierungsmassnahmen voraus. Je nach Zustand des Gebäudes, wirtschaftlicher Absicht usw. kann unterschiedlich tief in die bestehende Bausubstanz eingegriffen werden. Die einheitliche Bildung **verschiedener Sanierungspakete** ist wichtig für die Evaluation differenzierter Resultate:

- unsaniert
- minimal saniert
- durchschnittlich saniert
- fortschrittlich saniert

Als Vergleichsgrössen wurden einerseits ein Neubau eines Mehrfamilienhauses konzipiert, der in der Art der Bauweise und der Energieeffizienz variiert wurde. Anderseits wurden die Resultate einem Einfamilienhaus in Holzleichtbauweise gegenübergestellt.

Die Berechnungen haben in allen Fällen gezeigt, dass die **Betriebsenergie**, in erster Linie für die Beheizung, in zweiter Linie für die elektrischen Geräte und Warmwasser, dominierend ist. Wärmeschutzmassnahmen und Energieeffizienz können aus dieser Sicht kaum überschätzt werden. Der Aufwand an Grauer Energie für Herstellung, Transport, Einbau und Abbruch der Baustoffe stellt zwar einen nicht vernachlässigbaren, aber doch deutlich weniger wichtigen Anteil des Gesamtenergieflusses dar. Zudem sind die Optimierungsmöglichkeiten eingeschränkter. Der Aufwand für periodische Erneuerungsmassnahmen (Küchen, Innenausbau usw.) ist bei fast allen Objekten grösser als für Massnahmen beim Sanierungseingriff. Weil Massnahmen des Wärmeschutzes und der rationellen Energieanwendung keine grossen Mengen an Grauer Energie beanspruchen, amortisieren sie sich ökologisch meistens nach wenigen Jahren.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurde von durchschnittlichen Wohnungsgrössen und Belegungsdichten (Personenbelegung pro Wohnung) ausgegangen. Der Anspruch nach Wohnraum hängt mit dem Wohlstand, den gesellschaftlichen Vorstellungen über das Wohnen und der Bevölkerungsstruktur, etwa der durchschnittlichen Familiengrösse, zusammen. Diese Grössen lassen sich im Rahmen von Erneuerungsentscheiden für ein Wohngebäude nicht beeinflussen. Die Energiekennzahlen, sowohl für Betriebs- wie für Herstellungsenergie, verändern sich allerdings stark, wenn im Rahmen einer Objektsanierung viele Kleinwohnungen anstatt Grosswohnungen eingebaut werden. Einerseits ist die Belegungsdichte bei Klein- und Grosswohnungen unterschiedlich. Andererseits ist die Installationsdichte verschieden. In einer Umbauvariante mit lauter Kleinwohnungen hat es beispielsweise wesentlich mehr Küchen und Sanitärräume, was den Bedarf an Grauer Energie erheblich beeinflussen kann. Die Haushaltsgrösse ist vor allem wegen dem Haushaltstromverbrauch ein sehr sensitiver Faktor. Je mehr Personen in einem Haushalt leben, desto kleiner ist der Elektrizitäsverbrauch pro Kopf. Durch das grosse Optimierungspotential beim Wärmeverbrauch Heizung und Warmwasser und den geringen Anteil der Grauen Energie ist die Bedeutung des Haushaltstromverbrauches bei energetisch optimierten Gebäuden hoch. Abbildung 1 zeigt den gesamten Energieverbrauch von fünf fortschrittlich sanierten Wohnbauten (1_C bis 5_C) und einem fortschrittlichen Neubau (N_mfh_lo). Durch die Berücksichtigung der höheren Wertigkeit des Energieträgers Elektrizität, im speziellen noch durch die Wahl des europäischen Strommixes (UCPTE), kann der Haushaltstrom zur dominierenden Grösse werden. Die Qualität der Küchen- und Haushaltgeräte sowie der Beleuchtung - durchschnittliche oder beste heute erhältliche Technologie - beeinflusst deshalb die Kennzahlen von Sanierungsvarianten massgeblich. Sanierungsvarianten mit unterschiedlicher Wohnungsanzahl und Wohnungsgrössen können sich wegen dieser Effekte stark bezüglich ihres Primärenergiebedarfes unterscheiden. Da Sie aber verschiedene gesellschaftliche Bedürfnisse nach Wohnraum abdecken, können sie einander auch nur mit Vorbehalt gegenübergestellt werden.

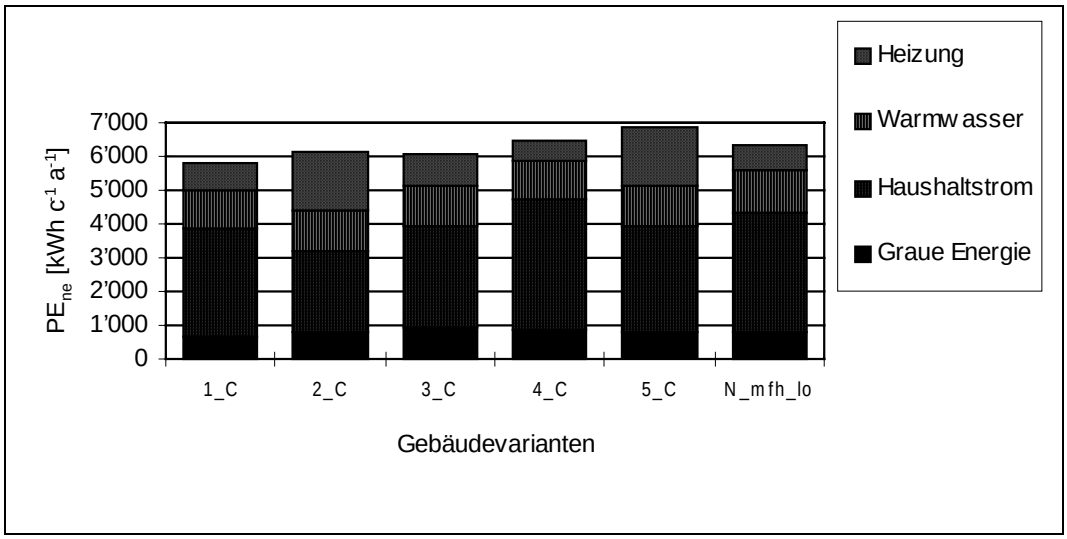


Abbildung 1: Der gesamte Verbrauch an nicht erneuerbarer Primärenergie (PE_{ne}) pro Person und Jahr (kWh $c^{-1}a^{-1}$). Dargestellt sind fünf fortschrittlich sanierte Wohnbauten (1_C bis 5_C) und ein Neubau in Holzbauweise (N_mfh_lo).

Neben den gesamtheitlichen Betrachtungen verschiedener Gebäudetypen und unterschiedlicher Sanierungsvarianten wurden in einer Reihe von **Parameterstudien** Aussagen zu gezielten einzelnen Fragestellungen gemacht.

- **Massivbau versus Leichtbau**
  Die Gebäudelebensdauer von Massiv- und Holzleichtbauten hängt entscheidend von Faktoren wie Unterhalt oder Benutzeransprüchen ab. Sie kann deshalb nicht als Frage des Systems beantwortet werden. Dagegen lösen Leichtbauten tendenziell geringere Flüsse an schlecht rezyklierbaren Stoffen als Massivbauten aus. Die Gesamtbilanz von Heizenergie und Grauer Energie der beiden Bauweisen hängt entscheidend vom wärmetechnischen Standard der Gebäudehülle ab. Werden einander nämlich zwei wärmetechnisch identische Objekte gegenübergestellt (gleiche Gebäudehüllen-k-Werte), sind die Unterschiede marginal. In der Realität stehen sich allerdings oft hochgedämmte Leichtbauten und wegen der grossen Wanddicken mittel-

mässig gedämmte Massivbauten gegenüber. In diesem Fall haben die Leichtbauten die bessere Bilanz. Massivbauten werden den Anspruch der ökologischen Ebenbürtigkeit zu (Holz-) Leichtbauten nur aufrecht erhalten können, wenn sie ebenfalls mit einem hervorragenden Wärmeschutz ausgestattet werden können. Argumentationen über unterschiedliche Lebensdauer und Wärmespeicherverhalten haben untergeordnete Bedeutung.

- **Produktevarianz**
  Für die Berechnung der Grauen Energie wird normalerweise von Durchschnittswerten für Baumaterialien ausgegangen. Faktisch bestehen aber Unterschiede von Produkt zu Produkt, je nachdem, ob ein Baustoff in einer energetisch optimierten Anlage hergestellt wird und wie weit er transportiert werden muss. Werden Baustoffe aufgrund eines günstigeren durchschnittlicheren Grauenergiewertes bevorzugt, kann das konkrete Produkt im Einzelfall durchaus eine höheren Grauenergiebelastung aufweisen als der benachteiligte Baustoff. Abbildung 2 zeigt zum Beispiel die mittlere Graue Energie eines Neubaus in Massivbauweise von Backsteinen und von Kalksandstein, ausgedrückt in nicht erneuerbarer Primärenergie (PE_{ne}). Der massenbezogene Garuenergiewert (MJ/kg) von Kalksandsteinen ist dabei am tiefsten. Dagegen kommt bei einer Betrachtung, die sich auf die Energiebezugsfläche EBF des Neubaus bezieht (MJ/m^{2}a), die geringere Dichte sowie die bessere Wärmeschutzeigenschaft von Backstein zum tragen. So gesehen ist der Grauenergieverbrauch von Backsteinen aus besonders energiebewusst produzierenden Betrieben tiefer als der von durchschnittlich produzierten Kalksandsteinen. Die Wahl von Backsteinen oder Kalksandsteinen aus unterschiedlichen Herstellerwerken wirkt sich aber auf die gesamte Graue Energie sowie die gesamten Energieflüsse nicht sehr stark aus.

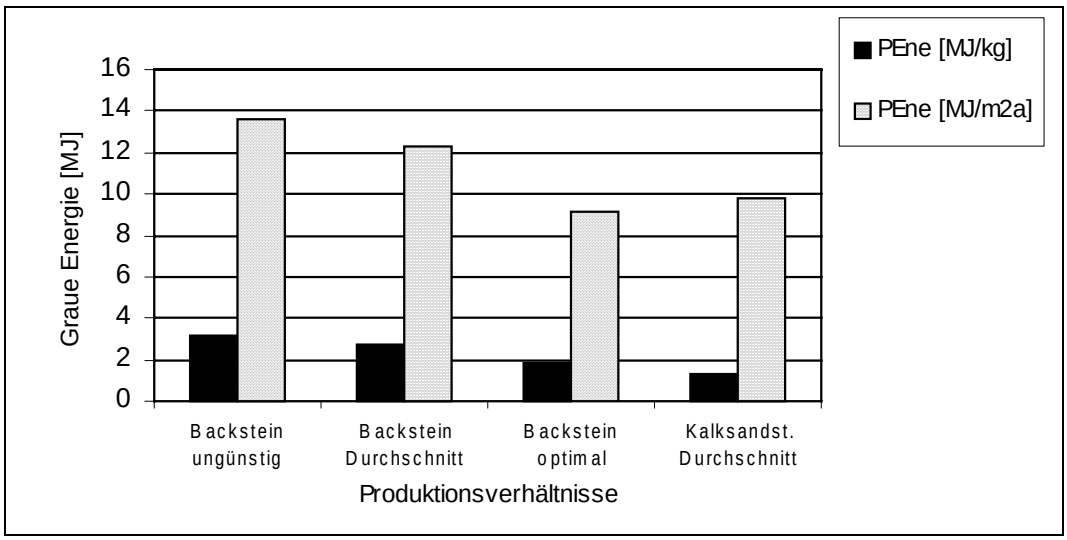


Abbildung 2: Die Graue Energie für Backstein oder Kalksandstein eines Neubaus in Massivbauweise; ausgedrückt in nicht erneuerbarer Primärenergie (PE_{ne}). Die Werte sind einmal auf die Masse (MJ/kg) und einmal auf die EBF eines Neubaus (MJ/m^{2}a) bezogen.

- **Gebäudehülle** (Balkonverglasungen und Dämmstärken)
  Die optimale Dämmstärke aus energetischer und ökologischer Sicht (nicht aus wirtschaftlichem Blickwinkel!) hängt von Faktoren wie Dämmaterial und Heizsystem ab. Grundsätzlich ist sie aber höher als mit realen Baukonstruktionen mit verhältnismässigem Aufwand erreicht werden kann, und liegt zwischen 30 und 50 cm. Für die untersuchten Balkonverglasungen und die damit verbundenen Massnahmen zur Entschärfung der Balkon-Wärmebrücken liegt die energetische Rückzahlfrist (Energieeinsparung gegenüber Energieaufwendungen) im günstigen Bereich.

- **Wärmeschutzverglasungen**
  Die Verwendung des Edelgases Xenon zur Füllung des Scheibenzwischenraumes muss aus energetischer Sicht als nicht sinnvoll bewertet werden. Der Input an Grauer Energie ist - zumindest beim heutzutage angebotenen Xenon - höher als die durch das bessere Wärmedämmvermögen eingesparte Heizenergie. Das beste Aufwand/Ertrags-Verhältnis wird mit Krypton erreicht. Bei gut besonnten südorientierten Fenstern der untersuchten Gebäude (schweiz. Mittelland) überwog der Nutzen der guten Strahlungsdurchlässigkeit von 2-fach-Verglasungen gegenüber 3-fach-Verglasungen. Allerdings gilt dies nur bei optimalem Benutzerverhalten und einem gut geregelten Heizsystem. Bei Niedrigenergiehäusern interessiert vor allem die Zeit im Hochwinter (verkürzte Heizperiode). Da in dieser Zeit die Globalstrahlung gering ist, schneiden hier südseitig die kryptongefüllten 3-fach-Verglasungen am besten ab.

- **Gebäude- und Bauteillebensdauer**
  Die Untersuchung zeigt, dass ab ca. 50 Jahren Gebäudelebensdauer keine oder kaum mehr markante Unterschiede in der Endbilanz auftreten. Ob die Gebäudelebensdauer also mit 50 oder 80 Jahren angenommen wird, bewirkt keine wesentlichen Änderungen bei den Resultaten.
  Die Wahl unterschiedlich langer Bauteillebensdauer, also etwa Küchenersatz nur alle 25 statt 15 Jahre, hat einen bedeutenden Einfluss auf die Höhe der Grauen Energie. Da diese jedoch einen eher geringen Anteil am Gesamtenergieverbrauch hat, ist auch die Bedeutung der Bauteillebensdauer eher gering, wenn es sich nicht um krasse Fälle handelt, wie den Abbruch eines Massivgebäudes nach wenigen Jahren oder die Auswechslung von fast neuen Küchengeräten etc.

- **Holzbau und Holztrocknung**
  Der Schweizer Wald liefert genügend Bauholz, um die Nachfrage für den Wohnungsbau zu decken. Je nach Gebäudetyp müssen bei der Holzgewinnung kleine Optimierungsschritte wie zum Beispiel das Erhöhen der Einschlagmenge oder die bessere Verwertung von Altholz vorgenommen werden. Die Graue Energie des gesamten Bauholzes beträgt beim untersuchten Einfamilienhaus in Holzleichtbauweise nur ca. ein Viertel der gesamten Grauen Energie. Wird sie in Bezug gesetzt zur Betriebsenergie, sind kaum mehr Unterschiede verschiedener Holzbauweisen erkennbar. Auch die Frage ob technisch oder natürlich getrocknetes Konstruktionsholz eingesetzt wird, ist in diesem Kontext nicht sehr bedeutend.

- **Metallbauteile**
  Metalle können bis 40% der Grauen Energie eines Wohngebäudes ausmachen und sind deshalb nicht zu vernachlässigen. Durch das weitere Vorantreiben von Recyclingmassnahmen im Metallbereich kann die Primärenergienachfrage weiter gesenkt werden. Wichtige Elemente sind Küchen. Durch ihre kurze Lebensdauer und Ihren hohen Anteil an Metallbaustoffen in den Geräten können sie einen Anteil von 10 bis 20% an der gesamten Grauen Energie ausmachen.

- **Funktionale Einheit**
  Für Ökobilanzen im Bauwesen können unterschiedliche Bezugsgrössen (funktionale Einheiten) verwendet werden. Die Wahl der funktionalen Einheit wirkt sich entscheidend auf die Endresultate aus. Bezieht man die Resultate, wie in der Branche üblich, auf die Energiebezugsfläche (MJ $m^{-2}a^{-1}$), so drückt sich der Umstand, dass eine grosse Wohnung absolut gesehen eine ökologische Mehrbelastung darstellt, nicht in den Ergebnissen aus. Um dies zu berücksichtigen, wird in diesem Projekt als funktionale Einheit in erster Linie ein nutzungsspezifisches Maß (kWh $c^{-1}a^{-1}$) verwendet.

Das gewählte Vorgehen, anhand von fünf realen und typischen Wohnbauten und deren Sanierungsmöglichkeiten eine Energie- und Stoffflussanalyse durchzuführen, hat zu eindeutigen und überraschend übereinstimmenden Resultaten geführt, die auch einige klare Schlussfolgerungen zulassen. Bezüglich dieser Schlussfolgerungen muss allerdings auch

die Kehrseite der Methode klargestellt werden: Mit der Wahl der Energie als Leitgrösse hat man in der Regel eine Entscheidgrundlage, die auch eine ökologische Optimierung gewährleistet. Als ressourcenorientierte Betrachtung bleibt sie aber naturgemäss kurzsichtig gegenüber Umweltauswirkungen. Obwohl mit fünf typischen Fällen das Feld der Wohnbauten gut ausgeleuchtet wird, muss immer sorgfältig bedacht werden, ob in der Übertragung von Schlussfolgerungen auf ein konkretes weiteres Objekt andere Rahmenbedingungen und Systemgrenzen als in der Untersuchung vorliegen. Die wichtigsten Vorgaben der vorliegenden Arbeit in diesem Sinne sind:

- Beschränkung auf Wohnbauten.
- Primärenergieverbrauch zur Stromerzeugung gemäss gegenwärtiger Situation im europäischen Raum (UCPTE), was dem Elektrizitätsverbrauch in den Bilanzen ein hohes Gewicht gibt.
- Standardnutzung und Bewohnerverhalten (basierend auf Empfehlung SIA 380/1).
- Energie als Schlüsselindikator, was im Regelfall akzeptiert werden kann, im Sonderfall aber möglicherweise ungenügend ist (z.B. bei Altlasten).

Im Rahmen von Schlussfolgerungen und Empfehlungen muss vor allem die Bedeutung der Betriebsenergie herausgestrichen werden. Bei bestehenden, sanierungsbedürftigen Bauten überwiegt die Heizenergie. Da diese zudem über ein sehr hohes Optimierungspotential verfügt, soll zuerst sie reduziert werden. Dies geschieht vor allem über eine optimale Dämmung der Gebäudehülle sowie ein gutes Lüftungskonzept, wenn möglich mit Lüftungsanlage samt Wärmerückgewinnung und schliesslich eine effiziente Heizung. Die Elektrizität, die für Haushaltgeräte benötigt wird, wurde bisher tendeziell unterschätzt. Ihr sollte in Zukunft besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Der Aspekt der Grauen Energie hat in der Regel nicht die Bedeutung, dass er Entscheide, ob eine Massnahme durchgeführt wird oder nicht, beeinflussen soll. Hingegen ist es natürlich sinnvoll, die beschlossenen Massnahmen hinsichtlich Bedarf an Grauer Energie zu optimieren. Dies kann durch Massenreduktion, Baustoffbevorzugung und Verlängerung der Lebensdauer (Qualität) erreicht werden.

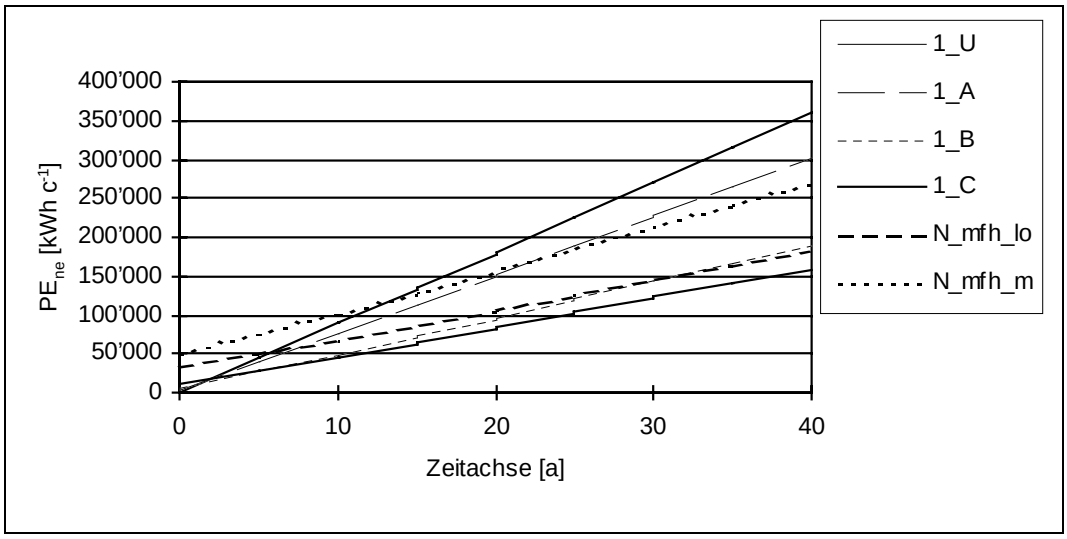


Abbildung 3: Nachfrage an Primärenergie eines Sanierungsobjektes mit verschiedenen Erneuerungsintensitäten und zwei Neubauten über die ersten 40 Jahre.

Bestehende Wohnbauten können, wenn die Rahmenbedingungen gut sind, mit heutiger Technologie so saniert werden, dass sie die Anforderungen der strengen Nachhaltigkeit im Sinne der vorliegenden Studie erreichen. Dies ist allerdings nur mit einer sehr weitgehenden energietechnischen Sanierung oder dem Erstellen eines hochwertigen Ersatzneubaus möglich.

Damit die Grössenordnung und die Relevanz der Resultate besser zur Geltung kommen, werden einige **Vergleichsbetrachtungen** angestellt: Die Energievorschriften der Behörden sind bei Sanierungen und Neubauten relativ einfach zu erreichen und einseitig auf die Heizenergie ausgerichtet. Die Qualitätsmarke *MINERGIE®* dagegen verspricht einerseits durch ihre Einfachheit hohe Umsetzungschancen und setzt anderseits richtigerweise bei einer Reduzierung der Betriebsenergie, insbesondere der Heizenergie, an. *MINERGIE®* ist als Standard ein wichtiges Etappenziel, das auch betriebs- und volkswirtschaftliche Rea-

litäten bewusst einkalkuliert. Das Konzept der 2‘000-Watt-Gesellschaft des ETH-Bereiches vertritt ebenfalls die Auffassung, dass für eine nachhaltige Entwicklung die Reduktion des Energieverbrauches im Zentrum steht. Die Anforderungen sind etwas milder als bei den Annahmen der vorliegenden Studie, ist doch vorgesehen, dass noch ein Viertel der 2‘000 Watt als fossile Energieträger konsumiert werden kann. Mit Bezug auf diese „weichere“ Definition nachhaltiger Entwicklung kann gesagt werden, dass Nachhaltigkeit im Bauwesen durchaus als (langfristiges) Ziel und nicht als Utopie verstanden werden darf.

2 Anlass und Ziel der Arbeit

2.1.1 Hintergrund

1997 erarbeitete eine Gruppe von vier Studierenden im Rahmen des Nachdiplomstudium Energie an der Fachhochschule beider Basel eine Diplomarbeit zum Thema „Nachhaltigkeit im Wohnungsbau“. Trotz Einschränkung des Themas auf den Bereich Energie sprengte die Aufgabenstellung eigentlich den Rahmen einer Diplomarbeit. Um so erfreulicher war die Tatsache, dass es der Gruppe trotzdem gelang, an einem Fallbeispiel aufzuzeigen, dass die Anforderungen einer nachhaltigen Entwicklung durchaus in konkrete Ziele und entsprechende Sanierungsprogramme umsetzbar sind. Nebst dem Diplomarbeitsbericht lag zum Schluss ein selbstentwickeltes Rechenprogramm vor, genannt SUSTAIN, welches die differenzierte Berechnung von Energie- und Stoffflüssen an Wohnbau-Sanierungen und -Neubauten erlaubte. Im Rahmen der Diplomarbeit konnte das Programm aus zeitlichen Gründen gerade mal an einem Beispiel, einem Mehrfamilienhaus, angewendet werden.

Viele Gebäudeeigenschaften werden in SUSTAIN in parametrisierter Weise erfasst. Dies führt dazu, dass nicht alle realen Gebäude erfasst werden können. Gebäude, welche aber die Voraussetzungen zur Erfassung durch SUSTAIN erfüllen, können dank der Parametrisierung sehr einfach verändert werden. So können rasch viele Varianten gerechnet werden. Damit erfüllte SUSTAIN, nach gewissen Erweiterungen und Modifikationen zu SUSTAIN II, die Voraussetzung, mittels einer Reihenuntersuchung repräsentativer Wohnbauten Licht in viele Fragen im Bereich des nachhaltigen Bauens zu bringen. Dies wurde mit der vorliegenden Untersuchung gemacht.

2.1.2 Ziele

Die Resultate der Arbeit sollen zur Klärung der Frage beitragen, was ökologische Nachhaltigkeit im Bausektor konkret bedeutet. Das Bauwesen ist als Wirtschaftszweig mit jährlich 40 Milliarden Fr. Umsatz und rund 70 Millionen Tonnen Materialhandling äusserst bedeutsam für die Errichtung einer nachhaltigen Wirtschaftsweise in der Schweiz. So sind etwa die folgenden Fragenkomplexe für die Festlegung einer Nachhaltigkeits-Strategie im Bauwesen besonders bedeutsam:

- Könnte es sein, dass erhebliche Teile der schweizerischen Bausubstanz aus energetischer und ökologischer Sicht mit vergleichbarem oder sogar höherem Nutzen abgebrochen und durch optimierte Neubauten ersetzt werden könnten, anstatt sie zu erhalten, sanieren oder umzubauen?
- Welche Bauqualität lässt sich aus dem Postulat der nachhaltigen Entwicklung ableiten? Lassen sich quantitative Anforderungen an die Stoff- und Energieflüsse und damit an die Baukonstruktion formulieren?
- Ist die Erfüllung des Grundsatzes der Nachhaltigkeit im Bauwesen, also beispielsweise, keine nicht erneuerbaren Ressourcen zu verwenden, ein technisch machbares Projekt? Ist es nur partiell oder nur mit unverhältnismässigem Aufwand erreichbar?
- Welche Kriterien der ökologischen Nachhaltigkeit sind für den Bauplaner aussagekräftig und operabel? Wenn Energie als Schlüsselindikator der Nachhaltigkeit verwendet wird: Welche Bedeutung haben die verschiedenen Energieformen wie Betriebsenergie, Haushaltstrom, Graue Energie?

Die Erkenntnis der Arbeit sind einerseits in der Zusammenfassung in konzentrierter Form nachzulesen. Um sie für interessierte Fachleute aus der Bauwirtschaft möglichst operabel zu gestalten, sind ausserdem im Kapitel 9 explizite ‚Kriterien nachhaltiger Entwicklung im Wohnungsbau‘ zusammengestellt. Die detailliert analysierten und dargestellten Wohnbauten sollen aber vor allem für die an der ökologischen Nachhaltigkeit Interessierten einen Fundus an umsetzbaren Erkenntnissen enthalten.

3 Begriffe

A	Gebäudehüllenoberfläche
a	Jahre
BAT	Best Available Technology
B_{el}	Bilanzzahl elektrisch, in Elektrizität umgerechnete Endenergiebilanz eines Gebäudes
BfE	Bundesamt für Energie
BFT	Best Future Technology
BfS	Bundesamt für Statistik
BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft
c	Personen
COP	Coefficient of performance
E	Energiekennzahl, Endenergiebedarf pro m^2 EBF
EAWAG	Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz
EBF	Energiebezugsfläche
EE	Endenergie
E_e	Energiekennzahl Elektrizität
EFH	Einfamilienhaus
E_h	Energiekennzahl Heizung
EMPA	Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
EPS	Expandierter Polystyrol
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule
ETV	Elektro-thermischer Verstärkungsfaktor
E_w	Energiekennzahl Wärme (Heizung und Warmwasser)
E_{ww}	Energiekennzahl Warmwasser
GES	Schweizerische Gesamtenergiestatistik, alljährlich erscheinend
Graue Energie	Baustoffenergie, Herstellungsenergie, Feedstockenergie usw.
JAZ	Jahresarbeitszahl einer Wärmepumpe
MFH	Mehrfamilienhaus
MJ $m^{-2}a^{-1}$	Megajoule pro m^2 und Jahr, MJ/m^2a
MVO	Musterverordnung
m^3f	Festmeter Holz, 1 m^3 Holz ohne Hohlräume
NGF	Nettogeschossfläche
PE	Polyethylen
PE_{ne}	Primärenergie nicht erneuerbar
PP	Polypropylen
PSI	Paul Scherrer Institut
PUR	Polyurethan-Hartschaum
PV	Photovoltaik
PVC	Polyvinilchloryd
Q	Nutzenergiebedarf pro m^2 EBF
Q_h	Heizenergiebedarf nach SIA 380/1
Q_w	Energiebedarf Wärme ($Q_h + Q_{ww}$)
Q_{ww}	Energiebedarf Warmwasser
SFS	Schnittwaren, Furniere und Sperrholz
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
SpF	Span- und Faserplatten
Ster	Ster Holz, 1 m^3 Holz inkl. Hohlräumen zwischen Spälten
SUSTAIN II	Überarbeitete Projektsoftware, basierend auf Microsoft EXCEL™
UCPTE	Europäischer Stromverbund (Union pour la coordination de la production et du transport de l' électricité), er umfasst zwölf Länder
WP	Wärmepumpe
WSL	Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft
WSV	Wärmeschutzverglasung
XPS	Extrudierter Polystyrol

4 Methodik

4.1 Einführung

Was bedeutet der Anspruch der (ökologischen) Nachhaltigkeit für die Sanierung und Erneuerung der bestehenden Wohnbauten in der Schweiz? Um aussagekräftige Antworten zur Erhellung dieser Fragestellung zu erhalten wurde in groben Zügen der folgende Weg beschritten:

1. Es wurden fünf für den schweizerischen Gebäudepark typische und repräsentative bestehende Wohnbauten gesucht und ausgelesen. Die Berechnungen haben gezeigt, dass die Abweichungen in den Resultaten nicht dergestalt sind, dass durch mehr Objekte wesentlich mehr Erkenntnisse hätten gewonnene werden können. Wichtiger wären allenfalls Vergleichsberechnungen von Bauten anderer Kategorien (Dienstleistungsbauten, Industrie etc.)
2. Es wurden drei (energetische) Sanierungsvarianten mit steigender Intensität definiert und dann die Energie- und Stoffflüsse über die Lebensspanne der Gebäude gerechnet. Und zwar bei allen fünf Gebäuden für die drei Sanierungsvarianten sowie die Fälle, wo auf eine Sanierung verzichtet wird bzw. wo das Gebäude abgebrochen und durch einen (energetisch optimierten) Neubau ersetzt wird.
3. Um aktuelle Einzelfragen wie Massiv- oder Leichtbau, Einfluss der Produktealternativen gegenüber Materialalternativen u.ä. auszuloten wurden zusätzliche Gebäudevarianten durchgerechnet.
4. Die errechneten spezifischen und absoluten Stoff- und Energieströme erlauben eine Fülle von vergleichenden Auswertungen und Schlussfolgerungen hinsichtlich der Bewertung unterschiedlicher Erneuerungsstrategien im Wohnungsbau.
5. Schliesslich wurde eine ressourcenorientierte Definition des Umweltaspektes der Nachhaltigkeit auf den Wohnungsbau übertragen, d.h. ein anteilsmässiger Anspruch auf die zur Verfügung stehenden nachhaltigen Energie- und Materialressourcen der Schweiz ermittelt und die Sanierungsvarianten an diesem Angebot gemessen.

Im folgenden wird einerseits die Nachhaltigkeitsdefinition etwas genauer erläutert und andererseits insbesondere das für die Berechnung der Stoff- und Energieflüsse entwickelte Rechenprogramm SUSTAIN methodisch detailliert dargestellt.

4.1.1 Nachhaltiges Bauen und Wohnen

Abbildung 4 zeigt den in dieser Arbeit gewählte methodische Ansatz auf, nachhaltiges Bauen und Wohnen zu quantifizieren. Der Energiekonsum wurde der schweizerischen Gesamtenergiestatistik (GES 1997) entnommen, was der Basis Endenergie entspricht. Chemische Energie (Wärme) und Elektrizität werden getrennt erfasst, können aber mit verschiedenen Wirkungsgraden ineinander übergeführt werden.

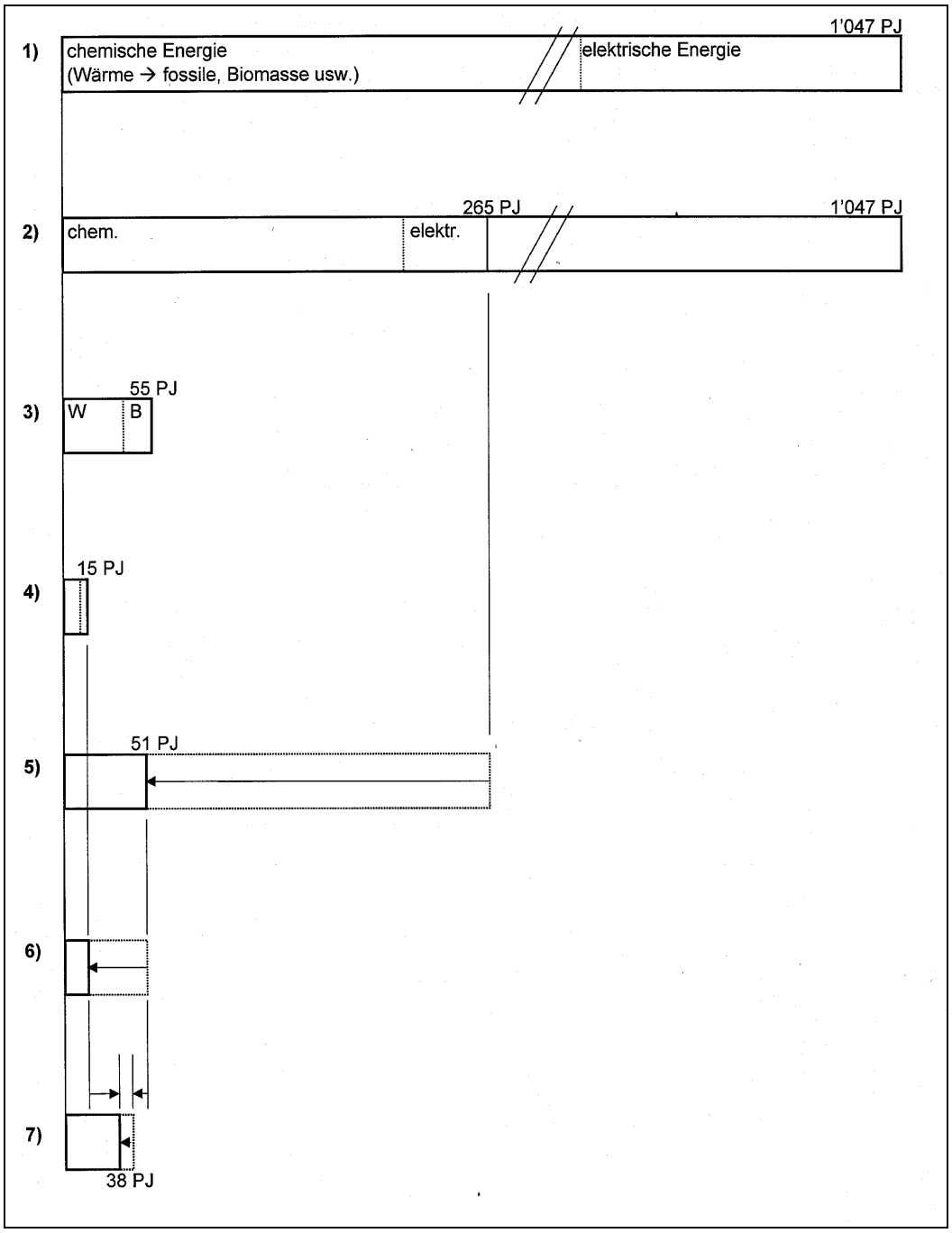


Abbildung 4: Schematische Darstellung des methodischen Vorgehens.

Betrachtungsraum ist Europa: Insbesondere für die Strombereitstellung gelten die Verhältnisse im UCPTE-Raum. Betrachtungen mit Systemgrenze Schweiz werden in Exkursen behandelt.

Die verwendete Nachhaltigkeitsdefinition in 7 Schritten (vergleiche Abbildung 4):

1. Der gesamte schweizerische Energiekonsum wird getrennt nach chemischer und elektrischer Energie auf der Stufe Endenergie erfasst (1047 PJ). Nicht vernachlässigt werden darf die importierte Graue Energie. Das ist diejenige Energie, die für die Herstellung von Gütern benötigt wird, welche im Ausland hergestellt und in die Schweiz importiert werden.
2. Nun wird der Anteil ermittelt, der für das Wohnen benötigt wird. Dies ist die Energie, die für Heizung, Warmwasser, Haushaltstrom und Herstellung/Entsorgung der Baustoffe benötigt wird. Dieser Anteil beträgt etwa 26% (265 PJ) des Gesamtenergiekonsums.
3. Jetzt wird das heutige Angebot an nachhaltigen (erneuerbaren) Energiequellen im Grossraum Europa ermittelt. Es beträgt ca. 55 PJ für die Schweiz und besteht vorallem aus Wasserkraft (W) und Biomasse (B). Nicht inbegriffen ist die dezentrale Nutzung erneuerbarer Energie wie Sonnenkollektoren oder Photovoltaik. Diese kann nämlich in fast beliebiger Weise zugebaut werden und wird erst bei Punkt 6 erfasst.
4. Nun wird eine entscheidende Definition gemacht: Der Anteil des Energieverbrauchs des Wohnens (ca. 26%) bleibt in Zukunft gleich hoch. Künftig soll das Energieangebot aber nur noch aus erneuerbaren Energien bestehen. Das heisst, das Wohnen darf in Zukunft etwa ein Viertel aller erneuerbaren Energie beanspruchen dürfen.
5. Der heutige Energieverbrauch kann nun aber durch Sparmassnahmen bei Neubauten und Sanierungen wie besserer Wärmeschutz oder effizientere Haustechnik drastisch reduziert werden.
6. Die in Punkt 5 getätigten Massnahmen reichen jedoch noch nicht aus, um die Nachfrage nach Energie aus rein erneuerbaren Quellen zu decken. Deshalb wird jetzt dieses noch bestehende Manko durch den Zubau von dezentraler Energienutzung (Sonnenkollektoren oder Photovoltaik) ausgeglichen.
7. Bei allen bisherigen Betrachtungen wurde von heutigen Technologien und vom heutigen Energieangebot ausgegangen. Gebäude sind aber äusserst langlebige Produkte. Viele der Rahmenbedingungen und beteiligten Prozesse werden sich im Verlaufe der Gebäudelebensdauer verändern. Zu diesem Zweck wurde das Szenario SOLL geschaffen. Dieses bildetet das geschilderte Angebot-/Nachfragemodell über den gesamten Lebenszyklus des Bauwerkes ab. Zum Beispiel wird davon ausgegangen, dass sich das Angebot an erneuerbaren Energiequellen erhöhen wird oder sich Komponenten des Wärmeschutzes und der Haustechnik verbessern werden.

4.1.2 Funktionalität der Simulationssoftware

Die in dieser Arbeit verwendete Simulationssoftware entstand in den Grundzügen aus einer Diplomarbeit, die am Nachdiplomstudium ‘Energie’ an der Fachhochschule beider Basel entstand (Erb et al. 1997). Für diese Arbeit wurde sie überarbeitet, ergänzt und trägt dem Namen SUSTAIN II. Mit diesem Werkzeug können Energie- und Stoffflüsse simuliert werden, welche die Prozesse Erstellung, Erneuerung, Rückbau sowie der Betrieb von Wohngebäuden verursachen.
Als Bezugsgrössen dienen die Energiebezugsfläche (EBF) und die Bewohner (c). Die beiden Bezugssysteme unterscheiden sich dann, wenn von der heutigen durchschnittlichen pro Kopf-Nachfrage nach EBF abgewichen wird. Ist also beispielsweise ein Gebäude unterdurchschnittlich belegt, so wird die EBF-Bilanz besser ausfallen als die pro Kopf-Bilanz. Auf Grund der Verteilungsgerechtigkeit der erneuerbaren Ressourcen, wäre die pro Kopf- der EBF-Betrachtung vorzuziehen. Da EBF-bezogenen Angaben, z.B. Energiekennzahlen jedoch weitverbreitet sind, soll auf diese nicht verzichtet werden.

Energie

Die Energie wird als nicht erneuerbare Primär- wie auch als Endenergie erfasst. Die nicht erneuerbare Primärenergie (PE_{ne}) ist ein guter Indikator für die Umweltbelastung, hauptsächlich für den Treibhauseffekt, heute üblicher Prozesse. Ein weiterer Grund die PE_{ne} zu berechnen war auch die Kompatibilität mit Resultaten anderer Studien. Die Nachfrage nach Endenergie (EE) wird hingegen für Überlegungen bezüglich der ökologischen Nachhaltigkeit verwendet. Diese kann nur durch einen vollständigen Verzicht auf nicht erneuerbare Energieträger erreicht werden. Bei den erneuerbaren Energien ist eine Betrachtung auf Primärenergieniveau bedeutungslos, da, nicht wie bei den nicht erneuerbaren Energien (CO_2), keine vergleichbare Umweltbelastung mit deren Nutzung verbunden ist. Es gilt einzig die Nachfrage auf Stufe Endenergie mit erneuerbaren Energien zu befriedigen.

Schlussresultat ist bei der PE_{ne} die Summe aus allen erwähnten Prozessen. Die Nachfrage auf Stufe Endenergie in Form von chemischer, elektrischer und Treibstoff-EE, wird mit dem jeweiligen Angebot an erneuerbarer EE dieser drei Kategorien verrechnet. Überschüsse oder Mankos werden in Elektrizitätsäquivalente umgerechnet und zur Bilanzgrösse B_{el} aufsummiert. Dies geschieht mittels der in der Tabelle 1 aufgelisteten Umwandlungswirkungsgrade. Sie beruhen auf physikalischen Gesetzen und sich in Entwicklung befindlichen oder bereits realisierten Umwandlunsgsprozessen.

Umwandlungsschritt	Faktor
elektrisch - chemisch	1.0
chemisch - elektrisch	0.5
elektrisch -Treibstoff	0.5

Tabelle 1: Die Umwandlungswirkungsgrade von Endenergieträgern in Elektrizität zur B_{el}.

Beim Umrechnungsfaktor von 1.0 für die Konversion von Elektrizität in chemische Energie wurde davon ausgegangen, dass die chemische Energie entweder als Hochtemperaturwärme oder als chemisches Reagenz (Stahlherstellung) eingesetzt wird. In beiden Fällen ist mit Strom kein höherer Wirkungsgrad als 1.0 möglich, da nicht mit Wärmepumpen gearbeitet werden kann.
Für die Umwandlung von chemischer in elektrische Energie stehen verschiedene Technologien zur Verfügung. Blockheizkraftwerke, Brennstoffzellen oder Kombikraftwerke (GuD) erreichen heute elektrische Wirkungsgrade zwischen 0.30 und 0.55. Bei Biomasse als Brennstoff ist der gewählte Faktor von 0.5 heute noch nicht erreichbar. Angesichts des Betrachtungszeitraums (Gebäudelebensdauer) von bis 100 Jahren scheint dieser Wert aber vernünftig. Weiter ist zu beachten, dass die theoretisch als Fernwärme nutzbare Abwärme eines Umwandlungsprozesses in der vorliegenden Programmversion nicht berücksichtigt wird.
Technologien zur Herstellung von Treibstoffen aus elektrischer Energie sind zum Beispiel die Wasserstoffproduktion oder die Einkoppelung von Elektrizität in die Methanolherstellung aus Biomasse (Stucki 1996). Hier besteht noch eine relativ grosse Unsicherheit bezüglich des Gesamtwirkungsgrades solcher Versorgungssysteme. Ein Umwandlungswirkungsgrad von 0.5 kann deshalb nur als grobe Schätzung verstanden werden.

Stoffe

Bei den Baustoffen werden neben der Grauen Energie auch die Kriterien Endlichkeit und Recyklierbarkeit betrachtet. Die Stoffflüsse eines Gebäudes sind diesbezüglich in je vier Kategorien gegliedert (vgl. Kapitel 4.2.3 'Baustoffmodul'). Erfasst werden nur die Stoffe, welche direkt durch das Gebäude fliessen. Stoffflüsse vorgelagerter Prozesse (Baustoffproduktion oder Energiebereitstellung) werden nicht einbezogen.
Für das Bauholz wurde analog der Endenergie ein Angebot ermittelt (vgl. Kapitel 4.2.5 'Holzmodul'), welches mit der Nachfrage durch das Gebäude verrechnet wird.

4.1.3 Szenarien

Die Umweltwirkungen von Gebäuden werden in *SUSTAIN II* aus zwei Perspektiven betrachtet, diese sind im Folgenden mit IST und SOLL bezeichnet.

IST

Nachfrage: Es wird nur die heute geplante bauliche Massnahme (Sanierung oder Neubau) analysiert, also keine zukünftigen Erneuerungen. Die auf ein Jahr umgelegte Nachfrage ergibt sich somit aus den durch die Lebensdauer dividierten Baustoffaufwendungen plus die jährlichen Belastungen durch den Betrieb. Die zugrundegelegten Prozesse entsprechen dem heutigen Durchschnitt.
Eine Unsicherheit besteht einzig im Rückbauprozess, welcher nach Ablauf der Lebensdauer eines Gebäudelementes stattfindet, also nicht dem heutigen Prozess entsprechen muss. Bei energetischen Betrachtungen stellt sich insbesondere das Problem des Brennwertes von organischen Baustoffen. Wird dieser beim Bau als Aufwand verbucht, so stellt sich die Frage, ob er beim Rückbau erhalten bleibt (Recycling), genutzt wird (thermische Verwertung) oder verloren geht (Deponie), respektive eine Kombination dieser Möglichkeiten. Rückbau durch Recycling oder thermische Verwertung bedeuteten eine Aufwandsminderung. In *SUSTAIN II* wird der Brennwert nicht als Aufwand berücksichtigt, was die Annahme bedingt, dass der Rückbau sich zu annähernd 100% aus Recycling und thermischer Verwertung zusammensetzt.

Angebot: Die zur Verfügung stehende erneuerbare Endenergie entspricht der heutigen Produktion und liegt bei 570 kWh $c^{-1}a^{-1}$. Das Bauholzangebot von 134 kg $c^{-1}a^{-1}$ entspricht im IST- und SOLL-Szenario dem Maximum einer nachhaltig optimierten Holzwirtschaft.

SOLL

Nachfrage: Es wird das Gebäude ab der baulichen Massnahme bis zum Ende der Gebäudelebensdauer betrachtet. Die jährliche Belastung besteht in diesem Fall aus der Summe aller baustofflichen und betrieblichen Aufwendungen dividiert durch die Gebäudelebensdauer. Die baustofflichen Aufwendungen setzen sich aus dem geplanten Eingriff plus aller noch folgenden Erneuerungen von Gebäudeelementen zusammen. Bei diesen Erneuerungen des Gebäudes werden die bei der geplanten Massnahme gewählten Konstruktionen und Baustoffe beibehalten.
Die diesem Szenario zugrundegelegten Prozesse bezüglich Baustoffproduktion zeichnen sich durch die beste, heute verfügbare Energieeffizienz aus, also nicht heutiger Durchschnitt wie im IST-Szenario. Weiter wird ein maximales Recycling angenommen. Es werden also keine Zukunftstechnologien vorausgesetzt, hingegen wird bereits bei heute verwendeten Baustoffen von einem maximalen Recyclatanteil ausgegangen. Ersteres führt zu einer zu hohen, zweiteres zu einer zu tiefen Schätzung, womit sie sich tendenziell neutralisieren. Die Aufwendungen für den Betrieb (Wärme und Haushaltstrom) basieren auf einer Technologie, welche als Durchschnitt für den gesamten Betrachtungszeitraum geschätzt wurde. Wird die Wärme beispielsweise durch eine Wärmepumpe bereitgestellt, so entspricht ihr COP dem besten heute verfügbaren Produkt.
Angebot: Die zur Verfügung stehende erneuerbare Endenergie von 1’480 kWh $c^{-1}a^{-1}$ beruht auf einer Schätzung der mittelfristigen Potentiale. Das Bauholzangebot entspricht im IST- und SOLL-Szenario dem Maximum einer nachhaltig optimierten Holzwirtschaft.

Das IST-Szenario ist geeignet, Massnahmen bezüglich ihrer kurzfristigen Auswirkungen zu beurteilen. Sollen hingegen Gebäudekonzepte über die gesamte Gebäudelebensdauer eingeschätzt werden, so ist das SOLL-Szenario vorzuziehen, da es Auswirkungen von zukünftig veränderten Rahmenbedingungen berücksichtigt. Für die Baustoffseite bedeutet dies beispielsweise, dass Holzbauten wegen dem Optimierungspotential bei der Bauholztrocknung im IST etwas schlechter abschneiden als im SOLL, wo dieses Potential realisiert wird.

4.2 Programmmodule

Das Programm setzt sich aus vier Teilen zusammen:

- Gebäudemodul: Eingabe der Gebäudestruktur und der Konstruktionen sowie Berechnung der Nachfrage nach Energie und Stoffen durch das simulierte Gebäude.
- Baustoffmodul: Liefert die baustoffspezifischen Daten wie Primär- und Endenergiebedarf, Baustoffkategorien usw.
- Angebotsmodul: Liefert die Angebotswerte bezüglich der erneuerbaren Ressourcen Endenergie und Bauholz.
- Ausgabemodul: Liefert Resultate mit Grafiken einzelner oder mehrerer Objekte.

4.2.1 Gebäudemodul

Eingabemodul

Im Eingabemodul wird ein Gebäude durch seine Dimensionen definiert. Dadurch entsteht ein parametrisiertes Modell des Gebäudes. Die Haustechnik ist mit der Struktur des Gebäudes logisch verknüpft. Dieses Vorgehen erlaubt es einerseits, grössere Eingriffe in Struktur, Konstruktion und Haustechnik mit wenig Aufwand vorzunehmen und stellt anderseits sicher, dass keine manuellen Flächen- und Volumenberechnungen notwendig sind.

Die Eingabegrössen sind in drei Kategorien gegliedert:

1. **Gebäudestruktur und -orientierung** mit Stockwerk-, Wohnungs- und Zimmerzahl sowie Orientierung des Gebäudes. Es können auch ein oder zweiseitig angebaute Gebäude definiert werden. Über die durchschnittliche Belegung verschiedener Wohnungstypen (1 bis >4 Zimmer-Wohnungen) in der Schweiz (BfS 1990) wird auf die gesamte Bewohnerzahl des Gebäudes geschlossen. Die Orientierung wird dazu benutzt, den gewählten Standardmeteodatensatz entsprechend umzurechnen.

2. **Dimensionen und Konstruktionen** der Gebäudeelemente. Hier können die verschiedensten Konstruktionen und Materialien für Decken, Wände, Dach, Fenster usw. gewählt und deren einzelne Komponenten frei dimensioniert werden.
3. **Haustechnik**. Für die Wärmeerzeugung, -verteilung und -abgabe stehen alle relevanten System zur Wahl. Die Leitungslängen der Wärme- und Wasserverteilung werden über gebäudeabhängige Faktoren der gewählten Gebäudestruktur angepasst, diese Faktoren können aber auch selbst eingegeben werden. Gleiches gilt für Abwasserleitungen und Elektroinstallationen.

Zu den Punkten 2 und 3 nun einige weitergehende Ausführungen:

Dimensionen und Konstruktionen

Am Beispiel der „Aussenwände beheizt gegen Aussenklima“ werden die Möglichkeiten des Programms erläutert. Es können pro Gebäude zwei verschiedene, frei definierbare Konstruktionen gewählt werden mit ebenfalls frei zu bestimmendem Anteil an der Gesamtfläche. Möglich sind folgende Typen:

- **Holzständerkonstruktion** mit Hinterlüftung.
- **Massivmauerwerk mit Aussendämmung:** Als Mauermaterial stehen Backstein, Bruchstein, Kalksandstein, MARO-Stein und Beton zur Auswahl. Die Konstruktionen können mit einer Hinterlüftung versehen oder als Kompaktfassade verputzt werden.
- **Zweischalenmauerwerk (mit Aussendämmung):** Als Mauermaterial stehen Backstein, Kalksandstein und Beton zur Auswahl.

Die einzelnen Komponenten der Konstruktionen werden individuell dimensioniert. Beispielsweise lässt sich so eine Balkenkonstruktion mit wenig Aufwand in eine Stegträgerkonstruktion umwandeln. Dämmmaterial und -stärke sind ebenfalls frei wählbar. Als Dämmung steht zur Verfügung:

- Zellulose
- Steinwolle
- Schaumglas
- expandierter Polystyrol (EPS)

Als innere Wandbeläge stehen Gipsglattstrich, Kunststoffputz und Holztäfer zur Wahl. Für die Wetterhaut können ein Putz (mineralisch oder auf Kunststoffbasis) oder eine hinterlüftete Schalung aus verschiedenen Holzqualitäten oder Faserzement eingesetzt werden.
Der Wärmedurchgangskoeffizient (k-Wert) der gewählten Konstruktion wird automatisch berechnet und im Eingabemodul angezeigt.

Haustechnik

Für die Bereitstellung der Nutzwärme stehen fünf Grundlastsysteme zur Verfügung:

- **Wärmepumpe** mit Aussenluft, Sole oder Grundwasser als Umweltwärmequelle. Für jedes der drei Systeme wurde jeweils das beste und ein mittleres Produkt aus dem Bulletin des Wärmepumtentestzentrums Töss (WPZ 1998) ausgewählt und im Programm abgebildet. Aufgrund des Wärmeleistungsbedarfs und des Wärmeabgabesystems des Gebäudes wird die erforderliche Vorlauftemperatur berechnet und der COP sowie die JAZ der gewählten WP bestimmt. Für die Warmwasserbereitstellung wird der COP und die JAZ jeweils separat in Abhängigkeit von den benötigten Temperaturen berechnet.
- **Holz-, Öl- oder Gaskessel** werden hauptsächlich über ihren Jahresnutzungsgrad und die Kesselpumpenleistung definiert.
- **Sonnenkollektoranlagen mit Saisonspeicher** müssen in einem speziellen Programm simuliert und die so erhaltenen Resultate in *SUSTAIN II* importiert werden.

Die Grundlastsysteme können mit folgenden Komponenten ergänzt werden:

- **Wohnungslüftung:** Zur Reduktion der Lüftungsverluste kann eine Lüftungsanlage mit WRG und optionalem Erdregister zur Luftvorwärmung eingesetzt werden. Der thermische Wirkungsgrad der WRG ist eine Eingabe, hingegen wird der Druckverlust sowie der Ventilatorwirkungsgrad automatisch berechnet.
- **Photovoltaik:** Die entsprechenden Monatserträge werden im Programm gemäss der in Pacer (Herzog et al. 1992) beschriebenen Methode berechnet. Wird in einem Monat durch die PV-Anlage mehr Elektrizität erzeugt als durch die Summe aller Prozesse verbraucht wird, so kommt für den Überschuss ein Saisonspeicherwirkungsgrad von 0.5 (???) zur Anwendung, d.h. der mit dem Speicherwirkungsgrad multiplizierte Überschuss steht in einem Monat mit Strommanko zur Verfügung. Dieser Speicherwir-

kungsgrad repräsentiert die Stromspeicherung in einem Speichersee oder in chemischer Form, wie beispielsweise Wasserstoff oder Methanol (Stucki 1996).

- **Sonnenkollektoren:** Wärmepumpe und Heizkessel können mit Sonnenkollektoranlagen zur Warmwasserbereitung kombiniert werden. Die Erträge werden entweder im Programm selbst mit der KENN-Methode (Zogg 1986) geschätzt, oder als Monatserträge aus einem anderen Programm importiert.
- **Zimmeröfen:** Allen Grundlastsystemen können Zimmeröfen beigefügt werden. Deren Nutzungsintensität wird über den gewünschten Deckungsgrad bezüglich dem Heizenergiebedarf Q_h definiert.

4.2.2 Betriebsenergiemodul

Heizung

In *SUSTAIN II* ist eine Berechnung des Heizenergiebedarfs nach SIA 380/1 (Monatsmethode) und des Wärmeleistungsbedarfs nach SIA 384/2 integriert. Diese stützen sich auf die Definitionen im Eingabemodul und die Standardnutzung gemäss SIA 380/1, von welcher auch abgewichen werden kann.
Im Programm sind 16 umfassende Meteodatensätze vorhanden, welche mit der Meteonorm 97 (Meteotest 1997) ermittelt wurden. Durch die Eingabe der Gebäudeorientierung werden die Standardstrahlungsdaten des gewählten Datensatzes auf die entsprechende Orientierung (Fenster, Sonnenkollektoren, PV-Paneele) umgerechnet.
Um Transmissionsverluste gegen unbeheizte Räume zu berechnen, können die mittleren Monatstemperaturen solcher Zonen in *SUSTAIN II* einfach bestimmt werden. Als unbeheizte Zonen sind vorgesehen: Kellergeschoss, Dachgeschoss, Treppenhäuser und Wintergärten.

Warmwasser

Der Warmwasserbedarf wird über den spezifischen Verbrauch pro Tag und die Speichertemperatur definiert. Die Verteilung geschieht über ein Einzelzapfstellensystem oder ein Verteilsystem. Das Verteilsystem kann mit oder ohne Zirkulation betrieben werden. Bei Systemen mit Zirkulation wird zwischen getrennter Rohrführung und Rohr-an-Rohr-Systemen unterschieden. Die Ausstoss- und Transmissionsverluste werden spezifisch für die gewählte Systemkonfiguration berechnet, wobei für verschiedene Nutzungskategorien die minimale Nutztemperatur und die Nutzungsperiodik eingegeben werden kann.

Haushaltstrom

Für die Nachfrage nach Elektrizität durch Elektrogeräte im Haushalt sind drei Szenarien vorhanden. Alle diese Szenarien bieten den gleichen Nutzen für die Bewohner, sie unterscheiden sich einzig durch die Effizienz der verwendeten Geräte. Die zugrundeliegenden Nutzungsdaten, z.B. Aufkochvorgänge pro Kopf, unterscheiden sich je nach Haushaltsgrösse. Zur Berechnung des gesamten Haushaltstrombedarfs des Gebäudes wird deshalb die Wohnungsstruktur berücksichtigt.

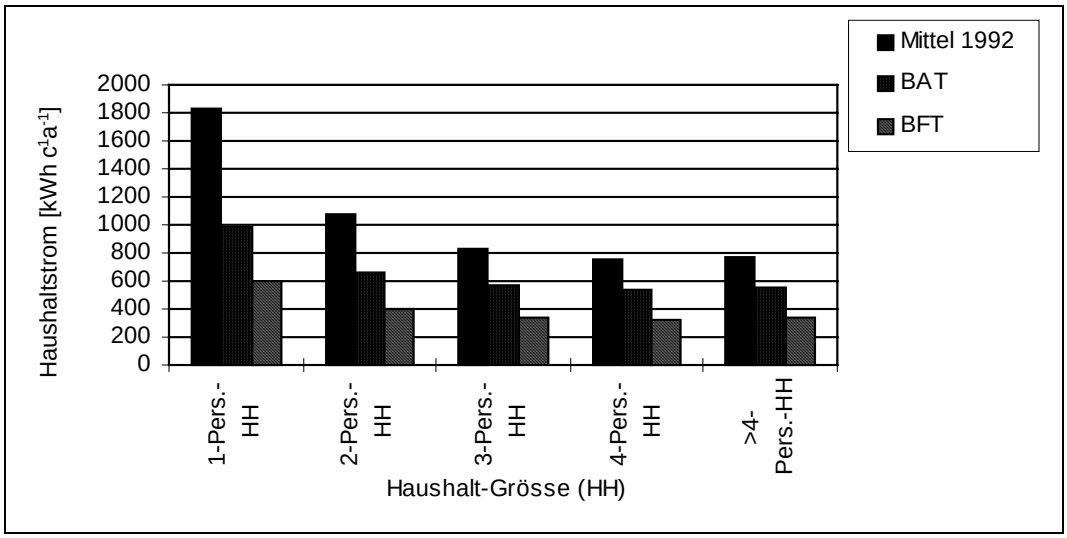


Abbildung 5: Die grundlegenden Annahmen im Bereich Haushaltstrom. Die Grösse des Verbrauches ist entscheidend von der Personenbelegung pro Wohnung sowie der eingesetzten Technologie abhängig.

Für das Szenario 'Mittel 1992' wurden die heutigen durchschnittlichen Verhältnisse gemäss Huser (1992) verwendet. Im Szenario BAT (Best Available Technology) wurden die besten Geräte gemäss Gerätedatenbank (Version 1997/2A) eingesetzt. Im dritten Szenario, BFT (Best Future Technology), wurden Annahmen bezüglich heute bereits absehbarer technologischer Innovationen gemacht. Durch den Einsatz von Vakuum-Dämmung und Sterling-Antrieb liegt das Sparpotential für Kühlschränke beispielsweise im Bereich von 30 bis 40%. Bei den Kochsystemen sind Technologien kurz vor der Markteinführung, welche den Stromverbrauch um mindestens 30% reduzieren werden. Der Einsatz von WRG-Systemen reduziert den Strombedarf von Geschirrspülern um 50%. Mit Vakuum-Dämmungen sind bei Backöfen Einsparungen um 60% möglich. Mittels elektronischer Vorschaltgeräte lassen sich die Stand-By Verbräuche von TV, Radio und Video praktisch eliminieren.

Baustoffflüsse

Durch Dimensionierung und Wahl der Konstruktionen ist das Volumen der verschiedenen Materialien nach der baulichen Massnahme (Neubau oder Sanierung) bekannt. Bei Neubauten entspricht dieses Volumen dem Aufwand, exklusive Verarbeitungsabfälle. Im Falle einer Sanierung reduziert sich dieser Aufwand um die Volumina der bereits bestehenden Gebäudeelemente. Für diesen Zweck können im Programm ganze Gebäudeelemente oder Teile von Elementen als bestehend definiert werden.
Für das Zuweisen von Lebensdauern wurden die Gebäudelemente in knapp 90 Kategorien eingeteilt. Jeder Kategorie ist eine minimale und ein maximale Lebensdauer zugeordnet. Diese Daten wurden grösstenteils der Literatur entnommen (Gabathuler 1989, von Arx 1995, AfB 1997) oder wenn keine entsprechenden Werte verfügbar waren, selbst geschätzt. Die Anzahl Erneuerungen eines Elements entspricht dem aufgerundeten Resultat der Division der Gebäudelebensdauer durch die Elementlebensdauer.

In der Baustoffdatenbank sind 80 Baustoffe mit folgenden Parametern beschrieben:

- **Energie:** PE_{ne}- und EE-Aufwand des Produktionsprozesses bis zum Baustoffhandel.
- **Transport zur Baustelle:** Transportdistanz und Transportmittel vom Baustoffhandel bis zur Baustelle. Die Distanzen basieren primär auf der Anbieterdichte in der Schweiz.
- **Recyklierbarkeit:** Kategorie bezüglich Recyklierbarkeit des Baustoffes.
- **Rohstoffvorkommen:** Kategorie bezüglich der Begrenztheit der zugrundeliegenden Rohstoffe.
- **Verarbeitungsabfälle:** Prozentualer Anfall an Abfällen bei der Verarbeitung auf der Baustelle.
- **Dichte**

Durch die Verknüpfung der volumetrischen Baustoffflüsse mit der Baustoffdatenbank wird der Baustofffluss bezüglich Volumen, Masse, Energiebedarf und Qualität (Recyklierbarkeit, Rohstoffvorkommen) erfasst. Diese Grössen werden einerseits als Summe für den geplanten Eingriff (Sanierung oder Neubau) und für die nachfolgenden Erneuerungen bis zum Ablauf der Gebäudelebensdauer und andererseits als jährlicher Durchschnitt ab Eingriff bis Gebäuderückbau ausgegeben.

4.2.3 Baustoffmodul

Allgemeines

Um das Ziel 'Nachhaltigkeit' zu erreichen, brauchen Stoffflüsse nicht a priori vermieden zu werden, die Entnahmerate von Stoffen aus der Umwelt darf aber nicht grösser sein als deren Erneuerungsrate. Es dürfen also nur Baustoffe verwendet werden, die sich hundertprozentig in Stoffkreisläufe einfügen lassen. Grundsätzlich erfüllen diese Anforderungen nur Baustoffe, die entweder nachwachsend und somit auch wieder abbaubar sind, oder aber Baustoffe, die zu hundert Prozent wiederverwendet oder wiederverwertet werden können. Da es aber Baustoffe gibt, die zwar nicht zu hundert Prozent wiederverwendet oder -verwertet werden können, jedoch aus Rohstoffen bestehen, deren Vorkommen quasi unerschöpflich ist und bestimmte Landesteile als Deponieraum zur Verfügung stehen, sind auch solche während einer Übergangsfrist zugelassen.

Baustoffkategorien

Im Programm wird die Rohstoffherkunft (Endlichkeit) und die Recyclingfähigkeit beurteilt. Dem Bauteilrecycling (Wiederverwendung, Weiterverwendung) wird kein grösseres Potential zugesprochen, es erfolgt dementsprechend die nachfolgende Kategorisierung.

Recyclingfähigkeit		Endlichkeit von Ressourcen	
1	gut baustofflich wiederverwertbar	n	nachwachsend
2	gut rohstofflich oder thermisch verwertbar	q	aus quasi unerschöpflichen Quellen
3	nur z.T. wieder- oder weiterverwertbar	b	aus beschränkten Quellen
4	weder wieder- noch weiterverwertbar	A	Aushub

Tabelle 2: Die Baustoffkategorien, unterteilt nach Recyclingfähigkeit und Endlichkeit.

Recyclingfähigkeit

1 Gut baustofflich wiederverwertbar.
In dieser Kategorie finden sich Baustoffe, bei denen ein problemloses, nahezu hundertprozentiges Baustoffrecycling möglich ist. Es sind dies nebst allen Metallen auch der Gips sowie thermoplastische Kunststoffe.

2 Gut rohstofflich oder thermisch weiterverwertbar.
Darunter fallen vor allem Holz und Holzwerkstoffe. Diese lassen sich nach Gebrauch problemlos, falls unbehandelt, in Holzfeuerungen thermisch verwerten. Altholz kann aber auch rohstofflich verwertet werden, indem man es zu Spänen verarbeitet, die dann in die Spanplattenproduktion fliessen.

3 Nur zum Teil wieder- oder weiterverwertbar.
Dieser Kategorie wird beispielsweise der Beton zugeordnet. Der Abbindevorgang des Zementes im Beton ist ein irreversibler Prozess. Um aus Altbeton neuen Beton herzustellen, muss demzufolge Zement und Sand beigegeben werden. Massenmässig entspricht dies einer Recyclingquote von ca. 60%.

4 Weder wieder- noch weiterverwertbar.
Was sich nicht oder nur sehr schlecht wieder- oder weiterverwerten lässt, wird dieser Kategorie zugeordnet. Natürlich findet sich fast immer ein Verwendungszweck für ein Altmaterial. Aber es darf nie darum gehen, Bedürfnisse zu schaffen, die ohne Anfall von Altstoffen gar nicht erst entstanden wären. Wenig sinnvoll ist beispielsweise Stapelpalette aus Altkunststoffen herzustellen, statt wie bis anhin aus Holz. Dadurch werden der Rohstoffeinsatz nicht vermindert, das Entsorgungsproblem nur aufgeschoben und eventuell neue Umweltprobleme geschaffen.

Endlichkeit

n Nachwachsend.
Darunter fallen alle pflanzlichen und tierische Rohstoffe wie Holz, Kork, Schilf, Stroh, Hanf, Kokosfasern oder Schafwolle.

q Aus quasi unerschöpflichen Quellen.
Schultze-Darup (1996) beurteilen, dass die Rohstoffe Kalkstein (Jura), Lehm (Mittelland), Ton und Mergel in ausreichenden Mengen vorhanden sind. Ebenfalls in diese Kategorie gehören Baustoffe auf Basis von Quarzsand, z.B. Glas.

b Aus beschränkten Quellen.
Hier werden nebst den Erzen zur Metallherstellung natürlich alle Stoffe der Petrochemie eingeordnet.

Energiebedarf der Baustoffproduktion

Methode

In 'Ökoinventare und Wirkungsbilanzen von Baumaterialien' (Weibel & Stritz 1995) sind die wichtigsten, in der Schweiz gebräuchlichen Baustoffe bilanziert. Diese Ökoinventare sind ein Modulsystem, bei welchem sämtliche Energie- und Materialaufwände sowie Emissionen und Immissionen erfasst wurden.

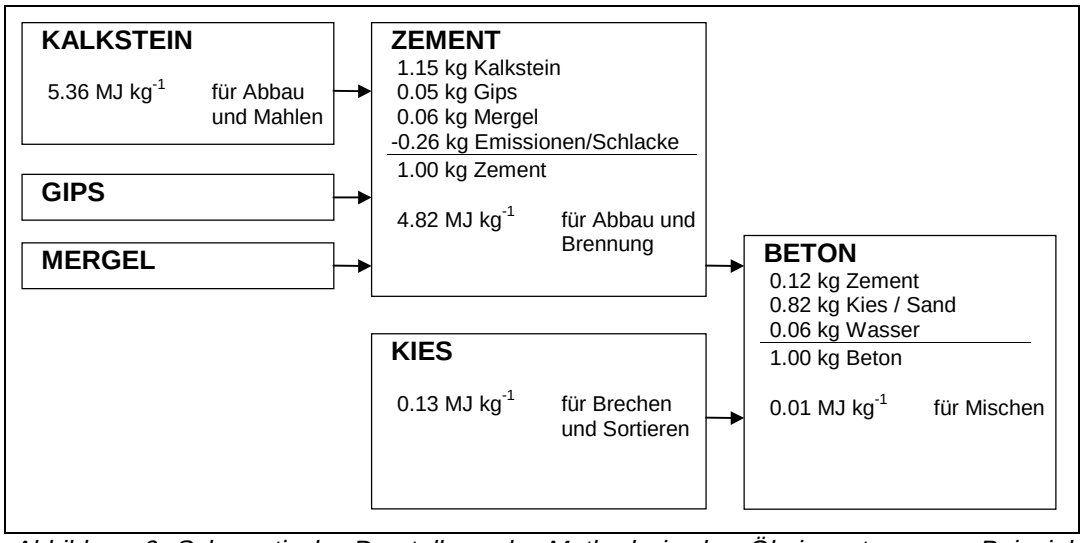


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Methode in den Ökoinventaren am Beispiel Beton.

Leider sind ausser für einige Metalle keine Recyclingprozesse erfasst. Zur Ermittlung des Energiebedarfs der restlichen rezyklierbaren Baustoffe wurden deshalb Teilmodule der Ökoinventare mit eigenen Berechnungen ergänzt. Das Vorgehen ist nachfolgend anhand der Stahlherstellung dargestellt.

Ökoinventare: **Stahl-Primärproduktion**		*Berechnung in dieser Arbeit:* **Stahl-Sekundärproduktion**	
Eisenerzabbau	9.84 MJ kg^{-1}_{Stahl}	↕ entfällt	
Pelletierung	0.46 MJ kg^{-1}_{Stahl}		
Sinterung	0.19 MJ kg^{-1}_{Stahl}		
Roheisenproduktion	14.69 MJ kg^{-1}_{Stahl}	Schrotthandling (eigene Schätzung)	0.11 MJ kg^{-1}_{Stahl}
Stahlproduktion (Oxygen-Verfahren)	0.58 MJ kg^{-1}_{Stahl}	Stahlproduktion (elektrolytisch)	3.40 MJ kg^{-1}_{Stahl}
Walzvorgang	1.53 MJ kg^{-1}_{Stahl}	Walzvorgang	1.53 MJ kg^{-1}_{Stahl}
total	27.29 MJ kg^{-1}_{Stahl}	total	5.04 MJ kg^{-1}_{Stahl}

Abbildung 7. Vereinfachte Darstellung der Berechnung des Energieaufwandes für Recyclingprozesse. Pro Produktionsschritt wurden die Energieinputs für die Bereiche chemische Energie, Elektrizität sowie Treibstoffe ermittelt.

Untersuchte Baustoffe

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden für die Baustoffe die Energieaufwände (chemisch, elektrisch und Treibstoffe) auf Stufe PE_{ne} und EE berechnet. Die folgende Tabelle zeigt ein Auswahl der untersuchten Stoffe.

Nr.	Baustoffe	Kat.	total PE_{ne} [MJ kg^{-1}]	Nr.	Baustoffe	Kat.	total PE_{ne} [MJ kg^{-1}]
	Beton				**Holz**		
1	Beton	3.q	0.79	25	Kantschnittholz techn. getr.	1.n	4.67
2	Beton rezykliert	3.n	0.96	26	Kantschnittholz nat. getr.	1.n	1.77
	Zementgeb. Produkte			27	Brettschichtholz	1.n	10.60
3	Kalksandstein	3.q	1.28	28	Spanplatte	2.n	6.93
4	Recyclingstein MARO	3.q	1.22	29	Weichfaserplatten	2.n	14.38
5	Zementmörtel	3.q	1.49	30	Weichfaserpl. bituminiert	2.n	15.28
6	Kalkmörtel	3.q	1.81	31	Hartfaserplatten	2.n	12.46
7	Zementestrich	3.q	1.47		**Wärmedämmstoffe**		
	Tonprodukte			32	Zellulosefaser	1.n	3.70
8	Backstein	3.q	2.73	33	Kork	2.n	12.72
9	Ziegel	3.q	3.57	34	Steinwolle	2.q	16.76
10	Keramik	3.q	7.57	35	Schaumglas	3.q	64.30
	Lehm				**Kunststoffe**		
11	Lehmvollstein	1.q	1.40	36	Polystyrol EPS nicht rezykl.	2.b	28.15
	Gips / Anhydrit			37	Polyvinylchlorid PVC rezykl.	1.n	14.66
12	Gipsplatten	1.q	4.11	38	Polyethylen PE rezykliert	1.n	11.01
13	Gipsfaserplatten	2.q	4.09	39	Polystyrol EPS rezykliert	2.n	18.93
14	Gipsfaserplatten rezykliert	2.n	5.85	40	Gummi EPDM	4.b	29.30
15	Anhydritunterlagsboden	3.q	0.88		**Diverse**		
	Glas			41	Bitumen	4.b	8.14
16	Flachglas	3.q	12.42	42	Faserzement	2.q	14.59
	Metalle			43	Naturstein	2.q	0.35
17	Baustahl z.T. rezikliert	1.b	27.87	44	Bruchkies	2.q	0.19
18	Baustahl ganz rezykliert	1.n	11.86	45	wasserl. Dispersion	4.b	18.58
19	Gusseisen z.T. rezykliert	1.b	28.02	46	div. Chemikalien	4.b	-
20	Aluminium z.T. rezykliert	1.b	396.31	47	Argon	1.q	13.03
21	Aluminium rezykliert	1.n	267.33	48	Krypton	1.q	2'482.5
22	Kupfer z.T. rezykliert	1.b	96.84	49	Xenon	1.q	16'834.7
23	Zink z.T. rezykliert	1.b	95.04	50	Baugrubenaushub abtransp.	A	0.01
24	Zink zum verzinken	1.b	125.02	51	Baugrubenaushub ab.+ ein.	A	0.03

Tabelle 3. Auswahl der untersuchten Baustoffe. Als Vereinfachung wird nur die benötigte, nicht erneuerbare Primärenergie (PE_{ne}) angegeben. Für die Berechnung wurde der UCP-TE-Strommix verwendet.

Es muss beachtet werden, dass bei reziklierbaren Baustoffen im Szenario IST heutige Produktionsverhältnisse (z.T. rezykliert) und im SOLL maximal mögliche Recyclingraten eingesetzt wurden. Die Beurteilung der Endlichkeit der Ressourcen kann deshalb von q oder b zu n wechseln. Dies hat jedoch nur bei ausgeglichenem Angebots/Nachfrage-Verhältnis Gültigkeit.

4.2.4 Angebotsmodul

Energie

Für die Berechnung des Angebots an Energie wird die heutige und zukünftige erneuerbare Endenergiemenge bestimmt. Das heutige (IST) respektive zukünftige (SOLL) Angebot für den Wohnungsbau wird ermittelt, in dem das jeweilige Gesamtangebot (chemische und elektrische EE) mit dem Anteil am Verbrauch 1995 mulitipliziert wird (Erb et al. 1997).
Bei der Elektrizität kann die Systemgrenze Schweiz oder UCPTE gewählt werden. Dank der Wasserkraft weist die Schweiz heute aber wohl auch in Zukunft ein spezifisch höheres Angebot an erneuerbarer Elektrizität auf als der UCPTE-Raum. Mit der Wahl der Systemgrenze Schweiz ist es deshalb einfacher Nachhaltigkeit im Sinne der hier verwendeten Definitionen zu erreichen.
Für die chemische Energie wird kein UCPTE-Szenario erstellt, da das Potential zur Biomassenutzung im UCPTE-Raum recht ausgeglichen ist.

Energiesplit

Aus Tabelle 4 geht hervor, dass das Wohnen in der Schweiz rund 24% der chemischen und 30% der elektrischen Endenergie konsumiert. Der Anteil des Wohnens in der Schweiz beträgt ca. 1% des gesamten Elektrizitätskonsums im UCPTE-Raum.

chemisch			**elektrisch**			
	Schweiz = UCPTE		Schweiz		UCPTE	
	[TJ a^{-1}]	[%]	[TJ a^{-1}]	[%]	[TJ a^{-1}]	[%]
Betrieb	190’250	22.54%	60’255	27.84%	60’255	1.10%
Baustoffe	13’918	1.65%	3’717	1.72%	3’717	0.07%
Wohnen total CH	204’168	24.19%	63’971	29.56%	63’971	1.17%
Rest	639’892	75.81%	152’437	70.44	5’418’829	98.83%
TOTAL	844’060	100.00%	216’408	100.00%	5’482’800	100.00%

Tabelle 4: Die Anteile des Wohnungsbaus am Endenergiekonsum 1995. In der Spalte elektrisch\UCPTE ist der Anteil des Elektrizitätskonsums des Wohnens in der Schweiz am gesamten Elektrizitätskonsum im UCPTE-Raum dargestellt.

Angebot

Nachdem nun der dem Wohnen zustehende Anteil erneuerbarer Energien festgelegt ist, muss das Gesamtangebot eruiert werden. Im IST-Szenario wird das heute bestehende Angebot und im SOLL die mittelfristig zu erwartende Energiemenge verwendet. Potentiale von Anlagen zur dezentralen Gewinnung von erneuerbarer Energie (Solarthermie, Photovoltaik und Wärmepumpen) werden nicht als Angebotssteigerung sondern als Nachfragereduktion behandelt und sind deshalb nicht im Angebot enthalten.
Es wurden folgende Quellen erneuerbarer Energie untersucht:

- Wasserkraft
- Holz
- andere Biomasse
- Wind

Die solarthermische Stromproduktion wurde nicht einbezogen, da wohl auch mittelfristig noch nicht mit einer intensiven Nutzung dieser Technologie zu rechnen ist. Die langfristigen Potentiale sind jedoch beträchtlich und übersteigen jene von Wind bei Weitem (Weizsäcker 1995).
Zur besseren Verständlichkeit werden die Angebotsmengen nicht absolut, sondern bereits als Angebot für das Wohnen in der Schweiz in MJ m^{-2} EBF angegeben. Die Berechnung dieses Angebots entspricht dem Gesamtangebot des entsprechenden EE-Trägers multipliziert mit dem Anteil des Wohnens 1995, dividiert durch die gesamte EBF der Schweiz von 380 Mio. m^2 (BfS 1990).

Szenario	[MJ $m^{-2}a^{-1}$]	Quelle oder Interpretation
Wasserkraft		
IST_{CH}	99	Schweizerische Produktion 1995 abzüglich Verteilverluste (BEW 1996).
IST_{UCPTE}	26	Frischknecht et al. (1994)
$SOLL_{CH}$	104	Annahme einer 5%-igen Produktionssteigerung. Diese sollte hauptsächlich durch Modernisieren der bestehenden Anlagen erreicht werden. Aus Gründen des Gewässer- und Landschaftsschutzes sind neue Anlagen nicht wünschenswert.
$SOLL_{UCPTE}$	47	Frischknecht et al. (1994)
Wind		
IST_{CH}	0	Gemäss Horbaty (1997).
IST_{UCPTE}	0.3	Gemäss Lehmann (1995)
$SOLL_{CH}$	5	Technisch realisierbares Potential (Buser et al. 1996).
$SOLL_{UCPTE}$	15	EWEA (1991) und Selter (1986)
Holz		
IST	11	Gesamte thermische Nutzung von Holz 1995 (BEW 1996).
SOLL	33	Angebot an thermisch nutzbaren Holzprodukten gemäss Kapitel 'Energieholz'.
andere Biomasse		
IST	1	Gemäss BEW (1996).
SOLL	8	Technisch realisierbares Potential BEW (1997). Eine Übersicht der Bedeutung verschiedener Systeme gibt Abbildung 10.

Tabelle 5: Heutiges (IST) sowie mittelfristig zu erwartendes (SOLL) Angebotes an erneuerbaren Energiequellen.

Die Wind-Potentialstudie (Buser et al. 1996) hat namentlich im Jura und im nordwestlichen Alpenraum 3'000 Anlagenstandorte aufgezeigt. An diesen Standorten kann je eine Anlage à 500 kW oder zwei Anlagen à 250 kW installiert werden. Die Studie geht davon aus, dass die dazu notwendigen rund 3'300 Anlagen bis ins Jahr 2030 aufgestellt werden können.

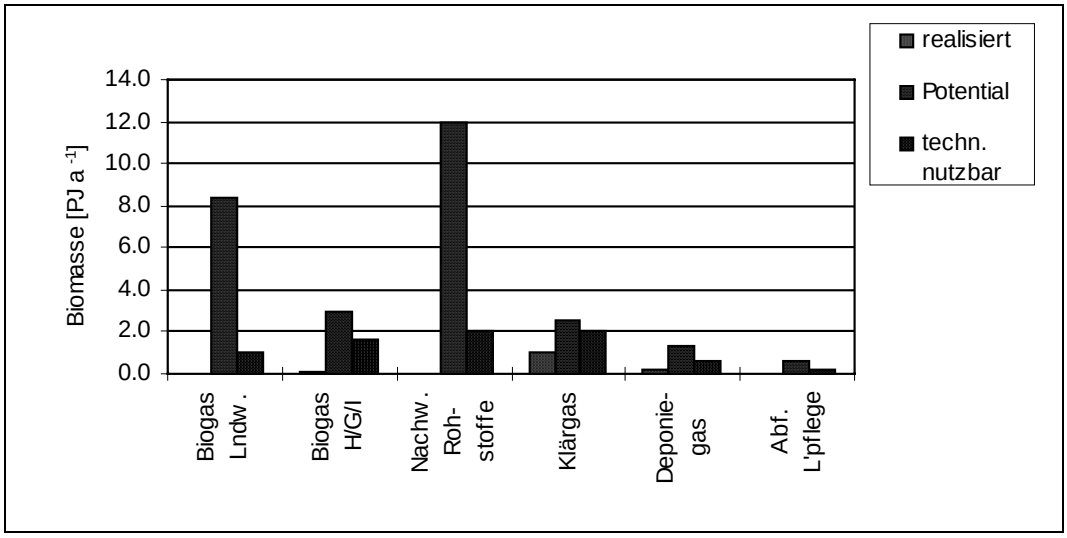


Abbildung 8. Die verschiedenen Quellen von Energie aus Biomasse (exklusive Holz). Deutlich wird die teilweise grosse Differenz zwischen dem theoretischen Potential und was davon als technisch nutzbar erachtet wird.

Der Anteil erneuerbarer Energien an der Gesamtnachfrage 1995 beträgt beim CH-Mix rund 15% und für den UCPTE-Mix 5%. Im SOLL wächst das Angebot beim CH-Mix um

einen Drittel, im UCPTE-Raum hingegen um mehr als 160%. Im SOLL liegt das Angebot in der Schweiz deshalb nur noch um einen Drittel über dem UCPTE Angebot.
Durch den Verzicht auf nicht erneuerbare Energien wird das Angebot also drastisch reduziert. Daneben findet, hauptsächlich in der an Hydroelektrizität reichen Schweiz, eine Angebotsverschiebung von chemischen Energieträgern zu Elektrizität statt. Heute stellt die gesamte Stromproduktion einen Anteil von 19.3% am Endenergiekonsum, im SOLL wächst dieser auf 71.3% an. Abbildung 9 zeigt das Endenergieangebot heute und für den nachhaltigen Prozess Wohnen (IST und SOLL) pro Kopf.

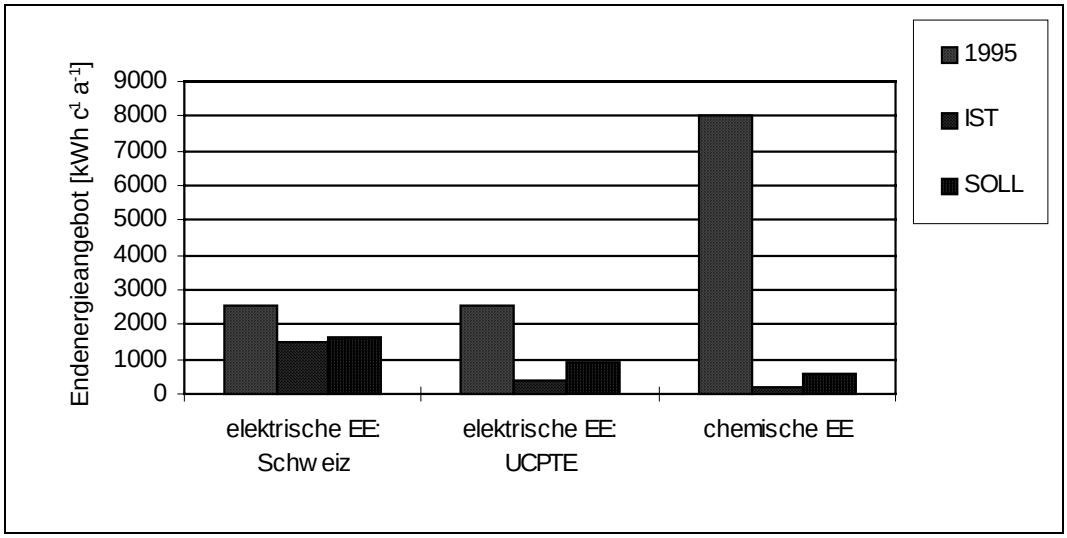


Abbildung 9. Die Summe aller heute konsumierten Endenergieträger liegt um einen Faktor 5 über der Summe aller künftig zur Verfügung stehenden erneuerbaren Energien.

Es wird deutlich, dass energetisch nachhaltiges Wohnen eine Effizienzrevolution um einen Faktor 5 (CH) bis 7 (UCPTE) bedingt.

4.2.5 Holzmodul

Holzsplit

In der Forststatistik (BUWAL & BfS 1993) sind die Stoffflüsse der schweizerischen Holzwirtschaft für das Jahr 1995 analysiert. Darin sind, ausgehend vom Holzeinschlag, in der Schweiz die verschiedenen Verarbeitungsstufen bezüglich In- und Output dargestellt.

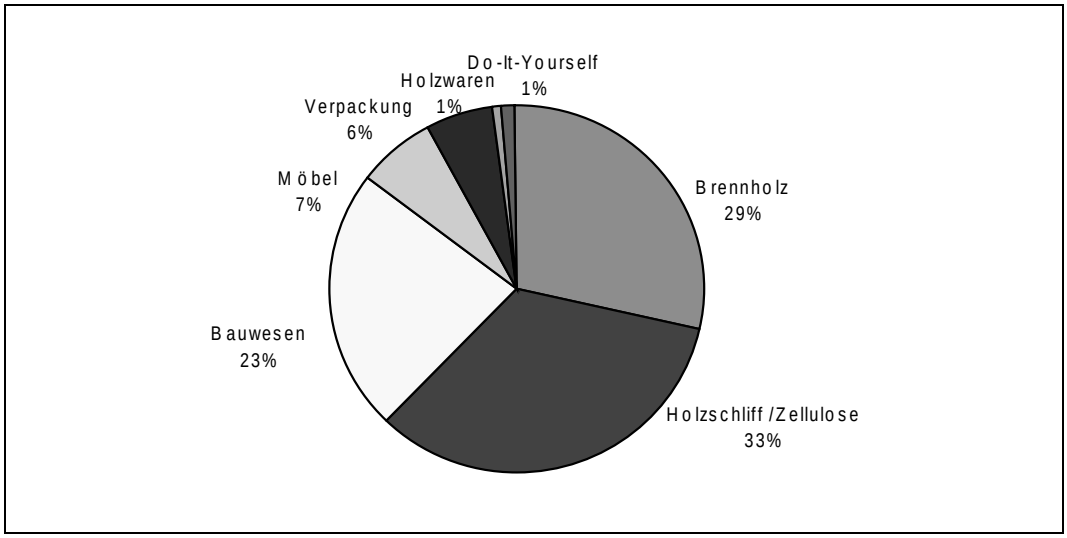


Abbildung 10. Die Aufteilung der Holzendprodukte in der Schweiz.

Die daraus resultierenden Endproduktekategorien sind in Abbildung 10 ersichtlich. 1995 wurde in der Schweiz eine Holzmenge von 4.7 Mio. m^3f (Festmeter) eingeschlagen. Der Importüberschuss lag bei 1.3 Mio. m^3f und der Gesamtkonsum bei 7.2 Mio. m^3f. Die Differenz zwischen Einschlag/Import und Konsum hat seinen wichtigsten Grund im Altpapierrecycling (0.9 Mio. m^3f).

Die Kategorie Bauwesen (1.7 Mio. m^3f) kann mittels einer Studie (Basler 1997) weiter aufgeteilt werden.
Der heutige Anteil des Wohnungsbaus am Bauholzkonsum von 48% wird auch für den nachhaltigen Wohnungsbau (SOLL) beibehalten. Der Anteil des Bauholzes respektive aller übergeordneter Holznachfrager (vgl. Abbildung 10) am gesamten Holzangebot ändert sich jedoch durch die im Folgenden beschriebenen Optimierungen der Holzwirtschaft.

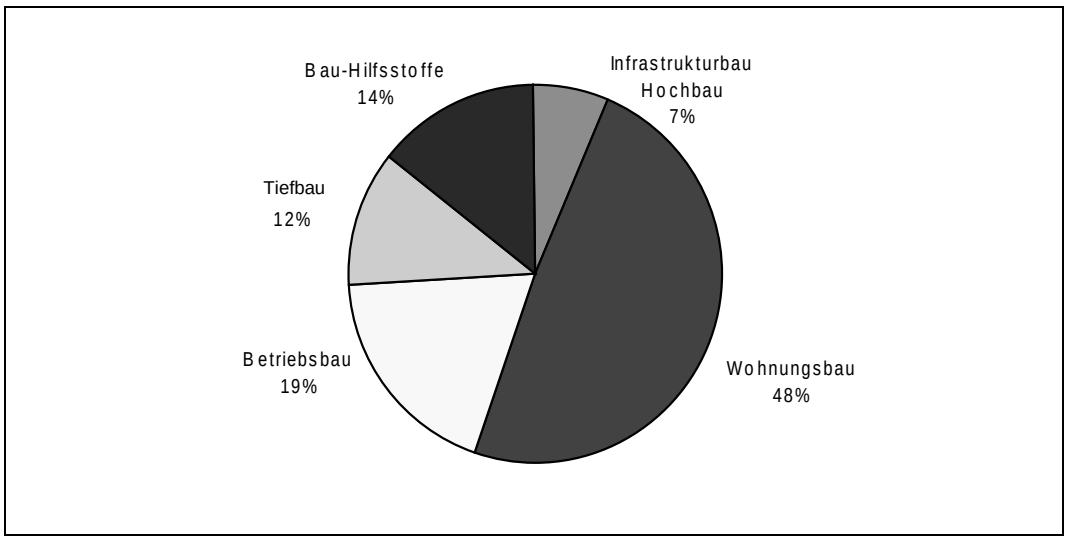


Abbildung 11. Der Wohnungsbau verbraucht mit 48% den grössten Teil des Bauholzes. Eine nicht zu vernachlässigende Menge wird als Bauhilfsstoffe verwendet (14%), wovon mehr als 90% Schalungsbretter sind.

Holzangebot

Ziel der Optimierung ist das Erhöhen der für den Wohnungsbau zur Verfügung stehenden Bauholzmenge, bei mehr oder weniger konstanten Mengen der übrigen Nachfrager.

Optimierungsschritte

1. Erhöhen der Einschlagmenge von 4.7 Mio.m^3f auf 6.8 Mio. m^3f. Diese Menge entspricht gemäss Landesforstinventar 1982-86 (WSL 1988) einer nachhaltigen Nutzung des Schweizer Waldes. Die jährlich nachwachsende Menge beträgt gemäss der gleichen Quelle ca. 10 Mio. m^3f.
2. Ausgleichen der Aussenhandelsbilanz, also Import gleich Export.
3. Erhöhen des Altholzanteils in der Span- und Faserplattenproduktion von 23% auf 33%.
4. Reduktion des Industrieholzinputs in die Papierproduktion (Holzschliff/Zellulose) von 59% auf 40%. Die Papierproduktion wird dadurch bei mengenmässig gleichem Altpapierrecycling um 19% reduziert.
5. Erhöhen des Industrieholzinputs in die Span- und Faserplattenproduktion von 41% auf 60%, entsprechend der Reduktion bei der Papierproduktion.

Durch diese Massnahmen ergeben sich die in Abbildung 12 dargestellten Verschiebungen bei den Holzendprodukten.
Alle Kategorien exklusive Brennholz und Holzschliff/Zellulose setzen sich aus prozentual gleichen Teilen Span-/Faserplatten (SpF) und Schnittwaren/Furniere/Schichthölzer (SFS) zusammen. Im IST beträgt der Anteil der SpF 27% und steigt im SOLL auf 33% an. Der Grund liegt im erhöhten Altpapierrecycling und im größeren Input an Industrieholz in die SpF-Produktion.

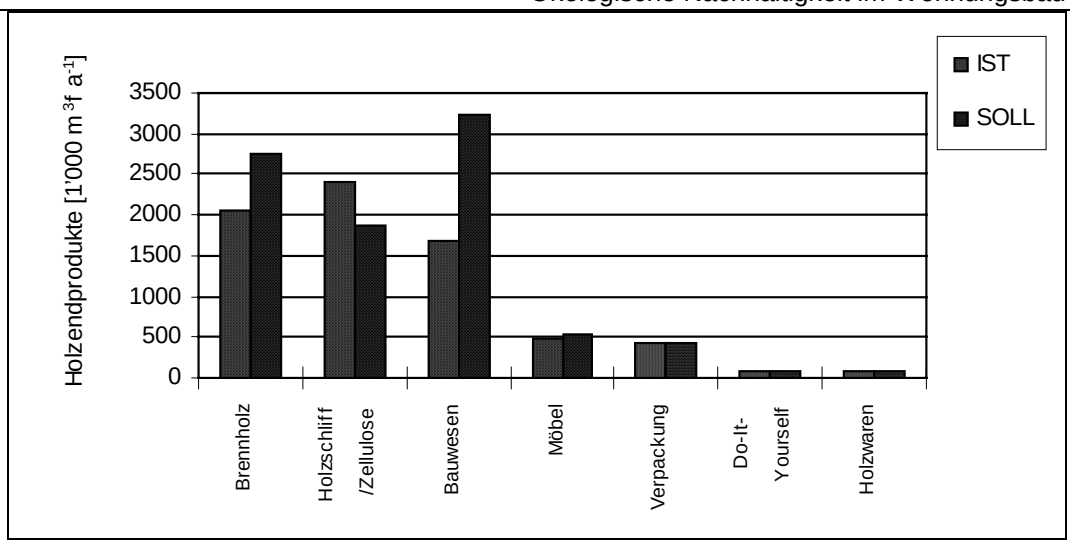


Abbildung 12. Gegenüberstellung der Holzendproduktemengen 1995 und nach den oben beschriebenen Optimierungsmassnahmen der Holzwirtschaft (IST/SOLL).

Die heute nachgefragte Menge an Holz ist eine rein durch wirtschaftliche Faktoren bestimmte Grösse und widerspiegelt in keiner Weise ein nachhaltiges Angebot. Die bereits heute nutzbare Menge entspricht viel eher dem Angebot nach Realisierung der Optimierungsschritte, reduziert um die Differenzen zwischen 1995 und IST/SOLL bei Holzschliff/Zellulose. Das eigentliche Bauholzangebot IST käme danach auf ca. 2'800 m^3f zu liegen, knapp 15% unterhalb des SOLL. Aus Gründen der Einfachheit und der wohl eher gemächlichen Zunahme der Nachfrage nach Bauholz, wird das gesamte SOLL-Angebot als bereits heute bestehend betrachtet.

Energieholz

Für die Berechnung des Energieholzangebots im SOLL wird davon ausgegangen, dass in einem stabilen System grundsätzlich der Input dem Output entspricht. Somit ist die jährlich geschlagene gleich der jährlich vom System ausgeschiedenen Holzmenge (Altholz und Papier). Um den Aufwand für das Einsammeln in vernünftigen Grenzen zu halten, wurde eine Nutzungsfunktion eingeführt, welche den tatsächlich einer energetischen Nutzung zuführbaren Anteil einer Produktekategorie bezeichnet.
Aus Tabelle 6 und Abbildung 13 wird deutlich, dass sich der Anteil von Waldholz am Energieholzangebot von 40% im IST auf 20% im SOLL vermindert und der Altholzanteil von 14% auf 55% steigt, wobei die absoluten Werte der meisten Kategorien grösser werden.

Energie	**Fluss**	**Nutzungsfunktion**	**Energieholz**	**Heizwert**	**Endenergie**	**Endenergie**
	[Mio. m^3a^{-1}]	**[%]**	**[Mio. m^3a^{-1}]**	**[MJ m^{-3}]**	**[PJ a^{-1}]**	**[%]**
Brennholz	2.756	100	2.756	8'280	22.8	44
Papier	1.013	80	0.810	8'640	7.0	13
Bauwesen	2.413	80	1.930	8'820	17.0	32
Möbel	0.391	80	0.313	8'820	2.8	5
Verpackung	0.326	80	0.261	8'640	2.3	4
Do-It-Yourself	0.065	50	0.033	8'820	0.3	1
Holzwaren	0.065	50	0.033	8'820	0.3	1
TOTAL	7.029		6.136		52.4	100

Tabelle 6. Energieholznutzung im SOLL. Die Nutzungsfunktion definiert den mit vernünftigem Aufwand energetisch nutzbaren Anteil jeder Produktekategorie.

Dieser Umstand weist darauf hin, dass in Zukunft zentrale Altholzverbrennungsanlagen mit entsprechender Abgasreinigung stark an Bedeutung gewinnen dürften.

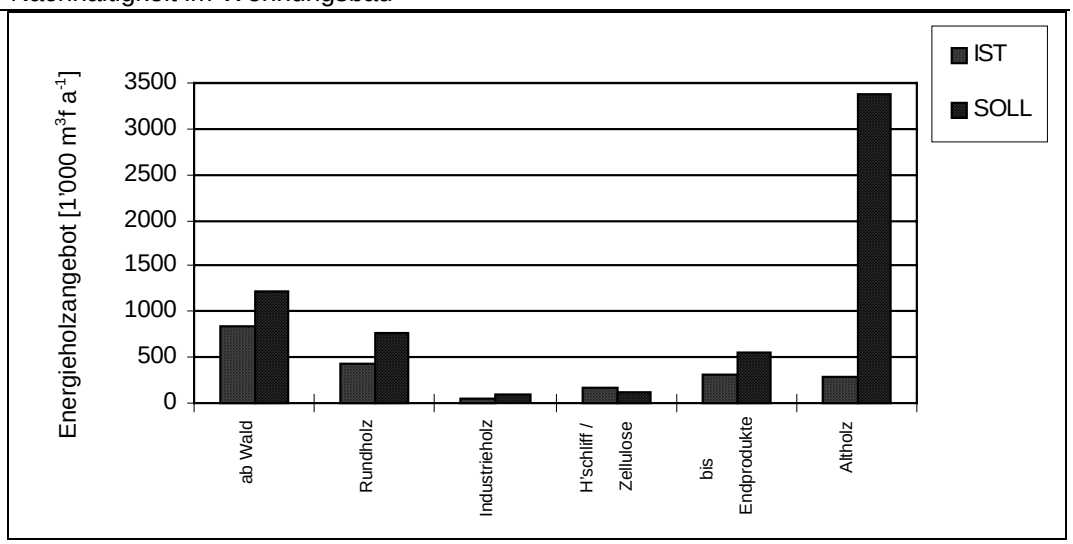


Abbildung 13. Vergleich IST vs. SOLL verschiedener Energieholzqualitäten. In dieser Graphik ist die Position Brennholz aus Tabelle 6 aufgeschlüsselt nach dem Ort des Anfalls in der Produktionskette. Die gesamte Nutzung von Altholz und Altpapier ist in der Position 'Altholz' zusammengefasst.

Die Überlegungen zum IST-Angebot an Bauholz (IST gleich SOLL) gelten für das Energieholzangebot nicht oder nur beschränkt. Einzig der SOLL-Wert beim Brennholz ab Wald kann durch eine erhöhte Nachfrage durch das Wohnen realisiert werden. Das Ausschöpfen der anderen Potentiale bedingt strukturelle Veränderungen, wie der Bau von Anlagen zur thermischen Altholznutzung aber auch eine erhöhte Nachfrage nach Bauholz und somit mehr Verarbeitungsabfälle. Als IST-Angebot wird deshalb nur der heutige Energiefluss verwendet.

4.2.6 Bilanzmodul

Definition

Nachdem nun Angebot und Nachfrage definiert und ermittelt sind, kann nun Bilanz gezogen werden. Um strenge Nachhaltigkeit zu erreichen, darf die Energienachfrage (Verbrauch) eines Gebäudes ein bestimmtes Angebot aus nur erneuerbaren Energiequellen nicht überschreiten.

Bilanzzahl elektrisch (B_{el})

Um die Nachfrage einem bestimmten Angebot gegenüberstellen und verrechnen zu können, ist es notwendig, die verschiedenen Typen von Energieträgern auf eine einzige Grösse zu reduzieren. Zu diesem Zweck wurde die Bilanzzahl elektrisch - kurz B_{el} - geschaffen. Mit ihr werden sämtliche Energieangebote und -nachfragen mit den in Tabelle 1 ersichtlichen Wirkungsgraden auf Elektrizität pro Kopf umgerechnet.

- Übersteigt nun die Nachfrage das Angebot, kann das Gebäude nicht als nachhaltig taxiert werden.
- Unterschreitet dagegen die Nachfrage das Angebot, kann das Gebäude als nachhaltig eingestuft werden.

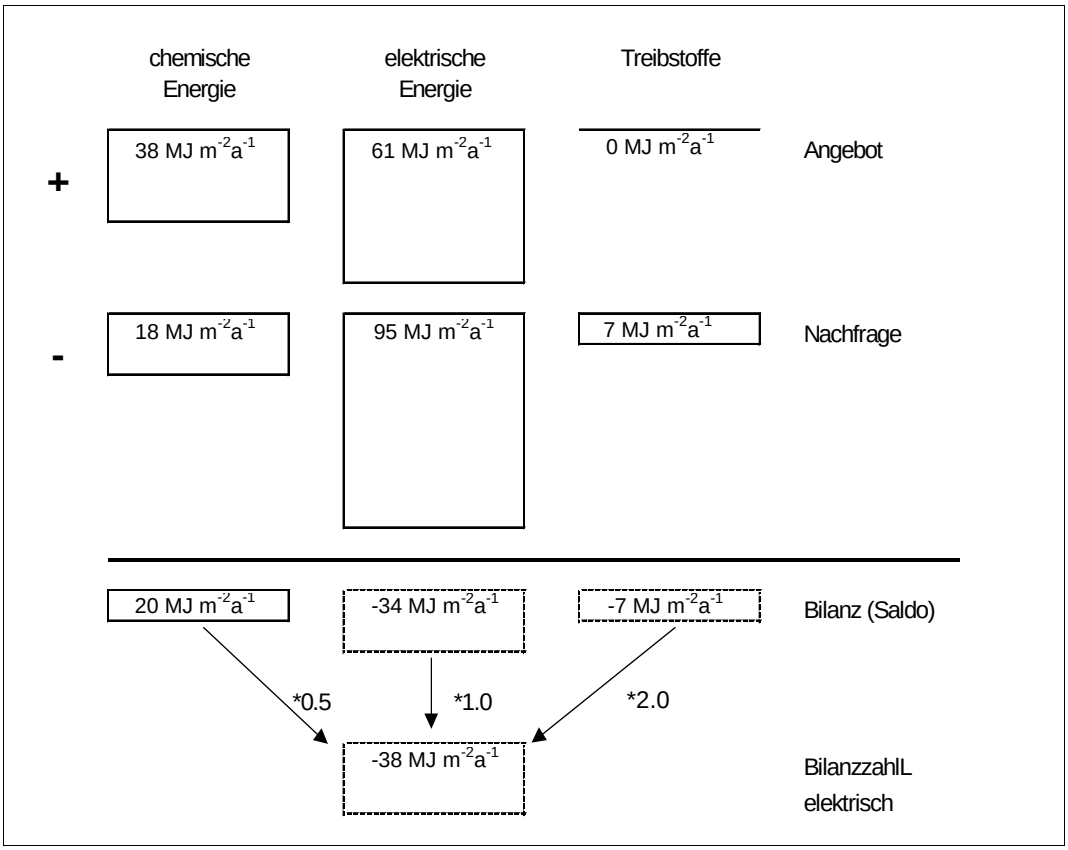


Abbildung 14. Schematische Darstellung der Bilanzzahl elektrisch B_{el}. Im dargestellten Beispiel wurden die Zahlen eines Neubaus in Holzleichtbauweise eingesetzt. Die B_{el} ist negativ, da die Nachfrage bei der Elektrizität und den Treibstoffen überwiegt.

Stoffflüsse

Dieselbe Thematik auf der Seite der Stoffflüsse kann nicht genau auf die gleiche Weise abgehandelt werden und wird insbesondere in den Kapitel 7.4 ‘Bilanzierung der Stoffflüsse’ sowie 8.6 ‘Holzbau und Holztrocknung’ beschrieben.

5 Beschrieb der untersuchten Objekte

5.1 Einleitung

Da es das Ziel dieser Arbeit ist, möglichst allgemeingültige Aussagen über den Gebäudepark Schweiz zu machen, wurde bei der Wahl der Untersuchungsobjekte folgende Parameter berücksichtigt:

- Gebäudegrösse
- Gebäudekonstruktion (Baualterungsstufe)
- Wohnungsstruktur.

Zudem wurde darauf geachtet, dass die Objekte möglichst einfache Gebäudekörper darstellen und nicht allzuviele Vor- und Rücksprünge besitzten. Dies ist wichtig für die Aussagekraft allgemeingültiger Resultate, und zudem können komplexere Gebäudeformen mit *SUSTAIN II* nicht erfasst werden.

Die Objekte sind mit Plänen, Fotos und mit den wichtigsten Gebäudedaten- und Kennziffern dokumentiert.

5.2 Sanierungen

5.2.1 MFH Allmendstrasse 221 - 225 in Basel (Objekt 1)

Die Liegenschaft Allmendstrasse 221 bis 225 befindet sich in der Nähe des Rheinkraftwerkes Birsfelden in Basel, gegenüber eines Sportplatzes. Sie wird von der städtischen Liegenschaftsverwaltung verwaltet. Der Bau gilt als ein für die Erstellungszeit typisches Objekt: Backsteinwände, unbeheiztes Dachgeschoss mit Walmdach und 3½-Zimmerwohnungen.

Abbildung 15: Ansicht des Objektes 1 von Westen.

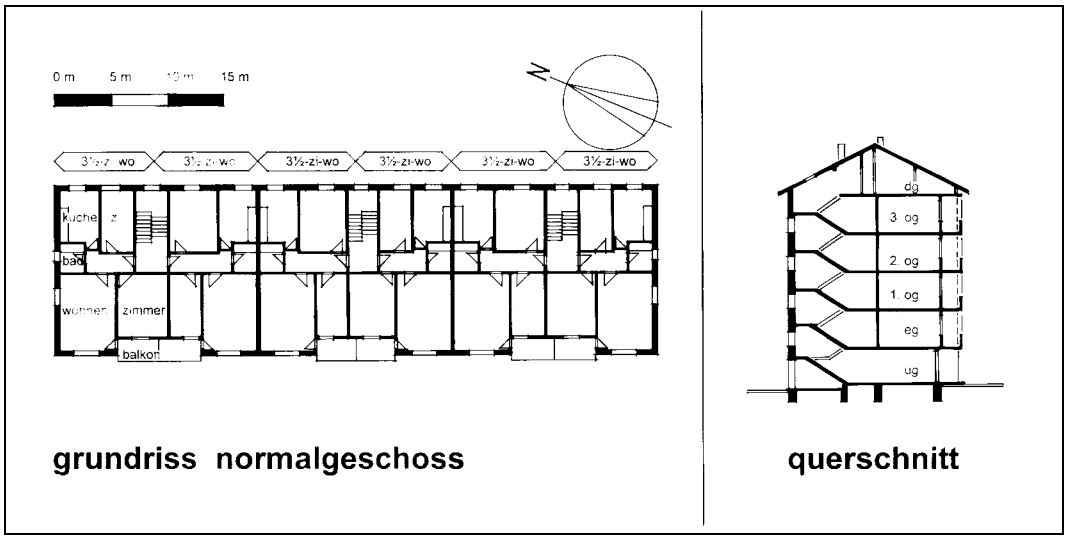


Abbildung 16: Grundriss Normalgeschoss und Querschnitt von Objekt 1.

Baujahr	1956
Höhe über Meer	270 M.ü.M.
Anzahl Wohnungen	24 x 3½-Zi-Wo
Aussenwand	Backstein 39 cm, ungedämmt
Dach	Sparrenlage 12 cm mit 6 cm Mineralwolle
Decken	Beton 12 cm
Fenster	Holzrahmen mit Doppelverglasung
A/EBF	0.92 (gewichtet)
mittlerer k-Wert	1.55 W $m^{-2}K^{-1}$
Wärmeerzeugung	alter Gaskessel im Nahwärmeverbund (6 Liegenschaften)
Wärmeabgabe	bestehende Plattenheizkörper
Warmwasser	Einzelgasboiler

Tabelle 7: Daten der Gebäudehülle und der Haustechnik von Objekt 1.

5.2.2 EFH Bündtenweg 15 in Hölstein (Objekt 2)

Das 1957 erstellte Einfamilienhaus liegt im basellandschaftlichen Hölstein und wurde 1957 errichtet. Das Untergeschoß ist über Terrain angeordnet. Das Dachgeschoss ist unbeheizt und dient als Estrich, ist aber hoch genug, um ausgebaut zu werden. Die Fassaden bestehen aus einem homogenen Backstein-Mauerwerk, die Decken sind Holzbalkenlagen und für Raumwärme und Warmwasser sorgt ein Ölkessel.

Abbildung 17: Ansicht des Objektes 2 von Süden.

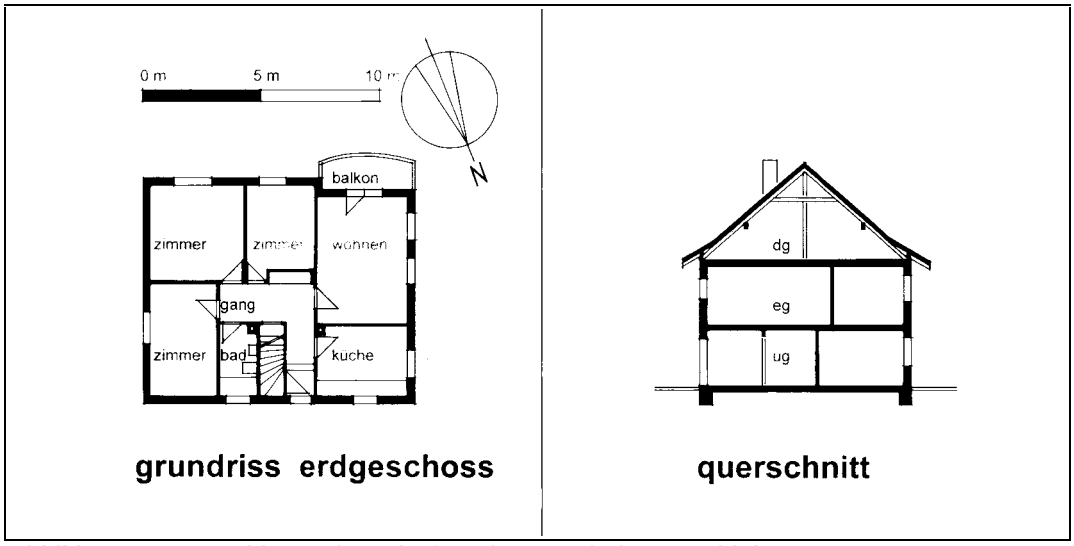


Abbildung 18: Grundriss Erdgeschoß und Querschnitt von Objekt 2.

Baujahr	1957
Höhe über Meer	423 M.ü.M.
Anzahl Wohnungen	1 x 4½-Zi-Wo
Aussenwand	Backstein 30 cm, ungedämmt
Dach	Sparrenlage 14 cm, ungedämmt
Decken	Holzbalken 22 cm
Fenster	Holzrahmen mit Doppelverglasung
A/EBF	2.01 (gewichtet)
mittlerer k-Wert	1.40 W $m^{-2}K^{-1}$
Wärmeerzeugung	Ölkessel 19.5 kW, Baujahr 1987
Wärmeabgabe	bestehende Radiatoren aus Stahlrohren
Warmwasser	Elektroboiler 200 lt.

Tabelle 8: Daten der Gebäudehülle und der Haustechnik von Objekt 2.

5.2.3 MFH Isabellenweg 3 - 7in Biel (Objekt 3)

Um die Jahrhundertwende wurde dieses heute stark sanierungsbedürftige Mehrfamilienhaus erstellt. Es steht nordwestlich vom Bieler Hauptbahnhof in einem ruhigen Wohnquartier am Zihlkanal. Die Zweizimmerwohnungen mit separatem WC im Treppenhaus entsprechen nicht mehr den heutigen Anforderungen. Jede der neun Wohnungen wird einzeln mit einem Holzofen beheizt.

Abbildung 19: Ansicht des Objektes 3 von Norden.

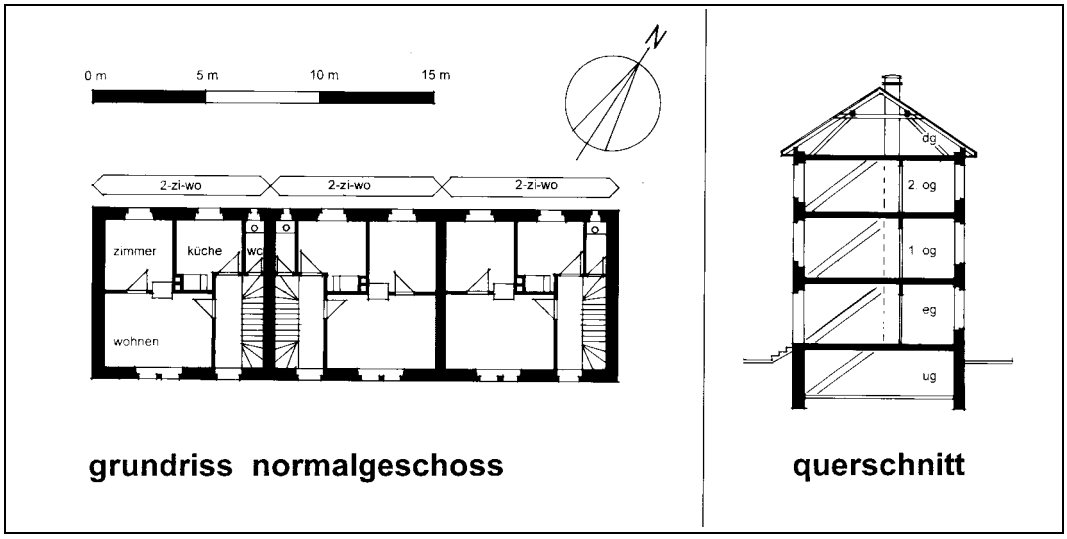


Abbildung 20: Grundriss Normalgeschoss und Querschnitt von Objekt 3.

Baujahr	1898
Höhe über Meer	435 M.ü.M.
Anzahl Wohnungen	9 x 2-Zi-Wo
Aussenwand	Bruchsteinmauerwerk 50 cm, ungedämmt
Dach	Sparrenlage 20 cm, ungedämmt
Decken	Holzbalkenlage 24 cm
Fenster	Holzrahmen mit Einfachverglasung und Vorfenster
A/EBF	1.33 (gewichtet)
mittlerer k-Wert	2.29 W $m^{-2}K^{-1}$
Wärmeerzeugung	Holz-Einzelöfen
Wärmeabgabe	direkt vom Ofen
Warmwasser	Elektroboiler

Tabelle 9: Daten der Gebäudehülle und der Haustechnik von Objekt 3.

5.2.4 MFH Muttenzerstrasse 91 in Pratteln (Objekt 4)

Das vierte Objekt ist ein zwölfgeschossiges Hochhaus, das in Pratteln an der Ausfallstraße Richtung Muttenz steht. Es wurde 1969 in einer Ort- und Plattenbetonbauweise erstellt. Die Fassaden sind teilweise innen mit 4 cm Polystyrol wärmegedämmt. Alle Geschosse sind identisch und bieten von der 1½- bis zur 4½-Zimmerwohnung verschiedene Wohnungsgrössen an. Diese sind entweder ost- oder west orientiert und werden mit einem zentralen Ölkessel beheizt.

Abbildung 21: Ansicht des Objektes 4 von Nordwesten und Nahaufnahme vom Balkon.

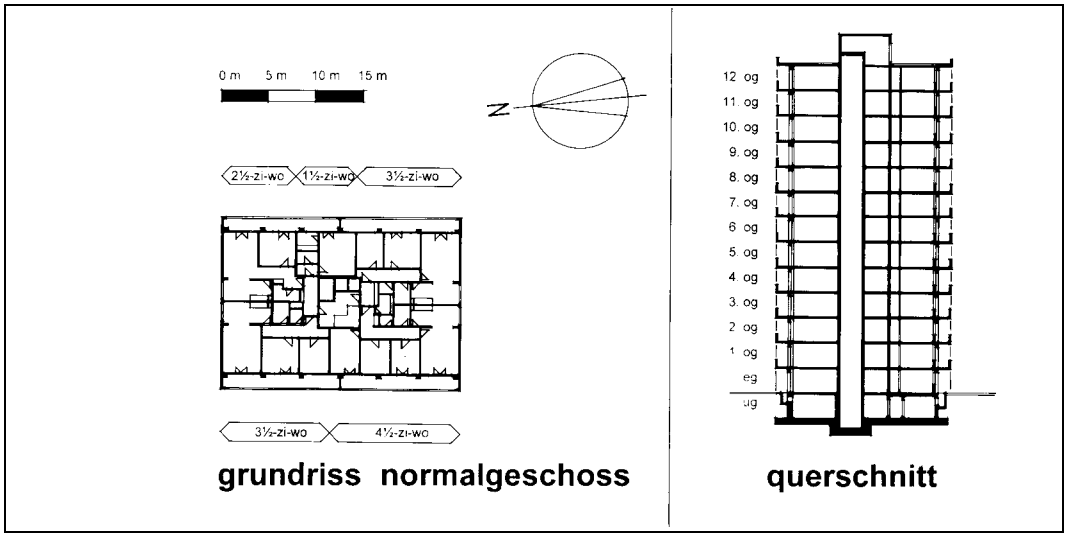


Abbildung 22: Grundriss Normalgeschoss und Querschnitt von Objekt 4.

Baujahr	1969
Höhe über Meer	298 M.ü.M.
Anzahl Wohnungen	12 x 1½-, 12 x 2½-, 24 x 3½-, 12 x 4½-Zi-Wo
Aussenwand	Beton od. Backstein 18 cm, 2-4 cm EPS, 1-5 cm Gips
Dach	Flachdach aus Beton, 2 cm EPS
Decken	Beton 15 cm
Fenster	Holzrahmen mit Doppelverglasung
A/EBF	0.69 (gewichtet)
mittlerer k-Wert	1.22 W $m^{-2}K^{-1}$
Wärmeerzeugung	zentraler Ölkessel im UG
Wärmeabgabe	ursprüngliche Radiatoren
Warmwasser	Ölkombikessel, mit Zirkulation

Tabelle 10: Daten der Gebäudehülle und der Haustechnik von Objekt 4.

5.2.5 MFH Schänzlistrasse 32/34 in Solothurn (Objekt 5)

Die Liegenschaft Schänzlistrasse 32/34 in Solothurn liegt in einem Wohnquartier, das sich Anfangs Jahrhundert östlich entlang dem rechten Aareufer entwickelte. Das Gebäude selber wurde 1932 errichtet und ist durch die Zeilenbauweise beidseitig angebaut. Jeder der zwei Haustypen wird separat mit einem Treppenhaus erschlossen und besitzt jeweils vier Dreizimmerwohnungen. Das Dachgeschoss wird als Estrich benutzt. Die Fassaden bestehen aus einem zweischaligen Backsteinmauerwerk.

Abbildung 23: Ansicht des Objektes 5 von Süden (Hof) und Norden (Zugänge).

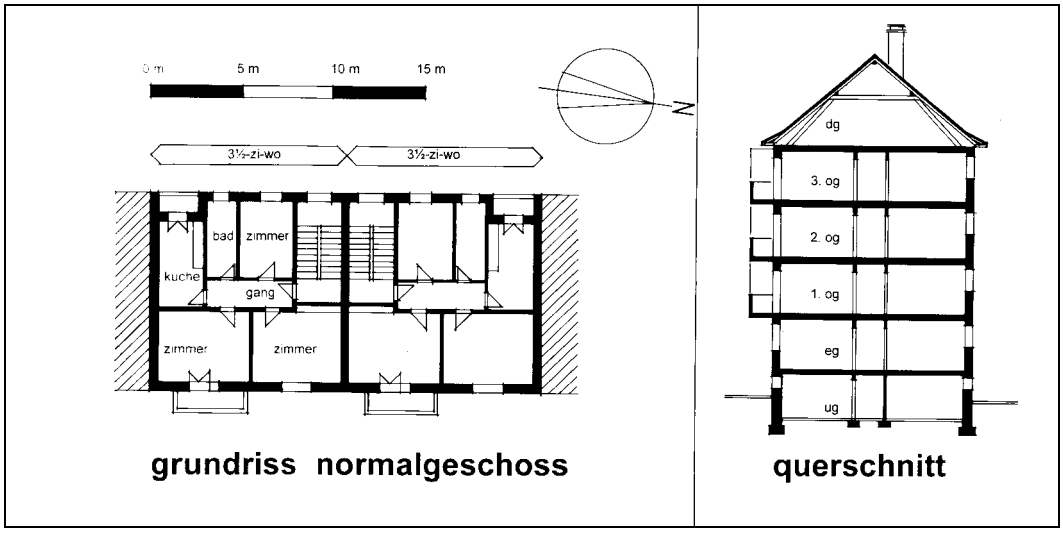


Abbildung 24: Grundriss Normalgeschoss und Querschnitt von Objekt 5.

Baujahr	1932
Höhe über Meer	437 M.ü.M.
Anzahl Wohnungen	8 x 3-Zi-Wo
Aussenwand	Backstein 12 cm, Luftspalt, Backstein 25 cm
Dach	Sparrenlage 14 cm, ungedämmt
Decken	Holzbalken 22 cm
Fenster	Holzrahmen mit Doppelverglasung
A/EBF	0.93
mittlerer k-Wert	1.42 W m^{-2} K^{-1}
Wärmeerzeugung	Zentraler Ölkessel (ab ca. 1965), Küche mit Gasherd
Wärmeabgabe	Radiatoren aus Gusseisen (ab ca. 1965)
Warmwasser	Elektroboiler

Tabelle 11: Daten der Gebäudehülle und der Haustechnik von Objekt 5.

5.3 Neubauten

5.3.1 Neubau Mehrfamilienhaus (Objekt N_mfh)

Die Daten für den Neubau liefert ein projektierter Reihenbau. N steht für Neubau, mfh für Mehrfamilienhaus. Die Grundvariante ist mit einem unterschiedlichen Angebot an 2- bis 4½-Zimmerwohnungen ausgestattet, wobei versucht wurde, ungefähr der gesamtschweizerischen Neubautätigkeit zu entsprechen (BfS 1990). Es wurden die Meteodaten von Biel verwendet. Der Baukörper ist südorientiert und nordseitig mit Lauben erschlossen.
Für die vorliegende Arbeit wurden folgende Variationen dieses Typs kreiert:

- N_mfh_l **N**eubau **M**ehr**f**amilien**h**aus in **L**eichtbauweise (konventionell)
- N_mfh_lo **N**eubau **M**ehr**f**amilien**h**aus in **L**eichtbauweise **o**ptimiert
- N_mfh_m **N**eubau **M**ehr**f**amilien**h**aus in **M**assivbauweise (konventionell)
- N_mfh_mo **N**eubau **M**ehr**f**amilien**h**aus in **M**assivbauweise **o**ptimiert

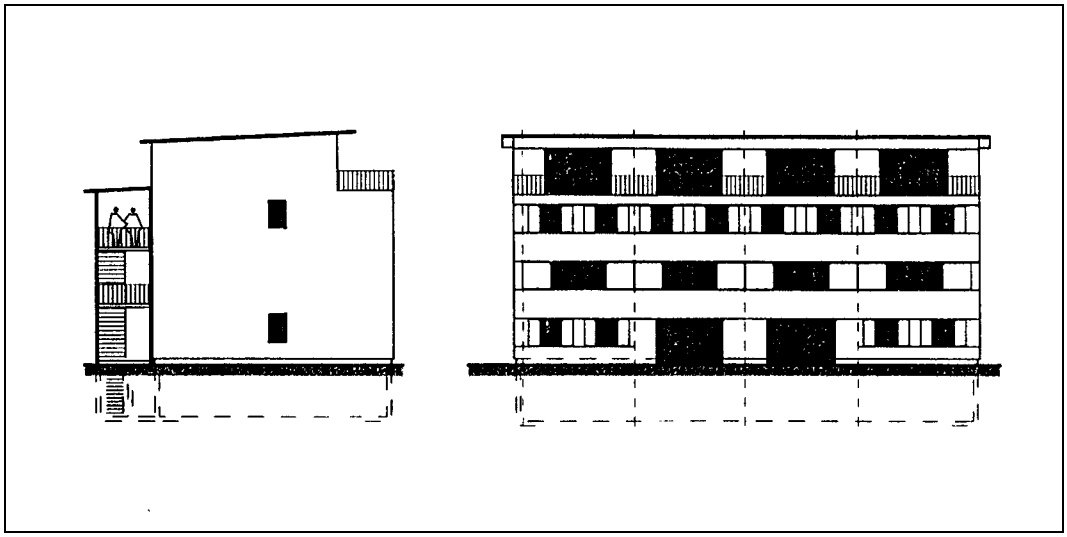


Abbildung 25: Ansicht des Objektes N_mfh von Westen und Süden.

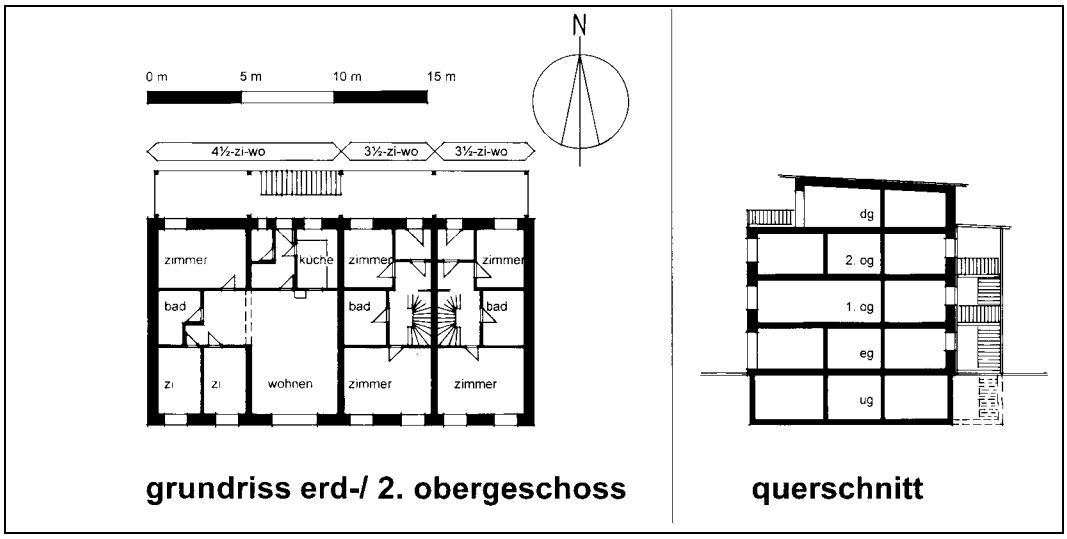


Abbildung 26: Grundriss Erd-/ 2. Obergeschoß und Querschnitt von Objekt N_mfh.

Höhe über Meer	435 M.ü.M.
Anzahl Wohnungen	4 2-, 4 3½-, 2 4½-Zi-Wo
A/EBF	1.14 (gewichtet)

Tabelle 12: Allgemeine Daten von Objekt N_mfh.

N_mfh_l		
Bauteil	**Ausführung**	**k-Wert**
Aussenwand	Kantholzkonstruktion mit 16+4 cm Steinwolle	0.22 W $m^{-2}K^{-1}$
Dach	Holzsparrenlage mit 16+4 cm Steinwolle	0.20 W $m^{-2}K^{-1}$
Decke über UG	Kantholzkonstruktion mit 18+2 cm Steinwolle	0.20 W $m^{-2}K^{-1}$
Fenster Süd	Holzrahmen mit 2-fach-WSV Argon/Krypton	1.10 W $m^{-2}K^{-1}$
Fenster übrige	Holzrahmen mit 2-fach-WSV Argon/Krypton	1.10 W $m^{-2}K^{-1}$
mittlerer k-Wert Gebäude		0.37 W $m^{-2}K^{-1}$
Wärmeerzeugung	Sole/Wasser-Wärmepumpe	
Wärmeabgabe	Bodenheizung in Zement	
Warmwasser	Sole/Wasser-Wärmepumpe	
Lüftung mit WRG	nein	

Tabelle 13: Daten der Gebäudehülle und der Haustechnik von Objekt N_mfh_l.

N_mfh_lo		
Bauteil	**Ausführung**	**k-Wert**
Aussenwand	Holzwellstegträger, Zellulose 30 + 4 cm	0.13 W $m^{-2}K^{-1}$
Dach	Holzwellstegträger, Zellulose 30 + 10 cm	0.10 W $m^{-2}K^{-1}$
Decke über UG	Holzwellstegträger, Zellulose 20 (+2) cm	0.18 W $m^{-2}K^{-1}$
Fenster Süd	Holzverbund. mit 2-fach-WSV Argon/Krypton	1.10 W $m^{-2}K^{-1}$
Fenster übrige	Holzverbund. mit 2-fach-WSV 2 Fol. Xenon	0.35 W $m^{-2}K^{-1}$
mittlerer k-Wert Gebäude		0.27 W $m^{-2}K^{-1}$
Wärmeerzeugung	Sole/Wasser-Wärmepumpe	
Wärmeabgabe	Bodenheizung mit Alulamellen	
Warmwasser	Sole/Wasser-Wärmepumpe	
Lüftung mit WRG	ja (mit Erdregister zur Luftvorwärmung)	

Tabelle 14: Daten der Gebäudehülle und der Haustechnik von Objekt N_mfh_lo.

N_mfh_m		
Bauteil	**Ausführung**	**k-Wert**
Aussenwand	ZSM Backstein 12+15 cm, Steinwolle 10 cm	0.30 W $m^{-2}K^{-1}$
Dach	Holzsparrenlage, Steinwolle 12 cm	0.20 W $m^{-2}K^{-1}$
Decke über UG	Stahlbeton 20 cm, EPS 8 (+2) cm	0.28 W $m^{-2}K^{-1}$
Fenster Süd	Holzrahmen mit 2-fach-WSV Argon/Krypton	1.10 W $m^{-2}K^{-1}$
Fenster übrige	Holzrahmen mit 2-fach-WSV Argon/Krypton	1.10 W $m^{-2}K^{-1}$
mittlerer k-Wert Gebäude		0.45 W $m^{-2}K^{-1}$
Wärmeerzeugung	Sole/Wasser-Wärmepumpe	
Wärmeabgabe	Bodenheizung in Zement	
Warmwasser	Sole/Wasser-Wärmepumpe	
Lüftung mit WRG	nein	

Tabelle 15: Daten der Gebäudehülle und der Haustechnik von Objekt N_mfh_m.

N_mfh_mo		
Bauteil	**Ausführung**	**k-Wert**
Aussenwand	Backstein 15 cm, Zellulose 20 cm	0.20 W $m^{-2}K^{-1}$
Dach	Holzsparrenlage, Zellulose 18 cm	0.20 W $m^{-2}K^{-1}$
Decke über UG	Stahlbeton 20 cm mit 16 (+2) cm Steinwolle	0.22 W $m^{-2}K^{-1}$
Fenster Süd	Holzverbund. mit 2-fach-WSV Argon/Krypton	1.10 W $m^{-2}K^{-1}$
Fenster übrige	Holzverbund. mit 2-fach-WSV 2 Fol. Xenon	0.35 W $m^{-2}K^{-1}$
mittlerer k-Wert Gebäude		0.34 W $m^{-2}K^{-1}$
Wärmeerzeugung	Sole/Wasser-Wärmepumpe	
Wärmeabgabe	Bodenheizung mit Alulamellen	
Warmwasser	Sole/Wasser-Wärmepumpe	
Lüftung mit WRG	ja (mit Erdregister zur Luftvorwärmung)	

Tabelle 16: Daten der Gebäudehülle und der Haustechnik von Objekt N_mfh_mo.

5.3.2 Neubau Einfamilienhaus (Objekt N_efh)

In der Kategorie Einfamilienhaus wurde ebenfalls ein Holzleichtbau gewählt: Typ 'Tricolo-Domino', ein gut wärmegedämmter Holzelementbau der Firma Renggli in Schötz. N steht für Neubau, efh für Einfamilienhaus. Es wurden die Meteodaten von Biel verwendet. Der Baukörper ist südorientiert.
Für die Parameterstudie 'Holzbau und Holztrocknung' wurden folgende Variationen dieses Typs kreiert (siehe auch Kapitel 8.6 'Holzbau und Holztrocknung'):

- N_efh_1 Bauweise: Wellstegträger Holztrocknung: technisch
- N_efh_2 Bauweise: Kantschnittholz Holztrocknung: natürlich
- N_efh_3 Bauweise: Kantschnittholz Holztrocknung: technisch
- N_efh_4 Bauweise: Brettschichtholz Holztrocknung: technisch

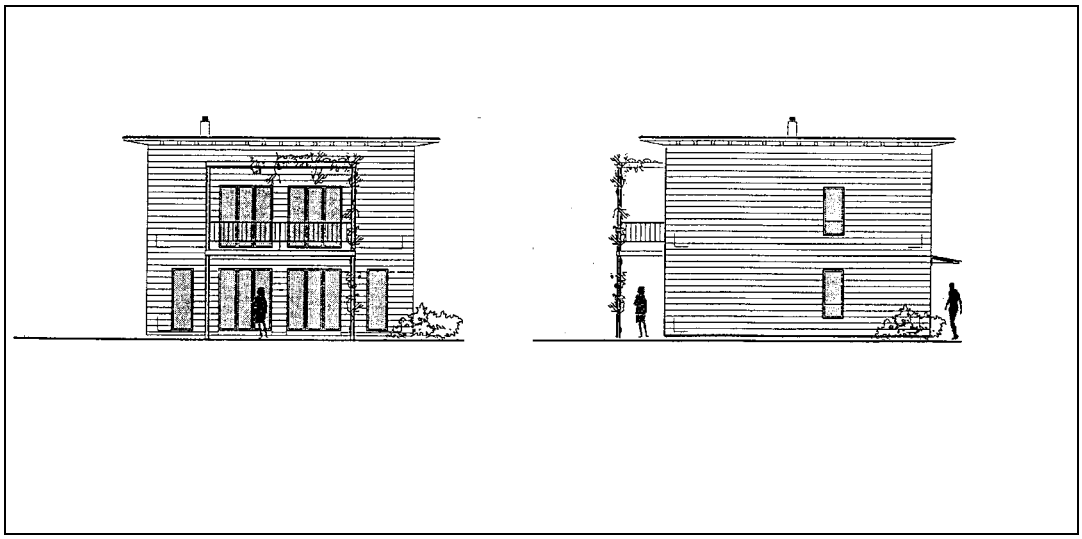


Abbildung 27: Ansicht des Objektes N_efh von Süden und Osten.

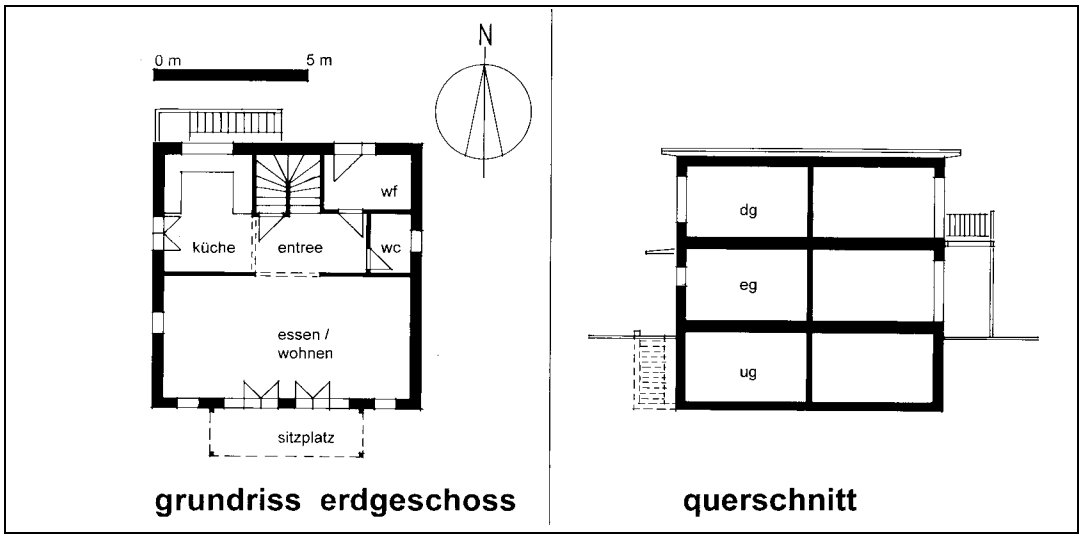


Abbildung 28: Grundriss Erdgeschoß und Querschnitt von Objekt N_efh.

Aussenwand	Holzkonstruktion, 20 + 8 cm Wärmedämmung
Dach	Holzkonstruktion, 20 + 12 cm Wärmedämmung
Decke zu UG	Holzkonstruktion, 20 + 2 cm Wärmedämmung
Fenster	Holzverbund mit 3-fach-WSV Xenon
A/EBF	2.0 (gewichtet)
Wärmeerzeugung	Sole/Wasser-Wärmepumpe
Wärmeabgabe	Radiatoren
Warmwasser	Sole/Wasser-Wärmepumpe
Lüftung mit WRG	ja (mit Erdregister zur Luftvorwärmung)

Tabelle 17: Daten der Gebäudehülle und der Haustechnik von Objekt N_efh.

6 Definition der Sanierungspakete

6.1 Sanierungspakete

6.1.1 Einleitung

Die Quantifizierung von Energie- und Stoffflüssen einer Gebäudesanierung setzt die genaue Projektierung einzelner Sanierungsmassnahmen voraus. Je nach Zustand des Gebäudes und den Zielen der beabsichtigten Sanierung wird unterschiedlich tief in die bestehende Bausubstanz eingegriffen oder nicht. Die Gegenüberstellung von Energie- und Stoffflüssen, wie sie von verschiedenen Sanierungsvarianten bzw. von der Erstellung eines Ersatzneubaus verursacht werden, liefert Informationen über die energetische (und damit auch ökologische) Bedeutung sowohl von einzelnen Massnahmen, aber auch von Massnahmenpaketen und sogar von Erneuerungsstrategien.

Für die vorliegende Arbeit wurden die folgenden vier Sanierungspakete definiert und bei allen fünf Fallbeispielen als Varianten durchgerechnet:

- U unsaniert
- A minimal saniert
- B durchschnittlich saniert
- C fortschrittlich saniert

Wird zum Beispiel für das Objekt 1 (Allmendstrasse Basel) eine durchschnittliche Sanierung vorgesehen, so ergibt sich daraus das Varianten-Kürzel 1_B.

6.1.2 Unsanierter Zustand (Variante U)

Bauteil	Massnahmen
Allgemeines	Falls beim realen Objekt bereits einzelne Sanierungsmassnahmen getätig wurden, wird trotzdem vom ursprünglichen Zustand des Gebäudes ausgegangen.
Gebäudehülle / Haustechnik	Es erfolgen keine Investitionen. Die Betriebsenergienachfrage geht aus der unsanierten Gebäudehülle und Haustechnik hervor. Die Stoffflüsse werden nur durch die periodische Erneuerung einzelner Bauteile über die Lebensdauer ausgelöst (z.B. der Ersatz der Küchengeräte alle 15 Jahre).

Tabelle 18: Beschrieb der Erneuerungsstrategie U.

6.1.3 Minimale Eingriffsintensität (Variante A)

Bauteil	Massnahmen
Fassade	--
Dach	--
Fenster	neue Holzrahmen mit 2-fach-WSV Argon/Krypton
Decke zu UG	neu: 5 bis 10 cm EPS
Decke zu DG	neu: 5 bis 10 cm EPS
Balkone	--
Aussentüren+Sonnenschutz	--
Spenglerarbeiten	--
Wärmeerzeugung	--
Wärmeverteilung	--
Wärmeabgabe	--
Lüftung mit WRG	--
PV/Solarthermie	--
Warmwasser	--
Innenausbau (Küche, Bad...)	Elemente werden ersetzt, wenn sie älter als 30 Jahre sind, danach im normierten Zeitintervall

Tabelle 19: Definition des Sanierungspaketes A.

6.1.4 Durchschnittliche Eingriffsintensität (Variante B)

Bauteil	Massnahmen
Fassade	neue Kompaktfassade mit 10 cm EPS
Dach	neue Eindeckung, 12 cm Steinwolle
Fenster	neue Holzrahmen mit 2-fach-WSV Argon/Krypton
Decke zu UG	neu: 10 cm EPS
Decke zu DG	neu: 10 cm EPS
Balkone	--
Aussentüren+Sonnenschutz	--
Spenglerarbeiten	neu
Wärmeerzeugung	neue Luft/Wasser-Wärmepumpe
Wärmeverteilung	--
Wärmeabgabe	--
Lüftung mit WRG	--
PV/Solarthermie	--
Warmwasser	neue Luft/Wasser-Wärmepumpe
Innenausbau (Küche, Bad...)	Elemente werden ersetzt, wenn sie älter als 20 Jahre sind, danach im normierten Zeitintervall

Tabelle 20: Definition des Sanierungspaketes B.

6.1.5 Fortschrittliche Eingriffsintensität (Variante C)

Bauteil	Massnahmen
Allgemeines	Es wird von einem Auszug der Mieter ausgegangen.
Fassade	neue hinterlüftete Fassade mit 20 cm Zellulose, Holzschalung
Dach	neue Eindeckung, bis 30 cm Zellulose
Fenster	neue Holzverbundrahmen mit 2-fach-WSV, 2 Folien Xenon (Süd: 2-fach Argon/Krypton)
Decke zu UG	neu: 10 bis 15 cm Steinwolle
Decke zu DG	neu: 10 bis 15 cm Steinwolle
Balkone	z.T. neue Verglasung
Aussentüren+Sonnenschutz	neu
Spenglerarbeiten	neu
Wärmeerzeugung	neue Sole/Wasser-Wärmepumpe
Wärmeverteilung	neu
Wärmeabgabe	-- (oder nach Objekt neu)
Lüftung mit WRG	ja (mit Erdregister zur Luftvorwärmung)
PV/Solarthermie	-- (nicht standardmässig vorgesehen)
Warmwasser	neue Sole/Wasser-Wärmepumpe
Innenausbau (Küche, Bad...)	Elemente werden ersetzt, wenn sie älter als 10 Jahre sind, danach im normierten Zeitintervall

Tabelle 21: Definition des Sanierungspaketes C.

7 Analyse verschiedener Gebäudetypen

Sofern nichts anderes vermerkt ist, wurde im Kapitel 7 'Analyse verschiedener Gebäudetypen' als Bezugsgrösse die Belegungsdichte verwendet und mit dem Szenario IST gerechnet.

7.1 Einleitung und Kurzinformation

7.1.1 Ausgangslage

Die Diplomarbeit ‚Nachhaltiger Wohnungsbau' (Erb et al. 1997) zeigte, dass unter bestimmten Voraussetzungen die Variante 'Abbruch und Erstellung eines Neubaus' die umweltverträglichste Erneuerungsstrategie sein kann. Diese Resultate waren allerdings sehr fallbezogen und können nicht ohne weiteres auf andere Situationen und Gebäudetypen übertragen werden.

7.1.2 Fragestellung

- Welchen Einfluss hat der Ist-Zustand eines Wohngebäudes (Bausubstanz, Haustechnik und A/V-Verhältnis) auf die ökologische Gesamtbilanz?
- Sanierung oder Abruch mit Neubau?
  - Welche Eingriffsintensität bringt ein gutes ökologisches Aufwands-/Ertragsverhältnis?
  - Wann amortisieren sich die Mehrinvestitionen einer intensiveren Erneuerungsstrategie?
- Welchen Einfluss haben die Stoffflüsse (Recyclingfähigkeit eines Baustoffes etc.)?
- Mit welchen Massnahmen kann Nachhaltigkeit erreicht werden?
- Welchen Einfluss können unterschiedliche Annahmen beim Haushaltstromverbrauch haben?

7.1.3 Die wichtigsten Erkenntnisse

Um wohnen zu können, muss Wohnraum erstellt, betrieben, unterhalten und periodisch renoviert bzw. saniert werden und schliesslich nach Ablauf der Gebäudelebensdauer als Ganzes ersetzt werden. Dadurch entsteht ein fortlaufender, durchschnittlicher Energiebedarf und Stofffluss. Diese ökologische Gesamtbilanz über den ganzen Lebenszyklus ist bei unsanierten Wohngebäuden dominiert vom Energiebedarf für die Beheizung. Der Ist-Zustand eines bestehenden Gebäudes hat einen untergeordneten Einfluss darauf, welches die energetisch beste Erneuerungsstrategie ist. Je tiefer eine Erneuerungsstrategie eingreift, desto kleiner sind die Abweichungen in der Gesamtbilanz verschiedener Objekte. Der Heizenergiebedarf sinkt bei allen auf ein vergleichbares Mass und der Aufwand für periodische Erneuerungsmassnahmen (Küchen, Innenausbau usw.) ist ohnehin bei allen Objekten grösser als für Massnahmen beim Sanierungseingriff.

Mehrinvestitionen in Massnahmen zur rationellen Energieanwendung amortisieren sich meistens nach wenigen Jahren, im extremsten der untersuchten Fälle nach ca. 14 Jahren.

Bei gleicher energetischer Gesamtbilanz sind Sanierungen wegen den minim höheren Stoffflüssen, welche die Variante Rückbau und Ersatzneubau verursacht, vorzuziehen.

Wird Europa als Betrachtungsraum gewählt, kann wegen dem relativ kleinen Angebot an erneuerbaren Energien mit keiner der betrachteten Erneuerungsstrategien strenge Nachhaltigkeit erreicht werden. Dies kann jedoch - je nach Gebäude und gewähltem zeitlichen Szenario - mit dem Zubau von 1 bis 26 m^2 Photovoltaikfläche pro Kopf ausgeglichen werden.

Die Haushaltsgrösse (Personenbelegung pro Wohnung) ist wegen dem Haushaltstromverbrauch ein sehr sensitiver Einflussparameter. Sie kann bei bestehenden Bauten nicht ohne weiteres verändert werden. Die Art des eingesetzten Gerätesatzes kann über die Frage Sanierung oder Abbruch mit Neubau entscheiden.

7.2 Einfluss der vorhandenen Bausubstanz

7.2.1 Grundlagen

Für die vorliegenden Berechnungen wurde die in Kapitel 5 'Beschrieb der untersuchten Objekte' erläuterten Gebäude Nr. 1 bis 5 sowie der optimierte Neubau in Holzleichtbauweise verwendet. Die unterschiedliche Ausgangslage dieser Objekte ist in Tabelle 22 dargestellt.

Variante	mittlerer k-Wert [W $m^{-2}K^{-1}$]	A/V [m^{-1}]	A/EBF [-]	Warmwasser Q_{ww} [MJ $m^{-2}a^{-1}$]	Heizenergie Q_h [MJ $m^{-2}a^{-1}$]
1_U	1.57	0.50	0.92	78	333
2_U	1.42	1.02	2.01	137	846
3_U	2.32	0.76	1.34	75	766
4_U	1.26	0.28	0.69	76	236
5_U	1.43	0.50	0.93	63	397
N_mfh_lo	0.27	0.49	1.14	72	35

Tabelle 22: Die Basisdaten der unsanierten Objekte und vom optimierten Holzleichtbau. A/V bedeutet Verhältnis der Gebäudeoberfläche zum Volumen, A/EBF Verhältnis der Gebäudeoberfläche zur Energiebezugsfläche.

7.2.2 Totale Nachfrage an nicht erneuerbarer Primärenergie (PE_{ne})

Abbildung 29 zeigt Objekt 1 mit den verschiedenen Sanierungsintensitäten sowie zwei Neubauten im Quervergleich. Die totale PE_{ne}-Nachfrage unterscheidet sich bei den Sanierungsvarianten bis fast 100%.

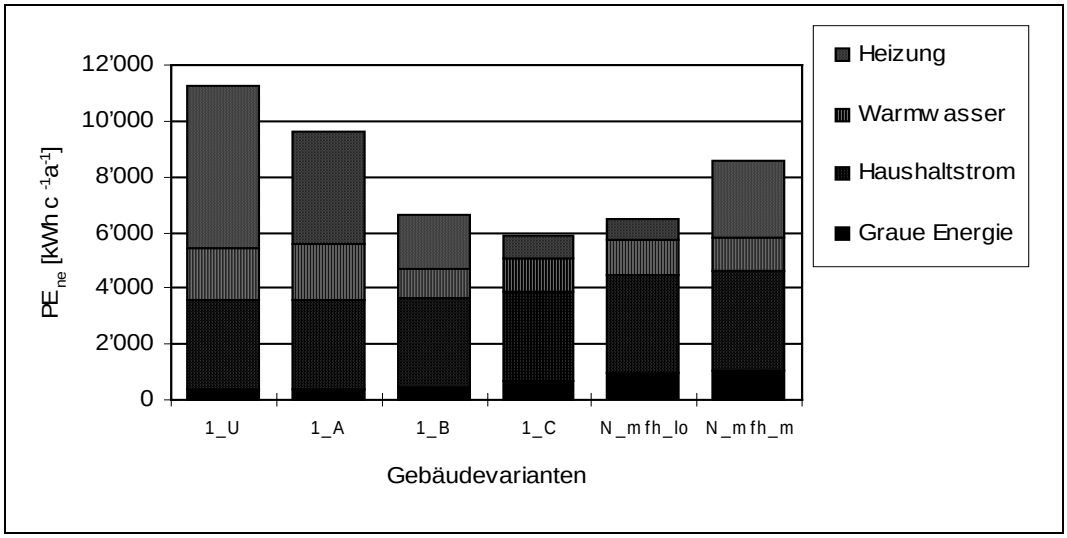


Abbildung 29: PE_{ne}-Nachfrage aus Heizung, Warmwasser, Haushaltstrom und Grauer Energie verschiedener Sanierungsintensitäten von Objekt 1 und zwei Neubauten.

Heizenergie

Die Heizenergie ist wie erwartet bei der unsanierten Variante der mit Abstand dominierenste Faktor. Eine kaum gedämmte Gebäudehülle sowie ein schlechter Wirkungsgrad bei der Wärmeerzeugung sind dafür verantwortlich. In Abbildung 34 sehen wir allerdings, dass bei der Heizenergie verschiedener unsanierter Objekte markante Unterschiede vorhanden sind. Unterschiedliche mittlere k-Werte sowie verschiedene A/V-Verhältnisse beeinflussen den Heizenergiebedarf wesentlich. Beim Stadthaus (5_U) beispielsweise geht der Vorteil der beidseitigen Anbauung durch die grosszügigen Raumhöhen und Treppenhäuser (eines pro Wohnung) wieder verloren. Beim Altbau in Biel (3_U) wirkt sich der schmale, aber lange Baukörper ungünstig auf das A/V-Verhältnis aus. Bei diesem Objekt wirken sich aber vorallem die hohen Transmissionsverluste durch die Aussenwände aus. Bruchstein hat eine Wärmeleitfähigkeit von 2.30 W $m^{-1}K^{-1}$, Backstein dagegen nur 0.44 W $m^{-1}K^{-1}$.

Haushaltstrom

Die zweite wesentliche Einflussgrösse ist die Nachfrage nach Haushaltstrom. Der Pro-Kopf-Wert ist abhängig von der Haushaltsgrösse. Beim EFH ist der Verbrauch am kleinsten, da es vier Personen pro Haushalt beherbergt (Abbildung 34). Bei den Objekten mit ausschliesslich Dreizimmerwohnungen (1 und 5) ist er gleich groß. Am stärksten fällt er bei 3_U (nur Zweizimmerwohnungen), 4_U und N_mfh_lo (verschiedene Haushaltsgrössen) ins Gewicht.

Warmwasser

Die kleinsten Anteile bei der Warmwassererzeugung weisen die Objekte 1_U und 4_U auf. Das Warmwasser wird dort fossil erzeugt (Gas oder Öl). Bei 2_U, 3_U sowie 5_U ist der Elektroboiler für die recht hohe Primärenergienachfrage verantwortlich. Beim Neubau N_mfh_lo wird das Warmwasser mit einer Wärmepumpe mit einer Jahresarbeitszahl von 3.5 erzeugt, was zum tiefsten Verbrauch in diesem Bereich führt.

Graue Energie

Eindeutig ist der geringe Einfluss der Baustoffe. Er bewegt sich innerhalb weniger Prozente bei den bestehenden unsanierten Bauten und bis gut zehn Prozent beim Neubau N_mfh_lo. In Abbildung 34 ist gut ersichtlich, wie klein die Differenz der Grauen Energie von unsanierten Objekten und des Neubaus ist. Der Energieinput für Baustoffe besteht bei den unsanierten Objekten einzig aus Unterhaltsmassnahmen, wie zum Beispiel der Wechsel der Küchengeräte alle 15 Jahre.

7.2.3 Totale PE_{ne}-Nachfrage über die Gebäudelebensdauer

Als Gebäudelebensdauer der verschiedenen Sanierungen sowie Neubauten wird einheitlich 100 Jahre gewählt. Bei Betrachtungen über die gesamte Lebensdauer muss jedoch beachtet werden, dass sich viele der angenommenen Prozesse oder Wirkungsgrade in dieser Zeit verändern werden. Zu diesem Zweck wurde das Szenario SOLL geschaffen (siehe Kapitel 4 'Methodik'). Beim Energieangebot und bei der Energienachfrage wird von möglichen Mittelwerten über diese Zeitspanne ausgegangen.
Die Umwandlungswirkungsgraden von End- auf Primärenergie werden sich in dieser Zeit ebenfalls verändern. Solche Wirkungsgrade sind jedoch schwer voraussehbar. Deshalb werden in diesem Bereich die heutigen Wirkungsgraden beibehalten.

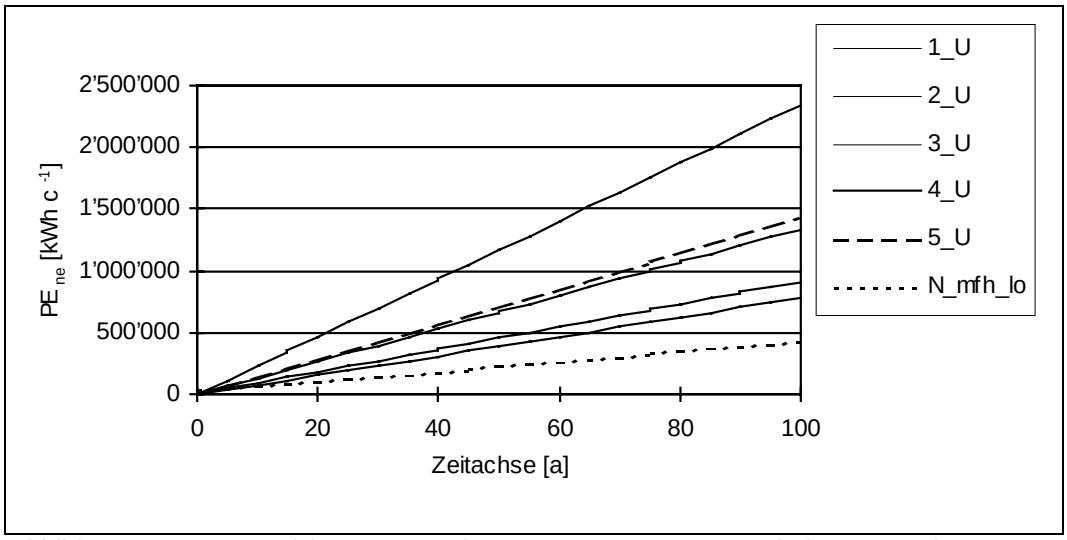


Abbildung 30: PE_{ne}-Nachfrage aus Heizung, Warmwasser, Haushaltstrom und Grauer Energie über den Lebenszyklus bei den unsanierten Varianten U und dem optimierten Neubau in Holzleichtbauweise (Szenario SOLL).

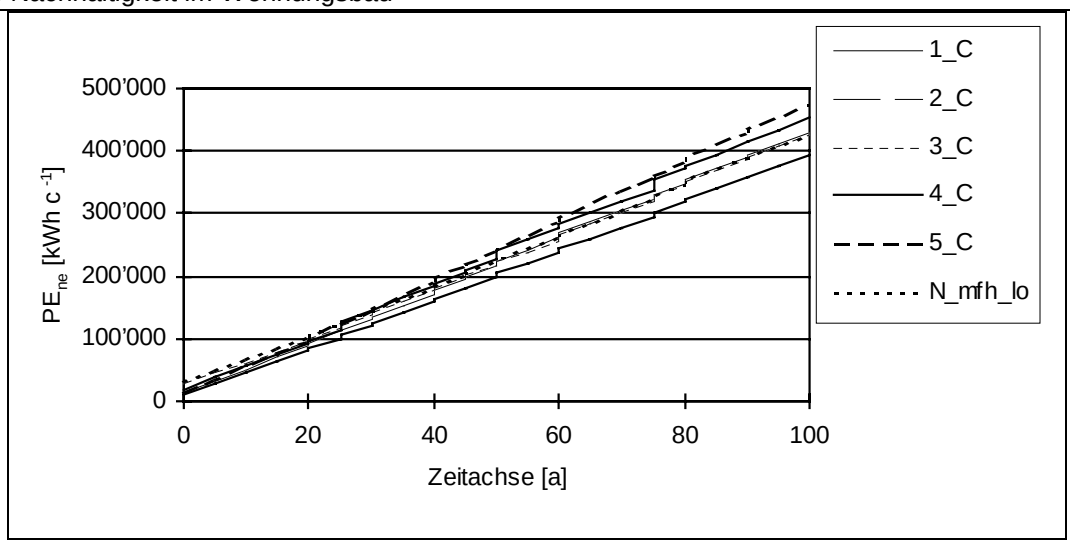


Abbildung 31: PE_{ne}-Nachfrage über den Lebenszyklus der fortschrittlich sanierten Varianten (Szenario SOLL).

Abbildung 30 zeigt die Endenergienachfrage über den Lebenszyklus der unsanierten Varianten und eines Neubaus. Die im vorangegangenen Kapitel beschriebenen unterschiedlichen Ausgangslagen führen zu einer sehr grossen Spreizung der Energielinien (Kurven). Der Neubau (N_mfh_lo) kompensiert seinen Nachteil der höheren Herstellungsenergie gegenüber den unsanierten Objekten durch die tiefere Betriebsenergie schon nach wenigen Jahren.
Dagegen fallen die Unterschiede bei den fortschrittlich sanierten Varianten kaum mehr ins Gewicht (Abbildung 31): Der 'Fächer' schliesst sich, die Kurven formieren sich im Bereich des Neubaues.

7.2.4 Graue Energie für Unterhalt und Erneuerung

Die PE_{ne}-Nachfrage der Grauen Energie teilt sich in Eingriff (Neubau oder Sanierung) und Erneuerung (Unterhalt) auf. Abbildung 32 zeigt, dass bei den Sanierungen dieser Anteil 2% (1_U) bis 21% (1_C) betragen kann. Einzig beim Neubau in konventioneller Massivbauweise (N_mfh_m) macht der Anteil des Neubaus mit 53% etwas mehr aus als die Erneuerungsmassnahmen.

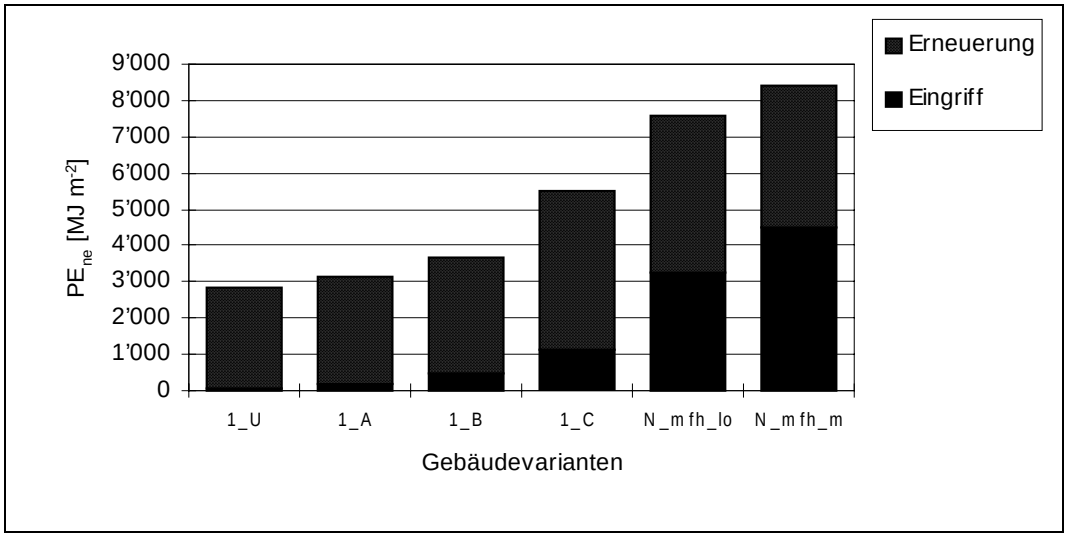


Abbildung 32: Der Split der Grauen Energie für Eingriffs- und Erneuerungsmassnahmen (Unterhalt) bei verschiedenen Sanierungen und zwei Neubauten.

Die Graue Energie für den Teil Erneuerung ist also bei praktisch allen untersuchten Objekten - egal ob Sanierung oder Neubau, MFH oder EFH, usw.- grösser als der Anfangsinput an Grauer Energie. Ins Gewicht fallen vor allem Bauteile mit kurzen Lebensdauern (z.B. Küchengeräte, Fenster usw.) oder mit hohem Gehalt an Grauer Energie (z.B. Metalle, Edelgase usw.). Welche Erneuerungsmassnahmen welchen Anteil ausmachen zeigt Tabelle 23 für den optimierten Neubau (Anteil Eingriff 46%).

Anteil [%]	Bauteilgruppe	Spezifikation	Lebensdauer [Jahre]
19.5%	Fenster	7.3% Edelgase 6.9% Holz 2.9% Glas 2.2% Aluminium 0.3% EPDM	Ost/Nord: 20 Süd/West: 25
17.2%	Sonnenschutz	Holz, Beschläge	25
16.2%	Küchen	9.8% Geräte 6.4% Möbel	15 25
8.6%	Parkettböden	inkl. Versiegelung	25
5.1%	Aussendämmung	Schalung, Zellulose	25
3.9%	Erschliessungslaube	3.3% Stahlkonstr. 0.6% Holzboden	75 75
3.4%	Bäder	Keramik, Chromstahl, PVC	40
26.1%	übriges	Türen, Haustechnik, Wand-schränke, Wandbeläge ...	div.
100.0%	total	nur Erneuerungsmassnahmen	-

Tabelle 23: Die Aufteilung der Erneuerungsmassnahmen beim Neubau N_mfh_mo.

7.2.5 Schlussfolgerungen

- Der im Prozentbereich liegende Anteil der Grauen Energie bei der PE_{ne}-Nachfrage macht bereits deutlich, dass die Art und Weise der vorhandenen Bausubstanz (auch bei baufälligen Objekten) nur einen unwesentlichen Einfluss auf die Gesamtbilanz hat. Viel wichtiger ist die Betriebsenergie.
- Die Diagramme mit den Lebenszyklus-Kurven erklären, dass sich die Gesamtbilanzen völlig verschiedener Objekte angleichen, je besser die Sanierungsmassnahmen sind, das heisst, je tiefer die Betriebsenergie gesenkt werden kann.
- Bei der Aufteilung der Baustoffnachfrage in Neubau und Erneuerung (Unterhalt) ist der Anteil für Erneuerung bei allen untersuchten Sanierungen und Neubauten grösser als der für Neubau- (oder Sanierungs-)massnahmen. Auch dies erklärt den kleinen Einfluss der vorhandenen Bausubstanz.

7.3 Analyse der zeitlichen und baulichen Dynamik

7.3.1 PE_{ne}-Nachfrage über die Lebensdauer

Unterschiedliche Sanierungsmassnahmen bewirken einen unterschiedlich hohen Anfangsinput an Grauer Energie. Je tiefer der Eingriff zu Beginn, desto höher ist normalerweise die Einsparung an Betriebsenergie über die Lebens- und Nutzungsdauer eines Wohngebäudes. Die Extrem-Variante stellt ein Abbruch mit anschließendem Neubau dar.

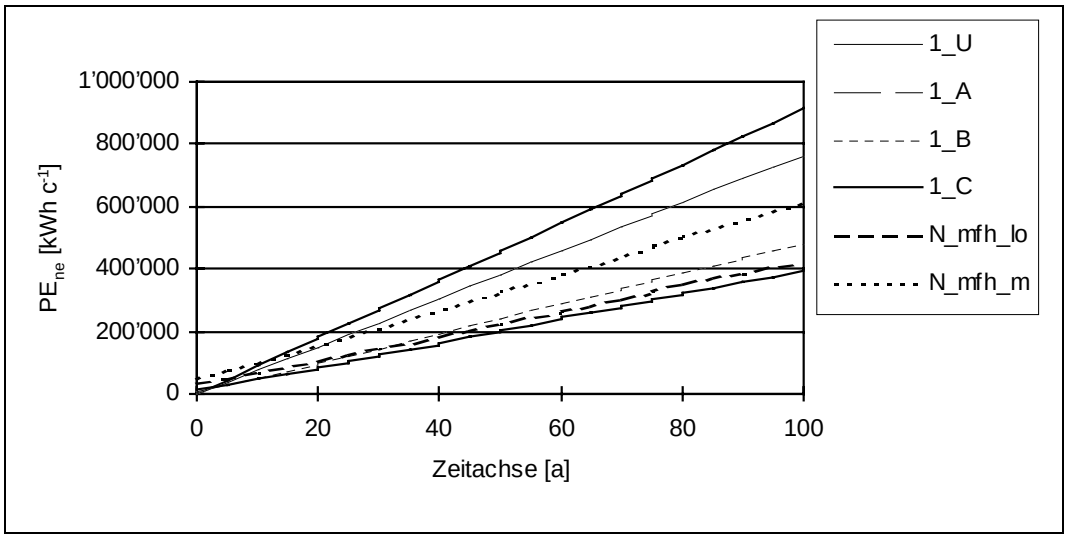


Abbildung 33: Die totale PE_{ne}-Nachfrage über den Lebenszyklus verschiedener Sanierungsstufen beim Objekt 1 sowie zwei Neubauten (Szenario SOLL).

Aus Abbildung 33 ist ersichtlich, wie sich die Baustoffnachfrage - zu Beginn und für Erneuerungsmassnahmen - gegenüber der Betriebsenerige verhält. Zum Zeitpunkt des Eingriffes (Jahr 0) liegen alle Varianten nahe beieinander, die Neubauten leicht darüber. Bereits im Kapitel 7.2 'Einfluss der vorhandenen Bausubstanz' wurde auf den geringen Anteil der Grauen Energie hingewiesen. Die kleinen vertikalen Sprünge auf den Kurven sind auf die Erneuerungsmassnahmen zurückzuführen. Summiert haben sie jedoch den höheren Anteil als der Anfangsinput (Kapitel 7.2.4 'Graue Energie für Unterhalt und Erneuerung').
In Abbildung 33 (vergrössert) ist erkennbar, ab welchem Zeitpunkt der Anfangsinput amortisiert ist (Schnittpunkt mit der Kurve 1_U):

- Stufe A (minimal saniert): 1 Jahr
- Stufe B (durchschnittlich saniert): 2 Jahre
- Stufe C (fortschrittlich saniert): 3 Jahre
- Optimierter Neubau: 6 Jahre
- Konventioneller Massivbau: 14 Jahre

Man beachte, dass sich die Kurven der durchschnittlichen Sanierung (1_B) und des optimierten Neubaus (N_mfh_lo) nach ca. 30 Jahren schneiden. Dies bedeutet, dass bei einer Lebensdauer von 30 Jahren beide Varianten gleich gut abschneiden, bei einer kürzeren die Sanierung, bei einer längeren der Neubau besser sind.
Das beste Resultat erreicht die fortschrittliche Sanierung. Überraschend ist, dass deren Kurve sogar noch leicht flacher ist als die des optimierten Neubaus. Einen Schnittpunkt wird es also nie geben. Dafür ist weder die Heiz- noch die Warmwasserenergie verantwortlich, sondern der Haushaltstrom: durch den Anteil an kleinen Wohnungen beim Neubau ist die PE_{ne}-Nachfrage um über 100 kWh $c^{-1}a^{-1}$ höher als bei der Sanierung (nur $3^1/_2$-Zimmerwohnungen).

7.3.2 Eindringintensität verschiedener Sanierungspakete

Auf die grossen Unterschiede bei der PE_{ne}-Nachfrage der unsanierten Objekte wurde bereits im Kapitel 7.2 'Einfluss der vorhandenen Bausubstanz' eingegangen. Abbildung 34 und Abbildung 35 zeigen dies nochmals auf eine andere Art: Je besser die Sanierungsmassnahmen sind, desto mehr gleichen sich die Gesamtbilanzen an.

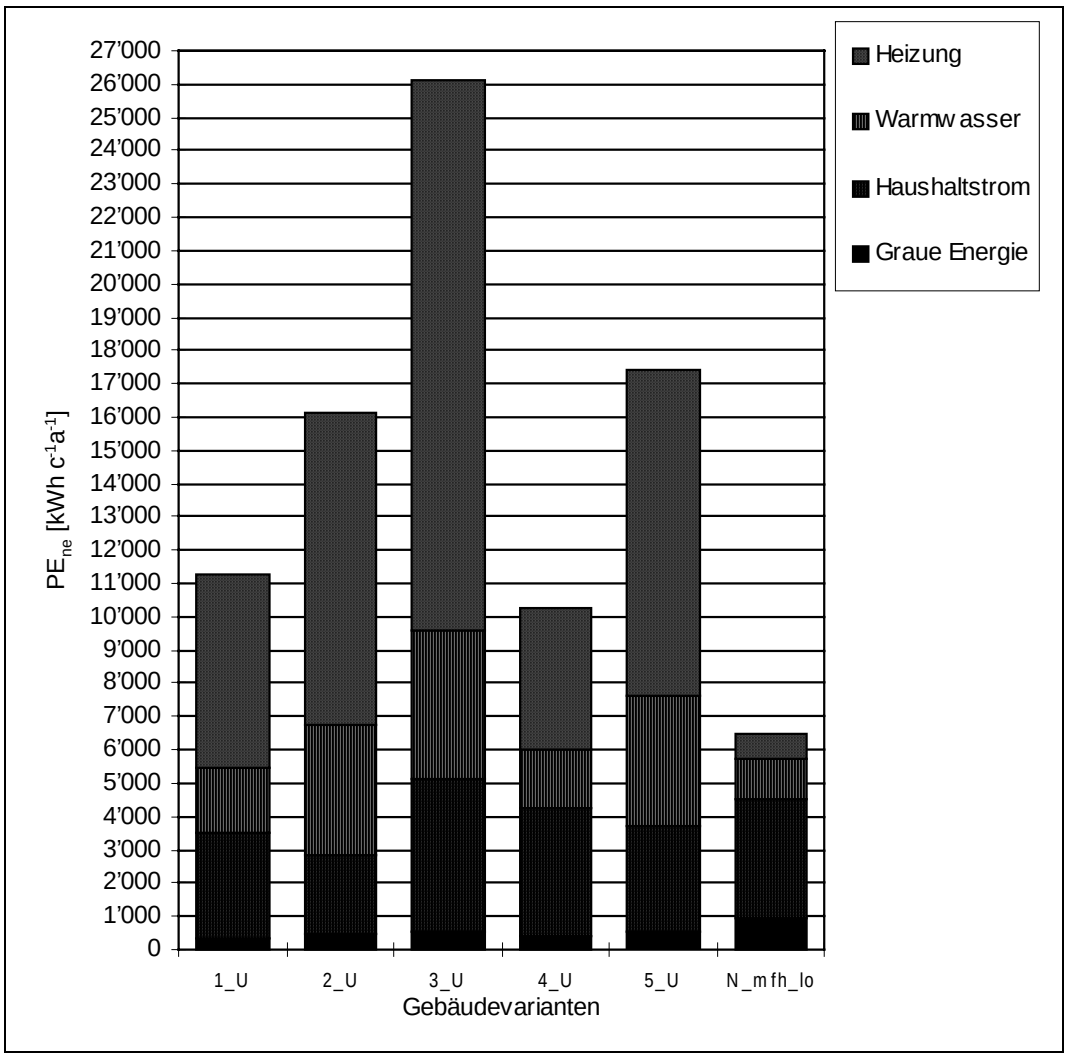


Abbildung 34: Totale PE_{ne}-Nachfrage der Objekte bei Sanierungsstufe U (IST).

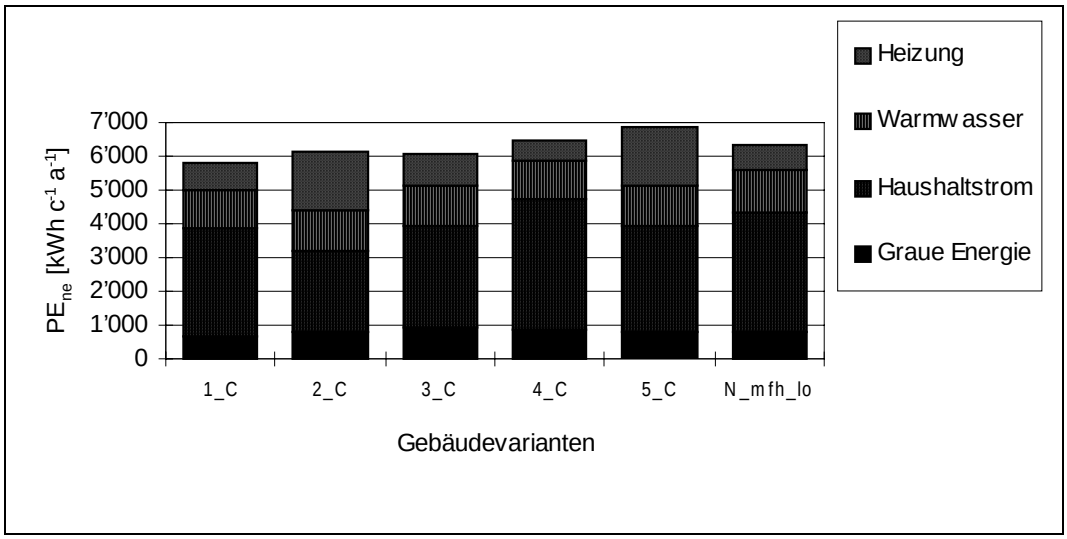


Abbildung 35: Totale PE_{ne}-Nachfrage der Objekte bei Sanierungsstufe C (IST).

Bei zunehmender Erneuerungsintensität ergeben sich auch Verschiebungen in der Rangfolge. Das im unsanierten Zustand schlechteste Objekt 3 'arbeitet' sich mit fort-

schreitender Sanierungsintensität auf Platz drei vor. Dies ist vorallem darauf zurückzuführen, dass bei seinem schlechten mittleren k-Wert grosse Verbesserungen möglich sind. Dagegen bleibt Objekt 5 am Schluß des Feldes. Es fällt von Rang fünf auf Rang sechs zurück. Der hohe EBF-Anteil pro Person (55.2 m^{-2}), grosse Raumhöhen (2.90 m) sowie der hohe Treppenhausanteil pro Wohnung lassen sich nicht korrigieren.
Erstaunlich ist, dass das EFH trotz hohem EBF-Anteil pro Person immer im Mittelfeld bleibt (Platz vier bis zwei). Mitverantwortlich dafür ist der recht tiefe Bedarf an Haushaltstrom, denn die Höhe des Strombedarfes berechnet sich als Funktion der Haushaltgrösse. Dagegen kann das Hochhaus (Objekt 4) den Vorteil seiner Kompaktheit nicht behalten: es wird von Platz eins auf Platz vier zurückversetzt ab. Der hohe Haushaltstromanteil der vielen kleineren Wohnungen schlägt durch.
Bei allen Objekten zeigt sich: Die einfachste und wirkungsvollste Massnahme ist, die hohe Heizenergie durch eine gute Wärmedämmung auf ein Minimum zu reduzieren.
Die Vorteile kompakter Bauweise sowie gemeinschaftlicher Nutzungen (Haushaltstrom) sind beim Objekt 1 auf ideale Weise vereinigt. Bereits die durchschnittliche Sanierung 1_B liegt im Bereich des optimierten Neubaus (6'617 gegenüber 6'490 kWh $c^{-1}a^{-1}$). Alle anderen Objekte (ausser Nr. 5) schaffen dies erst mit fortschrittlichen Sanierungsmassnahmen (C).
In Kreisen der Ökobilanzierung im Bauwesen ist es üblich, als Bezugsgrösse ein gebäudespezifisches Mass zu verwenden, zum Beispiel die Energiebezugsfläche EBF in m^2. Zudem wird die Energie meistens in MJ anstelle kWh angegeben. Abbildung 36 zeigt die Ergebnisse aus Abbildung 35 mit Bezug auf die EBF (MJ $m^{-2}a^{-1}$).

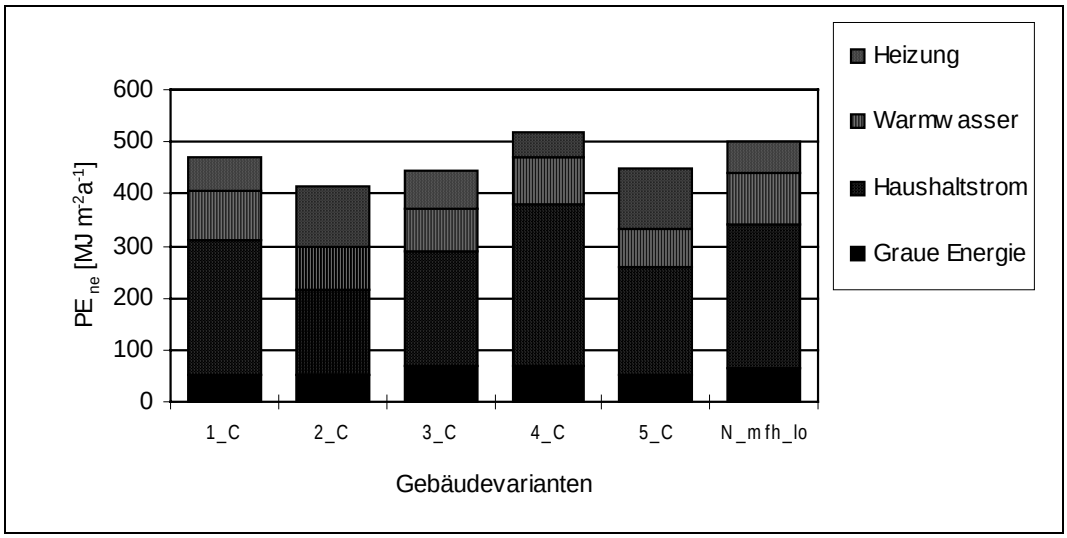


Abbildung 36: Totale PE_{ne}-Nachfrage der Objekte bei Sanierungsstufe C (IST). Als Vergleich zu Abbildung 35 wird hier für die Energie MJ und als Bezugsgrösse die EBF verwendet.

Da nun bei dieser Betrachtung die Grösse und die Personenbelegung der Wohnungen nicht mehr berücksichtigt werden, präsentiert sich ein anderes Bild. Zum Beispiel wird beim Einfamilienhaus (2_C) nun nicht mehr einkalkuliert, dass weniger Personen mehr Raum beanspruchen. So gesehen hat es den tiefsten Primärenergieverbrauch aller untersuchten Objekte. Auf diese Thematik wird in Kapitel 8.8 ‚Energieflüsse pro Quadratmeter oder pro Kopf' eingegangen.

7.4 Bilanzierung der Stoffflüsse

7.4.1 Bewertung nach Stoffkategorien (Sanierungen + Neubauten)

Die Graue Energie stellt einen guten Indikator zur Bewertung von Stoffflüssen dar. Sie ist jedoch nicht die einzige Beurteilungsgrösse. Faktoren wie Recyclingfähigkeit (Beanspruchung von Deponieraum) oder Erschöpfbarkeit von Ressourcen müssen ebenfalls in die Bewertung einfließen. Sie können jedoch nicht direkt mit der Energie verrechnet und verglichen werden. Sie werden folgendermaßen erfasst: Sämtlichen verwendeten Baustoffen wurde je eine der in Tabelle 2 aufgelisteten Kategorien zugeordnet.

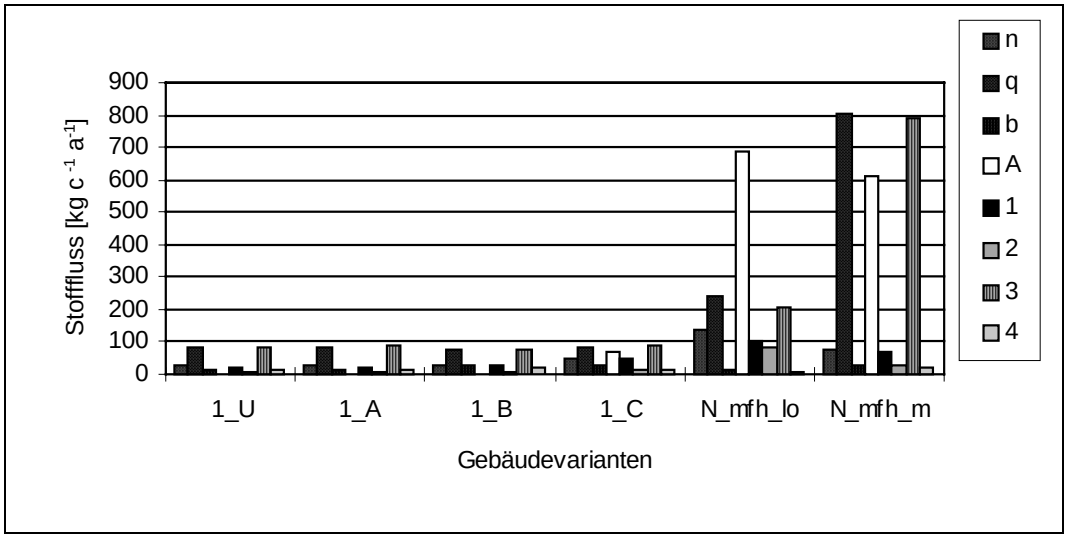


Abbildung 37: Masse der Stoffflüsse der verschiedenen Sanierungsstufen beim Objekt 1 und zwei Neubauten.

Abbildung 37 zeigt die Grössenordnung der Stoffflüsse, die durch die Bautätigkeit sowie Unterhalt/Erneuerung ausgelöst werden.
Die Stoffflüsse der einzelnen Kategorien werden folgendermassen beurteilt:

n In der Kategorie n sticht der optimierte Neubaus durch seinen hohen Holzanteil heraus. Dies ist jedoch nicht problematisch, solange die Nachfrage das Angebot nicht überschreitet.

q Die beiden Neubauten heben sich deutlich von den Sanierungen ab. Der optimierte vor allem durch das UG in Beton, der konventionelle durch die gesamte Tragstruktur. Auch dies kann als unproblematisch angesehen werden, da diese Stoffe eben praktisch unerschöpflich sind.

b Die Anteile sind bei allen Varianten praktisch gleich und gering.

A Beim Aushub überwiegen natürlich die Neubauten. Der optimierte hat durch das Erdregister sogar noch einen leicht höheren Anteil. Fazit: Dieser Aushub der Neu-bauten muss irgendwo deponiert werden, in dieser Hinsicht sind also Sanierungen den Neubauten vorzuziehen. Wird allerdings im konkreten Fall ein Altbau durch einen Neubau ersetzt, ist der Aushub ja bereits vorhanden.

1/2 In diesen beiden ‘unproblematischen’ Kategorien hat wiederum der optimierte Neubau durch seinen hohen Holzanteil den grössten Wert.

3 Der konventionelle Massivbau verursacht einen rund viermal höheren Stoffluss an schwierig rezyklierbaren Materialien als der optimierte Holzleichtbau. Im Vergleich zu den Sanierungen ist es sogar mehr als das Achtfache! Diese Stoffe werden irgendwann einmal Deponieraum beanspruchen. Auch in dieser Hinsicht sind deshalb Sanierungen Neubauten (insbesondere Massivbauten) vorzuziehen. Doch auch hier muss wie bei Kategorie A gesagt werden, dass bei einem konkreten Objektvergleich oftmals das Untergeschoß nicht vollständig rück- und neugebaut werden müsste, sondern eventuell mit einigen Anpassungen direkt wiederverwendet werden könnte.

4 Die Anteile sind bei allen Varianten praktisch gleich hoch. Dieser geringe Anteil ist aus Sicht von Stoffflüssen vernachlässigbar, kann aber aus toxikologischer und baubiologischer Sicht von Bedeutung sein.

Wie schon erwähnt, werden bei den Stoffflüssen in dieser Arbeit nur die neu eingesetzten Baustoffe berücksichtigt. Der Einbezug vorhandener Baustoffe (Entsorgung) würde aus ökologischer Sicht zu einem verzerrten Bild führen. Erstens können Umwelteinwirkungen, die bei der Baustoff-Herstellung entstanden sind, ja nicht mehr rückgängig gemacht werden und zweitens ist die Entsorgung nicht erneuerbarer Stoffe bereits vorprogrammiert. Es werden also nur die anstehenden Entscheidungen betrachtet, frühere Fehler können nicht mehr korrigiert werden.

Nicht rezyklierbares Baumaterial wird also grundsätzlich einmal Deponieraum beanspruchen. Im Extremfall Abbruch mit Neubau geschieht dies heute, bei der Sanierung in der Zukunft. Viel wichtiger ist die Beachtung folgender zwei Punkte:

1. Nicht nachwachsende oder nicht rezyklierbare Baustoffe müssen mit nachwachsenden resp. rezyklierbaren ersetzt werden.
2. Die Betriebsenergie muss so rasch und so tief wie möglich gesenkt werden.

7.5 Wann ist Nachhaltigkeit erreicht?

7.5.1 Strenge Nachhaltigkeit

Um strenge Nachhaltigkeit zu erreichen, darf die Energienachfrage (Verbrauch) eines Gebäudes ein bestimmtes Angebot aus nur erneuerbaren Energiequellen nicht überschreiten. Diese Definitionen werden in Kapitel 4.2.6 'Bilanzmodul' beschrieben.

7.5.2 Gegenüberstellung der untersuchten Objekte

Wie weit sind nun die untersuchten Objekte (Sanierungen und Neubauten) von der Grenze der Nachhaltigkeit entfernt? Als Systemgrenze der Bilanzierung wurde der UCPTE-Raum gewählt. Man beachte, dass dieser bei der Elektrizitätsproduktion nur über einen bescheidenen Anteil an erneuerbaren Energien von ca. 15% verfügt (Wasserkraft).
Die Unterschiede der beiden Szenarien IST und SOLL sind in Kapitel 4.1.3 ‚Szenarien' beschrieben.

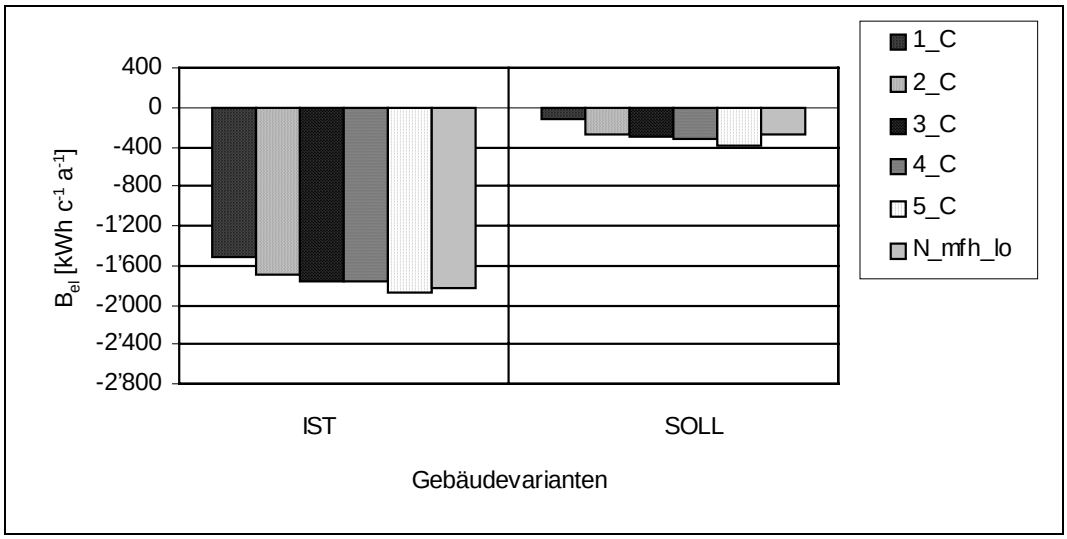


Abbildung 38: Die B_{el} verschiedener fortschrittlich sanierter Objekte und eines Neubaus.

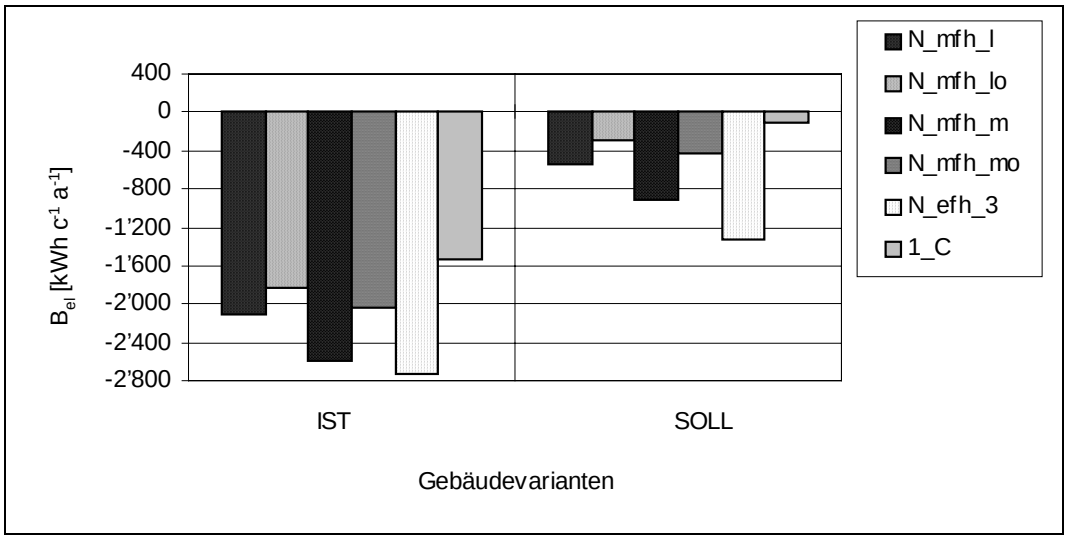


Abbildung 39: Die B_{el} verschiedener Neubauten und einer Sanierung.

Abbildung 38 und Abbildung 39 erklären, dass keines der untersuchten Objekte - weder Neubau noch Sanierung - die Grenze der Nachhaltigkeit bei den gewählten Systemgrenzen erreicht. Überall ist die B_{el} negativ, das heisst, die Nachfrage überschreitet das Angebot. Die beste Bilanz erreicht die fortschrittliche Sanierung des Objektes 1 (1_C) mit -1'526 kWh $c^{-1}a^{-1}$ im IST und -112 kWh $c^{-1}a^{-1}$ im SOLL.

7.5.3 Bilanzausgleich mit Photovoltaik-Fläche

Bei allen Objekten wurde also eine zu hohe Energienachfrage resp. ein Manko beim Angebot festgestellt. Nachhaltigkeit (im energetischen Sinn) kann nun durch Bereitstellen zusätzlicher erneuerbarer Energie erreicht werden. Zur Verfügung stehen entweder Solarthermie oder Photovoltaik (PV). PV hat den Vorteil, dass sie quasi unabhängig vom restlichen Haustechnikkonzept implementiert werden kann und eine relativ geringe 'energetische Rückzahlfrist' von wenigen Jahren hat. Wegen dem hohen Anteil an Haushaltstrom kann PV direkt zur Defizitdeckung beitragen. Wird zur Wärmebereitstellung eine Wärmepumpe eingesetzt, kann PV indirekt helfen, das Strommanko zu decken (PV-Strom * Speicherwirkungsgrad * JAZ = Wärme).
PV-Fläche kann nun zugebaut werden, bis die Bilanz B_{el} gleich null ist. Dieser Ansatz hat den Vorteil, die Grösse des Mankos verständlich darzustellen und somit zu relativieren.

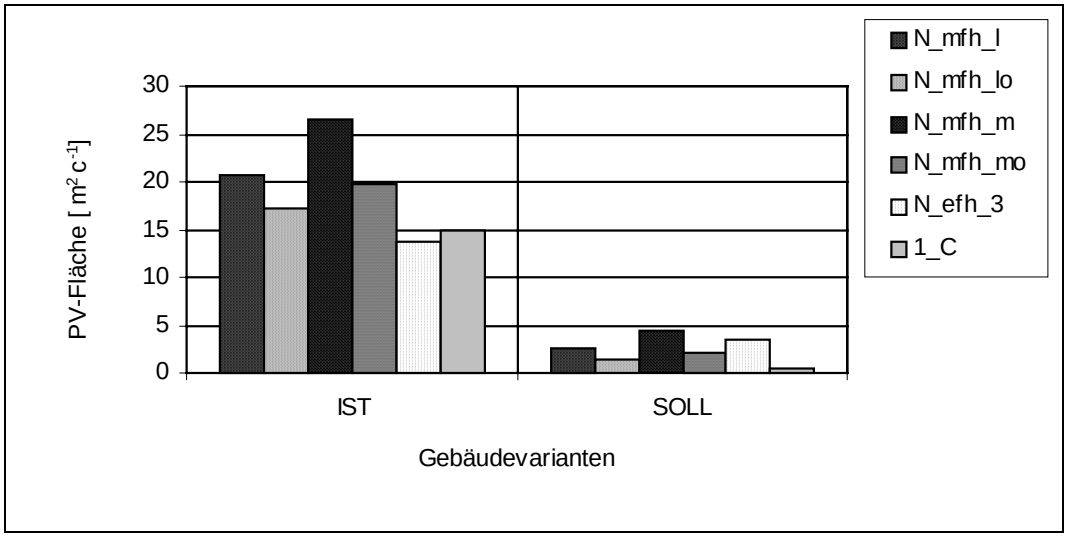


Abbildung 40: PV-Fläche die pro Person nötig ist, um Nachhaltigkeit bei den verschiedenen Neubauten und der Sanierung 1_C zu erreichen.

Abbildung 40 zeigt die PV-Fläche, die pro Person nötig ist, um strenge Nachhaltigkeit zu erreichen. Vorallem fallen natürlich die Differenzen der beiden Szenarien IST und SOLL auf. Im IST mit dem heutigen Angebot erneuerbarer Energie braucht es doch im Schnitt 19 m^2 pro Person, im SOLL mit dem ausgebauten Angebot nur noch 3 m^2 pro Person. Ein sinnvolles Konzept muss auf jeden Fall die beiden Strategien - Erhöhung des Angebotes und Reduzierung der Nachfrage - miteinander koppeln.

7.5.4 Systemgrenze Schweiz anstelle Europa (UCPTE-Raum)

Entscheidenden Einfluss auf die Resultate bei der Ökobilanzierung hat wie gesagt die Wahl der Systemgrenzen. Da Umweltbelastung ein globales Problem darstellt, macht die Wahl von politischen Systemgrenzen grundsätzlich wenig Sinn, weshalb bei dieser Arbeit der UCPTE-Raum als Bilanzierungsgrenze gewählt wurde.
Die Schweiz hat jedoch mit dem höheren Anteil an Wasserkraft (57%) gegenüber Europa im Angebot an erneuerbaren Energieträgern einen entscheidenden Vorteil. Deshalb ist es interessant zu sehen, wieviel rascher Nachhaltigkeit beim schweizerischen Energieangebot erreicht wäre.

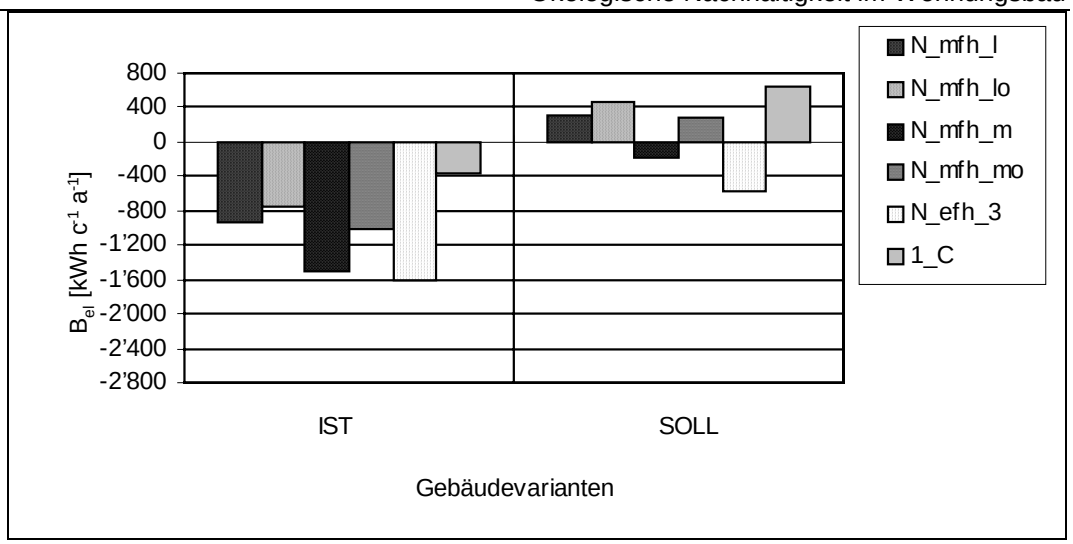


Abbildung 41: Die Bilanzzahl elektrisch B_{el} mit Systemgrenze Schweiz bei den verschiedenen Neubauten und der Sanierung 1_C.

Auch im Szenario IST erreicht noch keines der untersuchten Objekte strenge Nachhaltigkeit. Erst im SOLL haben vier der sechs Gebäude eine positive B_{el}. Die beste Variante ist wiederum 1_C mit über +600 kWh $c^{-1}a^{-1}$, die schlechteste das EFH mit über -500 kWh $c^{-1}a^{-1}$, was allerdings mit ca. 2 m^2 PV-Fläche pro Person ausgeglichen werden könnte Die PV-Technik wurde im Szenario SOLL optimiert (Wirkungsgrad Zellen und Wechselrichter usw.).

7.6 Unterschiedliche Wohnungsgrössen beim Neubau

7.6.1 Grundlagen

Heute ist ein Trend zu immer kleineren Haushaltsformen erkennbar. Die Neubautätigkeit reagiert auf diese Nachfrage mit dem Angebot unterschiedlicher Wohnungsgrössen. Auch der in diesem Projekt verwendete MFH-Neubau bietet Zwei-, Drei- und Vierzimmerwohnung an. Dies entspricht in etwa der Aufteilung der neu erstellten Wohnungen in der Schweiz (BfS 1990). Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass kleinere Wohnungen einen höheren Haushalts-Elektrizitätsverbrauch pro Kopf haben als grosse. Zwei der untersuchten Sanierungsobjekte (1 und 5) haben dagegen ein homogenes Angebot an Dreizimmerwohnungen. Dies stellt im Bereich Haushaltstrom einen Vorteil dar.

7.6.2 Berechnungen und Kommentar

Anstelle eines Neubaus mit verschiedenen Wohnungsgrössen bietet sich nun auch die Möglichkeit, einen Neubau mit nur Grosswohnungen als Referenzobjekt zu nehmen. Die Resultate dazu sind in Abbildung 42 ersichtlich.

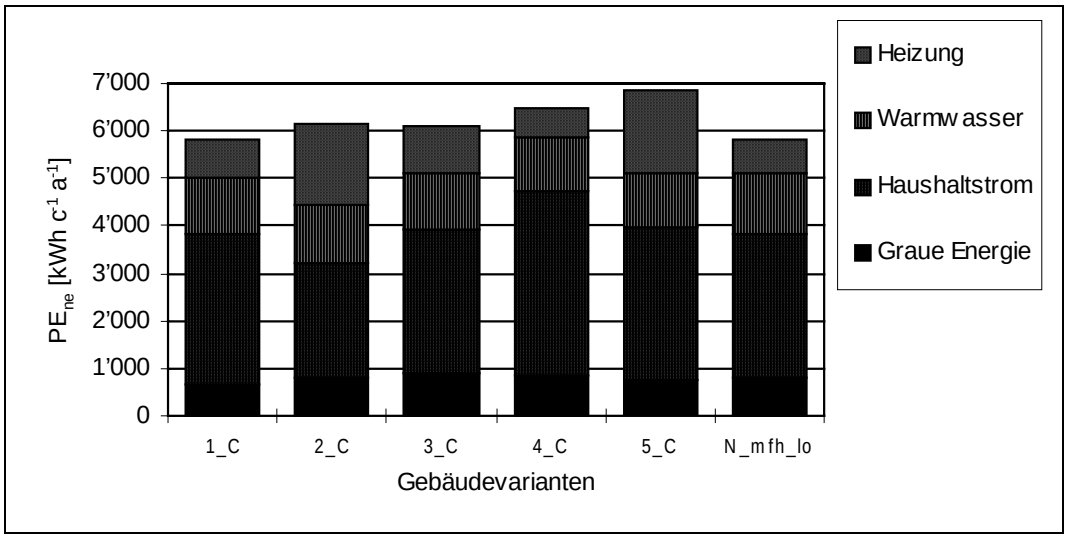


Abbildung 42: Die totale PE_{ne}-Nachfrage mit einem Referenzneubau in Leichtbauweise mit nur Drei- und Vierzimmerwohnungen.

Die Belegung beim Neubau mit nur Drei- und Vierzimmerwohnungen bleibt sich annähernd gleich (18.8 gegenüber 19.0 Personen pro Objekt). Dagegen sinkt der Verbrauch an Haushaltsstrom beachtlich. Jetzt ist nur noch Objekt 1 etwas besser als der Neubau!

7.6.3 Schlussfolgerungen

Die Wahl der Wohnungstruktur (Anzahl und Grösse) ist ein wichtiger Faktor, der die Frage 'Sanierung oder Neubau' entscheidend beeinflußt. In diesem Projekt werden als Referenzobjekte MFH-Neubauten mit unterschiedlichen Wohnungsgrössen gewählt (Zwei- bis Vierzimmerwohnungen). Damit wird der durchschnittlichen Neubautätigkeit in der Schweiz Rechnung getragen. Damit können allgemein gültige Aussagen gemacht werden. Fragen zum Vergleich von spezifischen Einzelobjekten müssen von Fall zu Fall geklärt werden.

7.7 Szenarien beim Haushaltsstromverbrauch

7.7.1 Grundlagen

Das vorangehende Kapitel beschreibt die Wichtigkeit des Haushaltstromverbrauches. Im Kapitel 4.2.2 ‚Betriebsenergiemodul' werden die Hintergründe und Annahmen der drei grundlegenden Haushaltstrom-Szenarien erläutert:

- heutiger Durchschnittsverbrauch (1992)
- Best Available Technology (BAT)
- Best Future Technology (BFT)

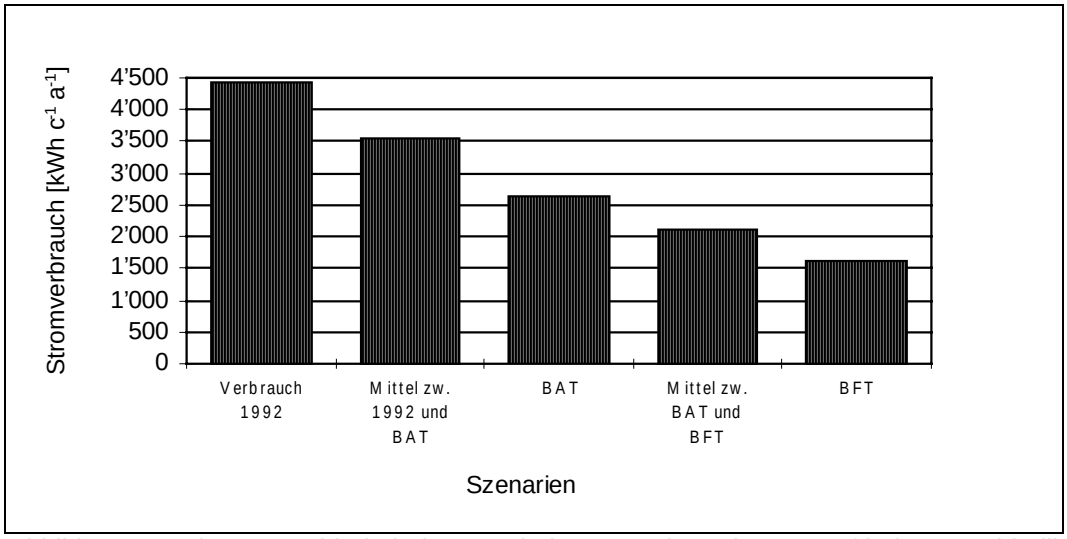


Abbildung 43: Die Unterschiede beim Haushaltstromverbrauch pro Kopf bei unterschiedlichen Szenarien beim Objekt N_mfh_lo.

In Abbildung 43 sind die Auswirkungen des Haushaltstromverbrauches pro Kopf bei unterschiedlichen Szenarien beim Objekt N_mfh_lo ersichtlich (Mix von Zwei- bis Vierzimmerwohnungen). Dieser kann sich in den beiden Extremen (1992 und BFT) bis zu 280% unterscheiden.

7.7.2 Berechnungen und Kommentar

Die folgenden zwei Abblidungen beschreiben die PE_{ne}-Nachfrage bei unterschiedlichen Annahmen im Haushaltsstrom.

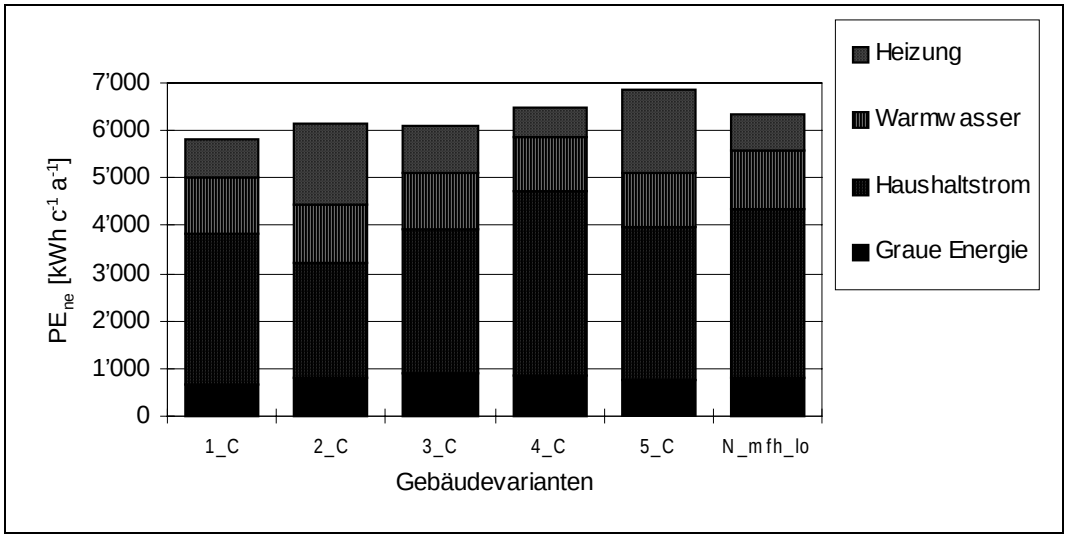


*Abbildung 44: Die totale PE_{ne}-Nachfrage der verschiedenen fortschrittlichen Sanierungen und dem Neubau N_mfh_lo, wenn beim Haushaltstrom vom Szenario **'Mittel zwischen 1992 und Best Available Technology'** ausgegangen wird.*

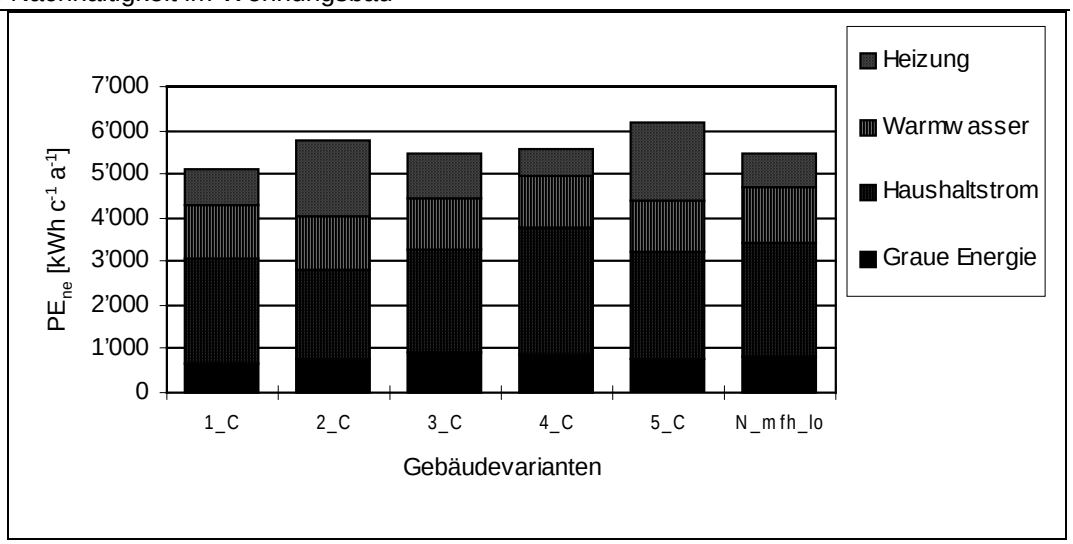


*Abbildung 45: Die totale PE_{ne}-Nachfrage der verschiedenen fortschrittlichen Sanierungen und dem Neubau N_mfh_lo, wenn beim Haushaltstrom vom Szenario **'Best Available Technology'** ausgegangen wird.*

Das Einfamilienhaus (2_C) ist ein Bautyp, der durch den Mehrpersonenhaushalt einen relativ kleinen Haushaltstromverbrauch pro Kopf hat, durch das schlechte A/EBF-Verhältnis aber einen recht grossen Heizenergiebedarf aufweist. Im Gegensatz dazu steht das Hochhaus (4_C): Kleiner Heizenergieverbrauch bei grossem Haushaltstromverbrauch wegen den kleinen Wohnungen. Die Graue Energie ist wegen dem kleineren Gebäudehüllenanteil pro Kopf grundsätzlich beim Hochhaus geringer, wird aber durch den höheren Anteil an Küchengeräten und dgl. der kleinen Wohnungen wieder kompensiert, so dass die Graue Energie in beiden Fällen etwa gleich groß ist.
Zu beachten sind nun vorallem die beiden beschriebenen Extreme Einfamilienhaus (2_C) und Hochhaus (4_C). Beim durchschnittlichen Gerätepark (Abbildung 44) fällt der relativ kleine Stromverbrauch des EFH nicht so stark ins Gewicht wie bei den anderen Bauten. Die gesamte PE_{ne}-Nachfrage ist etwas geringer als beim Neubau N_mfh_lo. Dagegen schlagen bei der Ausstattung mit fortschrittlichen Geräten (Abbildung 45) die anderen Anteile (vor allem der Heizenergiebedarf) des EFH durch: die gesamte PE_{ne}-Nachfrage ist nun etwas höher als beim Neubau!
Genau konträr dazu verhält sich aus den erwähnten Gründen das Hochhaus. Bei durchschnittlichen Geräten ist es etwas schlechter, bei den besten Geräten ungefähr gleich gut wie der Neubau.

7.7.3 Schlussfolgerungen

Die Wahl des Geräteparkes ist also ein weiterer, sehr sensitiver Faktor, welcher über die Frage Neubau oder Sanierung entscheiden kann. Grundsätzlich wird in diesem Projekt im Szenario IST das Mittel vom heutigen Verbrauch und BAT verwendet. Dies entspricht etwa der Geräteausstattung, die heute durchschnittlich neu eingebaut wird. Im Szenario SOLL wird mit dem Mittel zwischen BAT und BFT gerechnet, was einer Ausstattung über den Lebenszyklus entsprechen könnte.

8 Parameterstudien

Sofern nichts anderes vermerkt ist, wurde im Kapitel 8 ‘Parameterstudien’ als Bezugsgrösse die EBF verwendet und mit dem Szenario IST gerechnet.

8.1 Massivbau versus Leichtbau

8.1.1 Einleitung und Kurzinformation

Ausgangslage

Wohnungsbau in der Schweiz bedeutet auch heute noch in erster Linie Massivbau. Diese konventionelle Bauweise, die sich hauptsächlich der Materialien Backstein, Kalksandstein und Stahlbeton bedient, hatte im Wohnungsbau lange Zeit praktisch ein Monopol. In den letzten Jahren hat mit dem Ruf nach mehr Ökologie, tieferen Baukosten und kürzerer Erstellungszeit Leichtbauweisen in Holz an Terrain gewonnen. Immer wieder wird der Holzleichtbau aber bezüglich Herstellungsenergie, Lebensdauer oder Wärmespeicherfähigkeit in Frage gestellt.

Fragestellungen

- Wie groß ist der Unterschied an Herstellungsenergie der beiden Bauweisen?
- Wie gross ist die Streubreite bezüglich Herstellungsenergie innerhalb der Holzbau- bzw. innerhalb verschiedener Massivbauweisen.
- Kann ein Massivbau im Verlauf seiner Lebensdauer den erhöhten Herstellungsenergiebedarf durch verringerte Betriebsenergie einsparen?
- Wie groß ist der Einfluss unterschiedlicher Backsteinherstellung (energieintensivere oder -extensivere Produktion) oder wenn anstelle Backstein Kalksandstein verwendet wird?

Die wichtigsten Erkenntnisse

Die Gebäudelebensdauer von Massiv- und Leichtbauten hängt entscheidend von Faktoren wie Unterhalt oder Benutzeransprüchen ab. Sie kann deshalb nicht als Frage des Systems beantwortet werden. Dagegen lösen Leichtbauten geringere Stoffflüsse als Massivbauten aus.
Die Gesamtbilanz von Heizenergie und Grauer Energie der beiden Bauweisen hängt entscheidend von der Typologie der Vergleichsobjekte ab. Werden einander zwei wärmetechnisch identische Objekte gegenübergestellt (gleiche Gebäudehüllen-k-Werte), sind die Unterschiede marginal. Vergleicht man jedoch heute marktübliche Systeme, haben die Leichtbauten wegen dem tieferen Heizenergiebedarf die bessere Bilanz.
Der Einfluss von Backsteinen aus unterschiedlichen Herstellerwerken auf die Graue Energie sowie die gesamten Energieflüsse ist marginal. Die These, dass Kalksandstein wegen der geringeren Grauen Energie ökologischer sei, kann in dieser Form nicht unterstützt werden. Der Backstein verfügt über die kleinere Dichte und geringere Wärmeleitfähigkeit. Bei wenig gedämmten Objekten mit langen Lebensdauern können deshalb Backsteinbauten besser abschneiden.

8.1.2 Lebensdauern der beiden Bauweisen

Problemstellung

Diese Frage kann nur nach Ermessen beantwortet werden. Am Holzleichtbau wird immer wieder kritisiert, dass seine tiefere Herstellungsenergie keine Vorteile bringe, da sich Holz während seines Einsatzes als Bauteil verformen und abwittern kann und deshalb gegenüber dem Massivbau auch eine kürzere Lebensdauer aufweise. Tatsächlich ließen Fehler, die in frühen Holzleichtbaukonstruktionen gemacht wurden, solche Rückschlüsse zu. Diese Formulierung jedoch als allgemeingültige Wahrheit zu postulieren ist unzulässig. In der Tat existieren zum Beispiel alte Bauernhäuser aus Holz seit mehr als 200 oder 300 Jahren. Ausschlaggebend für diese langen Lebensdauern sind einerseits materialgerechte Konstruktionen wie grosse Vordächer oder die Verwendung von Hartholz in Erdreichnähe oder aber ein sorgfältiger Unterhalt durch die Benutzer. Andererseits sind Beispiele von Betonhochhäusern aus den USA bekannt, die aus technischen und sozialen Gründen nach 30 Jahren wieder abgebrochen wurden.

Empfehlungen

Die Frage der Lebensdauer dieser beiden unterschiedlichen Systeme kann deshalb nicht abschließend beurteilt werden. Entscheidender als die Systemwahl ist die Konstruktionsweise, der Unterhalt und die Benutzeransprüche. Die Wahl gleicher Gebäudelebensdauern der beiden Systeme erscheint sinnvoll. Im Exkurs ‘Gebäudelebensdauer’ wird auf den Einfluss unterschiedlicher Lebensdauern näher eingegangen.
In der Lebensdauerfrage bei Neubauten und Sanierungen wird ebenfalls kein Unterschied gemacht. Wird ein bestehendes Objekt tiefgreifend erneuert, so kann davon ausgegangen werden, dass diejenigen Bauteile, denen als Lebensdauer die totale Gebäudelebensdauer zugeordnet wurde (Tragstruktur), für einen gesamten nächsten Lebenszyklus funktionstüchtig sind. Elemente, die periodisch erneuert werden müssen (z.B. Fassadenelemente, Innenausbau usw.), haben ohnehin bei Sanierungen wie auch bei Neubauten den höheren PE_{ne}-Anteil an der Grauen Energie als Elemente mit Gebäudelebensdauer (Kapitel 7.2.4 ‘Graue Energie für Unterhalt und Erneuerung’).

8.1.3 Graue Energie von Massiv- und Leichtbau

Berechnungen und Kommentar

Abbildung 46 zeigt die PE_{ne}-Nachfrage von Herstellungsenergie der verschiedenen Neubauten im Vergleich mit einem EFH (N_efh_3) und einer optimierten Sanierung (1_C). Der optimierte Leichtbau liegt erwartungsgemäß etwas über der konventionellen Holzleichtbauweise. Dies ist vorallem auf die höheren Anteile an Metall (zusätzliche Lüftung) sowie Edelgase (Xenonfüllung in Fenstern anstelle Argon/Krypton) zurückzuführen.

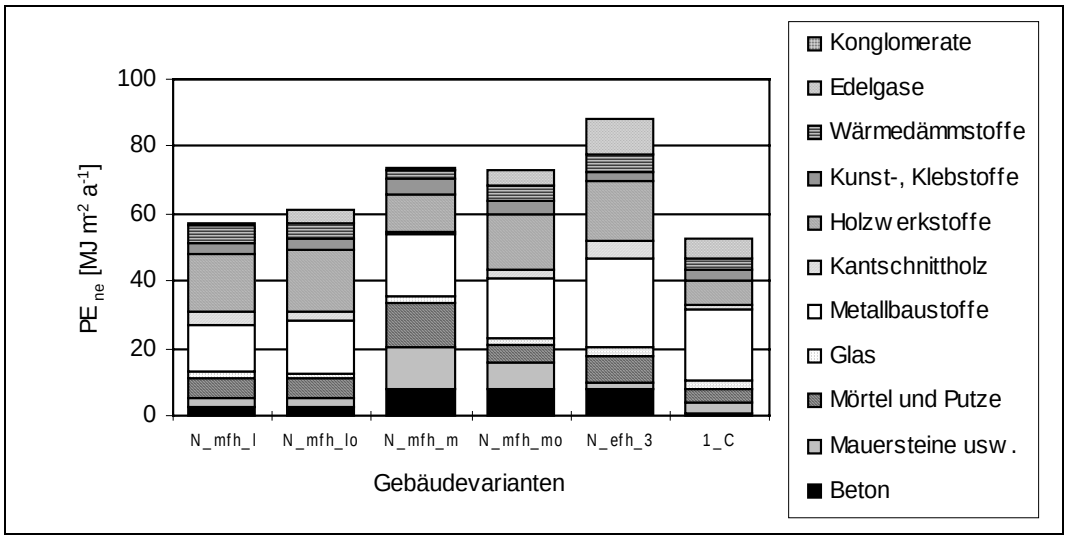


Abbildung 46: Herstellungsenergie auf Primärenergiebasis nach Baustoffklassen der verschiedenen Massiv- und Leichtbauten sowie einer Sanierung.

Anders ist die Situation bei den beiden Massivbauten. Bei der optimierten Variante tritt anstelle einer massiven Aussenschale eine Holzverschalung und die Unterlagsböden aus Zement werden durch solche in Trockenbauweise ersetzt. Dies führt dazu, dass die totale

Herstellungsenergie trotz höherem Holz- und Edelgasanteil leicht tiefer ist als bei der konventionellen Variante.
Der Unterschied von Massiv- oder Leichtbau ist jedoch nicht gravierend. Er beträgt im extremsten Fall - zwischen den konventionellen Varianten N_mfh_l und N_mfh_m - nur 17 MJ $m^{-2}a^{-1}$ (24%). Dagegen beinhaltet das EFH klar die grösste Herstellungsenergie, die Sanierung die tiefste.
Abbildung 47 setzt die Graue Energie wiederum in Relation zu den gesamten Energieflüssen.

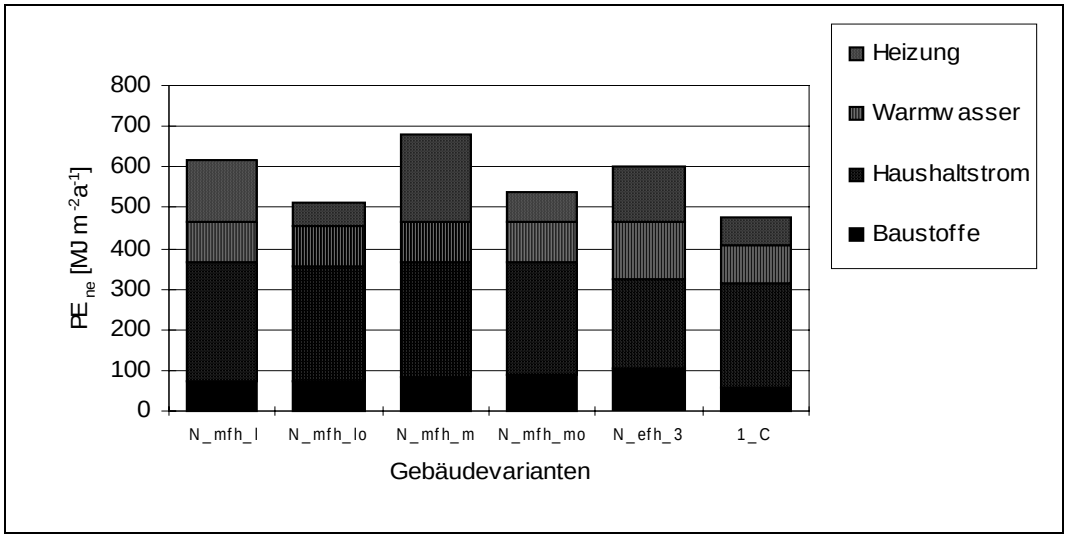


Abbildung 47: Die gesamte PE_{ne}-Nachfrage der verschiedenen Massiv- und Leichtbauten sowie einer Sanierung.

8.1.4 Bewertung nach Stoffkategorien (Massiv- und Leichtbauten)

In Kapitel 7.4.1 'Bewertung nach Stoffkategorien' wurde die Problematik von Stoffflüssen sowie deren Behandlung in dieser Arbeit beschrieben. Die verwendeten Baustoff-Kategorien werden in Tabelle 2 beschrieben.

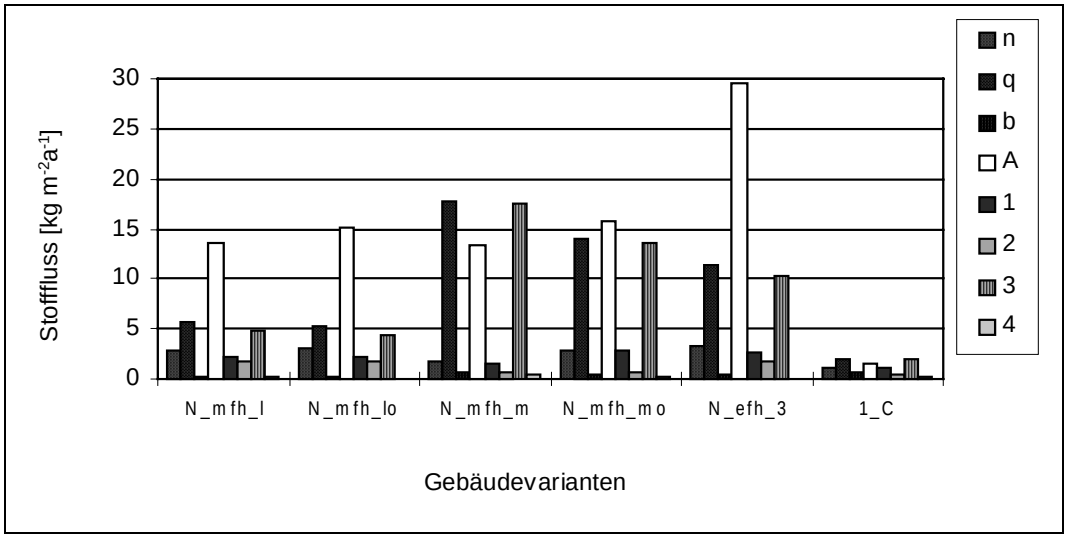


Abbildung 48: Masse der Stoffflüsse der verschiedenen Massiv- und Leichtbauten sowie einer Sanierung.

In Abbildung 48 erkennen wir die unterschiedliche Zusammensetzung der durch die Baumassnahmen ausgelösten Stoffflüsse pro Bewohner.

- Endlichkeit (Kat. n, q, b, A):
  Der Unterschied vom Einsatz von nachwachsenden Baustoffen (Kategorie n) ist erstaunlich gering. Dagegen wälzen die Massivbauten ein Vielfaches an Stoffen der Kategorie q um (Backstein, Kalksandstein, Beton usw.). Auffallend ist der hohe Aushub-Anteil des EFH. Dies ist auf den hohen Pro-Kopf-Anteil des Untergeschosses zurückzuführen, jedoch energetisch kaum von Bedeutung. Pro Kilogramm Aushub wird nur ca. 0.01 MJ Endenergie benötigt.
- Recyclingfähigkeit (Kat. 1, 2, 3, 4):
  Die beiden Leichtbauten liegen in der Kategorie 2 durch ihren relativ hohen Anteil an Holzwerkstoffen mehr als das Doppelte über den Massivbauten. In beiden Massivbauten, aber auch beim Leichtbau-EFH steckt ein Mehrfaches an begrenzt rezyklierbaren Stoffen (Kategorie 3). Die Flüsse der Kategorie 4 (Chemikalien, Anstrichstoffe usw.) sind aus stofflicher Sicht minim, haben jedoch negative Auswirkungen in toxikologischer oder baubiologischer Sicht.

Über die spezielle Problematik beim stofflichen Vergleich von Neubauten und Sanierungen wird in Kapitel 7.4 'Bilanzierung der Stoffflüsse' näher eingegangen.

Aus Abbildung 47 ist die tiefere PE_{ne}-Gesamtnachfrage von Leichtbauten gegenüber den Massivbauten ersichtlich. Auch die ausgelösten Stoffflüsse sind bei den Leichtbauten tiefer. Damit werden die ökologischen Vorteile von Holzleichtbauten in energetischer sowie stofflicher Hinsicht bestätigt. Vorausgesetzt wird eine kompakte Bauweise (MFH statt EFH).

8.1.5 Graue Energie versus Heizenergie

Grundlagen

Die Heizenergiebedarfsberechnungen in *SUSTAIN II* basieren auf der Methode der SIA-Norm 380/1. Der Gewinnfaktor für die Freie Wärme (solare Gewinne, Personen- und Elektroabwärme) ist um so kleiner, je grösser das Verhältnis von Freier Wärme zum Bruttoheizenergiebedarf ist. Er berücksichtigt jedoch die Art der Bauweise nicht. Unterschiedliche Ausnutzung der Freien Wärme bei differenzierten Konstruktionen können nur mit aufwendigen Simulationsrechnungen eruiert werden.
Zum Systemvergleich wurde einerseits von gängigen Konstruktionen oder aber von optimierten Bauweisen ausgegangen. Die daraus resultierenden Gebäudehüllen-k-Werte und Heizenergiebedarfe unterscheiden sich deshalb und sind in Tabelle 24 festgehalten. Im Holzleichtbau sind gute k-Werte viel eher zu erreichen, da die tragende und wärmedämmende Ebene dieselbe sind. Dem Vergleich liegt also eine wirtschaftliche und nicht eine wärmetechnische Basis zugrunde. Auf eine detaillierte Kostenberechnung wurde jedoch auch verzichtet, da Baukosten allzu sensibel auf zeitliche und geografische Unterschiede reagieren. Bei allen Varianten wurde mit der Sole/Wasser-Wärmepumpe gerechnet, bei den optimierten mit einer Lüftung mit WRG. Bei der Variante N_mfh_lo II wurden die Gebäudehüllen-k-Werte von N_mfh_mo übernommen, was zum gleichen Heizenergiebedarf führt.

Objekt	k-Wert Fassade [W $m^{-2}K^{-1}$]	k-Wert Dach [W $m^{-2}K^{-1}$]	Lüftung	Heizenergie Q_h [MJ $m^{-2}a^{-1}$]
N_mfh_l	0.22	0.20	nein	124
N_mfh_lo	0.13	0.10	ja	34
N_mfh_m	0.30	0.20	nein	166
N_mfh_mo	0.20	0.20	ja	48
N_mfh_lo II	0.20	0.20	ja	48

Tabelle 24: Die wichtigsten energetischen Daten der untersuchten MFH-Neubauten.

Berechnungen und Kommentar

In Fraefel (1996) wurde der Einfluss von Massiv- und Leichtbauten auf den Heizenergiebedarf untersucht. Dabei wurde bei der Massivbauweise vor allem der Vorteil als Jahresspeicher (≠ Saisonspeicher!) erkannt: die Heizperiode verkürzt sich in den Übergangszeiten jeweils um ca. drei Wochen. Der Heizenergiebedarf wird dadurch gegenüber einer Holzleichtbauweise um 14% gesenkt. Auch Afjei (1998) weist eine 13%-ige Reduktion des Heizenergiebedarfes beim gleichen Gebäude alleine durch die Umstellung von Leicht- auf Massivbau nach. In Tabelle 25 wird aufgezeigt, um wieviele Prozente der Heizenergiebe-

darf beim Massivbau gesenkt werden müsste, um dessen höhere Herstellungsenergie zu ‘amortisieren’.

Objekt	Herst.energie [MJ $m^{-2}a^{-1}$]	Heizenergie [MJ $m^{-2}a^{-1}$]	total [MJ $m^{-2}a^{-1}$]	Reduktion E_{heiz} [MJ $m^{-2}a^{-1}$]	[%]
N_mfh_l	59	148	207	--	--
N_mfh_m	76	209	285	-78	37
N_mfh_lo	63	58	121	--	
N_mfh_mo	75	71	146	-25	35
N_mfh_lo II	65	72	137	-16	22

Tabelle 25: Herstellungs- und Heizenergie der fünf MFH-Neubauten auf Primärenergiebasis.

Der Vergleich zeigt eindeutig, dass die Heizenergie um 78, 25 oder 16 MJ $m^{-2}a^{-1}$ reduziert werden müsste (22 bis 37%). Dies liegt sicher ausserhalb dessen, was mit einem passiv-solar-optimierten Massivbau erreicht werden kann.

8.2 Produktevarianz bezüglich Grauer Energie

8.2.1 Einleitung und Kurzinformation

Ausgangslage

Die Bilanzierung von Grauer Energie erfolgt praktisch immer auf der Basis von Daten, die in verschiedenen Datenbanken zusammengestellt sind. Aus Praktikabilitätsgründen kann dabei nur mit Durchschnittswerten gerechnet werden. Im Einzelfall stammt aber ein Baustoff aus einem bestimmten Werk mit einer spezifischen Produktionsstruktur und einer gegebenen Transportdistanz. Es ist offensichtlich, dass die Grauenergiewerte für ein reales Bauobjekt sich verbessern lassen, wenn die Baustoffe (bewusst oder zufällig) aus energetisch optimierten Betrieben bezogen werden. Bezüglich verschiedener Bauprodukte wird heftig diskutiert, ob die Produktevarianz der Grauen Energie, sowohl im gegenwärtigen Marktangebot, wie auch infolge der laufenden Modernisierung der Produktionsstätten, nicht die Unterschiede zwischen Baustoff- und Bausystem-Alternativen übertrifft und die heute übliche Art der Grauenergieoptimierung fragwürdig macht.

Fragestellungen

- Wie groß ist der Unterschied an Herstellungsenergie bei Baustoffen oder Bauelementen aus unterschiedlicher Produktion?
- Ist die Streubreite der Grauen Energie von Bauprodukten aus unterschiedlicher Produktion möglicherweise bedeutender als die Unterschiede zwischen konkurrierenden Baustoffen?
- Fallbeispiel: Wie groß ist der Einfluss unterschiedlicher Backsteinherstellung (energieintensivere oder -extensivere Produktion) oder wenn anstelle Backstein Kalksandstein verwendet wird?

Die wichtigsten Erkenntnisse

Bezogen auf die Bedeutung der Grauen Energie insgesamt sind die Unterschiede unter den verschiedenen Produkten aus dem gleichen Baustoff tatsächlich erheblich. So wird etwa der “ökologische Vorsprung“ des Kalksandsteins gegenüber Backstein durch seinen rund 2,3 mal geringeren Energieinhalt relativiert: Backsteine aus „energetisch optimaler Produktion“ können je nach Anwendung besser als durchschnittliche Kalksandsteine abschneiden. (Aspekte der unterschiedlichen Recyklierbarkeit, Trag- oder Wärmespeicherfähigkeit der beiden unterschiedlichen Materialien wurden hier nicht berücksichtigt!) Insgesamt aber sind die Unterschiede so gering, dass sowohl Grauenergieunterschiede innerhalb der gleichen Baumaterialien wie auch zu direkten Konkurrenzprodukten in der Regel geringe energetische Relevanz haben. Namhafte Unterschiede im Bedarf an Grauer Energie treten erst auf, wenn eigentliche Bausystem-Unterschiede zur Wahl stehen (Holzbau, Massivbau, Metallbau) oder ganze Gebäudeteile zur Diskussion gestellt werden (Tiefgarage ja oder nein).

8.2.2 Backstein aus unterschiedlichen Werken und Kalksandstein

Grundlagen

In Bruck (1996) wurden zehn Backstein-Herstellerwerke aus Deutschland, Österreich und der Schweiz bilanziert. Die Untersuchung erfolgte anonym und lieferte die in Tabelle 26 ersichtlichen Werte der Herstellungsenergie auf Endenergiebasis.

	Herstellungsenergie		Dichte	Wärmeleitfähigkeit λ
	[MJ kg^{-1}]	[MJ dm^{-3}]	[kg m^{-3}]	[W m^{-1}K^{-1}]
schlechtestes Werk	2.36	2.83	1'200	0.44
Durchschnitt	1.95	2.34	1'200	0.44
bestes Werk	1.34	1.61	1'200	0.44
zum Vergl.: Kalksandstein	0.85	1.53	1'800	0.80

Tabelle 26: Die Unterschiede verschiedener Backsteine und von Kalksandstein.

Als Untersuchungsobjekt wurde der Neubau des Mehrfamilienhauses N_mfh_m verwendet.

Berechnungen und Kommentar

Beim konventionellen Massivbau wurden nun jeweils die massiven Mauerwerkskonstruktionen mit oben genannten Werte variiert. In Abbildung 49 ist der Unterschied auf die PE_{ne}-Nachfrage der Baustoffklassen ersichtlich.

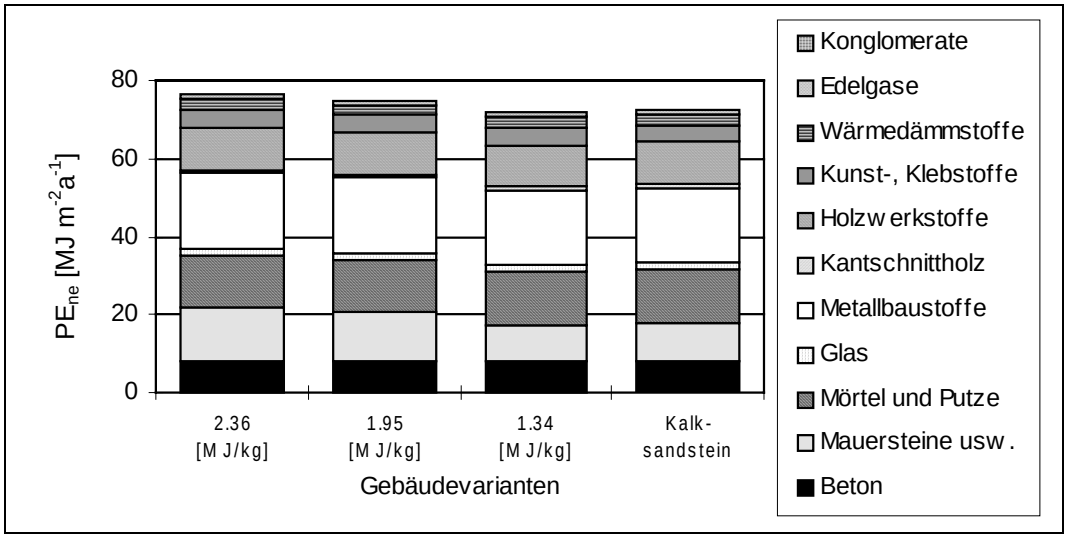


Abbildung 49: PE_{ne}-Nachfrage der Baustoffklassen des MFH-Neubaus mit unterschiedlichen Backsteinen und Kalksandstein.

Interessant ist, dass die Variante mit Kalksandstein gering schlechter abschneidet als die Variante mit dem besten Backstein und dies obwohl KS einen rund 40% tieferen Aufwand an Grauer Energie pro kg als dieser hat. Die tiefere Dichte des Backsteines - 1'200 gegenüber 1'800 kg m^{-3} - macht den Vorsprung schon beinahe wieder wett. Dazu kommen geringere Energieverbräuche beim Transport durch die höhere Anzahl von Anbietern.

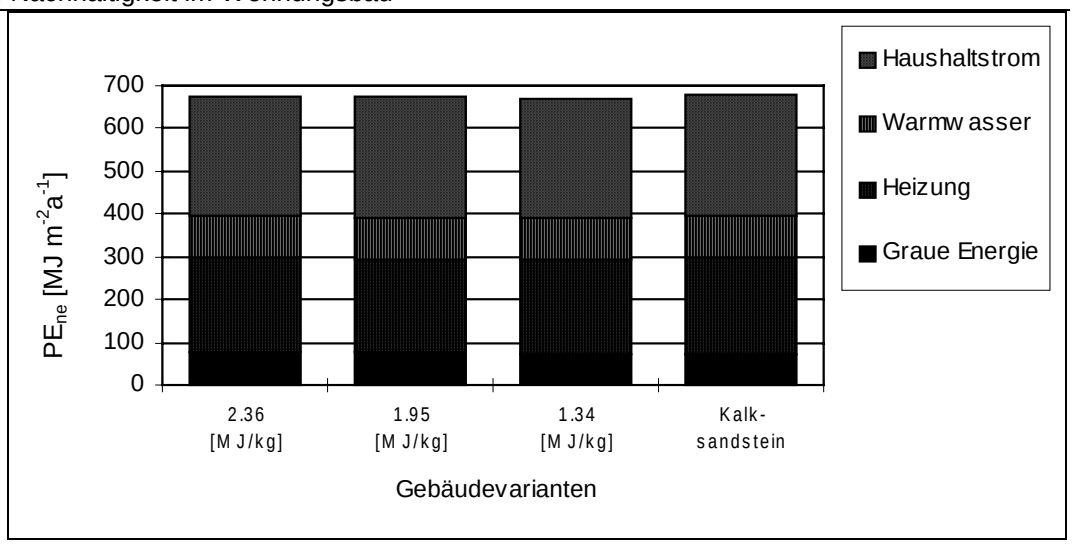


Abbildung 50: Die gesamte PEne-Nachfrage des MFH-Neubaus mit unterschiedlichen Backsteinen und Kalksandstein.

In Abbildung 50 sehen wir dann die totale Nachfrage auf Primärenergiebasis. Die Unterschiede von Backstein und Kalksandstein fallen im Verhältnis zu den gesamten Energieflüssen kaum ins Gewicht. Interessanter dagegen ist die Tatsache, dass die schlechtere Wärmeleitfähigkeit λ von Kalksandstein - 0.80 gegenüber 0.44 W $m^{-1}k^{-1}$ - den Heizenergiebedarf leicht anhebt. Dadurch kippt die Gesamtbilanz: Der Backsteinbau hat daher eine minim kleinere PE_{ne}-Nachfrage als der Kalksandsteinbau.

Die in Abbildung 50 diskutierten Untersuchungen wurden mit dem konventionellen Massivbau N_mfh_m durchgeführt. Da dieser über einen durchschnittlichen Dämmstandard verfügt, kann man davon ausgehen, dass bei einem gut gedämmten Bau die geringere Wärmeleitfähigkeit von Backstein weniger ins Gewicht fällt. Deshalb wurden nun zusätzlich noch unterschiedliche gedämmte Massivbauten miteinander verglichen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 51 über den gesamten Lebenszyklus der Gebäude ersichtlich.

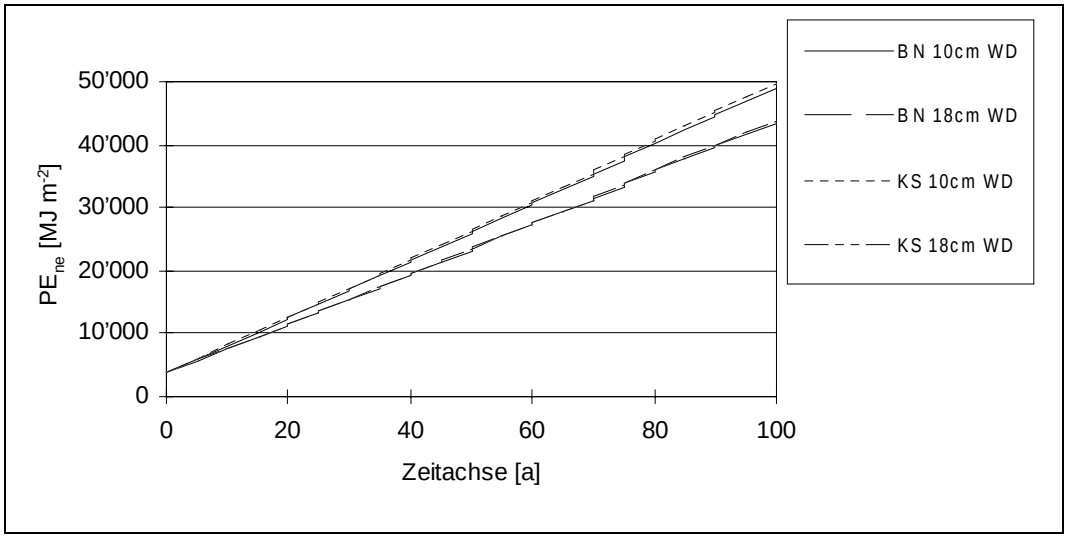


Abbildung 51: PE_{ne}-Nachfrage über den Lebenszyklus von unterschiedlich gedämmten Backstein- und Kalksandsteinbauten (Szenario SOLL). BN = Backstein normal; KS = Kalksandstein; WD = Wärmedämmung Gebäudehülle.

Es lässt sich in der Grafik kaum erkennen, dass sich die Kurven der beiden schlecht gedämmten Varianten nach ca. 30 Jahren kreuzen. Dagegen 'amortisiert' sich der Mehraufwand beim Backstein bei den gut gedämmten Varianten auch nach 100 Jahren noch nicht. Das heisst, der Vorteil der besseren Wärmeleitfähigkeit von Backstein kommt nur bei schlecht gedämmten Varianten und Gebäudelebensdauern über 30 Jahren zum Tragen.

8.3 Gebäudehülle

8.3.1 Einleitung und Kurzinformation

Ausgangslage

Bauliche Massnahmen an der Gebäudehülle wie Wärmedämmung und Balkonverglasungen helfen mit, den Heizenergiebedarf zu reduzieren. Allerdings ist es auch so, dass zur Herstellung, zum Transport und zum Ein- und Ausbau dieser Bauteile ebenfalls Energie aufgewendet werden muss, was auch eine ökologische Belastung darstellt. Der Mehraufwand an Grauer Energie für eine bessere Energieeffizienz muss kleiner sein als der Bauteil dadurch im Laufe seiner Lebensdauer einsparen kann, andernfalls macht die Realisierung einer solchen Massnahme aus ökologischer Sicht keinen Sinn.

Fragestellung

Bei den folgenden zwei Wärmeschutzmassnahmen wird berechnet, ob sie sich energetisch amortisieren oder nicht. Verschiedene Einflussparameter wirken sich dabei positiv (+) oder negativ (-) auf den Energieverbrauch auf. Zudem wird versucht, jeweils die energieeffizienteste Lösung zu finden.

1. Massnahme: Balkone verglasen, abtrennen oder Rückwand dämmen
   + passive Nutzung der Sonnenenergie
   + oftmals Reduktion einer Wärmebrücke
   + Wärmedämmung in Balkonnische wird weniger wichtig
   - kleinere solare Direktgewinne (niederer g-Wert)
   - höhere Beschattung
   - Aufwand an Grauer Energie
2. Massnahme: Wärmedämmung der Fassade
   + kleinere Transmissionsverluste (k-Wert)
   - Aufwand an Grauer Energie

Die wichtigsten Erkenntnisse

Die Resultate sind in starkem Masse von den getroffenen Annahmen bezüglich Rahmenbedingungen und Methodik abhängig.

Bei den Balkonen bewährten sich sämtliche in diesem Bereich getätigten Massnahmen. Am besten schneidet ein neuer Balkon mit guter Wärmedämmung der Rückwand ab. Es wurden jedoch nur rückspringende Balkone (Loggien) untersucht.

Die energetisch (nicht wirtschaftlich) optimale Dämmstärke hängt neben Faktoren wie Dämmaterial oder Heizsystem entschieden von der Vergleichssystemwahl ab. Für eine Aussendämmung und Wärmeerzeugung mittels einer Wärmepumpe liegt sie zwischen 20 und 30 cm, mit Ölheizung bei ca. 50 cm. Generell wird der Wärmeschutz der Gebäudehülle auch bei sehr tiefen k-Werten nicht durch dessen Graue Energie in Frage gestellt.

8.3.2 Balkone, Balkonverglasungen

Grundlagen

Bei Sanierungen werden Balkonverglasungen oft in Betracht gezogen, nicht nur weil sie Energieeinsparungen versprechen, sondern vor allem weil sie längere Nutzungszeiten als offene Balkone anbieten, also höheren Wohnkomfort (Mietertrag). Allerdings muss die richtige Ausführung sowie der Aufwand an Grauer Energie (Verglasung, Aluminiumprofile usw.) beachtet werden. Seltener werden bestehende Balkone mit auskragender Betonplatte durch neue in Leichtbauweise ersetzt, obwohl damit die Wärmebrücke vollständig eliminiert würde, stärker wärmegedämmt werden könnte (falls möglich) und der Aufwand an Grauer Energie kleiner wäre als mit Verglasungen.
Tabelle 27 gibt Auskunft über die betrachteten Varianten. Bei der Minimalvariante wird die Balkonrückwand (Nische) aus Platzgründen mit nur 5 cm wärmegedämmt, die Wärmebrücke der durchlaufenden Betonplatte bleibt erhalten. Bei den verglasten Varianten wurde zwischen thermisch getrennten Stahlprofilen mit Wärmeschutzverglasung (Variante II) und ungedämmten Aluminiumprofilen mit einer kostengünstigen, luftgefüllten 2-fach-Verglasung (Variante III) unterschieden. Zudem wurde die Wärmebrücke der Balkonplatte verringert und eine erhöhte Beschattung der rückwärtigen Fenster berücksichtigt. Bei den Varianten IV und V ging man von einem Abbruch der auskragenden Balkonplatte und einem selbsttragenden Balkonneubau aus.

Variante	Beschreibung	Wärmedämmung Glas / Rahmen [W $m^{-2}K^{-1}$]	Wärmebrücke Platte [W $m^{-1}K^{-1}$]	Wärmedämmung Rückwand [cm]
I	Minimalvariante	--	0.50	5
II	neue Verglasung	1.10 / 1.90	0.10	--
III	neue Verglasung	1.60 / 4.00	0.10	--
IV	neuer Balkon Stahl	--	--	10
V	neuer Balkon Holz	--	--	10

Tabelle 27: Diese fünf Balkonvarianten des Objektes 1_C wurden auf ihr energetisches Verhalten untersucht.

Berechnungen und Kommentar

Tabelle 28 listet die Resultate der verschiedenen Balkonvarianten auf. Daraus kann entnommen werden, dass sich jede bauliche Massnahme in diesem Bereich energetisch lohnt. Der Heizenergiebedarf sowie die PE_{ne}-Nachfrage werden gegenüber der Ausgangslage überall kleiner, die Unterschiede sind jedoch marginal. Die tiefste PE_{ne}-Nachfrage weist Variante V auf, bei ihr wird die Rückwand besser wärmegedämmt und die Wärmebrücke der Balkonplatte vollständig eliminiert. Mit einem kleinen Aufwand an Grauer Energie wird also ein Optimum an Einsparungen erreicht. Solare Gewinne durch Verglasungen werden oft über- und der Aufwand an Grauer Energie oft unterschätzt.

Variante	Beschreibung	Heizenergie Q_h [MJ $m^{-2}a^{-1}$]	PE_{ne}-Nachfrage [MJ $m^{-2}a^{-1}$]
I	Ausgangslage	69	475
II	neue Verglasung	58	470
III	neue Verglasung	61	473
IV	neuer Balkon Stahl	62	470
V	neuer Balkon Holz	62	468

Tabelle 28: Heizenergiebedarf und PE_{ne}-Nachfrage verschiedener Balkonvarianten beim Objekt 1_C.

Das Verglasen der Balkone macht aber in jedem Fall auch Sinn. Der Heizenergiebedarf wird sogar am meisten gesenkt. Jedoch sollten gute Wärmeschutzverglasungen verwendet werden, um die Wirkung als Pufferraum und die solaren Gewinne so gut als möglich auszunutzen. Die erhöhte Benutzbarkeit oder der bessere Schallschutz werten eine Verglasung weiter auf.
Noch zur Methodik: Mit *SUSTAIN II* können keine dynamischen Simulationsberechnungen durchgeführt werden, sondern Gewinne und Verluste wurden über die im Wintergarten vorherrschende Monatsmitteltemperatur ermittelt.

8.3.3 Dämmstärken

Grundlagen

Auch bei den Wärmedämmungen der Gebäudehülle sollte der Input an Grauer Energie nicht grösser sein als die durch die Dämmungen erzielten Einsparungen (Transmissionsverluste). Um spezifische Grössen für Sanierungen zu eruieren, wurden die Berechnungen mit dem Sanierungsobjekt 1 durchgeführt.
Wichtiger als die Wahl des Objektes sind auch hier die methodischen Annahmen. Wird als Wärmeerzeuger eine Wärmepumpe eingesetzt, so ergibt sich auf Endenergiestufe ein sehr tiefer Heizenergiebedarf. Demzufolge wird das Optimum bei einer geringeren Dämmstärke liegen, da die Graue Energie anteilsmässig höher ist. Anders werden sich die Resultate auf Primärenergiebasis oder mit einem Heizkessel präsentieren.

Berechnungen und Kommentar

In Abbildung 52 wird die Fassaden- und Dachdämmstärke der Bilanzzahl B_{el} (Endenergie) gegenübergestellt. Es wurde mit einer Wärmepumpe gerechnet und als Dämmaterial wurden Zellulosefasern mit einer hinterlüfteten Holzfassade eingesetzt. Die Dämmung der Kellerdecke und der Balkonrückwand konnten infolge der bestehenden Platzverhältnisse nicht variiert werden und wurde fest mit 14 cm, resp. 3 cm Steinwolle angenommen.

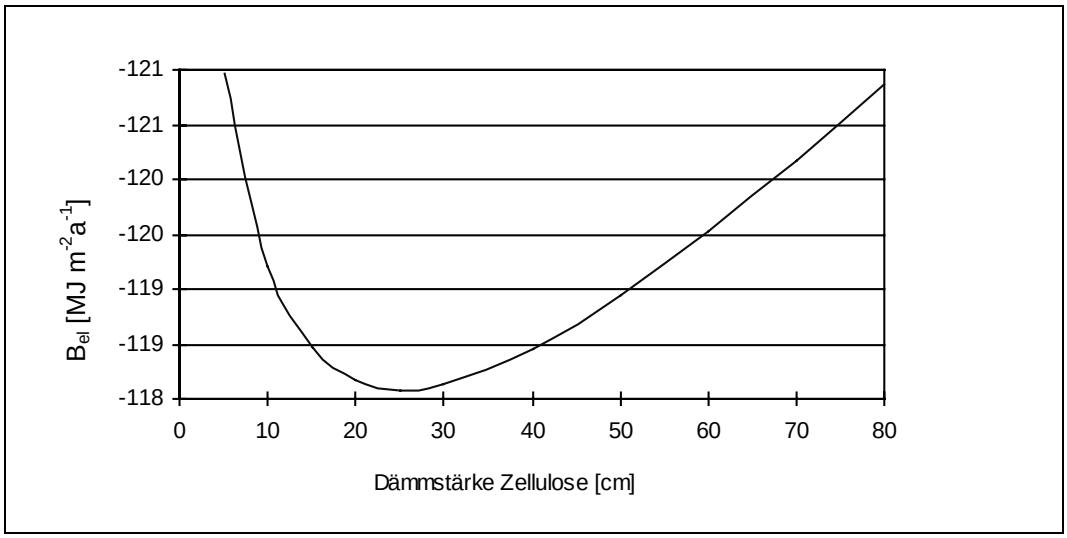


Abbildung 52: Die optimale Stärke einer Aussendämmung im Vergleich zur Bilanzzahl B_{el} (Endenergie).

Der Scheitel der Kurve liegt zwischen 20 und 30 cm. Das heisst, wenn die Dämmstärke um 25 cm beträgt, steht der energetische Aufwand in einem optimalen Verhältnis zum Ertrag.
Anders sieht es aus, wenn die Dämmstärke der PE_{ne}-Nachfrage gegenübergestellt wird. Der Grund liegt wie erwähnt bei der Nachfrage der Wärmepumpe nach Elektrizität. Deren Umwandlungswirkungsgrad von Primär- zu Endenergie liegt zwischen 25 bis 30%. Entsprechend stärker fällt nun die Heizenergie gegenüber der Grauen Energie ins Gewicht. Abbildung 53 zeigt, dass die energetisch optimale Dämmstärke nun im Bereich von 45 cm zu liegen kommt.

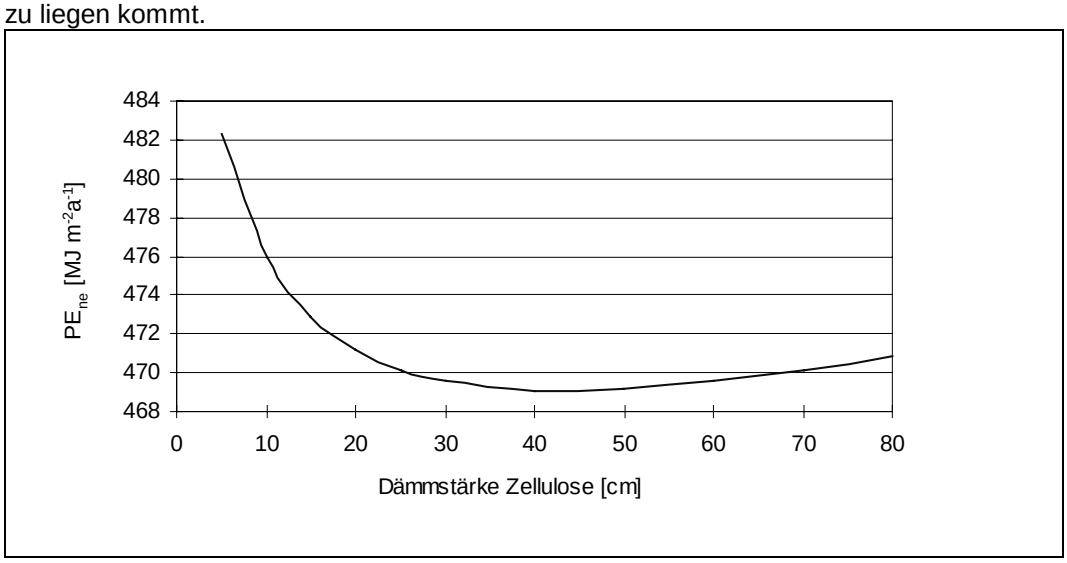


Abbildung 53: Die optimale Stärke einer Aussendämmung im Vergleich zur PE_{ne}-Nachfrage (Primärenergie).

Eine Gasheizung hat bei den untersuchten Objekten auf Stufe Primärenergie immer noch eine etwas höhere Energienachfrage als die eingesetzte Wärmepumpe, denn für diese wurde eine Jahresarbeitszahl von 4.2 ermittelt. Der Umwandlungsgrad von Elektrizität von End- zu Primärenergie dagegen liegt im UCPTE-Raum bei ca. 3.7. Berechnungen mit demselben Objekt und demselben Dämmaterial - jedoch mit einer Gasheizung - haben ergeben, dass die optimale Dämmstärke in diesem Fall bei etwa 50 cm liegt (Primär- wie Endenergie).

Das Dämmaterial Polystyrol EPS hat gegenüber Zellulose den höheren Input an Grauer Energie, jedoch aber auch die bessere Wärmeleitfähigkeit (ca. 0.033 gegenüber 0.042 W $m^{-1}K^{-1}$). Wird nun auch das Dämmaterial ersetzt, gewichtet die Graue Energie wieder etwas stärker. Das Optimum mit EPS liegt bei 40 cm.

8.4 Wärmeschutzverglasungen

8.4.1 Grundlagen

An einer Verglasung spielen sich grundsätzlich drei Vorgänge ab, die energetisch von Bedeutung sind:

- Transmissionsverluste von innen nach aussen (k-Wert)
- Solare Gewinne durch die Sonneneinstrahlung (g-Wert)
- Aufwand an Energie für die Herstellung der Komponenten (Graue Energie)

Aus energetischer Sicht sollte der k-Wert und der Aufwand an Grauer Energie möglichst tief, der g-Wert dagegen möglichst hoch liegen. Vorausgesetzt wird ein funktionierender Sonnenschutz wegen Überhitzungsproblemen im Sommer. Je nach Orientierung und Standort fällt aber der g-Wert unterschiedlich stark ins Gewicht, da die auftreffende Globalstrahlung im Süden recht hoch, im Norden sehr tief ist. Bei der Grauen Energie ist neben dem Glas und der IR-Beschichtungen vor allem die Gewinnung der Edelgase von Bedeutung. Über die Frage, wie lange die Edelgase in der Verglasung bleiben, herrscht noch kein Konsens. Es wird deshalb davon ausgegangen, dass die Wirkung der Gase über die ganze Lebensdauer der Verglasung erhalten bleibt. Die IR-Beschichtungen bestehen üblicherweise aus Metall- oder Metalloxydschichten, welche mit bescheidenem energetischem Aufwand hergestellt werden können (Trösch 1994). Sie weisen eine unterschiedliche Emissivität auf. Wird diese herabgesetzt, senkt sich der k-, aber auch der g-Wert.
Weiter hat der Gewinnfaktor der Freien Wärme einen Einfluss auf die Resultate bei der Heizenergiebedarfsberechnung nach SIA 380/1. Er ist um so geringer, je grösser das Verhältnis von Freier Wärme zum Bruttoheizenergiebedarf ist. Er ist also bei gutem Dämmstandard tief, bei schlechtem Dämmstandard hoch. Für die Festlegung dieses Faktors wurden die unsanierte sowie die fortschrittlich sanierte Variante von Objekt 1 (1_U, 1_C) verwendet.
Für die Berechnungen wurden die Meteodaten von Zürich SMA verwendet. Die Resultate gelten deshalb nur für Regionen mit ähnlichen klimatischen Verhältnissen.

Fragestellung

Wie im vorangehenden Kapitel wird berechnet, wann sich welcher Einsatz aus energetischer Sicht amortisiert oder nicht.

- Welches ist diejenige Wärmeschutzverglasung, bei der die Transmissionsverluste und der Aufwand an Grauer Energie möglichst klein, der Gewinn an solarer Einstrahlung jedoch möglichst hoch ist?

Die wichtigsten Erkenntnisse

Die Verwendung des Edelgases Xenon kann aus energetischer Sicht bei heutigen Herstellungsverfahren nicht als sinnvoll bewertet werden. Das beste Aufwand/Ertrags-Verhältnis wird mit Krypton erreicht. Südseitig erweisen sich 2-fach-Verglasungen wegen des hohen g-Wertes als vorteilhaft.
Bei Niedrigenergiehäusern interessiert vor allem die Zeit im Hochwinter (verkürzte Heizperiode). Da in dieser Zeit die Globalstrahlung gering ist, schneiden hier südseitig die kryptongefüllten 3-fach-Verglasungen am besten ab.

8.4.2 Heizperiode von Oktober bis April

Im folgenden wurden die Bilanzen verschiedener Verglasungen, bei verschiedenen Orientierungen und unterschiedlich gedämmten Bauweisen über die ganze Heizperiode ermittelt. Beschattung und Verschmutzung der Gläser wurden als konstant angenommen. Die Tabellen enthalten jeweils nur die zwei Verglasungstypen mit den besten Bilanzen pro m^2 Verglasung.

Orientierung	Aufbau	Füllung	k-Wert [W $m^{-2}K^{-1}$]	g-Wert [-]	Bilanz [kWh $m^{-2}a^{-1}$]
Süd	2-fach, IR	Ar/Kr	1.10	0.65	+149.5
Süd	3-fach, IR	Krypton	0.60	0.51	+143.7
West	3-fach, IR	Krypton	0.60	0.51	+42.3
West	3-fach, IR	Krypton	0.50	0.42	+32.3
Ost	3-fach, IR	Krypton	0.60	0.51	+36.5
Ost	2-fach, 2 Fol.	Xenon	0.35	0.53	+31.7
Nord	3-fach, IR	Krypton	0.50	0.42	-21.5
Nord	3-fach, IR	Krypton	0.60	0.51	-23.5

*Tabelle 29: Die jeweils besten Verglasungstypen bei **tiefem Gewinnfaktor** der Freien Wärme: 0.81 bei Objekt 1_C. Die Bilanz wurde pro m^2 Glas ermittelt.*

Orientierung	Aufbau	Füllung	k-Wert [W $m^{-2}K^{-1}$]	g-Wert [-]	Bilanz [kWh $m^{-2}a^{-1}$]
Süd	2-fach, IR	Ar/Kr	1.10	0.65	+202.8
Süd	2-fach, IR	Argon	1.50	0.72	+194.8
West	3-fach, IR	Krypton	0.60	0.51	+65.3
West	2-fach, 2 Fol.	Xenon	0.35	0.53	+51.8
Nord	3-fach, IR	Krypton	0.50	0.42	-12.9
Nord	3-fach, IR	Krypton	0.60	0.51	-13.0

*Tabelle 30: Die jeweils besten Verglasungstypen bei **hohem Gewinnfaktor** der Freien Wärme: 0.96 bei Objekt 1_U. Die Bilanz wurde pro m^2 Glas ermittelt.*

Die beste Bilanz auf der Südseite erreicht bei beiden Gebäudetypen eine mit Argon/Krypton gefüllte 2-fach-Verglasung. k- und g-Wert stehen hier also in optimaler Weise zueinander. Der solare Gewinn ist mehr als doppelt so hoch wie die Transmissionsverluste, die Graue Energie beträgt nur wenige Prozente der Gewinne.
Auf der West-, Ost- und Nordseite dominieren die mit Krypton gefüllten 3-fach Verglasungen. In allen berechneten Fällen sind west- und ostseitig die solaren Gewinne noch höher als die Transmissionsverluste, obwohl in den Berechnungen die Beschattung, die reduzierte Ausnutzung und der g-Wert berücksichtigt wurden.
Beim Füllvorgang der Scheibenzwischenräume gehen prozessbedingt rund 50% der Edelgase verloren (Richter 1996). Werden diese Verluste auf 25% reduziert, verringert sich zwar die Graue Energie, die Rangfolge der Verglasungstypen verändert sich jedoch nicht.

8.4.3 Heizperiode nur Dezember und Januar

Bei Niedrigenergiehäusern verkürzt sich normalerweise die Heizperiode beträchtlich. Von Interesse sind in diesem Zusammenhang vor allem Bilanzen im Hochwinter. Tabelle 31 zeigt die Resultate , wenn die Bilanzen nur über die beiden Monate Dezember und Januar erstellt werden.

Orientierung	Aufbau	Füllung	k-Wert [W $m^{-2}K^{-1}$]	g-Wert [-]	Bilanz [kWh $m^{-2}a^{-1}$]
Süd	3-fach, IR	Krypton	0.60	0.51	12.9
Süd	3-fach, IR	Krypton	0.50	0.42	8.5
West	3-fach, IR	Krypton	0.50	0.42	-15.7
West	3-fach, IR	Krypton	0.60	0.51	-16.5
Nord	3-fach, IR	Krypton	0.50	0.42	-22.4
Nord	3-fach, IR	Krypton	0.60	0.51	-25.1

*Tabelle 31: Die jeweils besten Verglasungstypen bei **tiefem Ausnutzungsfaktor** der Freien Wärme: 0.94 bei Objekt 1_C. Die Bilanzen wurden nur über die Monate Dezember und Januar ermittelt.*

Auf der West- und Nordseite schneiden die gleichen Typen am besten ab wie bei der Bilanzierung über die längere Heizperiode. Dagegen geht die Globalstrahlung auf der Südseite in dieser Zeit merklich zurück. Dies führt dazu, dass nun auch auf dieser Seite die kryptongefüllten 3-fach-Verglasungen wegen dem besseren k-Wert die beste Bilanz aufweisen.

Mit Krypton kann der k-Wert stark reduziert werden und der Aufwand an Grauer Energie liegt noch in einem vertretbaren Rahmen. Die Graue Energie fällt nur bei der Verwendung von Xenon merklich ins Gewicht. Dies und der tiefe g-Wert verhindern eine gute Gesamtbilanz von xenongefüllten 3-fach-Verglasungen oder 2-fach-Verglasungen mit innenliegenden Folien.

8.5 Gebäude- und Bauteillebensdauer

8.5.1 Einleitung und Kurzinformation

Ausgangslage

Über durchschnittliche Lebensdauern von Gebäuden oder einzelner Bauteile liegen kaum Untersuchungen vor. Diese Unsicherheit führt immer wieder zu heftigen Kontroversen, da sich die Variable Lebensdauer sehr sensitiv auf die Ökobilanz eines Produktes auswirken kann. In der Tat kann die Lebensdauer von Gebäuden oder Bauelementen durch Massnahmen wie Unterhalt und Pflege oder soziale Einflüsse entscheidend verändert werden. In Kapitel 8.1 'Massivbau versus Leichtbau' wird erklärt, weshalb in diesem Projekt eine einheitliche Gebäudelebensdauer von 100 Jahren gewählt wurde (Neubau und Sanierung, Massivbau und Leichtbau). Die Frage über die Ungewissheit der Zukunft bleibt also zu beantworten.
Bei den Bauteilen, die periodisch erneuert werden, wurde von den drei Gruppen von Lebensdauern (Minimum-, Mittel- und Maximumwerte) stets der Mittelwert verwendet.

Fragestellung

- Wie wirken sich unterschiedliche Gebäudelebensdauern auf die Endresultate (PE_{ne}-Nachfrage) aus? Ergeben sich Änderungen in der Frage Sanierung oder Abbruch/-Neubau?
- Wie wirken sich unterschiedlich lange Lebensdauern von Bauteilen oder Bauelementen aus (beispielsweise den Ersatz der Küchengeräte alle 20 statt alle 15 Jahre)?

Die wichtigsten Erkenntnisse

Die Untersuchung zeigt, dass ab ca. 50 Jahren Gebäudelebensdauer keine oder kaum mehr markante Unterschiede in der Endbilanz auftreten. Wird die Gebäudelebensdauer also mit 50 oder mehr Jahren angenommen, sind keine wesentlichen Abweichungen bei den Gesamtbilanzen zu erwarten.
Die Wahl unterschiedlich langer Bauelementlebensdauern hat einen marginalen Einfluss auf die Gesamtbilanz.

8.5.2 Variable Gebäudelebensdauer

In Abbildung 54 wird Objekt 1 zwei Neubauten gegenübergestellt. Ersichtlich ist die PE_{ne}-Nachfrage über die Lebensdauer von 40 Jahren. Anhand dieser Darstellung können Aussagen über unterschiedliche Gebäudelebensdauern gemacht werden.

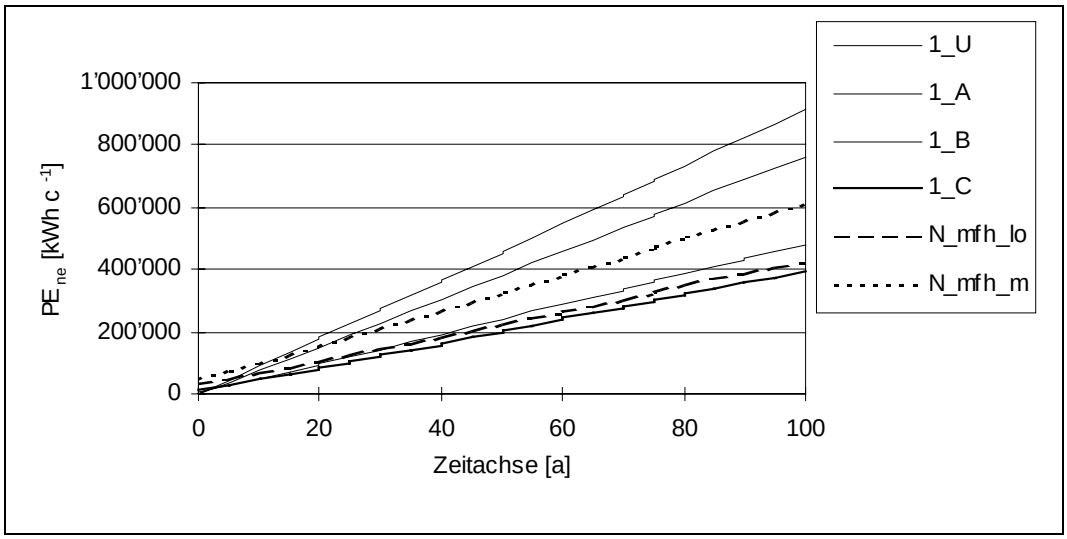


Abbildung 54: PE_{ne}-Nachfrage über den Lebenszyklus verschiedener Erneuerungsintensitäten und zwei Neubauten über die ersten 40 Jahre (Szenario SOLL).

Die Gegenüberstellung bringt ein klares Bild. Es findet der letzte Schnittpunkt bereits nach ca. 35 Jahren statt, nämlich zwischen der durchschnittlichen Sanierung (1_B) und dem optimierten Neubau (N_mfh_lo). Dies bedeutet, dass bei einer Gebäudelebensdauer von über 35 Jahren keine Veränderungen mehr in der Reihenfolge der bilanzierten Objekte eintreten. Von einer Lebensdauer in dieser Grössenordnung kann in der Realität sicher ausgegangen werden.

Speziell interessiert sicher wiederum der Vergleich der Sanierungen mit der Variante Abbruch/Neubau. In Abbildung 55 sind deshalb die optimierten Sanierungen verschiedener Objekte mit dem optimierten Neubau ersichtlich.

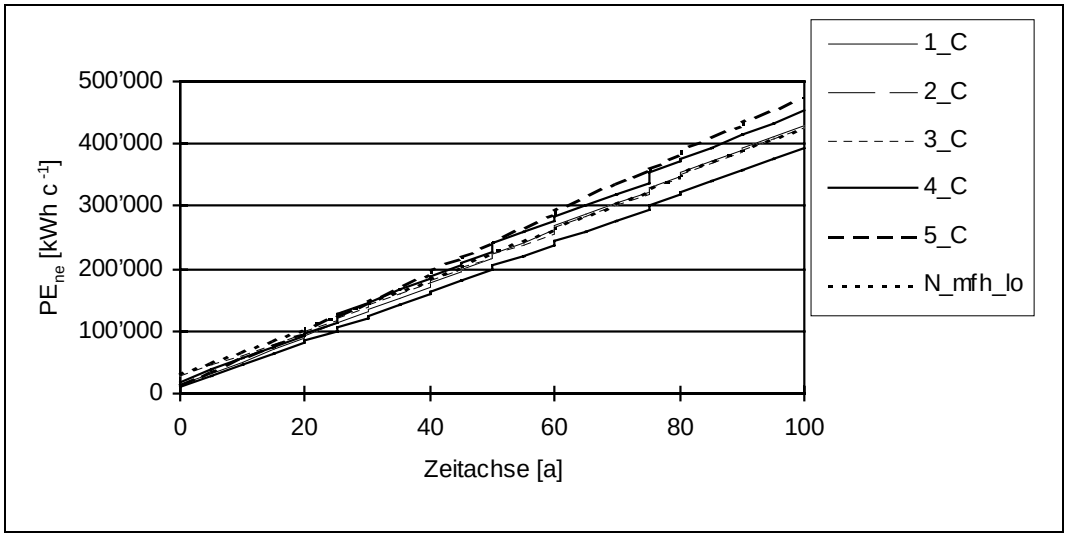


Abbildung 55: PE_{ne}-Nachfrage über den Lebenszyklus von 100 Jahren verschiedener optimal sanierter Objekte und dem optimierten Neubau (Szenario SOLL).

Der Neubau hat einen höheren Anfangsinput (Neubaumassnahmen) als die Sanierungen, jedoch die flachere Neigung der Kurve (tiefere Betriebsenergie). Abbildung 55 stellt auch dar, wann sich die Mehrinvestition des Neubaus 'ökologisch amortisiert':

- 2_C nach ca. 60 Jahren
- 3_C kurz nach 100 Jahren
- 4_C nach ca. 30 Jahren
- 5_C nach ca. 30 Jahren

Einzig Objekt 1_C hat eine flachere Kurve als der Neubau und ist als Sanierung natürlich bereits von Anfang an besser. Dafür ist der tiefere Bedarf an Haushaltselektrizität von Objekt 1 verantwortlich.

Die Gegenüberstellung verdeutlicht, dass ab 50 Jahren Gebäudelebensdauer in der Reihenfolge der untersuchten Objekte kaum mehr wesentliche Veränderungen stattfinden. Das heisst, ob als Gebäudelebensdauer 50 oder 100 Jahre veranschlagt werden, beeinflusst die Frage Sanierung oder Abbruch/Neubau also nicht.

8.5.3 Variable Bauteillebensdauer

In Kapitel 7 ‘Analyse verschiedener Gebäudetypen‘ wird beschrieben, dass die Aufwendungen für Unterhalts- und Erneuerungsarbeiten meistens mehr Graue Energie nachfragen als die Neubau- resp. Sanierungsmassnahmen. Der Wahl von Lebensdauern für Bauteile, die periodisch erneuert werden, kommt also für die Quantifizierung der Grauen Energie eine grosse Bedeutung zu. Tabelle 32 zeigt die gewählten Lebensdauern für die wichtigsten Bauelemente, deren Lebensdauern kürzer als die Gebäudelebensdauer sind. In den beiden Szenarien IST und SOLL wurden jeweils die Mittelwerte verwendet.

Bauteil	Mittel [Jahre]	Minimum [Jahre]	Maximum [Jahre]
Fenster Ost/Nord	25	20	30
Fenster Süd/West	20	15	25
Sonnenschutz Holz	25	20	30
Sonnenschutz Alu	35	30	40
Küchengeräte	15	10	20
Küchenmöbel	25	20	30
Parkettböden	25	20	30
Aussendämmung hinterlüftet	30	25	35
Erschliessungslaube	75	50	100
Bäder	40	30	50

Tabelle 32: Die wichtigsten Bauteillebensdauern.

In Tabelle 33 ist ersichtlch, wie stark sich die PE_{ne}-Nachfrage verändert, wenn die Lebensdauern der Bauteile mit den in Tabelle 32 ersichtlichen Werten variiert wurden. Der Einfluss nur auf die Graue Energie ist natürlich gross. Da sich die angenommenen Lebensdauern zum Teil bis 100% unterscheiden, variiert sie natürlich auch stark.
Durch den geringen Anteil der Grauen Energie an den gesamten Energieflüssen ist dagegen der Einfluss auf die Gesamtbilanz marginal.

PE_{ne}-Nachfrage	BTL Mittel [kWh $c^{-1}a^{-1}$]	BTL Min. [kWh $c^{-1}a^{-1}$]	BTL Max. [kWh $c^{-1}a^{-1}$]
Graue Energie	589	801	488
Heizung	902	902	902
Warmwasser	1’170	1’170	1’170
Haushaltstrom	3’186	3’186	3’186
TOTAL	5’847	6’059	5’746

Tabelle 33: Der Einfluss veränderter Bauteillebensdauern (BTL) auf Baustoff- und Gesamtnachfrage bei der Sanierung 1_C.

8.6 Holzbau und Holztrocknung

8.6.1 Einleitung und Kurzinformation

1) In technisch getrocknetem Kantholz steckt ca. drei mal mehr Graue Energie als in luftgetrocknetem.
2) Energieverbräuche für die technische Trocknung von einem Kilogramm Kantholz können bis zu Faktor 10 und mehr voneinander abweichen.
3) Reine Holzbauten haben einen hohen Bedarf an Schnittholz und Holzwerkstoffen.

Diese Tatsachen haben immer wieder Anlass zur Diskussion über die Umweltverträglichkeit von Holzbauten gegeben.

Fragestellung

- In Kapitel 8.1 ‚Massivbau versus Leichtbau' werden wir sehen, dass ein Holzleichtbau mit hohen Anteilen an technisch getrockneten Hölzern immer noch den geringeren Inhalt an Grauer Energie besitzt als ein vergleichbarer Massivbau. Wie groß sind jetzt aber die Unterschiede bei verschiedenen Holzbauarten:
  - mit materialsparenden Holzwellstegträgern
  - mit energieintensivem Brettschichtholz usw.?
- Liefert der Schweizer Wald genügend Bauholz, um den Prozess Wohnen auf nachhaltige Art und Weise zu ermöglichen?
- Wie groß sind die Einflüsse von unterschiedlich getrocknetem oder geerntetem Holz auf die gesamten Energieflüsse? Sind diese Trocknungsprozesse im Sinne von nachhaltigem Bauen zu optimieren?

Die wichtigsten Erkenntnisse

Die Graue Energie von Holz beträgt beim untersuchten Einfamilienhaus in Holzleichtbauweise nur ca. ein Viertel der gesamten Grauen Energie. Wird sie in Bezug gesetzt zur Betriebsenergie, sind kaum mehr Unterschiede der verschiedenen Holzbauweisen erkennbar.
Der Schweizer Wald liefert genügend Bauholz, um die Nachfrage für den Wohnungsbau zu decken. Je nach Gebäudetyp müssen bei der Holzgewinnung kleine Optimierungsschritte wie zum Beispiel das Erhöhen der Einschlagmenge oder die bessere Verwertung von Altholz vorgenommen werden.

8.6.2 Holztrocknung

Grundlagen

IP Holz (1989) liefert die Basisdaten zum Ökoprofil von Schnittholz und diversen Holzwerkstoffen. Die Bilanzierung weist zum Teil eine grosse Bandbreite in einzelnen Produktionsschritten auf. Vor allem der Energieverbrauch der technischen Trocknung von Schnittholz kann sich im Extremfall bis zu Faktor 13 unterscheiden. Dies ist nur geringfügig auf verschiedene Wirkungsgrade von Trocknungskammern oder unterschiedliche Trocknungsverfahren zurückzuführen, sondern vor allem auf die folgenden physikalischen Einflussfaktoren:

- Anfangs- und Endfeuchte des Holzes
- Querschnittsabmessungen des Holzsortimentes
- Fassungsvermögen der Trocknungskammer

Holzernte im Mittelland oder in alpinen Gebieten, aber auch unterschiedliche Produktionsverfahren bei den Holzwerkstoffen haben ebenfalls einen Einfluss auf die Energienachfrage der Holzproduktion, werden aber in der folgenden Parameterstudie nicht variiert.

Berechnungen und Kommentar

Das mit technisch getrocknetem Kantschnittholz konstruierte EFH (N_efh_3) diente als Berechnungsgrundlage. Das gesamte technisch getrocknete Schnittholz sowie sämtliche verwendeten Holzwerkstoffe wurden mit den in Tabelle 34 dargestellten Werte variiert.

	chemisch [MJ kg^{-1}]	elektrisch [MJ kg^{-1}]	Treibstoffe [MJ kg^{-1}]	total [MJ kg^{-1}]
schlechter Prozess	6.44	1.41	0.58	8.43
mittlerer Prozess	3.29	0.83	0.58	4.70
guter Prozess	1.31	0.33	0.58	2.21

Tabelle 34: Endenergieverbräuche für die Holzgewinnung und -trocknung (IP Holz 1989).

Tabelle 35 verdeutlicht die Einflussmöglichkeiten der verschiedenen Prozesse. Dabei wird ersichtlich, dass sich die PE_{ne}-Nachfrage des Holzes je nach Gewinnungs- und Trocknungsarten bis zu 100% unterscheiden kann.
Der Einfluss auf die gesamte Graue Energie ist geringer und auf die totale PE_{ne}-Nachfrage noch einmal eine Grössenordnung tiefer.

N_efh_3	schlechter Prozess [kWh c^{-1}a^{-1}]	mittlerer Prozess [kWh c^{-1}a^{-1}]	guter Prozess [kWh c^{-1}a^{-1}]
Kantholz	116	80	50
Holzwerkstoffe	355	248	185
Holz total	471 (144%)	328 (100%)	235 (72%)
übrige Baustoffe	1’337	1’337	1’337
Heizung	1’749	1’749	1’749
Warmwasser	2’014	2’014	2’014
Haushaltstrom	3’119	3’119	3’119
TOTAL	8’690 (102%)	8’547 (100%)	8’354 (98%)

Tabelle 35: Der Einfluss auf die PE_{ne}-Nachfrage verschiedener Holztrocknungsprozesse beim Einfamilienhaus N_efh_3.

Es wurde bereits erwähnt, dass im Holzsystembau viele Holzprodukte wegen hohen Qualitätsansprüchen Endfeuchten um 12% benötigen und dass dies mit ausschließlicher Lufttrocknung nicht zu erreichen sei. Folgende Optimierungsschritte werden empfohlen:

- Wo keine Endfeuchten von 17% und darunter benötigt werden, sollte der Einsatz von natürlich getrocknetem Schnittholz vorgezogen werden (IP Holz 1989).

Durch die Schaffung und Verwendung von Standardquerschnitten kann Schnittholz lange vor der Verwendung gewonnen werden. Damit wird genügend Zeit gewonnen, um das Holz bis zu ca. 20% Endfeuchte natürlich oder mit Solarthermie vorzutrocknen. Dadurch könnten hohe Mengen unnötigen Primärenergieverbrauches eingespart werden.

8.6.3 Holzbauarten

Grundlagen

Für diese Parameterstudie wird der Neubau des EFH verwendet (N_efh). Es ist der Typ 'Tricolo-Domino', ein hochwärmegedämmter Holzelementbau der Firma Renggli in Schötz. Variiert werden nur die Konstruktionsarten der Gebäudehülle (inkl. Balkone) und der Innenwände. Die Dämmstärken der Gebäudehülle wurden bei allen Varianten gleich belassen. Der Heizenergiebedarf ist somit überall praktisch derselbe. Einzig bei der Variante N_efh_2a wurde sämtliches Kantschnittholz als natürlich getrocknet angenommen, also auch Lattungen, Aussenschalung und interne Treppe (ausser Fenster).
Die Haustechnik wurde nicht variiert. Als Wärmeerzeuger wurde eine Sole/Wasser-WP und eine Lüftung mit WRG eingesetzt.

Variante	Bauweise	Trocknungsart	Dämmstärken: Boden/Wand/Dach
N_efh_1	Wellstegträger	technisch	26/28/32 cm
N_efh_2	Kantschnittholz	natürlich	26/28/32 cm
N_efh_2a	Kantschnittholz	alles natürlich	26/28/32 cm
N_efh_3	Kantschnittholz	technisch	26/28/32 cm
N_efh_4	Brettschichtholz	technisch	26/28/32 cm

Tabelle 36: Die Holzbauweisen des untersuchten Einfamilienhauses N_efh.

Die Varianten N_efh_2 und N_efh_2a sind hypothetische Varianten, da mit luftgetrocknetem Holz kaum Endfeuchten unter 20% möglich sind. Im Holzrahmenbau sind jedoch Endfeuchten um 12% nötig, um den hohen Qualitätsansprüchen wie z.B. Vermeidung von Rissen usw. zu genügen.

Berechnungen und Kommentar

In Abbildung 56 ist die Aufteilung der Grauen Energie der verschiedenen EFH-Varianten sowie eines MFH's als Referenzbau ersichtlich.

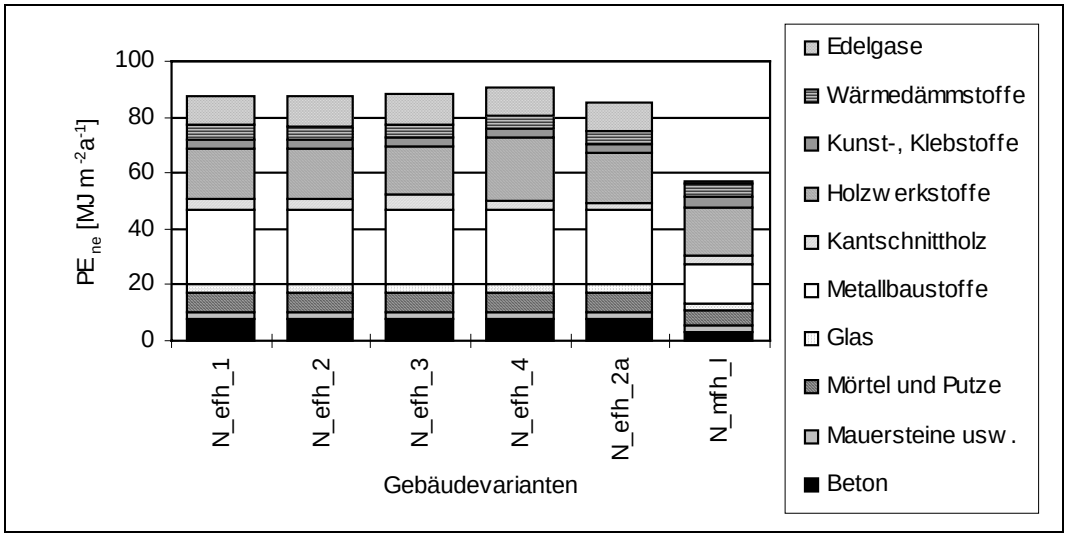


Abbildung 56: Der Einfluss auf die PE_{ne}-Nachfrage der Baustoffklassen verschiedener Holzbauweisen beim EFH und als Vergleich ein MFH in üblicher Holzleichtbauweise.

Zwei Punkte in Abbildung 56 sind besonders auffallend:

1. Erstens überwiegt der Anteil an Holzwerkstoffen gegenüber dem Kantschnittholz bei allen untersuchten Typen klar. Bei der Variante N_efh_4 beträgt der Anteil von Holzwerkstoffen sogar 87% des Holzbedarfes. Wie sich die Holzwerkstoffe aufteilen ist in Tabelle 37 ersichtlich. Der verhältnismässig hohe Stoffluss der Fensterrahmen ist vor allem durch die kurze Lebensdauer bedingt. Bei einer Gebäudelebensdauer von 100 Jahren werden sie also 3 bis 4 Mal ersetzt.
2. Zweitens bewegt sich die gesamte Graue Energie von Holzbauteilen beim (Holz-)EFH nur zwischen 21 und 25%. Die Metalle gewichten sogar noch stärker als das Holz. Dafür verantwortlich ist der Armierungsstahl im Beton, das Kupferdach, Küchengeräte, Haustechnik mit Lüftung und die Spenglerarbeiten. Darauf wird im Kapitel 8.7 'Metallbauteile' näher eingegangen. Auch für die mit Xenon gefüllten 3-fach-Verglasungen wird sehr viel Graue Energie in Form von Elektrizität aufgewendet (siehe Kapitel 8.3 'Gebäudehülle').

Anwendung	PE_{ne} [MJ $m^{-2}a^{-1}$]	PE_{ne} [%]	Bauteil-Lebensdauer [Jahre]
Platten in der Gebäudehülle (inkl. Unterdach und dgl.)	5.94	27%	50 bis G (100)
BSH-Rahmen in der Gebäudehülle (Balken, Stützen und dgl.)	4.84	22%	G (100)
Fenster (inkl. Sonnenschutz)	4.71	21%	20 bis 25
Parkettböden	2.32	11%	25
Küchenmöbel	1.42	6%	25
Innen- und Aussentüren	1.35	6%	45
Interne Treppe	0.71	3%	65
Balkone	0.39	2%	60
Wandschränke	0.39	2%	45
TOTAL	22.07	100%	--

Tabelle 37: Die Aufteilung der Holzwerkstoffe bei Variante N_efh_4.

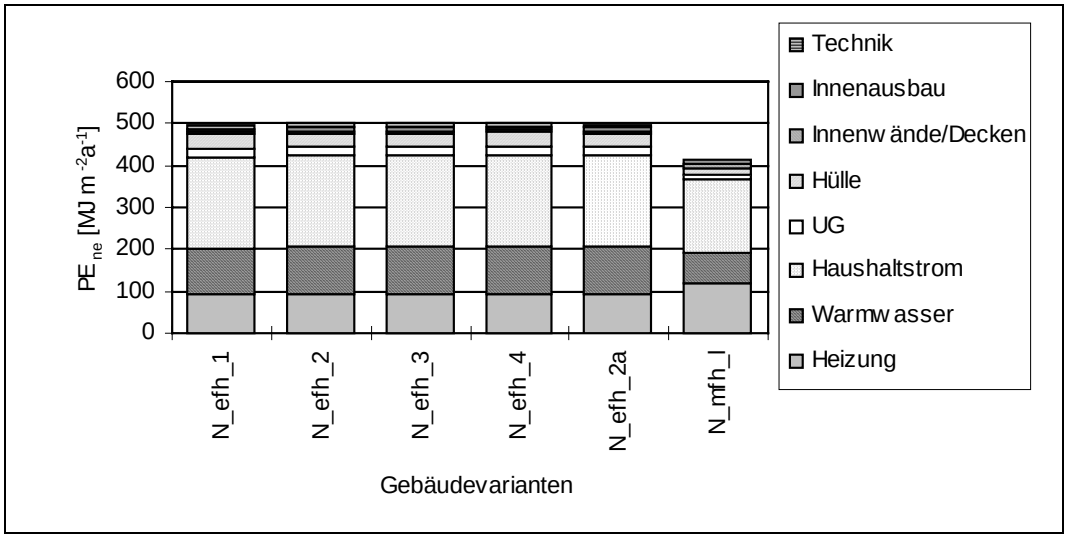


Abbildung 57: Der Einfluss auf die totale PE_{ne}-Nachfrage verschiedener Holzbauweisen beim EFH und beim MFH in üblicher Holzleichtbauweise.

Abbildung 57 setzt die Energienachfrage der Stoffflüsse in Relation zu den totalen Energieflüssen. Die Unterschiede der verschiedenen Holzbauarten gehen in der Dominanz der Betriebsenergie unter.

8.6.4 Stoffflüsse von Holzbauarten

Grundlagen

Im Kapitel 4.2.5 ‘Holzmodul‘ wird das Angebot an Bauholz im Wohnungsbau ermittelt. Dort werden auch die beiden Kategorien SFS (Schnittholz, Furniere, Sperrholz) und SpF (Spanplatten, Faserplatten) sowie verschiedene Optimierungsschritte in der Holzwirtschaft näher beschrieben.

Berechnungen und Kommentar

Tabelle 38 weist nach, dass in der Schweiz genügend Bauholz zur Verfügung steht, um auf nachhaltige Weise den Prozess Wohnen zu ermöglichen. Sogar das holzintensive EFH mit Rahmen aus Kantholz (oder BSH) weist bei der Kategorie SFS noch einen Überschuss von 7 kg $c^{-1}a^{-1}$ auf. Einzig in der Kategorie SpF weisen alle EFH-Varianten ein leichtes Minus auf, was aber mit dem Überschuss aus SFS ausgeglichen werden könnte.

[kg $c^{-1}a^{-1}$]	N_efh_1 (Stegträger)		N_efh_2 - 4 (Kantholz)		N_mfh_l (Kantholz)	
	SFS	**SpF**	**SFS**	**SpF**	**SFS**	**SpF**
Angebot	90	44	90	44	90	44
Nachfrage	- 71	- 46	- 83 *	- 46	- 51	- 44
Saldo	+ 19	- 2	+ 7	- 2	+ 39	0

Tabelle 38: Angebot und Nachfrage an Bauholz im Wohnungsbau (= mit Brettschichtholz -84 kg $c^{-1}a^{-1}$). Grundlage beim Angebot bilden die im Kapitel 4.2.5 ‘Holzmodul’ beschriebenen Optimierungsschritte in der Wald- und Holzwirtschaft.*

Mit Abstand die bessere Bilanz gegenüber dem EFH weist der MFH-Neubau auf. Mit dieser Bauweise könnte sogar auf einige der eingangs erwähnten Optimierungsschritte in der Holzwirtschaft verzichtet werden.

8.7 Metallbauteile

8.7.1 Einleitung und Kurzinformation

Ausgangslage

Einerseits gelten Metalle als grundsätzlich gut rezyklierbare Baustoffe, andererseits benötigen sie durch den aufwendigen Produktions- und Schmelzprozess einen hohen Energieinput zu ihrer Herstellung. Durch ihre hohe Dichte fallen sie deshalb auch bei minimaler Anwendung schnell einmal ins Gewicht.

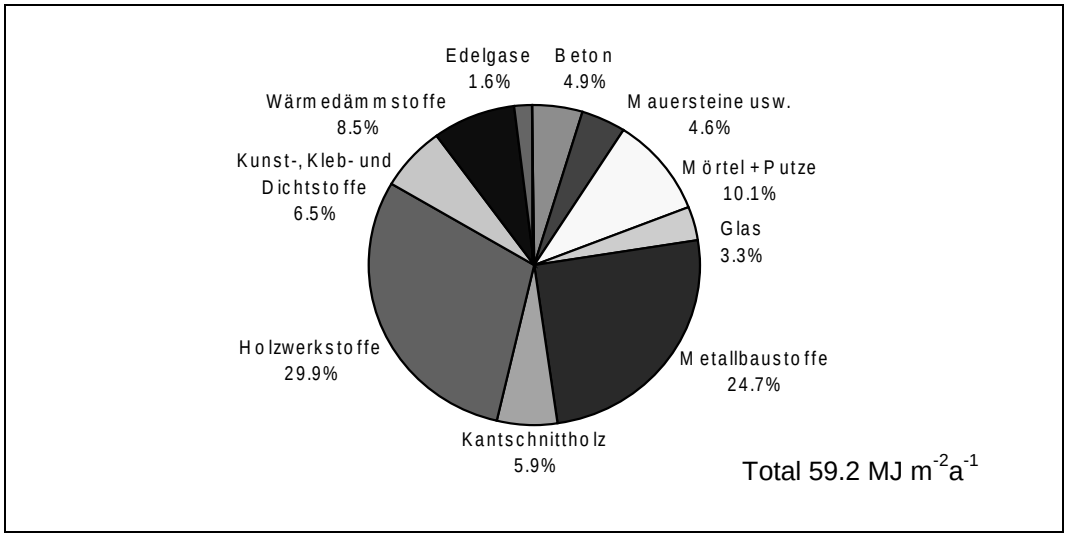


Abbildung 58: Die PE_{ne}-Nachfrage der verschiedenen Baustoffgruppen beim konventionellen Holzleichtbau N_mfh_l.

Aus Abbildung 58 entnehmen wir, dass bei einem konventionellen Holzleichtbau (N_mfh_l) der Anteil der Metalle an der gesamten Grauen Energie rund ¼ ausmacht. Nur gerade die Holzwerkstoffe liegen leicht darüber. Bei einer Sanierung können die Metalle durchaus den höchsten Anteil der Energienachfrage der Baustoffe ausmachen. Zudem ist der untersuchte Neubau nicht mit speziellen Metallbaustoffen ausgestattet (kein Metalldach, keine Lüftung usw.).

Fragestellung

- Wie sensitiv ist der Einfluss von Metallbaustoffen auf die gesamte Graue Energie? Kann die übermässige Anwendung von Metallbauteilen die gute Bilanz von Holzleichtbauten verändern?
- Was bringt ein maximales Metallrecycling?
- Wie groß ist der Metallanteil von Küchengeräten und -abdeckungen?

Die wichtigsten Erkenntnisse

Metalle können in Bilanzen von Grauer Energie bis 40% Anteil haben und sind deshalb nicht zu vernachlässigen.

Durch das weitere Vorantreiben von Recyclingmassnahmen im Stahl- und Metallbereich kann die Primärenergienachfrage weiter gesenkt werden.

Küchen haben durch Ihre kurzen Lebensdauern und Ihren hohen Anteil an Metallbaustoffen in den Geräten einen Anteil von 10 bis 20% an der gesamten Grauen Energie.

8.7.2 Graue Energie von Metallbauteilen

Grundlagen

Tabelle 39 zeigt, welche Metallbauteile beim Neubau in Holzleichtbauweise wieviel Graue Energie nachfragen.

Anwendung	PE_{ne} [MJ $m^{-2}a^{-1}$]	PE_{ne} [%]	Bauteil-Lebensdauer [Jahre]
Küchengeräte + Chromstahlabdeck.	4.3	31%	15
Stahlprofile bei Erschliessungslaube	2.9	21%	60
Div. Beschläge bei Fenster (Wetterschenkel, Abstandhalter usw.)	1.4	10%	20
Mechanismus bei Sonnenschutz	1.1	8%	25
Armierungsstahl im UG	1.0	7%	G
Armaturen Nassräume	1.0	7%	40
Kupferdrähte bei Elektrokabel	0.8	6%	25
Kupfer bei Spenglerarbeiten	0.7	5%	45
Speicher/Boiler	0.6	4%	25
Beschläge Türen	0.2	1%	45
TOTAL Metalle	14.0	100%	-

Tabelle 39: Die PE_{ne}-Nachfrage der Metallbauteile bei der Variante N_mfh_l.

Berechnungen und Kommentar

Beim Objekt N_mfh_l wurden nun schrittweise verschiedene Nichtmetallbauteile mit Metallbauteilen ausgewechselt. Bei den Haustechnikkomponenten Lüftung und Wärmeabgabe muss gesagt werden, dass eine isolierte Betrachtung der Grauen Energie grundsätzlich nicht sinnvoll ist, da diese Massnahmen auf der anderen Seite natürlich auch Energieeinsparungen mit sich bringen.

Massnahme	PE_{ne} der Baustoffe total [MJ $m^{-2}a^{-1}$]	davon Metalle [MJ $m^{-2}a^{-1}$]
Ausgangslage	59 (0)	14 (24.4%)
Metallsandwich- statt Holzküchen	61 (+2)	18 (29.6%)
Kupferdach statt Tonziegel	64 (+3)	22 (33.6%)
Verteilleitungen: Kupfer statt HDPE	66 (+2)	24 (35.7%)
Radiatoren statt Bodenheizung (HDPE)	67 (+1)	26 (38.4%)
Mech. Lüftung mit WRG	70 (+3)	28 (40.4%)

Tabelle 40: Die PE_{ne}-Nachfrage der Baustoffe bei erhöhten Metallanwendungen beim konventionellen Holzleichtbau N_mfh_l.

Tabelle 40 zeigt, dass der Ersatz einiger Bauteile mit durchaus gängigen Metallbauelemente die PE_{ne}-Nachfrage der Baustoffe von 59 auf 70 MJ $m^{-2}a^{-1}$ erhöhen kann. Der konventionelle Neubau in Massivbauweise (N_mfh_m) hat eine PE_{ne}-Nachfrage der Baustoffe von 74 MJ $m^{-2}a^{-1}$, also nur unwesentlich über dem Leichtbau. Zudem ist zu berücksichtigen, dass der Metallanteil verdoppelt wurde (von 14 auf 28 MJ $m^{-2}a^{-1}$).

Metalle sind also bei Betrachtungen der Grauen Energie unbedingt zu berücksichtigen. Bei unkontrollierter Anwendung von Metallbauteilen kann ein Leichtbau in die Grössenordnung eines Massivbaus zu liegen kommen.

8.7.3 Maximales Metallrecycling

Metalle benötigen bei der Herstellung zwar einen recht hohen Energieaufwand, sind aber andererseits sehr gut rezyklierbar und bieten daher kaum Ressourcen- oder Entsorgungsprobleme. Die Sekundärproduktion (Recycling) benötigt zudem weniger Energie als die Primärproduktion aus Erzen.
In der Schweiz werden bereits heute einige Metalle zu hohen Anteilen rezykliert. Als Beispiel darf der Betonstahl erwähnt werden, welcher zu über 90% aus Schrott hergestellt wird (Weibel & Stritz 1995). Der so produzierte Stahl benötigt noch 14 MJ kg^{-1} Primärenergie anstelle 40 MJ kg^{-1} bei der Primärherstellung.
Würden nun sämtliche Metalle einem maximalen Recycling (zu ca. 95%) zugeführt, ergäbe sich das in Tabelle 41 ersichtliche Bild.

Massnahme	**PE_{ne} der Baustoffe total [MJ $m^{-2}a^{-1}$]**	**davon Metalle [MJ $m^{-2}a^{-1}$]**
wie Ausgangslage, jedoch sämtliche Metalle rezykliert	57	13 (22.1%)
mit sämtlichen Metallbauteilen wie in Tabelle 40, jedoch sämtliche Metalle rezykliert	65	23 (35.6%)

Tabelle 41: Die PE_{ne}-Nachfrage der Baustoffe bei einem maximalen Metallrecycling beim konventionellen Holzleichtbau N_mfh_l.

Würden sämtliche Metalle soweit als möglich rezykliert, könnte also zwischen 4% und 8% der gesamten Grauen Energie (2 bis 5 MJ m^{-2} a^{-1}) eingespart werden.
Durch das Metallrecycling können also Erfolge erzielt werden. Es besitzt in der Schweiz bereits eine gewisse Tradition, sollte aber weiter vorangetrieben werden. Tabelle 42 zeigt die heutigen Recyclingraten in der Schweiz, welche auch in diesem Projekt verwendet wurden.

Metall	**Heutige Recyclingrate [%]**	**PE_{ne} der Herstellung mit heutigem Recycling [MJ kg^{-1}]**	**PE_{ne} der Herstellung mit max. Recycling (95%) [MJ kg^{-1}]**
Armierungsstahl	90%	14	12
Baustahl	10%	28	12
Gusseisen	73%	28	21
Aluminium	30%	396	267
Kupfer	40%	97	32
Chromnickelstahl	10%	54	52 (mit Rec.Stahl)

Tabelle 42: PE_{ne}-Nachfrage und Recyclingraten von Metallbaustoffen in der Schweiz (Quelle Weibel & Stritz 1995).

8.7.4 Küchen

Abbildung 59 zeigt uns die PE_{ne}-Nachfrage der Gebäudeelemente wiederum beim konventionellen Holzleichtbau. Wie wir schon gesehen haben, machen die Fenster durch ihre kurze Lebensdauer, die Verwendung von energieintensiven Edelgasen sowie Beschläge den grössten Teil aus.

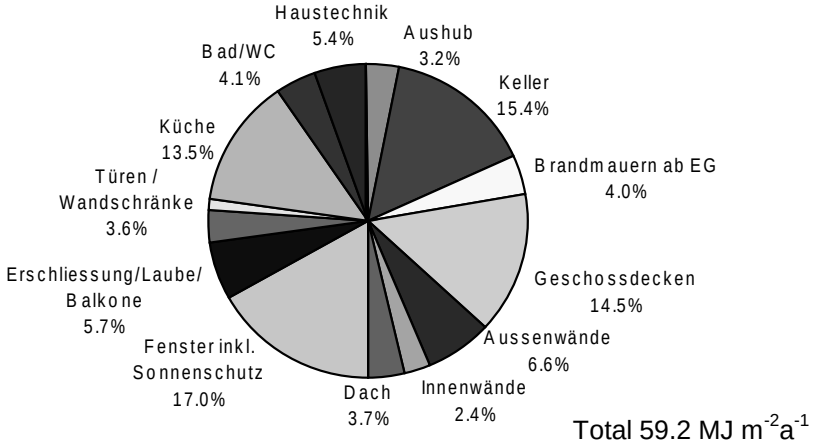


Abbildung 59: PE_{ne}-Nachfrage der verschiedenen Gebäudeelemente beim konventionellen Holzleichtbau N_mfh_l.

Gefolgt werden die Fenster vom Keller (Beton) und den Geschossdecken (Holz, Unterlagsböden usw.). Bereits an vierter Stelle finden sich die Küchen, noch vor den Aussenwänden oder der Haustechnik! Tabelle 43 zeigt die Ursache dieses überraschenden Effektes.

Kategorie	Material	PE_{ne}-Nachfrage [MJ $m^{-2}a^{-1}$]	Lebensdauer [Jahre]
Küchengeräte	Stahl, Chromst., Guß Kunststoffe Glas	4.3 0.8 0.2	15
	total	5.2	
Küchenmöbel	Spanplatten Kunstharzbeschichtung	2.1 0.5	25
	total	2.6	

Tabelle 43: Die PE_{ne}-Nachfrage der Küchen beim konventionellen Holzleichtbau.

Vorallem die Metalle, die in den Küchengeräten stecken sowie deren kurze Lebensdauern bewirken die relativ grosse PE_{ne}-Nachfrage.
Weiter wurde nun untersucht, wie groß die Graue Energie von Küchen sein kann, wenn Materialien oder Lebensdauern verändert werden. Dabei wurde bei den Lebensdauern der Geräte eine Bandbreite von 10 bis 20 Jahren, bei den Möbeln von 20 bis 30 Jahren angenommen.

Küchentyp	PE_{ne} bei min. Lebensdauer [MJ $m^{-2}a^{-1}$]	PE_{ne} bei mittlerer Lebensdauer [MJ $m^{-2}a^{-1}$]	PE_{ne} bei max. Lebensdauer [MJ $m^{-2}a^{-1}$]
Spanplatten mit Kunstharz-Beplankung	10.8	7.9	6.4
Massivholz mit Naturstein-arbeitsplatte	10.3	7.5	6.1
Metallsandwich mit Chrom-stahlarbeitsfläche	12.9	9.6	8.1

Tabelle 44: Die PE_{ne}-Nachfrage verschiedenerer Küchen bei unterschiedlichen Lebensdauern.

Geht man von einer durchschnittlichen PE_{ne}-Nachfrage beim Leichtbau von 59 MJ m^{-2} a^{-1} aus, so kann der Anteil der Küchen an der Grauen Energie zwischen 11% und 20% schwanken.

8.8 Energieflüsse pro Quadratmeter oder pro Kopf

8.8.1 Einleitung und Kurzinformation

Ausgangslage

Ökobilanzen im Bauwesen können nach unterschiedlichen Bezugsgrössen (funktionale Einheit) ausgewertet und dargestellt werden. Zur Auswahl stehen entweder

- ein gebäudespezifisches Maß (Nutzungseinheit) → Energie pro m^2 EBF oder pro m^3 beheiztes Volumen
- ein nutzungsspezifisches Maß (Belegungsdichte) → Energie pro Person.

Ein Bezug zu einem gebäudespezifischen Maß stellt in diesem Sinne ein Gebäudevergleich, ein Bezug zur Belegungsdichte ein Nutzungsvergleich dar.

Fragestellung

- Wie unterscheiden sich die Resultate bei verschiedenen funktionalen Einheiten?
- Wie verändern sie sich bei unterschiedlicher Belegungsdichte, also bei gleichbleibender NGF-Beanspruchung pro Person (z.B. 30 m^2 pro Person) anstelle einer Beanspruchung, die von der Wohnungsgrösse abhängig ist (z.B. 2.0 Personen pro 3-Zi-Whg)?

Die wichtigsten Erkenntnisse

Die Wahl der funktionalen Einheit wirkt sich entscheidend auf die Endresultate aus. Bezieht man die Resultate wie in Kreisen der Ökobilanzierer üblich auf die Energiebezugsfläche (MJ $m^{-2}a^{-1}$), so drückt sich der Umstand, dass eine grosse Wohnung absolut gesehen eine ökologische Mehrbelastung darstellt, nicht in den Ergebnissen aus. Um dies zu berücksichtigen , wird in diesem Projekt als funktionale Einheit grundsätzlich ein nutzungsspezifisches Maß (kWh $c^{-1}a^{-1}$) verwendet, in den Parameterstudien dagegen ein gebäudespezifisches (MJ $m^{-2}a^{-1}$).

8.8.2 Fläche oder Bewohner als Bezugsgrösse

Grundlagen

Wohnungsgrösse	Belegung [c]
1-Zimmer- Wohnung	1.2
2-Zimmer- Wohnung	1.4
3-Zimmer- Wohnung	2.0
4-Zimmer- Wohnung	2.7
>4-Zimmer- Wohnung	3.0
EFH (je nach Objekt)	3.0, 4.0, ...

Tabelle 45: Schweizerische, durchschnittliche Belegung verschiedener Wohnungstypen (Quelle: BfS 1990)

Objekt	EBF [m²]	Belegung [c]	EBF pro Person [m²]	NGF pro Person [m²]	NGF/EBF
1_C	2'120	48.0	44.2	29.4	0.67
2_C	211	4.0	52.9	36.4	0.68
3_C	795	16.2	49.1	30.6	0.62
4_C	4'993	111.6	44.7	34.9	0.78
5_C	884	16.0	55.2	32.7	0.59
N_mfh_lo	867	19.0	45.6	34.3	0.75

Tabelle 46: Resultierende Belegungsdichte der untersuchten Objekte

Berechnungen und Kommentar

Großzügige Wohnungen können bei einer Auswertung nach Fläche gut abschneiden: das am meisten EBF (54.6 m^2) beanspruchende Objekt 5 liegt unscheinbar im Durchschnitt (Abbildung 60). Dagegen schneidet es bei der Auswertung nach Bewohner am schlechtesten ab (Abbildung 61). Allerdings muss gesagt werden, dass der hohe EBF-Anteil nicht nur auf die relativ grosszügigen Grundrisse zurückzuführen ist (72 m^2 für eine 3-Zimmer-Wohnung), sondern auch auf den hohen Treppenhausanteil pro Wohnung und die 40 cm dicken Backsteinmauern beanspruchen ebenfalls viel Platz. Dementsprechend die tiefste PE_{ne}-Nachfrage hat Objekt 1, das auch den tiefsten EBF-(und NGF-) Anteil pro Bewohner aufweist.

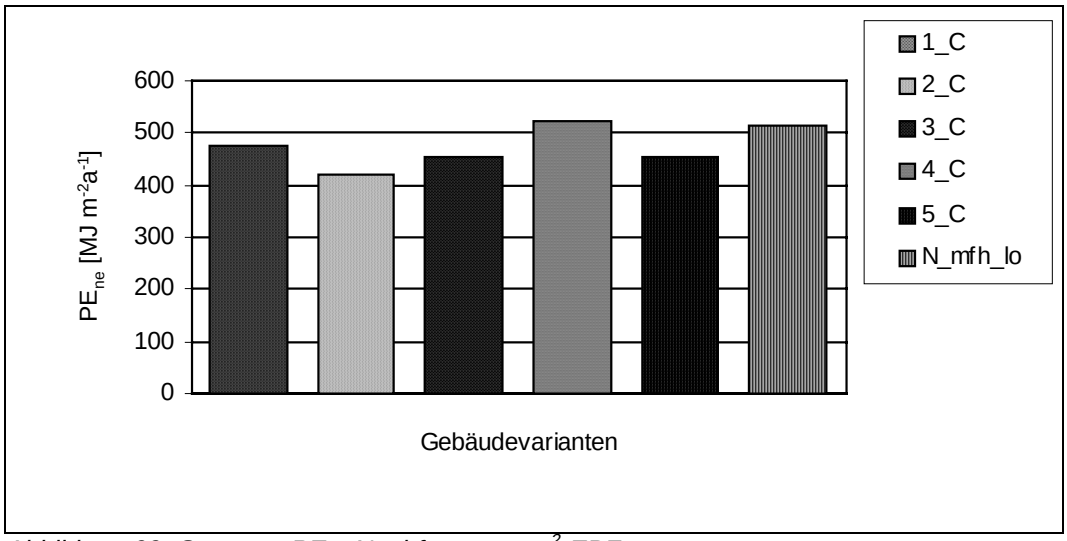


Abbildung 60: Gesamte PE_{ne}-Nachfrage pro m^2 EBF.

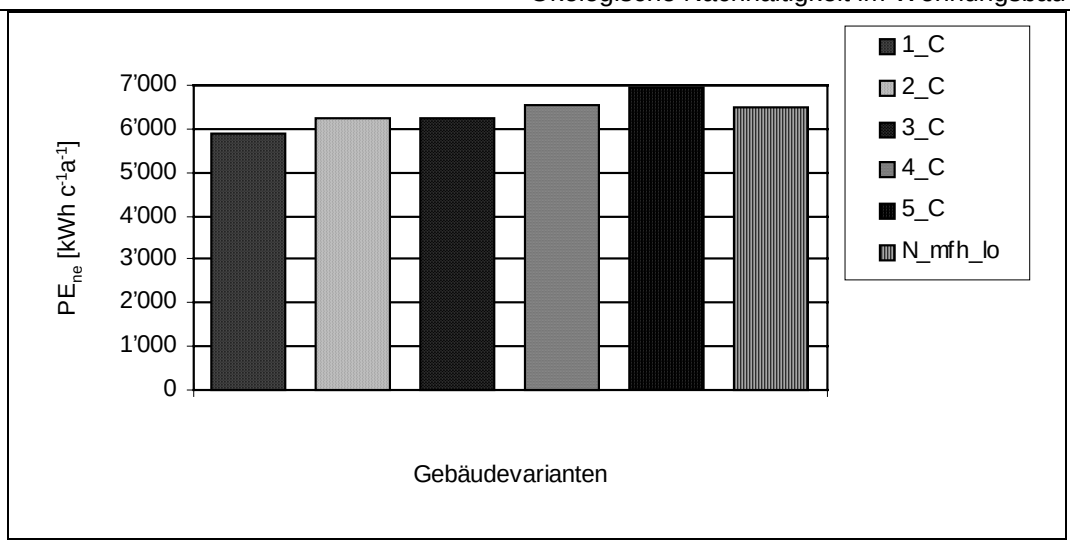


Abbildung 61: Gesamte PE_{ne}-Nachfrage pro Bewohner.

Bezieht man die Resultate auf die Energiebezugsfläche (MJ $m^{-2}a^{-1}$), so drückt sich der Umstand, dass eine grosse Wohnung eine Mehrbelastung darstellt, nicht in den Ergebnissen aus. Beträgt bei einem Einfamilienhaus der Heizenergiebedarf 50 MJ $m^{-2}a^{-1}$, lässt er sich beispielsweise mit 100 MJ $m^{-2}a^{-1}$ in einem MFH gleichsetzen, wenn im EFH die doppelte Wohnfläche pro Person beansprucht wird. Allerdings ist es auch so, dass die Belegung nie exakt bestimmbar ist und somit nur allgemeine Aussagen möglich sind.

8.8.3 Variierung der Nettogeschossfläche pro Person

Grundlagen

In Abbildung 15 wurde gezeigt, dass der optimierte Holzleichtbau eine leicht höhere PE_{ne}-Nachfrage als beispielsweise die optimierte Sanierung in Biel (3_C) hat. Jedoch hat der Neubau auch die extensivere Belegung, nämlich 34.3 m^2c^{-1} gegenüber 30.6 m^2c^{-1} beim Sanierungsobjekt.

Berechnungen und Kommentar

Erhöht man nun beim Neubau die Belegung auf vergleichbare 30.6 m^2 c^{-1} an, so wendet sich das Blatt (Tabelle 47): die PE_{ne}-Nachfrage des Neubaus sinkt auf rund 6'000 kWh c^{-1} a^{-1}, also rund 3% besser als bei der Sanierung. Die Wahl der Personenbelegung wirkt sich also entscheidend auf das Schlussresultat aus!

	3_C [30.6 m^2c^{-1}]	**N_mfh_lo [34.3 m^2c^{-1}]**	**N_mfh_lo [30.6 m^2c^{-1}]**
Nettowohnfläche NGF [m^2]	496	652	652
Personen pro Gebäude	16.2	19.0	21.3
PE_{ne}-Nachfrage [kWh $c^{-1}a^{-1}$]	6'158	6'505	6'002

Tabelle 47: Veränderte PE_{ne}-Nachfrage bei unterschiedlicher Belegung.

9 Kriterien nachhaltiger Entwicklung im Wohnungsbau

Der methodische Ansatz, am Beispiel von fünf realen und typischen Wohngebäuden die Energie- und Stoffflüsse möglicher Erneuerungsstrategien minutiös und über den ganzen Existenzzyklus zu beschreiben, hat ein überraschend einheitliches und klares Bild geliefert. Die Methode garantiert auch Praxisnähe und legt nahe, möglichst umsetzungsorientierte Schlussfolgerungen zu ziehen, was nachstehend versucht wird. Die Zuspitzung der Erkenntnisse zu Handlungsanweisungen ist mit Vereinfachungen und Verallgemeinerungen verbunden. Es sollen deshalb zunächst einige methodenbedingte Vorbehalte und Relativierungen formuliert werden und die wichtigen Randbedingungen und Systemgrenzen der Arbeit in Erinnerung gerufen werden, damit die Schlussfolgerungen richtig verstanden und umgesetzt werden. Ein Rechenmodell, das einen so komplexen und benutzerabhängigen Sachverhalt wie die Stoff- und Energieflüsse von Wohnbauten beschreibt, stellt nicht einfach die Wahrheit dar, sondern eine plausible Abbildung des Geschehens. Die Resultate können durch die Fülle der wählbaren Rahmenbedingungen, Annahmen und Systemgrenzen in einem weiten Bereich gesteuert werden. Die wichtigsten Rahmenbedingungen sind die Folgenden:

- Beschränkung auf Wohnbauten.
  Die Übertragung der Resultate auf andere (beheizte) Nutzungskategorien ist möglich. Allerdings müssen vor allem Unterschiede im Elektrizitätsverbrauch für den Betrieb sowie im Stoffflussbereich allenfalls wesentlich grössere Mengen an Metall beachtet werden.
- Klima.
  Die Übertragung der Fallbeispiele auf andere Regionen des schweizerischen Mittellandes und insbesondere in alpine oder voralpine Gegenden akzentuieren noch die Bedeutung des Wärmeschutzes. Übertragungen in deutlich andere, z.B. südländische Klimata dürften problematisch sein.
- Primärenergieverbrauch zur Stromerzeugung gemäss gegenwärtiger Situation im europäischen Raum (UCPTE).
  Die Frage des Strommixes, der Ökobilanzen (bzw. ökobilanzähnlichen Ansätzen) zugrunde gelegt wird, ist von grossem Einfluss, sehr umstritten und nicht losgelöst von Wertsetzungen zu beantworten. Wir haben als Grundvariante den Strommix gewählt, der die Wertigkeit der Elektrizität am stärksten betont.
- Standardnutzung und Bewohnerverhalten (basierend auf Empfehlung SIA 380/1). Das Modell geht von einfachen, standardisierten und unflexiblen Annahmen bezüglich des Benutzerverhaltens aus und missachtet allfällige Auslagerungen von Umweltbelastungen durch Massnahmen. Werden beispielsweise im Rahmen einer Sanierungsvariante Kleinwohnungen zu grossen Wohnungen zusammengelegt, sinkt der Verbrauch, weil die Belegungsdichte und die Installationsdichte (Küchen) ändert. Dadurch verbessert sich die Bilanz dieser Sanierungsvariante. Die Bewohner von Kleinwohnungen werden aber anderswo eine Kleinwohnung mit entsprechend hoher spezifischer Umweltbelastung belegen.
- Energie als Schlüsselindikator.
  Obwohl sich der Energieverbrauch, ganzheitlich betrachtet und auf Primär- wie Endverbrauchsstufe analysiert, als aussagekräftige Messlatte der Umweltbelastung bewährt, bildet er gewisse Belastungen nicht ab, z.B. Altlasten.

Im folgenden werden die wesentlichsten Erkenntnisse aus der Arbeit in 10 Aussagen zu Schlussfolgerungen und Empfehlungen verdichtet:

1) **In erster Linie muss die Betriebsenergie, also Heizenergie, Warmwasser und Haushaltelektrizität, reduziert werden. Sie ist der mit Abstand dominierendste Umweltbelastungsfaktor.**
   Bei den fortschrittlichen Neubauten und Sanierungen liegt sie im Bereich von 85% der nicht erneuerbaren Primärenergie, bei einem unsanierten Bau kann sie vor allem durch den grossen Heizenergiebedarf bis zu 98% ausmachen. Erneuerungsstrategien für bestehende Wohnbauten sollten also die künftig anfallende Betriebsenergie ins Zentrum der Optimierungsbemühungen rücken anstelle von Überlegungen zu den Stoffflüssen oder der Grauen Energie.

2) **Bei bestehenden, sanierungsbedürftigen Bauten sollte zuerst der Heizenergiebedarf reduziert werden. Der Optimierungsspielraum liegt meist im Bereich von weit über 100 MJ $m^{-2}a^{-1}$.**
   Bei allen untersuchten bestehenden Objekten hatte die Heizenergie den grössten Anteil an der gesamten Betriebsenergie. Durch die Reduktion des Heizenergiebedarfes und der Verbesserung von Wirkungsgraden von Heizsystemen konnte die fürs Heizen benötigte, nicht erneuerbare Primärenergie je nach Objekt um 81% bis 94% reduziert werden. Die Bedeutung des Wärmeschutzes von Wand, Dach, Boden und Fenster ist in diesem Zusammenhang von vorrangiger Bedeutung. Aus ökologischer Sicht sollten die Dämmschichten so dick wie technisch möglich und wirtschaftlich verkraftbar gewählt werden. Ebenfalls besonders interessant ist der Einbau von Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung, wo dies technisch möglich und mit verhältnismässigem Aufwand durchführbar ist. Allerdings muss beachtet werden, dass die Belastung auf Primärenergieebene rasch sehr gross werden kann und die Massnahme in Frage stellt, wenn die Anlage nicht sorgfältig konzipiert und dimensioniert wird. Zum Beispiel könnte bei langen Kanalsystemen die Ventilatorleistung (Druckabfall) und der Einsatz an Material (Metalle) stark zu Buche schlagen.

3) **Die Nachfrage nach Haushaltelektrizität muss kontrolliert und optimiert werden. Sie macht bei optimierten Neubauten wie Sanierungen mehr als die Hälfte an der gesamten, nicht erneuerbaren Primärenergie aus.**
   Die genaue Grösse ist von der Wahl der geographischen Systemgrenzen abhängig. Bei einem Neubau in Holzleichtbauweise beträgt sie für den Betrachtungsraum Europa 280 MJ $m^{-2}a^{-1}$ und für den Betrachtungsraum Schweiz 196 MJ $m^{-2}a^{-1}$. Im Rahmen von Erneuerungsstrategien für Wohnbauten sollte beim Geräteersatz konsequent „best available technology“ im Sinne der Energieeffizienz eingesetzt werden. Im weiteren sind Tageslichtbeleuchtung und Bewohnerinformation bedenkenswerte Aspekte.

4) **Das Ziel des nachhaltigen Bauens kann nur erreicht werden, wenn Energieverbrauchsreduktion und Energieeffizienzsteigerung durch die Nutzung möglichst umweltverträglicher erneuerbarer Energien ergänzt wird.**
   Auch die Nutzung erneuerbarer Energie ist mit Ressourcenbelastung (z.B. Landschaft) und Emissionen (z.B. Holzfeuerungsrauchgase) verbunden. Für den Wohnungsbau ist der Einsatz dezentraler aktiver thermischer Solarnutzung für die Erzeugung von Warmwasser wie auch die passive Solarnutzung sehr naheliegend.

5) **Neubauten brauchen mehr Graue Energie als Sanierungen. Dieser Mehraufwand liegt im extremsten Fall bei knapp 50 MJ $m^{-2}a^{-1}$ nicht erneuerbarer Primärenergie. Wenn bei der Variante Abbruch/Neubau die Betriebsenergie um mehr als 50 MJ $m^{-2}a^{-1}$ tiefer als bei der Sanierungsvariante gesenkt werden kann, so ist der Neubau energetisch besser als die Sanierung.**
   Die Differenz von 50 MJ $m^{-2}a^{-1}$ PE_{ne} ist das Resultat der Gegenüberstellung der beiden in dieser Hinsicht extremsten Varianten, nämlich einem bestehenden, unsanierten Objekt und einem konventionellen Neubau in Massivbauweise. Wird ein Neubau mit einer Sanierung des gleichen Standards verglichen, ist die Differenz viel kleiner, beispielsweise ca. 10 MJ $m^{-2}a^{-1}$ beim Vergleich eines fortschrittlichen Neubaus in Holzleichtbauweise mit einer fortschrittlichen Sanierung.

6) **Die Graue Energie ist nicht zu vernachlässigen, da sie normalerweise in der Grössenordnung von 30 bis 85 MJ $m^{-2}a^{-1}$ nicht erneuerbarer Primärenergie liegt.**
   Der Bedarf an Grauer Energie ist relativ unelastisch durch die Erstellung oder Sanierung von Gebäuden bedingt. Naturgemäss kann sie dann eingespart werden, wenn die

Möglichkeit des Nichtbauens eine mögliche Alternative ist. Die Fälle, wo durch den Verzicht auf Bauen, Umbauen oder Sanieren nicht ein Ersatzbedarf (auch an Grauer Energie) an anderer Stelle geschaffen wird, sind jedoch selten.
Der Aufwand an Grauer Energie für die Erstellung eines Gebäudes, umgelegt auf eine Lebensdauer von beispielsweise 100 Jahren, ergibt die obenstehenden Werte, die im Vergleich mit dem jährlichen Energiebedarf für den Betrieb eher bescheiden wirken. Eigentlich müsste aber die Ungewissheit, ob ein Gebäude dieses Alter überhaupt erreicht, einen Diskontierungseffekt haben. Immerhin werden heute immer häufiger Bauten, die keine fünfzig Jahre alt sind, abgebrochen. Es ist daher wichtig, sich bewusst zu bleiben, dass ein grosser Teil dieser 30 bis 85 MJ $m^{-2}a^{-1}$ als geballter Grauenergieverbrauch in der Grössenordnung 3'000 und 5'000 MJ m^{-2}_{EBF} bei der Erstellung „auf einen Schlag“ anfällt.

7) **Der Optimierungsspielraum ist bei der Grauen Energie deutlich geringer als beispielsweise bei der Heizenergie und liegt im Bereich von höchstens 35%.**
Wird zum Beispiel ein konventioneller Neubau in Massivbauweise (Szenario IST) mit einem Holzleichtbau verglichen, bei dem nur Baustoffe eingesetzt werden, die mit den besten heute verfügbaren Technologien hergestellt wurden und die Transportdistanzen zur Baustelle um 30% reduziert wurden (Szenario SOLL), kann die Graue Energie von 76 auf 50 MJ m^2a^{-1} reduziert werden. Das Optimierungspotential ist nur leicht höher, wenn Mehrfamilienhäuser mit Einfamilienhäusern oder Sanierungen mit Neubauten verglichen werden. Meist liegen die realen Handlungsalternativen jedoch wesentlich näher zusammen. Trotzdem ist es sicher wünschenswert, durch gezielte Baustoffwahl, Bevorzugung von Rezyklaten und Erhöhung der Einsatzdauer von Bauelementen den Bedarf an Grauer Energie minimal zu halten.

8) **Baustoffen, die für Unterhalts- und Erneuerungsarbeiten eingesetzt werden, muss eine höhere Bedeutung zukommen. Deren Anteil ist mindestens gleich bedeutend wie der Aufwand an Grauer Energie, der bei Neubauten für die Erstellung und bei Sanierungen für die Eingriffsmassnahmen anfällt.**
Nur gerade bei einem der untersuchten Objekte ist die Graue Energie für die Sanierung leicht höher als für Unterhalt und Erneuerung. Für die Dominanz der Unterhalts- und Erneuerungsmassnahmen sind vor allem Bauteile mit relativ kurzer Lebensdauer wie Fenster oder Küchengeräte verantwortlich.

9) **Grundsatzentscheide über Bausystem, Gebäudetyp und Baukörper sind zur Reduktion der Grauen Energie viel wichtiger als die Wahl geeigneter Produkte.**
Zum Beispiel liegt die Graue Energie bei einem Neubau in Holzleichtbauweise ca. 16 MJ $m^{-2}a^{-1}$ tiefer als bei einem vergleichbaren Neubau in Massivbauweise. Oder bei einem Mehrfamilienhaus in Holzleichtbauweise ist sie ca. 28 MJ $m^{-2}a^{-1}$ tiefer als bei einem Einfamilienhaus der gleichen Bauweise.
Dagegen kann die Graue Energie beim Massivbau bei der Variation von Backsteinen aus unterschiedlichen Herstellerwerken oder der Verwendung von Kalksandsteinen statt Backsteinen nur um 4 MJ $m^{-2}a^{-1}$ und beim Holzleichtbau durch die Wahl von natürlich statt technisch getrocknetem Holz nur um 5 MJ $m^{-2}a^{-}1$ gesenkt werden.

10) **Zwischen Energie- und Stoffflüssen besteht praktisch keine Korrelation. Die Grösse von Stoffflüssen kann deshalb nicht als Indikator für Umweltbelastungen verwendet werden.**
Bei einem unsanierten Mehrfamilienhaus betragen die Stoffflüsse 3 kg $m^{-2}a^{-1}$ und bei der fortschrittlichen Sanierung des gleichen Objektes 5 kg $m^{-2}a^{-1}$. Mit der Sanierung kann der Bedarf an nicht erneuerbarer Primärenergie insgesamt jedoch um 48% gesenkt werden. Untersuchungen anderer Autoren zeigten, dass der Primärenergieverbrauch gut als Bewertungsgrösse für Umweltbelastungen verwendet werden kann, da andere Belastungen wie CO_2-Aequivalente oder Versäuerungspotential weitgehend proportional zum Primärenergieverbrauch verlaufen (Intep 1999).

10 Vergleichsbetrachtungen

10.1 Wärmedämmvorschriften der Behörden

Grundlagen

In den meisten Schweizer Kantonen gelten für Gebäude Wärmeschutzvorschriften nach der Musterverordnung (MVO) vom März 1992. Der Heizenergiebedarf-Grenzwert ist vom Verhältnis A/EBF abhängig und berechnet sich für Wohnbauten nach folgender Formel:

- für Neubauten: < 120 + 100*(A/EBF)
- für Sanierungen: < 200 + 100*(A/EBF)

Bei den Warmwasseranlagen stützen sich die meisten Kantone ebenfalls auf die Musterverordnung oder auf SIA-Normen. Für die Bereiche Haushaltelektrizität und Graue Energie gibt es kaum Normen oder Standards.

Sanierungen

In Abbildung 62 wird der Heizenergiebedarf der verschiedenen Erneuerungsstrategien von Objekt 1 dem MVO-Grenzwert gegenübergestellt. 1_C_PV stellt eine Variante dar, die grundsätzlich mit 1_C identisch ist, was heisst, dass der Heizenergiebedarf gleich hoch ist. Jedoch wird das Energiemanko mit dem Zubau von Photovoltaik-Fläche ausgeglichen, so dass die Bilanzzahl B_{el} Null beträgt. Zu beachten ist dabei, dass als Strommix in dieser Arbeit ja der europäische Netzverbund (UCPTE) gewählt wurde. Bei diesem beträgt der Anteil an erneuerbarer Wasserkraft nur ca. 15%, im schweizerischen Strommix dagegen ca. 57%, also rund 4 mal mehr. Wenn man nun das Angebot an anderen erneuerbaren Energiequellen vernachlässigt (Wind, Biomasse usw.) heisst das, dass der Heizenergiebedarf rund vier mal tiefer sein müsste als bei der Berechnung mit dem schweizerischen Strommix.

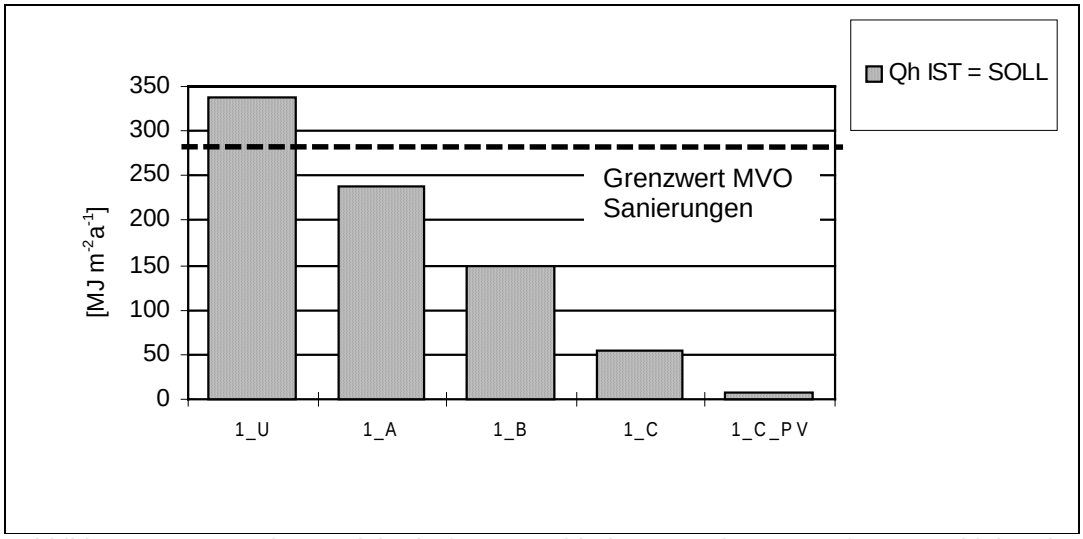


Abbildung 62: Der Heizenergiebedarf Q_h verschiedener Sanierungsstufen von Objekt 1 im Vergleich zum Grenzwert nach MVO. Bei 1_C_PV wurde das Manko an erneuerbarer Energie mit dem Zubau von Photovoltaik ausgeglichen, weshalb der Heizenergiebedarf entsprechend tiefer dargestellt wurde.

Der MVO-Grenzwert kann als mild eingestuft werden, da er mit einer minimalen Sanierung (Fensterersatz, UG-/DG-Decken gedämmt) bereits eingehalten werden kann.

Neubauten

Die Heizenergiebedarfe der verschiedenen Neubauten sowie deren Grenzwerte nach MVO sind in Abbildung 63 ersichtlich. Auch hier liegen die durchschnittlichen Bauweisen (N_mfh_l und N_mfh_m) bereits recht deutlich unter dem Grenzwert.

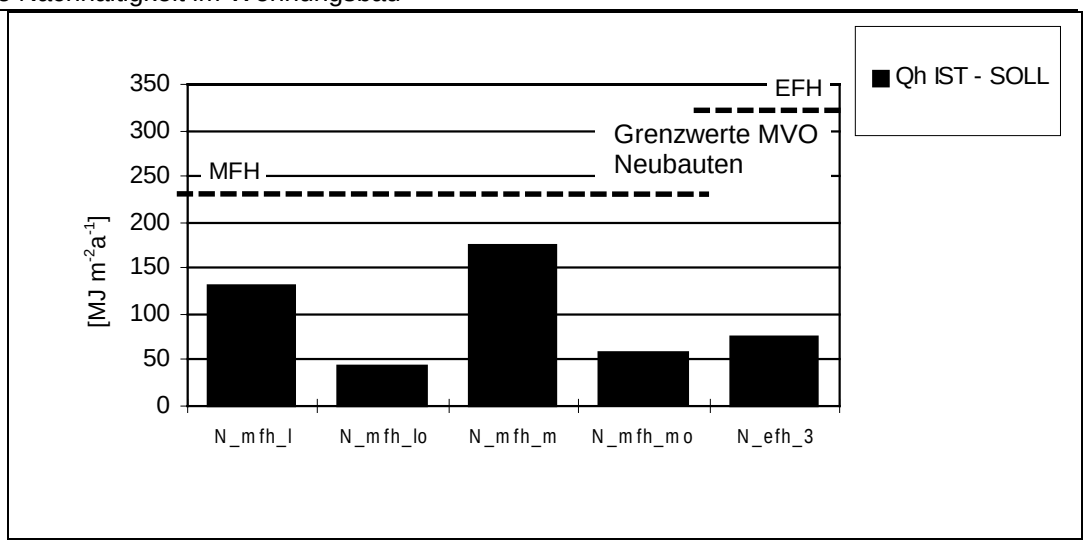


Abbildung 63: Der effektive Heizenergiebedarf Q_h der Objekte N_mfh, N_efh sowie der Grenzwert nach MVO.

10.2 MINERGIE®

Grundlagen

Der generelle Begriff *MINERGIE®* steht für rationelle Energieanwendung und den Einsatz erneuerbarer Energien - bei gleichzeitiger Verbesserung von Lebensqualität und Konkurrenzfähigkeit sowie Senkung der Umweltbelastung. *MINERGIE®* soll den Verbrauch nichterneuerbarer Energien auf ein umweltverträgliches Niveau reduzieren.
Für ausgewählte Anwendungsbereiche wurden Standards festgelegt. Im Baubereich werden diese über die Energiekennzahl Wärme E_w (gewichtete Endenergie Heizung und Warmwasser pro EBF) definiert. Dem höheren Primärenergieinhalt von Elektrizität wird mit der doppelten Gewichtung des Stromes für Wärmeanwendungen Rechnung getragen. Für Wohnbauten betragen die Standards:

- 45 kWh $m^{-2}a^{-1}$ (160 MJ $m^{-2}a^{-1}$) für Neubauten
- 90 kWh $m^{-2}a^{-1}$ (320 MJ $m^{-2}a^{-1}$) für Sanierungen (Baujahr vor 1990)

Zusätzlich existiert ein Standard von 17 kWh $m^{-2}a^{-1}$ für Haushaltelektrizität.

Interpretation

Einfacher, aber wirkungsvoller Standard

Die Energiekennzahlen sind einfach handhabbare Werte, welche zudem offen lassen, mit welchen Mitteln sie erreicht werden wollen. Der Schwerpunkt liegt jedoch bei den Energieeinspartechniken. In einer Energiebilanz eines Wohngebäudes überwiegen nämlich im Normalfall die Verluste (Transmission und Lüftung) gegenüber den Gewinnen (Solargewinne, Personen- und Elektroabwärme) bei weitem. Durch die Bilanzierung über die Energiekennzahl werden also vor allem Wärmeschutz der Gebäudehülle und Lüftung mit WRG gefördert anstelle beispielsweise einer Optimierung der Solaren Gewinne.

Schwerpunkt Betriebsenergie

Die *MINERGIE®*-Kennzahl von 17 kWh $m^{-2}a^{-1}$ für die Haushaltelektrizität muss zur Zeit zur Erlangung des *MINERGIE®*-Labels noch nicht nachgewiesen werden, und *MINERGIE®* setzt keine Grenzwerte für Graue Energie. Abbildung 34 zeigt die gesamte PE_{ne}-Nachfrage der unsanierten Varianten. Die Betriebsenergie, bestehend aus den Segmenten Heizung, Warmwasser und Haushaltstrom, ist die dominierende Grösse, insbesondere die Heizenergie. Durch die Fokussierung auf die Betriebsenergiesenkung zielt *MINERGIE®* also in die richtige Richtung.
In Abbildung 35 ist dann die gesamte PE_{ne}-Nachfrage der fortschrittlich sanierten Varianten ersichtlich. Vorallem fällt die Dominanz der Haushaltelektrizität auf. Doch auch die Graue Energie ist zum Teil höher als die Heizenergie. Dabei muss noch beachtet werden, dass 1 kWh Graue Energie wegen der Ressourcen- und Deponieproblematik die grössere Umweltbelastung mit sich bringt als 1 kWh Betriebsenergie.

Die Problematik von Fläche oder Bewohner als Bezugsgrösse wurde in Kapitel 8.8.2 'Fläche oder Bewohner als Bezugsgrösse' behandelt.

Sanierungen

Die *MINERGIE®*-Standards sind natürlich etwas strenger als die MVO-Werte. Beispielsweise wird der Grenzwert Wärme für Sanierungen nun erst mit der durchschnittlichen Sanierungen erreicht.

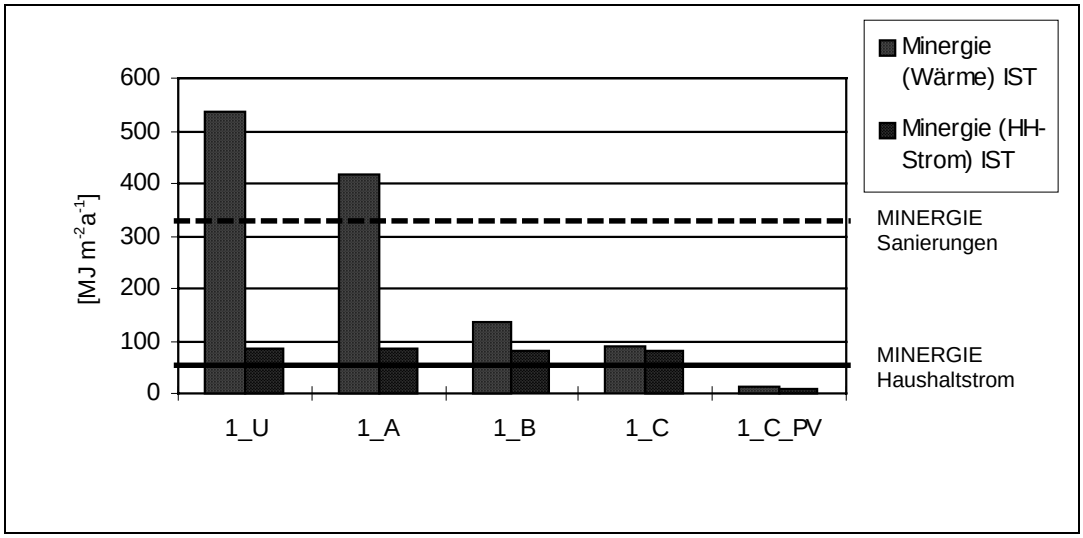


Abbildung 64: Die Grössenordnung der Energiekennzahlen Wärme und Haushaltstrom für Objekt 1, berechnet nach den MINERGIE®-Modalitäten.

Der Grenzwert Haushaltstrom wird nur von der Variante 1_C_PV erreicht. Diese bildet wiederum 'strenge Nachhaltigkeit' ab (im UCPTE-Raum, vgl. Kapitel 10.1 'Wärmedämmvorschriften'). Als Szenario wurde nicht 'BAT', sondern 'Mittel zwischen 1992 und BAT' eingesetzt.

Neubauten

Bei den Neubauten wird der *MINERGIE®*-Grenzwert Wärme nur mit dem konventionellen Massivbau (N_mfh_m) nicht erreicht. Der konventionelle Leichtbau dagegen liegt klar unter den geforderten 160 MJ $m^{-2}a^{-1}$. Diese beiden Bautypen haben die gleiche Haustechnik, sie unterscheiden sich also nur durch den unterschiedlichen Wärmeschutz der Gebäudehülle.

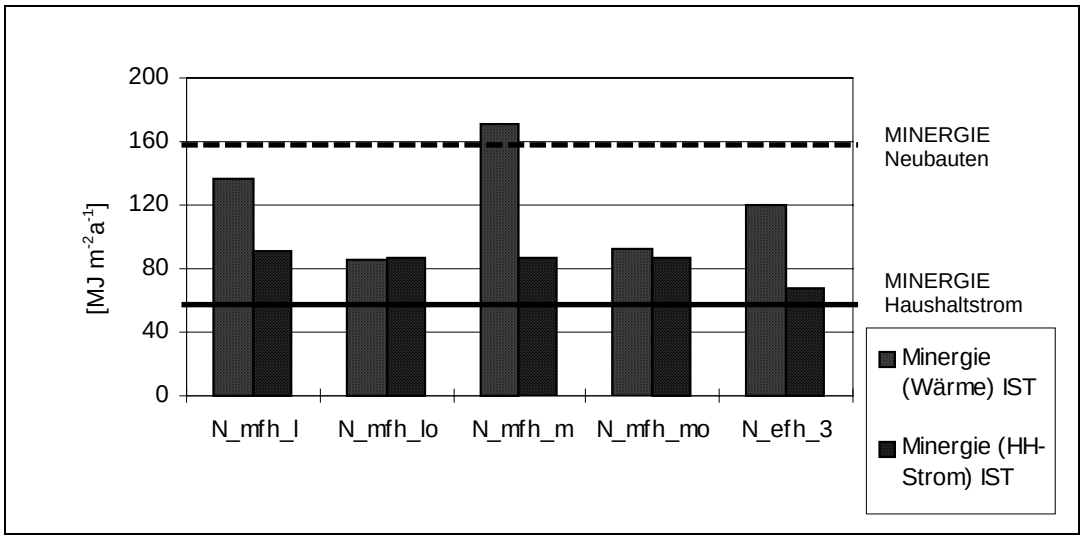


Abbildung 65: Die Grössenordnung der Energiekennzahlen Wärme und Haushaltstrom für die Neubau-Objekte, berechnet nach den MINERGIE®-Modalitäten.

Ebenfalls erstaunlich ist die Situation beim Haushaltstrom. Keine der berechneten Varianten erreicht den *MINERGIE®*-Grenzwert. Als Szenario wurde auch hier 'Mittel 1992 und BAT' eingesetzt. Nur wenn ausschliesslich die besten, heute erhältlichen Geräte eingesetzt werden (Szenario 'BAT'), wird der Grenzwert knapp unterschritten.

10.3 Die 2’000-Watt-Gesellschaft

Grundlagen

Der ETH-Bereich (ETH Zürich, ETH Lausanne, PSI, EMPA, EAWAG, WSL) setzt sich zum Ziel, eine führende Rolle bei der Schaffung einer nachhaltigen Schweiz zu übernehmen. Er vertritt die Auffassung, dass bei der Schaffung einer nachhaltigen Gesellschaft der Energieverbrauch im Zentrum steht. Hier bestehen heute jedoch grosse Unterschiede zwischen industrialisierten und den weniger entwickelten Ländern. Im Modell der 2’000 Watt-Gesellschaft soll - bei gleicher Lebensqualität wie heute - der Primärenergieverbrauch pro Person 2’000 W betragen, was etwa dem heutigen weltweiten Durchschnitt entspricht. In der Schweiz liegt der aktuelle Energieverbrauch bei ca. 6’000 W, in den USA gar bei 10’000 W. Umgekehrt verbrauchen die meisten Länder der dritten Welt deutlich weniger als 1’000 W, zum Teil sogar weniger als 500 W.
Die begrenzte Belastbarkeit unseres Planeten erlaubt es nicht, Milliarden Menschen mit jenen Energiemengen zu versorgen, welche heute von den Industrieländern beansprucht werden. Die Schaffung einer 2’000 Watt-Gesellschaft beruht auf zwei Pfeilern:

- Reduzierung der Umwandlungsverluste von Primär- zu Nutzenergie
- Senkung des Bedarfs an Nutzenergie durch bessere Technologien bei gleichbleibenden Energiedienstleistungen.

Definition

Die 2’000 W Primärenergie entsprechen einem Verbrauch von 17’520 kWh pro Jahr. Damit jedoch das Postulat der Nachhaltigkeit erfüllt werde, dürften jedoch bei einer erwarteten Weltbevölkerung von 10 Milliarden Menschen im Jahre 2050 die CO_2-Emissionen 1 Tonne pro Kopf und Jahr nicht überschreiten. Somit liessen sich entweder aus Kohle 300 W, aus Erdöl 450 W oder aus Erdgas 600 W erzeugen, im Schnitt also ca. 500 W. Der restliche Energiebedarf von 1’500 W müsste aus erneuerbaren Energiequellen gewonnen werden.
Nicht detailliert definiert sind dagegen zeitliche und geographische Systemgrenzen. Den Berechnungen der vorliegenden Arbeit liegen jedoch in diesem Bereich exakte Definitionen zugrunde. Beispielsweise wird zwischen den Szenarien IST (heute) oder SOLL (zukünftig) und Betrachtungsraum Schweiz oder Europa (UCPTE-Raum) unterschieden.

‘Die 500 Watt-Wohngesellschaft’

Der Prozess ‘Wohnen’ ist definiert als Energienachfrage von Heizung, Warmwasser, Haushaltstrom und Baustoffen. In der Schweiz wird dafür ca. ¼ des Gesamtenergieverbrauches aufgewendet, nämlich 24% der chemischen und 29% der elektrischen Energie (Tabelle 4 in Kapitel 4.2.4 ‘Angebotsmodul’). Geht man von einem Gesamtverbrauch von 2’000 W aus, resultiert ein Angebot für das Wohnen von ca. 500 W. Oder genauer gemäss obenstehender Definition:

- 1’500 : 4 = 375 W Primärenergie aus erneuerbaren Quellen
- 500 : 4 = 125 W Primärenergie aus nicht erneuerbaren Quellen

Berechnungen und Kommentar

In dieser Arbeit wird ein Prozess als nachhaltig definiert, wenn eine Energienachfrage ausschliesslich mit erneuerbaren Energieträgern gedeckt werden kann (vgl. Kapitel 4 ‘Methodik’). Diese Definition verbietet also jeglichen Verbrauch fossiler Energien.
Als Ausgangslage der vergleichenden Berechnungen diente Objekt 1_C. In Kapitel 7.5.3 ‘Bilanzausgleich mit Photovoltaik-Fläche’ wird der Ansatz erläutert, dass mit dem Zubau von Photovoltaikfläche das Energiemanko ausgeglichen werden kann. Beim Objekt 1_C muss dafür - je nach Szenario und Systemgrenze - von 0 bis 15 m^2 PV-Fläche zugefügt werden. Tabelle 48 zeigt die Grössenordnung der Berechnungen.

Szenario	PE_{ne}-Nachfrage		EE-Nachfrage	
	[kWh $c^{-1}a^{-1}$]	[Watt c^{-1}]	[kWh $c^{-1}a^{-1}$]	[Watt c^{-1}]
Systemgrenze UCPTE				
IST	736	84	461	53
SOLL	3'577	408	1'286	147
Systemgrenze CH				
IST	4'586	524	1'585	181
SOLL	3'951*	451*	1'365*	156*

*Tabelle 48: Die PE_{ne}- und EE-Nachfrage (als dem Gebäude zugeführte Energie) von Objekt 1_C, bei welchem PV-Fläche zugebaut wurde, bis die Bilanzzahl B_{el} null betrug. * bedeutet, dass bei dieser Variante bereits ohne PV-Fläche eine positive B_{el} erreicht wurde.*

Die PE_{ne}-Nachfrage liegt je nach Systemgrenze zwischen 84 und 524 W, also im Bereich der Werte der ETH. Zu prüfen gilt es jedoch, wie gut sich Primärenergie als Bezugsgrösse im Zusammenhang mit erneuerbaren Energien eignet und ob die Zulassung fossiler Energien - wenn auch stark reduziert - bei einer Zieldefinition über nachhaltige Entwicklung sinnvoll ist. Entscheidend ist vor allem das vorhandene Angebot sowie das Potential erneuerbarer Energiequellen.

10.4 Weiterer Forschungsbedarf

Der Anteil der Haushaltselektrizität spielt bei sämtlichen untersuchten optimierten Gebäuden eine dominante Grösse. Darauf hat auch die Wahl der Systemgrenzen Schweiz oder UCPTE wenig Einfluss. Es existieren heute jedoch keine gesetzlichen Auflagen oder Grenzwerte, die das Ziel einer Reduktion des Elektrizitätsverbrauchs im Haushaltsbereich anstreben. Auch für die Erlangung des *MINERGIE®*-Labels für Wohnbauten braucht der Haushaltstrom aufgrund eines fehlenden Erfassungsinstruments nicht nachgewiesen werden. Ein solches Instrument, das auf dem gedanklichen Modell der SIA 380/1 aufbauen könnte, wird als wichtige Weiterführung dieser Arbeit angesehen.

Die Ermittlung des Gewinnfaktors der Freien Wärme in der SIA-Norm 380/1 ist recht pragmatisch. Dieser ist nämlich nur vom Verhältnis Bruttoheizenergiebedarf zu Freier Wärme abhängig. In der Realität hängt aber der Ausnutzungsfaktor noch entscheidend von weiteren Faktoren, wie Anteil massiver Bausubstanz oder Lüftungskonzept ab. Ein Modell, das die erwähnten Faktoren auf einfache Art berücksichtigt, könnte hier Abhilfe schaffen. Dies könnte zusätzlich zu den SIA/380/1 - Programmen abgegeben werden; speziell für Kunden, die sich mit der Optimierung passivsolarer Gebäude befassen.

Bei der Wahl der Lebensdauer von Bauelementen oder ganzen Gebäuden wird in der Ökobilanzierung von Bauwerken oft auf Erfahrungswerte vergangener Jahre zurückgegriffen oder es werden Nutzungszeiten verwendet, die sich stark an Abschreibungszeiten aus der Ökonomie anlehnen. Die effektive Lebensdauer hängt aber in der Realität neben der Art des Unterhaltes oder gesellschaftlichen Werten auch davon ab, in welcher Phase sich ein Bauelement in der Technologieentwicklung befindet. Steht für ein Element die grosse Entwicklung noch bevor, wird sich die durchschnittliche Lebensdauer in Zukunft eher verkürzen, umgekehrt eher verlängern. Es wäre also ein Modell gefragt, welches diesen Standpunkt aufnimmt und sich einfach in Instrumente der Ökobilanzierung implementieren liesse.

Wie die Bauteillebensdauer sind auch die Werte der Baustoffinventare von entscheidender Bedeutung für die Ermittlung der Grauen Energie. Diese basieren heute unter anderem auf Herstellerangaben, können also unterschiedliche Systemgrenzen aufweisen oder veraltet sein. Die Bestimmung eines einheitlichen Anforderungsprofils und die Bildung einer Datenbank, die laufend aktualisiert wird, wäre wünschenswert.
Dies würde zudem die Baustoffhersteller dazu motivieren, ihre Herstellungsprozesse permanent zu verbessern.

Untersuchungen von Intep (1999) haben gezeigt, dass beim Ermitteln von Umwelteinwirkungen, die durch Stoffflüsse ausgelöst werden, die Grösse der CO_2-Aequivalente und des Versäuerungspotentials praktisch linear zum Primärenergieverbrauch verläuft. Die in dieser Arbeit getroffene Wahl der Grauen Energie als Indikator für Stoffflüsse scheint also gerechtfertigt zu sein. Allerdings werden bei all diesen Bewertungsgrössen das Recycling- oder das Ressourcenpotential nicht berücksichtigt. Ein einfaches Bewertungsmodell, analog zu den Umweltbelastungspunkten UBP (BUWAL 1997) wäre speziell für Baustoffe ein Bedürfnis.

Die vorliegenden Berechnungen haben gezeigt, dass der Betriebsenergie eine hohe Bedeutung zukommt. Die Software OGIP (**O**ptimierung der **G**esamtanforderungen an Kosten, Energie, Umwelt; ein Instrument für die **I**ntegrale **P**lanung), die sich zur Zeit in der Entwicklung befindet, legt ein starkes Gewicht auf die Bewertung der Baustoffflüsse sowie die Integration der Kosten. Parameter zur Erfassung der Betriebsenergie basieren teilweise auf einfachen, den SIA-Normen entnommenen Standardwerten. Ein differenzierteres Modul würde der Betriebsenergie die notwendige Gewichtung zukommen lassen.

11 Definitionen und Annahmen

Die Übersicht auf den folgenden zwei Seiten ist eine Kurzdarstellung der verwendeten Szenarien, Objekte, Sanierungspakete und Methodik. Für detailliertere Definitionen wird auf die entsprechenden Kapitel verwiesen.

Definitionen für das IST und SOLL Szenario

	IST	**SOLL**
Interpretation	Einbezug nur der heutigen Massnahmen auf Grund der heutigen durchschnittlichen Prozesse.	Es wird das Gebäude ab dem geplanten Eingriff bis zum Rückbau betrachtet.
Angebot		
Baustoffe	Bauholzangebot: Nachhaltig optimierte Holzwirtschaft. CH: 134 kg $c^{-1}a^{-1}$	Bauholzangebot: Nachhaltig optimierte Holzwirtschaft. CH: 134 kg $c^{-1}a^{-1}$
Energie	Heutiges Angebot an erneuerbaren Energien (Schweiz oder UCPTE-Raum). CH: 1'660 kWh $c^{-1}a^{-1}$ (EE) UCPTE: 570 kWh $c^{-1}a^{-1}$ (EE)	Mittelfristiges Potential der erneuerbaren Energien (Schweiz oder UCPTE-Raum). CH: 2'250 kWh $c^{-1}a^{-1}$ (EE) UCPTE: 1'480 kWh $c^{-1}a^{-1}$ (EE)
Nachfrage		
Baustoffe	– Produktion: Mittelwert heutiger Prozesse und heutige Recyclingraten.	– Produktion: Beste bereits heute verfügbare Technologie und maximales Recycling.
	– Transportdistanzen zur Baustelle: Heutige Werte.	– Transportdistanzen zur Baustelle: Gegenüber IST um ca. 30% reduziert.
	– Lebensdauern der Gebäudeelemente: Mittelwerte.	– Lebensdauern der Gebäudeelemente: Mittelwerte.
Betrieb	– Wärmeerzeuger: Heute üblicher Qualitätsstandard.	– Wärmeerzeuger: Beste bereits heute erhältliche Technologie.
	– Nutzenergiebedarf Heizung: IST = SOLL	– Nutzenergiebedarf Heizung: IST = SOLL
	– Warmwasserbedarf: Standardnutzung gemäss SIA 380/1 (50 lt./c).	– Warmwasserbedarf: Reduktion gegenüber IST um 20% (40 lt./c).
	– Haushaltstrombedarf: Mittelwert aus heutigem Gerätepark (1992) und besten Geräten gemäss Gerätedatenbank (BAT).	– Haushaltstrombedarf: Mittelwert aus besten Geräten gemäss Gerätedatenbank (BAT) und zukünftig verfügbaren Technologien (BFT).
	– Photovoltaik: Ertrag entspricht der heute verfügbaren Technologie	– Photovoltaik: Gegenüber dem IST wurde eine flächenspezifische Steigerung der Erträge um 50% angenommen.

Tabelle 49: Kurzübersicht über die Definitionen und Annahmen für das IST und SOLL Szenario.

Sanierungspakete

Variante	Eingriffsintensität	Massnahmen Gebäudehülle	Massnahmen Haustechnik
U	unsaniert	--	--
A	minimal saniert	Decke zu UG + DG gedämmt Fenster neu	--
B	durchschnittlich saniert	Decke zu UG + DG gedämmt Gebäudehülle 10 cm gedämmt Fenster neu	Luft/Wasser-Wärmepumpe
C	fortschrittlich saniert	Decke zu UG + DG gedämmt Gebäudehülle 20 cm gedämmt Fenster neu	Sole/Wasser-Wärmepumpe mech. Lüftung mit WRG

Tabelle 50: Kurzübersicht über die Definitionen und Annahmen für verschiedenen Sanierungspakete.

Untersuchte Objekte

Sanierungen

Kürzel	Objekt	Merkmale	Grösse	Baujahr
1	MFH, Allmendstrasse in Basel	kompakt	24 Wohnungen	1956
2	EFH, Bündtenweg in Hölstein	EFH	1 Wohnung	1957
3	MFH, Isabellenweg in Biel	alte Bausubstanz	9 Wohnungen	1898
4	MFH, Muttenzerstrasse in Pratteln	Hochhaus	60 Wohnungen	1969
5	MFH, Schänzlistrasse in Solothurn	2-seitig angebaut	8 Wohnungen	1932

Tabelle 51: Kurzübersicht über die untersuchten Sanierungsobjekte.

Neubauten

Kürzel	Objekt	Grösse	Baujahr
N_mfh_l	Neubau MFH in durchschnittlicher Holzleichtbauweise	10 Wohnungen	2000
N_mfh_lo	Neubau MFH in optimierter Holzleichtbauweise	10 Wohnungen	2000
N_mfh_m	Neubau MFH in durchschnittlicher Massivbauweise	10 Wohnungen	2000
N_mfh_mo	Neubau MFH in optimierter Massivbauweise	10 Wohnungen	2000
N_efh_1	Neubau EFH mit Holzwellstegträger	1 Wohnung	2000
N_efh_2	Neubau EFH mit Kantholz, Trocknung natürlich	1 Wohnung	2000
N_efh_3	Neubau EFH mit Kantholz, Trocknung technisch	1 Wohnung	2000
N_efh_4	Neubau EFH mit Brettschichtholz	1 Wohnung	2000

Tabelle 52: Kurzübersicht über die untersuchten Neubauobjekte.

Beispiel: 4_B

Bestehendes Mehrfamilienhaus an der Muttenzerstrasse in Pratteln.
Eindringintensität der Sanierungsmassnahmen sind durchschnittlich.

Baustoff-Kategorien

Recyclingfähigkeit		Endlichkeit von Ressourcen	
1	gut baustofflich wiederverwertbar	n	nachwachsend
2	gut rohstofflich oder thermisch verwertbar	q	aus quasi unerschöpflichen Quellen
3	nur z.T. wieder- oder weiterverwertbar	b	aus beschränkten Quellen
4	weder wieder- noch weiterverwertbar	A	Aushub

Tabelle 53: Die verwendeten Baustoffkategorien, unterteilt nach Recyclingfähigkeit und Endlichkeit.

Schema Methodik

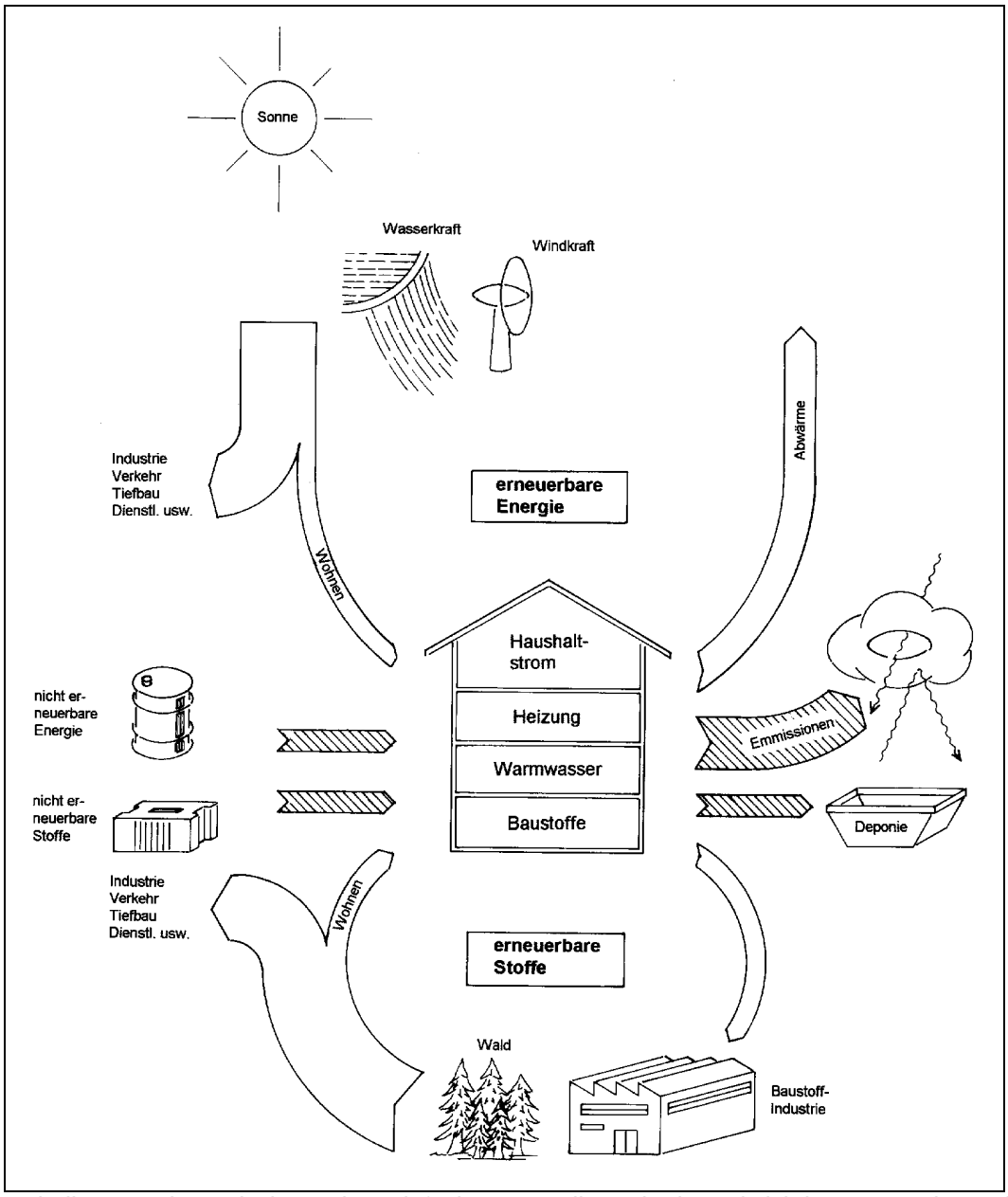


Tabelle 54: Schematische und vereinfachte Darstellung der berücksichtigten Energie- und Stoffflüsse.

12 Literaturverzeichnis

AfB 1997	Amt für Bundesbauten: Liste ‘Nutzungszeiten von Bauelementen’,
Afjei 1998	Thomas Afjei: ‘WP-Heizsysteme für Niedrigenergiehäuser’, Bericht im Tagungsband des 10. Schweizerischen Status-Seminares, EMPA-KWH
Basler 1997	Basler & Hoffmann AG Zürich: ‚Studie über die zweite Holzverarbeitungsstufe in der Schweiz‘, Im Auftrag des Bundesamtes für Statistik
BEW 1996	Bundesamt für Energiewirtschaft: ‘Energie-Forschung 1996’
BfS 1990	Bundesamt für Statistik: ‘Gebäude und Wohnungen’, Thematische Tabellen der eidgenössischen Volkszählung 1990
Bruck 1996	M. Bruck:‘ Ökologische Bewertung von Backsteinen und Backstein-Aussenwandkonstruktionen’, D-A-CH-Bericht
Buser et al. 1996	H. Buser, R. Horbaty et al.: ‘Windkraft und Landschaftsschutz’, Bundesamt für Energiewirtschaft
BUWAL & BfS 1993	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bundesamt für Statistik: ‘Schweizerische Forststatistik’, Wald und Holzwirtschaft in der Schweiz, Jahrbuch 1993, Bern
BUWAL 1997	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, ‘Bewertung in Ökobilanzen mit der Methode der ökologischen Knappheit’, Ökofaktoren 1997
Carba 1998	Persönliche Mitteilung von Herrn Chr. Fankhauser, CarbaGas AG Liebefeld-Bern vom 16. Februar 1998
Erb et al. 1997	Markus Erb, Markus Fahner, Gerold Lehmann, Adrian Regenass: ‘Nachhaltiger Wohnungsbau’, Diplomarbeit am Nachdiplomstudium Energie, Ingenieurschule beider Basel
Fraefel 1996	Rudolf Fraefel: ‘Leichtbau oder Massivbau?’, Zwei ökologisch gleichwertige Systeme, DIANE Ökobau
Frischknecht 1994	Rolf Frischknecht et al.: ‘Ökoinventare von Energiesystemen’, Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen usw., BEW, NEFF
Gabathuler 1989	C. Gabathuler, H. Wüest: ‘Bauwerk Schweiz’, Wüest und Gabathuler, Büro für Raumplanung und Rauminformation Zürich
GES 1997	Bundesamt für Energie, Schweizerischer Energierat: ‚Schweizerische Gesamtenergiestatistik 1997‘
Herzog et al. 1992	L. Herzog, U. Muntwyler: ‘Photovoltaik’, Planungsunterlagen für autonome und netzgekoppelte Anlagen, PACER-Bundesamt für Konjunkturfragen, Bern
Horbaty 1997	Robert Horbaty: ‘Vierjahresplan Windenergie’, 1996 bis 1999, ENCO Energie-Consulting Liestal
Intep 1999	Intep AG, esu-services, FHBB: ‚Ökologische Sanierungen von Bürobauten‘, Schlussbericht, Mitwirkung am IEA BCS Annex 31, Bundesamt für Energie
IP Holz 1989	Impulsprogramm Holz: ‘Untersuchungen zur Ökobilanz von Holz als Baustoff’, Schlußbericht
Lehmann 1995	Harry Lehmann, Torsten Raetz: ‘Zukunftsenergien’, Strategien einer neuen Energiepolitik, Birkhäuser Verlag Berlin
Meteotest 1997	Firma Meteotest: ‚Meteonorm‘ Versoin 3.0, Edition 1997, Global Meteorologicial Database for Solar and Applied Climatology

Huser 1992	A. Huser, R. Spalinger: ‘Stromverbrauchserhebung in Haushalten’, Materialien zu RAVEL 23.51 D
Moor 1999	Persönliche Mitteilung von Herrn Ueli Moor, Glas Trösch AG Bützberg vom 21. Januar 1999
Richter 1996	Klaus Richter et al.: ‘Ökologische Bewertung von Wärmeschutzgläsern’, Integraler Vergleich verschiedener Verglasungsvarianten, EMPA Abt. Holz
Schultze-Darup 1996	Burkhard Schultze-Darup, ‘Bauökologie’ Bauverlag GmbH Wiesbaden, Berlin
SIA 380/1	Empfehlung des Schweizerischen Ingenieur- und Architekten-Verein: ‚Energie im Hochbau‘, Ausgabe 1988
Stucki 1996	S. Stucki: ‘Biometh-Methanolproduktion aus Biomasse-Abfällen der Schweiz’, Paul Scherrer Institut Würenlingen
Trösch 1994	Glas Trösch AG Bützberg: ‘Glas und Praxis’, Kompetentes Bauen und Konstruieren mit Glas
von Arx 1995	U. von Arx: ‘Bauprodukte und Zusatzstoffe in der Schweiz’, Dokumentationsdienst BUWAL, Bern
Weibel & Stritz 1995	Thomas Weibel und Alexander Stritz: ‘Ökoinventare und Wirkungsbilanzen von Baumaterialien’, Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Hochbaukonstruktionen, ESU-Reihe Nr. 1/5, ETH Zürich, BEW
Weizäcker 1995	Ernst Ulrich von Weizäcker et al.: ‘Faktor vier’, Doppelter Wohlstand - halbierter Naturverbrauch, Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Droemer Knaur
WPZ 1998	WPZ-Bulletin Nr. 12, Wärmepumpentest- und Ausbildungszentrum Töss, Winterthur
WSL 1988	Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft: ‘Schweizerisches Landesforstinventar 1982 - 86’, Birmenstorf
Zogg 1986	Martin Zogg et al.: ‘Warmwasserbereitung mit Sonnenenergie’, Einfache Methode zur Berechnung des Wärmeertrages solarer Warmwasserbereitungsanlagen, IEA, Ingenieurschule Burgdorf