

## 4 Kosten und Nutzen von Energieeffizienzinvestitionen im Wohngebäudebereich

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

### 4.1 Methodisches Vorgehen zur Kostenermittlung und zu den Wirtschaftlichkeitsrechnungen

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

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

#### 4.1.1 Annahmen zur Kostenermittlung und zu energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen

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

- Für Ein- und Zweifamilienhausbesitzer und –Bauherren wird von einem Zinssatz von 3,5% ausgegangen, für Mehrfamilienhäuser von einem Zinssatz von 5,5%, jeweils in realen Werten, d.h. ohne Annahme einer Inflationsrate.
- Die Brennstoffpreisentwicklung der kommenden 30 Jahre hängt von vielen Faktoren ab. Es wird daher im folgenden erläutert, warum eine leicht steigende Preistendenz auf den Erdöl- und Erdgasmärkten zu erwarten ist.

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

### a) **Energiepreis-Entwicklung 2030 (als Referenzszenario)**

Das Design von Preisperspektiven in einem Land startet i.a. von Annahmen über die Entwicklungen auf den internationalen Energiemärkten, wobei Erdöl als der Preisführer für die Periode bis 2030 unterstellt wird. Die Kohle wird zwar auch als relativ unabhängig von den Entwicklungen auf dem Weltölmarkt erachtet, hat aber wegen des CO<sub>2</sub>-Problems keine grossen Chancen, den Welthandel auszudehnen, schon gar nicht aus Handlings- und Emissionsgründen im Raumwärmebereich.

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

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

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

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

Die *Entwicklung der Inlandspreise* erfolgte anhand folgender Annahmen:

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

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

<b>Obere Preisvariante in Preisen von 1999</b>	1999	2005	2010	2015
Rohöl fob in \$/b	17.84	27	30	32
Rohöl Einfuhrpreise, cif CHF/m <sup>3</sup>	157.05	240	265	280
Erdgas, Importpreis CHF/GJ	4.58	2.90	6.50	7.20
Steinkohle, Importpreis CHF/t	69	92	103	112
<b>Untere Preisvariante in Preisen von 1999</b>	1999	2005	2010	2015
Rohöl fob in\$/b	17.84	22	24	25
Rohöl Einfuhrpreise, cif CHF/m <sup>3</sup>	157.05	195	210	220
Erdgas, Importpreis CHF/GJ	4.358	5.30	5.70	6.10
Steinkohle, Importpreis CHF/t	2.41	80.00	82.00	86.00

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

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

Es sei nochmals betont, das CO<sub>2</sub>-Abgaben oder Preise für CO<sub>2</sub>-Emissionszertifikate in diesen Preisen der Referenz-Entwicklung aus Gründen der Transparenz noch nicht aufgenommen wurden.

### **b) Energie- und Baupolitik im Referenz-Szenario**

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

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

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

Untere Preisvariante	1999	2005	2010	2015	1999-2015	1999-2010
					% pro Jahr	
<b>Reale Preisbasis (1999)</b>						
<b>Grosshandelspreise (ohne MWSt)</b>						
Heizöl leicht (CHF/1000 l) <sup>1)</sup>	225	310	335	350	2.8	3.7
Heizöl leicht (CHF/1000 l)	150	220	240	245	3.1	4.4
Erdgas (Industrie) (Rp/kWh) <sup>2)</sup>	2.8	3.05	3.2	3.4	1.2	1.2
Erdgas (Kraftwerke) (Rp/kWh)	2.1	2.55	2.7	2.85	1.9	2.3
Steinkohle (Kraftwerke) CHF/tSKW)	71	77	79	80	0.75	1.0
Strom (Mittelspannung (Rp/kWh) <sup>3)</sup>	14.4	12.0	5)	5)	-	-
Strom (Höchstspannung) (Rp/kWh)						
<b>Haushalte (mit MWSt.)</b>						
Heizöl leicht (Rp/l)	30.7	40.0	43	45.0	2.4	3.1
Erdgas (Rp/kWh)	5.34	5.8	6.1	6.3	1.0	1.2
Strom (Rp/kWh) <sup>4)</sup>	19.6	18.5	5)	5)	-	-
Benzin unverbleit (Rp/l)	120.1	132	140	148	1.3	1.4
Diesel (Rp/l)	123.5	135	143	152	1.3	1.34
<sup>1)</sup> gewichteter Durchschnitt <sup>2)</sup> 11.6 GWh/a <sup>3)</sup> 15 GWh/a <sup>4)</sup> Typ III mit Jahresverbrauch von 4500 kWh <sup>5)</sup> zu berechnen						

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

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

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

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

#### a) **Investitionskosten und Festlegung des Erneuerungsanteils sowie Definition der Grenzkosten**

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

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

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

Tabelle 4.1-3 Erfahrungswerte des Erneuerungsanteils an der Gesamtinvestition

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

Quelle: IWU 2001

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

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

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

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

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

$K$  = Kosten

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

$Index_0$  bezieht sich auf die Referenzinvestition

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

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

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

$K$  = Kosten

$E$  = Energiebedarf oder -verbrauch

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

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

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

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

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

Bei der *Annuitätenmethode* müssen zunächst die gesamten Investitionskosten der Energieeinsparmassnahme über den Nutzungszeitraum ermittelt werden (vgl. auch SIA 480.20). Zu den Investitionskosten  $I_{\text{eff}}$  werden alle Kosten für Planung, Baustellenerrichtung, Anschaffung, Baugerüst und Installation eines Systems gezählt, die ausschliesslich als Mehrkosten für den Zweck der Energieeinsparung entstehen. Um sie für die Wärmedämmung eines zuvor nicht gedämmten Gebäudes zu ermitteln, müssen von den insgesamt anfallenden Investitionskosten einer Gesamtmassnahme  $I_{\text{ges}}$  die Ersatzkosten ohne die Energieeinsparmassnahme (also z.B. ohne Wärmedämmung oder einer Wärmedämmung mit der heute üblichen Referenzdämmstärke)  $I_0$  abgezogen werden und ein eventuell bestehender Restwert  $I_R$  (z. B. der Restwert des zu entfernenden Verputzes) dazu addiert werden:

$$I_{\text{eff}} = I_{\text{ges}} - I_0 + I_R \quad (\text{Gl. 4.1})$$

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

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

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

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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

### c) *Die Kapitalwertbetrachtung im Mietwohnungsbau als die angemessene Methode*

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

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

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

- Es wird häufig davon ausgegangen, dass ein wesentlicher Anteil der zusätzlichen Kosten für die Energieeinsparinvestitionen fremdfinanziert werden. Bei der Berechnung des Kapitalwertes entspricht die Anfangsauszahlung  $I_0$  dem eingesetzten Eigenkapital.
- Der Zinssatz sollte für erstrangig abgesicherte Hypothekendarlehen gewählt werden. Die Abschreibung sollte so gewählt werden, dass die Darlehen nach Ablauf des Betrachtungszeitraums zurückgezahlt sind. Finanzierungen über öffentliche Fördermittel sollten mit berücksichtigt werden.
- Die mit der Erneuerung verbundenen Steuerzahlungen ergeben sich aus zusätzlich möglichen Mieteinnahmen und Absatzmöglichkeiten von der Steuer: Absetzbar sind: die Erhaltungsaufwendungen, die Abschreibungen der nachträglichen Herstellungskosten, die Finanzierungsnebenkosten und die Zinszahlungen. Abzugsfähig können bei Liegenschaften im Privatvermögen nach § 30 Abs.2 des Steuergesetzes vom 8. Juni 1997 die Unterhaltskosten, die Versicherungsprämien und die Kosten der Verwaltung durch Dritte sein. Den Unterhaltskosten sind Investitionen gleichgestellt, die dem Energiesparen und dem Umweltschutz dienen. Nicht abzugsfähig sind dagegen wertsteigernde Aufwendungen.

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

- i) Voll als ordentliche Unterhaltungskosten abzugsfähig sind Aufwendungen für den Ersatz von bereits bestehenden Anlagen und Einrichtungen, sofern der nach dem heutigen Geldwert bemessene Neuwert der alten, ersetzten Anlagen oder Einrichtungen ungefähr den Kosten der neuen Investition entsprechen.
- ii) Aufwendungen für Massnahmen zur rationellen Energieanwendung und zur Nutzung erneuerbarer Energien sind in den ersten fünf Jahren nach Anschaffung der Liegenschaft zu 50 % und danach zu 100% abzugsfähig. Derartige Aufwendungen sind beispielsweise die Isolation von Dach, Keller oder Fassaden, die Errichtung eines unbeheizten Windfangs, der Einbau von thermostatischen Heizkörperventilen oder von Wärmeverbrauchsmessern für die einzelnen Bezüger in bestehende Heizanlagen, die Rückgewinnung von Wärme aus Abwasser und Luft, aber auch die Kosten für energietechnische Analysen und Energiekonzepte.
- iii) Erfolgt der Ersatz von veralteten Einrichtungen und die erstmalige Anbringung von neuen Bauteilen oder Installationen (z.B. Wärmedämmung) im Zuge einer Gesamtrenovierung, oder übersteigen die Kosten der Ersatzbeschaffung den nach heutigem Geldwert bemessenen Neuwert der alten, ersetzten Anlage wesentlich, so werden die entstehenden Gesamtkosten nach den vorstehend in i) und ii) genannten Grundsätzen aufgeteilt, d.h., es gibt als Restwert eine nicht von den Steuern abzugsfähige, wertvermehrnde Investitionssumme.

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

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

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

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

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

#### 4.1.3 Grenzen und Sensitivitäten der Kosten- und Wirtschaftlichkeitsberechnungen

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

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

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

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

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

Tabelle 4.1-4 Annahmen zu den verwendeten Realzinssätzen im Grenzkostenprojekt

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

Quelle Annahmen CEPE

Abbildung 4.1-1 zeigt, dass sich der Annuitätenfaktor

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

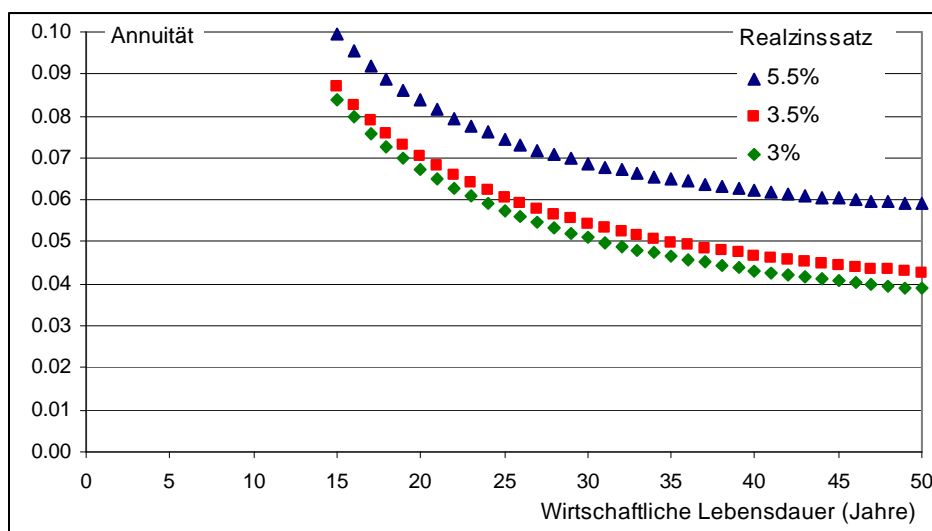


Abbildung 4.1-1 Annuitätsfaktor in Abhängigkeit des Zinssatzes und der wirtschaftlichen Lebensdauer

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

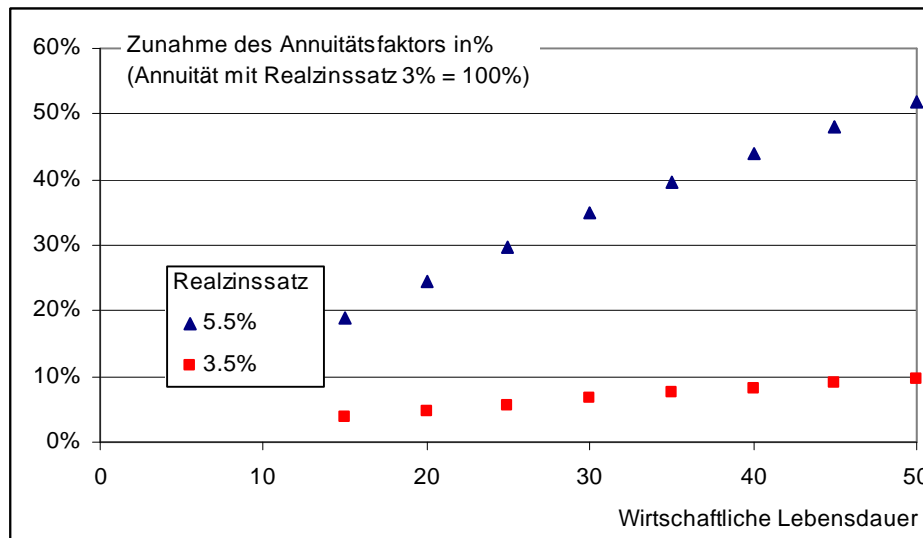


Abbildung 4.1-2 Zunahme der Annuitätsfaktoren in % im Vergleich zum Annuitätsfaktor mit dem Realzinssatz von 3%

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

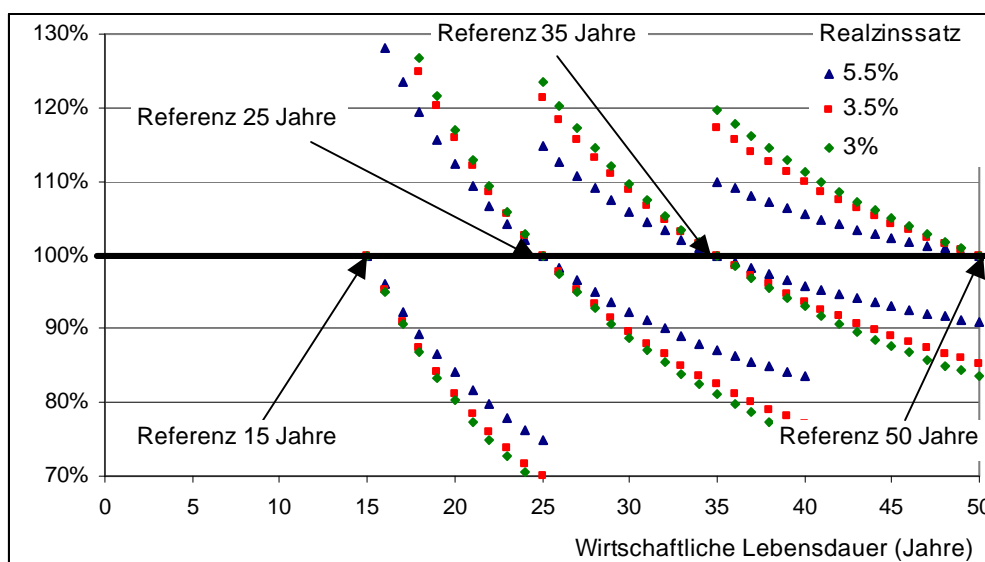


Abbildung 4.1-3 Sensitivität des Annuitätsfaktors hinsichtlich der Annahme der wirtschaftlichen Lebensdauer (100%=Annuitätsfaktor der jeweiligen Referenzlebensdauer)

**b) Grenzen der Kosten- und Wirtschaftlichkeitsberechnungen**

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

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

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

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

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

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

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

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

### 4.2.1 Aussenwärmedämmung mittels hinterlüfteter Fassaden

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

### 4.2.2 Aussenwärmedämmung mit Kompaktfassaden

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

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

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

		10 cm	12 cm	14 cm	16 cm	18 cm	20 cm
Ytong-SuperTherm 17.5	Theoretisch, ohne WB	0.25	0.22	0.19	0.17	0.16	0.14
	Gemäss SIA 180, 6 TD/m <sup>2</sup>	0.26	0.23	0.21	0.19	0.17	0.16
Backsteinwand 32 cm	Theoretisch, ohne WB	0.27	0.23	0.20	0.18	0.17	0.15
	Gemäss SIA 180, 6 TD/m <sup>2</sup>	0.28	0.25	0.22	0.20	0.18	0.17

WB: Wärmebrücken, TD: Thermodübel

Quelle: Flumroc-Docu2001/2002

### 4.2.3 Fensterleibungen

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

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

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

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



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

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

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

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

U-Wert Wand W/m <sup>2</sup> K	U-Wert Fensterrahmen		
	1.44 W/m <sup>2</sup> K	1.1 W/m <sup>2</sup> K	0.8 W/m <sup>2</sup> K
	Psi W/(mK)	Psi W/(mK)	Psi W/(mK)
0.4	0.07	0.05	0.04
0.3	0.08	0.06	0.05
0.2	0.09	0.07	0.06
0.15	0.10	0.08	0.07
0.12	0.11	0.09	0.08

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

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

Tabelle 4.2-5 Gewichtete U-Werte  $W/m^2K$  von Fassadenaussenwärmeeisammungen unter Berücksichtigung der Dämmstärke der Fensterleibungen

Dämmstärke cm	Ohne Fensterleibung		Leibungslänge / Fassadenfläche					
	Theoretischer U-Wert der Fassade ohne Thermodübel	U-Wert der Fassade unter Berücksichtigung der Thermodübel	0.15 m/m <sup>2</sup>			0.45 m/m <sup>2</sup>		
			Dämmstärke Leibung			Dämmstärke Leibung		
			4 cm	2 cm	0 cm	4 cm	2 cm	0 cm
10	0.27	0.28	0.30	0.30	0.31	0.33	0.34	0.37
14	0.20	0.22	0.24	0.24	0.25	0.27	0.29	0.32
20	0.15	0.17	0.19	0.19		0.23	0.24	
30	0.11	0.12	0.14			0.18		

Annahme zur U-Wert Berechnung: Dämmstoff mit  $\lambda=0.035 W/mK$

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

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

Tabelle 4.2-6 Gewichtete U-Werte  $W/m^2K$  von Fassadenaussenwärmeeisammungen bei Berücksichtigung des Fensteranschlages aussen (WD mind. 4 cm über Fenster-rahmen gezogen)

Dämmstärke cm	Ohne Berücksichtigung Fensterleibung		Anschlusslänge / Fassadenfläche			
	Theoretischer U-Wert der Fassade ohne Thermodübel	U-Wert der Fassade unter Be- rücksichtigung der Thermodübel	0.15 m/m <sup>2</sup>		0.45 m/m <sup>2</sup>	
			U-Wert-Fensterrahmen			
			1.44	0.8	1.44	0.8
			Resultierender gewichteter U-Wert			
12	0.28	0.30	0.31	0.31	0.34	0.32
18	0.20	0.21	0.22	0.22	0.25	0.24
24	0.15	0.17	0.18	0.18	0.21	0.20
30	0.12	0.13	0.15	0.14	0.18	0.17

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

Auch beim Fensteranschlag aussen am Mauerwerk können die linearen WB-Zuschläge merklich ins Gewicht fallen, wenn die Anschlusslängen pro Fassadenfläche hohe Werte annehmen. So ist bei einer Anschlusslänge von  $0.45m^2$  der resultierende U-Wert bei einer Dämmstärke von 30 cm nur  $0.18 W/m^2K$  statt  $0.13 W/m^2K$ , wenn die Anschlusszuschläge nicht berücksichtigt worden wären. Es ist bei grossen Fensterflächen im Neubau also darauf zu achten, dass die Fensterflächeneinteilung so gewählt wird, dass möglichst wenig Anschlusslaufmeter entstehen.

#### 4.2.4 Balkonplatten

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

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

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

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

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

In folgenden Situationen ist dieser WB-Zuschlag von Bedeutung:

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

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

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

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

	Balkonlänge / Fassadenfläche <sub>netto</sub> [m/m <sup>2</sup> ]	Zuschlag zum U-Wert bei durchgehender Betonierung der Balkonplatte bei Umlegung auf die Fassadenfläche
Durchlaufende Balkone	0.1 bis 0.3	0.07 bis 0.21 W/m <sup>2</sup> K
Einzelbalkone	0.03 bis 0.1	0.02 bis 0.07 W/m <sup>2</sup> K

Quelle Annahmen und Berechnungen mit Eurokobra (CEPE)

Die Werte in Tabelle 4.2-8 sind mit den typischen U-Werten der Aussenwärmedämmungen zu vergleichen, die im Referenzfall rund 0.3 W/m<sup>2</sup>K betragen. Der minimal erreichbare durchschnittliche U-Wert kann also markant höher liegen, z.B. 0.33 W/m<sup>2</sup>K statt 0.12 W/m<sup>2</sup>K bei 30 cm Wärmedämmung im schlechtesten Fall.

#### 4.2.5 Anschluss Flachdach

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

#### 4.2.6 Natürlicher Luftwechsel und Lüftungsanlagen

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

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

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

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

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

---

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

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

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

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

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

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

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

Tabelle 4.2-10 Heizwärmebedarf (MJ/m<sup>2</sup>a) aufgrund des Lüftungswärmeverlusts Q<sub>v</sub>

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

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

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

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

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

mit

$V_m$  mittlere geförderte Luftmenge in m<sup>3</sup>/h,

$\text{eta}_{WRG}$  Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung

$b$  Betriebsstunden in h/Woche

EBF Energiebezugsfläche

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Quelle HTA Luzern

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

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

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



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

(m <sup>3</sup> /h) / m <sup>2</sup> <sub>EBF</sub>	Aussenluft-Volumenstrom pro m <sup>2</sup> EBF		Thermisch wirksamer Aussenluftvolumenstrom pro m <sup>2</sup> EBF			
	EFH	3-4 Zi	EFH		3-4 Zi	
			alte Fenster	neue Fenster	alte Fenster	neue Fenster
Komfortlüftung zentral, mit WRG		1.1			0.5	0.3
Komfortlüftung pro Wg, mit WRG	0.8	0.9	0.6	0.3	0.6	0.3
Komfortlüftung mit WRG und WP	1.1	1.2				
Einzelraum-Komfortlüftung	0.8	0.9	0.7	0.5	0.7	0.5
Abluftanlage ohne WP	1.3	1.4	1.5	1.3	1.5	1.3
Abluftanlage mit Wärmepumpe	1.3	1.4	1.5	1.3	1.5	1.3
Automatische Fensterlüftung	1.6	1.8		1.6		1.6
Zum Vergleich: ohne Lüftung nach SIA 380/1 <sub>1988</sub> *			0.9		1.1	
Zum Vergleich: ohne Lüftung SIA 380/1 <sub>2001</sub> (lufthygienisches Min.)			0.7		0.7	
* Durchschnittlicher Luftwechsel EFH 0.4 /h, MHF 0.5/h, Annahmen für Umrechnung: Bruttohöhe=2.7m, Volumen <sub>netto</sub> /Volumen <sub>brutto</sub> =0.8						

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

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

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

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

Quelle: Berechnungen CEPE anhand der Grundlagen aus den obigen Tabellen

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

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

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

Tabelle 4.2-14 Heizwärmebedarfsreduktion durch Lüftungsanlagen bei verschiedenen Referenzfällen und Massnahmekombinationen  $\text{MJ/m}^2\text{a}$ , gemessen am Referenzwert „hoch“ gemäss Tabelle 4.2-9.

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

Quelle: Berechnungen CEPE anhand der Grundlagen aus den obigen Tabellen

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

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

#### 4.2.7 Fenster

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

Technische Eigenschaften des Fensters

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

Einbausituation

- Anschlagart und -ort
- Verschattung
- Luftdichtheit

Verhältnisse der energetischen Flüsse im Gebäude

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

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

##### a) **Wärmeverlust des Fensters (ohne Lüftungsverluste)**

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

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

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

$U_W$  = Wärmedurchgangskoeffizient Fenster (W=Window),  $W/m_2K$

$U_g$  = Wärmedurchgangskoeffizient in Scheibenmitte (G=Glazing),  $W/m_2K$

$A_g$  = Glasfläche,  $m^2$

$U_F$  = Wärmedurchgangskoeffizient des Fensterrahmens (F=Frame).  $W/m_2K$

$A_F$  = Rahmenfläche,  $m^2$

- $Y$  = Linearer Wärmedurchgangskoeffizient des Glasrandes, W/mK  
 $L_g$  = Glasrandlänge, m  
 $A_w$  = Gesamte Fensterfläche, m<sup>2</sup>

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

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

	Standard Holzfenster U <sub>g</sub> =1.1, U <sub>F</sub> =1.5, Psi=0.07		Passivhaus-Fenster U <sub>g</sub> =0.5, U <sub>F</sub> =0.8, Psi=0.07	
	W/m <sup>2</sup> K	%	W/m <sup>2</sup> K	%
Glas	0.78	52%	0.35	45%
Rahmen	0.44	29%	0.23	30%
Glasrand	0.28	19%	0.20	25%
Gesamt	1.49	100%	0.79	100%

Quelle Berechnungen CEPE

Je besser die U-Werte des Glases und des Rahmens sind, desto wichtiger wird der relative Einfluss des Glasrandverbundes, wie auch untenstehende Tabelle 4.2-16 zeigt<sup>1</sup>. Anhand der gleichen Tabelle lässt sich auch nachvollziehen, dass eine Verbesserung des Glas-U-Wertes zwar eine markante Verbesserung des Fenster-U-Wertes ergibt, dass jedoch auch der Rahmen mitbetrachtet werden muss, insbesondere um die Anforderungen des Passivhausstandards erfüllen zu können (U-Wert des Gesamtfensters kleiner oder gleich 0.8 W/m<sup>2</sup>K im eingebauten Zustand).

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

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

U-Wert Glas (W/m <sup>2</sup> K) Psi-Wert Glasrandverbund (W/mK)			1.3		1.1		0.7		0.5	
			0.07	0.05	0.07	0.05	0.07	0.05	0.07	0.05
Kunststoff rahmen (W/m <sup>2</sup> K)	Standard	1.6	1.67	1.59	1.52	1.44	1.24	1.16	1.10	1.02
	verbessert	1.4	1.61	1.53	1.47	1.39	1.18	1.10	1.04	0.96
	Bestwert	1.0	1.52	1.44	1.38	1.30	1.09	1.02	0.95	0.87
Holz- / Holz- Metall- Rahmen (W/m <sup>2</sup> K)	Standard	1.5	1.64	1.56	1.49	1.42	1.21	1.13	1.07	0.99
	verbessert	1.2	1.55	1.47	1.41	1.33	1.12	1.04	0.98	0.90
	stark verbessert	0.8	1.43	1.35	1.29	1.21	1.01	0.93	0.87	0.79
	Bestwert	0.73	1.41	1.33	1.27	1.19	0.99	0.91	0.84	0.77

Quelle: Berechnungen CEPE

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

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

Tabelle 4.2-17 Energiebilanz (Fensterfläche 1.7 m<sup>2</sup>) unterschiedlicher Fensterqualitäten bei verschiedenen Einbausituationen (MJ/m<sup>2</sup><sub>Fenster</sub>a), ohne Berücksichtigung der linearen Verluste der Fensterleibungen. Werte in fett: am Markt weit verbreitete Fenstertypen

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

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

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

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

Die Energiebilanz der Fenster reagiert deutlich auf den Glasanteil bzw. Rahmenanteil des Fensters, wie der Vergleich der Tabelle 4.2-17 mit *Tabelle C.1-3* im Anhang zeigt. Bei mehreren Situationen ist die Energiebilanz des Fensters besser als diejenige der Wand, vor allem bei Südlagen. Noch besser wird die Fensterenergiebilanz für grossflächige Fenster, welche sowohl einen hohen Glasanteil als auch einen tieferen Gesamtfenster-U-Wert aufweisen (bei gleichen Materialkennwerten), siehe Tabelle 4.2-18 für ein Gebäude mit einer Gebäudehülle mit Minergiequalität (U-Wert 0.2,  $Q_h$  ca. 100 MJ/m<sup>2</sup>a). Aufgrund des höheren Ausnutzungsgrads der freien Wärme würde die Energiebilanz des Fensters bei einer Gebäudehülle von heutiger Bauqualität (U-Wert 0.3) noch besser ausfallen, vor allem gegen Süden und bei relativ unverschatteten Lagen, siehe Tabelle C.1-4 im Anhang.

Tabelle 4.2-18 Energiebilanz (MJ/m<sup>2</sup><sub>Fenster</sub>a) **grossflächiger Fenster (5 m<sup>2</sup>) mit hohem Glasanteil von 85%** für unterschiedliche Fensterqualitäten bei verschiedenen Einbausituationen, ohne Berücksichtigung der linearen Verluste der Fensterleibungen

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

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

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

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

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

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

- In unverschatteter oder nur teilverschatteter Südlage (Verschattungsfaktor  $\geq 0.7$ ) ist die Bilanz für die meisten Fenstertypen sehr positiv oder nur leicht negativ, jedenfalls weniger negativ als diejenige der Passivhauswand. Besonders die grossflächigen Fenster können als eigentliche Energielieferanten bezeichnet werden.
- Dazu genügt in unverschatteter oder nur teilverschatteter Südlage (Verschattungsfaktor  $\geq 0.7$ ) ein zweifachverglastes Wärmeschutzfenster, denn die Energiebilanz kann gegenüber diesem Fenstertyp nur in wenigen Fällen verbessert werden: in wesentlichem Mass durch ein Passivhausfenster (also mit guter Rahmenqualität und g-Wert = 0.5 oder moderat durch ein Dreifach-Fenster mit einer Verglasung mit g-Wert  $\geq 0.5$ ).
- Bei Ost- und Westlage lassen sich mit heute weit am Markt verbreiteten erhältlichen Fenstern (3fach-Wärmeschutz mit „normalem“ g-Wert) Energiebilanzen erzielen, welche besser sind als selbst die Passivhauswand, sofern die Verschattung nicht unter 70% fällt.
- Auch bei kleinen Fenstern kann in Ost oder Westlage eine absolut positive Bilanz erreicht werden, wenn nebst guten Gläsern beste Rahmen und ein g-Wert von nicht unter 0.5 zum Einsatz kommen (Passivhausanforderung) und die Lage mehr oder weniger beschattungsfrei ist, Verschattungsfaktor  $\geq 0.7$ ). Beim Vergleich zur Wand genügt ein konventioneller Rahmen und ein Glas mit tiefem U-Wert und hohem g-Wert, damit die Energiebilanz besser ist als bei der Wand mit 16 cm WD.
- Auch in Ost- oder Westlage ist der Effizienzgewinn gegenüber dem Referenzfenster (bei Verschattungsfaktoren  $\geq 0.7$ ) eher gering, wenn nur das Glas allein verbessert wird und gleichzeitig nicht auf den g-Wert geachtet wird. Nur eine gleichzeitige Verbesserung des Rahmens und das Insistieren auf einen g-Wert von 0.5 vermag die Energiebilanz deutlich zu verbessern
- Je grösser die Verschattung bzw. je tiefer das Produkt aller Reduktionsfaktoren, desto wichtiger wird eine Verbesserung der U-Werte für eine Verbesserung der Gesamtbilanz und desto unwichtiger der g-Wert. Aber selbst für diese tiefen Reduktionsfaktoren hat ein grösserer g-Wert bei gleichem U-Wert noch einen Verbesserungseffekt.
- Gegen Norden weisen die Fenster bei der kleinen Fensterfläche in allen Fällen eine Negativbilanz aus, welche schlechter ist als diejenige der Wand gemäss heutigem Neubaustandard. Der Unterschied wird umso deutlicher, je besser die Wand gedämmt ist.



- Bei der grossen Fensterfläche ist die Energiebilanz des besten Fensters selbst gegen Norden noch ungefähr gleich derjenigen der Wand mit 16 cm Dämmung.
- Ein Anreiz aus energetischer Sicht, verbesserte Rahmen und **insbesondere weniger grössere statt viele kleinere Fenster einzusetzen** entsteht dadurch, dass **damit der U-Wert des Gesamtfensters verbessert wird**, ohne dass der g-Wert verschlechtert wird (wenn das gleiche Glas eingesetzt wird) und es kann eine Verbesserung bei allen Orientierungen und Verschattungslagen festgestellt werden.
- Und als letztes die an sich triviale Feststellung, dass eine Verlagerung der Fensterflächen von Nord nach den übrigen Orientierungen und eine solche von Ost/West nach Süd eine Verbesserung der Energiebilanz mit sich zieht.
- Last but not least ist zu betonen, dass die Energiebilanz der Fenster sehr sensitiv auf die Verschattung reagiert. Die Energiebilanz geht nicht proportional zur Verschattung zurück, sondern stark überproportional, denn der Verschattungsfaktor wirkt auf die Gewinne und damit auf den einen Term einer Differenz und nicht auf die Differenz selbst.

In diesen Betrachtungen nicht berücksichtigt ist, dass eine Vergrösserung der Fensterflächen möglicherweise eine Erhöhung der Leibungslängen pro m<sup>2</sup> Wand nach sich ziehen kann (die absolute Leibungslänge kann zwar architektonisch beeinflusst werden, aber die Wandfläche wird auf jeden Fall immer kleiner und tendenziell steigt die Leibungslänge in Funktion des Fensterflächenanteils, siehe Abbildung 2.2-2.). Wichtig ist dieser Effekt vor allem bei einer Differenzbetrachtung von energieeffizienten zu sehr energieeffizienten Wänden oder bei der absoluten Bestimmung des Heizwärmebedarfs beim Passivhausfenster; an der Stelle, an der es um die Grössenordnungen der Energiebilanz von Fenster verglichen mit Wand geht, kann er jedoch vernachlässigt werden.

Fazit: Solange die gesamten Wärmegewinne die Verluste nicht wesentlich übersteigen (das Gewinn-/Verlust-Verhältnis also deutlich unter 1 bleibt) und die Verschattung nicht 25% und mehr beträgt, wirkt sich eine Vergrösserung der Fensterflächen Richtung Süd, Ost und West positiv auf die Energiebilanz aus, wenn die Fensterqualität adäquat zur Wärmedämmung der Wand ausgewählt wird. Auch beim Passivhaus bestehen also kaum architektonischen Einschränkungen, solange die Fenster nicht zu mehr als 25% verschattet sind und Fenster gemäss Passivhausanforderungen zur Anwendung kommen.

Insbesondere beim Neubau besteht damit ein grosser architektonischer Spielraum, das Gebäude energetisch zu beeinflussen.

Selbstverständlich ist der energetische Nutzen zusätzlicher Fensterflächen umso grösser, je mehr die Orientierung in Richtung Süden ausgerichtet ist.

Wird das Verhältnis der Gewinne zu den Verlusten grösser als 1, so geht der energetische Grenznutzen zusätzlicher Fensterflächen (mit positiver Bilanz) langsam zurück, d.h. die zusätzliche energetische Verbesserung, die auf der Ebene des Gesamtgebäudes erreicht werden kann, wird immer kleiner, siehe dazu das folgende Kapitel 4.2.8.

Eine energetische Verschlechterung bei der Vergrösserung der Fensterflächen tritt dann ein, wenn die Verschattung 50% überschreitet oder Fensterqualitäten zur Anwendung kommen, welche nicht dem Dämmstandard der Wand entsprechen. Mit andern Worten ist dies dann der Fall, wenn die Energiebilanz des Fensters gemäss Tabelle 4.2-17 kleiner ist als die Energiebilanz der Wand gemäss Tabelle 4.2-19.

### c) **Veränderung der Energiebilanz des Fensters mit Einbezug der Lüftungsverluste**

Wie die Ausführungen zum Luftwechsel ohne bzw. mit Lüftungsanlagen gezeigt haben, kann der Luftwechsel je nach betrachtetem Fall stark variieren (Tabelle 4.2-9, Kapitel 4.2.6, S. 70). Ein Teil dieser Variation ist auf die Unterschiede beim Fenster, wie mit oder ohne (Gummi-)dichtung, Art der Abdichtung zwischen Fensterrahmen und Leibung bzw. Wand, zurückzuführen. Zu unterscheiden ist zwischen Neubau und Erneuerung.

Um bauphysikalische Risiken und unerwünschte Effekte auszuschliessen, unterscheiden wir beim Neubau zwei Fälle:

- Wenn keine Lüftungsanlage miteingebaut wird, ist von einem etwas höheren Luftwechsel auszugehen. Häufig wird im Neubau beim Fenster ein Teil der Gummidichtung entfernt (ein Fenster pro Raum, obere horizontale Fuge) oder es wird auf eine andere Art für eine minimale Luftzufuhr gesorgt (z.B. durch Lüftungsschlitze, kontrollierte Luftzufuhr in Bad und WC, evtl. in der Küche) beziehungsweise die BewohnerInnen sorgen für einen genügenden Luftwechsel.
- Wird eine Lüftungsanlage eingebaut, können und sollen die Fenster dichter eingebaut werden damit der Anteil der Luftmenge, welcher nicht über die Lüftungsanlage gewechselt wird, möglichst klein wird.

In beiden Fällen werden die energetischen Effekte beim Thema Luftwechsel und Lüftung behandelt.

Im Gebäudebestand sind die Unterschiede bei den Luftwechseln noch grösser als im Neubau. Sehr hohe Luftwechsel können durch den Einbau von neuen Fenstern tatsächlich stark reduziert werden und dem Fenster ist ein zusätzlicher energetischer Effekt zuzuschreiben. Allerdings sollte der Luftwechsel nicht zu stark reduziert werden, denn die Risiken für bauphysikalisch bedingte Schäden und andere mit dem Feuchtigkeitshaushalt zusammenhängende Schäden sind im Gebäudebestand noch grösser als im Neubaufall. Ob ein Fensterwechsel angebracht ist und in welcher Form ist situativ von einer Fachperson zu entscheiden.

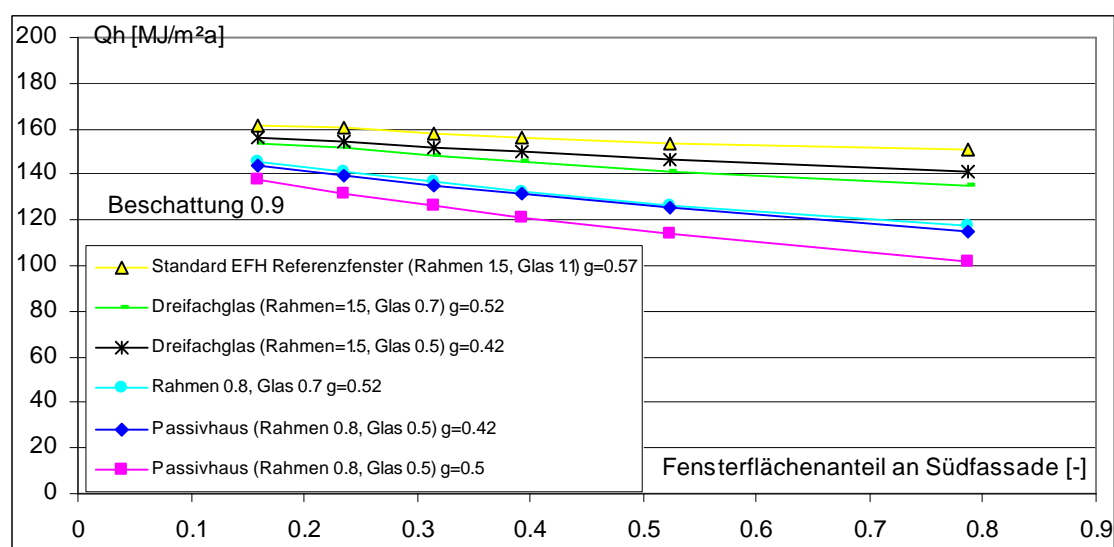
Um den zusätzlichen energetischen Effizienzgewinn pro  $m^2$ -Fensterwechsel abzuschätzen, sind Annahmen über die spezifische Fensterfläche pro EBF und die Luftwechselreduktion zu treffen. Eicher und Pauli gehen in ihrer Abschätzung (Erb et al., 2001) der Lüftungsverluste bei Fenstern von rund  $1200 \text{ MJ}/m^2_{\text{Fe}}\cdot\text{a}$  bei EV-Fenstern und von über  $600 \text{ MJ}/m^2_{\text{Fe}}\cdot\text{a}$  bei DV-Fenstern aus, was mehr als den Transmissionsverlusten entspricht. Bei einem Fensterflächenanteil von 0.15 bis  $0.2 \text{ m}^2_{\text{Fe}}/m^2_{\text{EBF}}$  ergeben diese Verluste  $180$  bis  $240 \text{ MJ}/m^2_{\text{EBF}}\cdot\text{a}$  (EV) bzw.  $90$  bis  $120 \text{ MJ}/m^2_{\text{EBF}}\cdot\text{a}$  (DV). Zu vergleichen sind diese Werte auch mit Tabelle 4.2-10. Kann der Energieverlust durch Luftwechsel beim Fensterersatz auf  $90$  bis  $140 \text{ MJ}/m^2_{\text{EBF}}\cdot\text{a}$  (EFH) bzw. auf  $110$  bis  $160 \text{ MJ}/m^2_{\text{EBF}}\cdot\text{a}$  (MFH) gesenkt werden, ergibt sich ein markanter energetischer Effizienzgewinn beim Ersatz der alten EV- bzw. DV-Fenster. Beim Unterschied zwischen alten und neuen Fenstern gemäss Tabelle 4.2-10 erhält man einen Effizienzgewinn zwischen minimal  $20 \text{ MJ}/m^2_{\text{EBF}}\cdot\text{a}$  und maximal  $90 \text{ MJ}/m^2_{\text{EBF}}\cdot\text{a}$  (EFH) bzw. zwischen minimal  $20 \text{ MJ}/m^2_{\text{EBF}}\cdot\text{a}$  und maximal  $120 \text{ MJ}/m^2_{\text{EBF}}\cdot\text{a}$  (MFH). Diese Effizienzgewinne sind den Kosten eines Fensterersatzes gegenüber zu stellen.

#### 4.2.8 Heizwärmebedarf in Funktion der Fensterflächenanteile

Mit der Erhöhung der Fensterflächenanteile verbessert oder verschlechtert sich die Energiebilanz des Gebäudes je nach Fensterqualität, Orientierung, Verschattung und der Grössenordnung der energetischen Gewinne und Verluste (siehe dazu auch das vorherige Unterkapitel). Wird die Fensterfläche nur wenig verändert, genügt es, die Energiebilanz der Fenster bzw. der Wand zu betrachten. Wird die Fensterfläche jedoch massiv verändert, so beeinflusst

dies das Verhältnis Gewinne zu Verluste u.U. so stark, so dass sich auch der Gewinnfaktor der freien Wärme verändert. Der Gewinnfaktor nimmt ab bei Fenstern und Einbausituationen mit positiver Energiebilanz, d.h. die Reduktion des Heizwärmebedarfs ist in diesen Fällen unterproportional zur Vergrößerung der Fensterflächen. Mit andern Worten: der energetische Grenznutzen nimmt ab und damit nehmen die Grenzkosten zu.

Die Annahme bei den Sensitivitätsrechnungen von Abbildung 4.2-1 bis Abbildung 4.2-4 ist, dass die Fläche pro Fenster **nicht** ändert in Funktion des zunehmenden Fensterflächenanteils und damit auch nicht die U-Werte sowie die Glasanteile pro Fenster. Aufgezeigt wird also der Effekt von mehr Fenstern der gleichen Fläche. [Eine Sensitivitätsrechnung, bei der gleichzeitig realistische Annahmen über die zunehmende Fläche pro Fenster und entsprechend höhere Glasanteile und tiefere U-Werte in Funktion des zunehmendem Fensterflächenanteils. getroffen werden, ist noch ausstehend.]



Quelle Berechnungen CEPE mit Entech 380/1

Abbildung 4.2-1 Der Heizwärmebedarf  $Q_h$  in Abhängigkeit der Fensteranteile an der **Südfassade** für verschiedene Fensterqualitäten. Ausgangslage ist ein Einfamilienhaus mit **Wand-U-Wert** von **0.2 W/m<sup>2</sup>K**, **energetisch wirksamen Luftwechsel** von **0.4** und einer **Beschattung** von **0.9**.

Die Abbildung 4.1-1 bis 4.1-4 zeigen aber auch, dass die Möglichkeiten, den Heizwärmebedarf  $Q_h$  durch die Vergrößerung der Fensterflächen zu beeinflussen, beschränkt sind. Bei einem Gebäude mit Wänden mit Minergiequalität (Annahme: U-Wert=0.2W/m<sup>2</sup>K) sind es im günstigsten Fall (geringe Verschattung, Passivhausfenster mit g-Wert=0.5) rund 40 MJ/m<sup>2</sup>a, wenn der Fensterflächenanteil von 15% auf 80% verbessert wird (siehe Abbildung 3.1-1). Auch wenn besondere bauliche Massnahmen getroffen werden, um den Ausnutzungsfaktor der freien Wärme nicht wesentlich absinken zu lassen (und die Steigung der Graphiken anhand der Steigung mit tiefen Fensterflächenanteilen extrapoliert würde), wären es „nur“ 60 MJ/m<sup>2</sup>a.

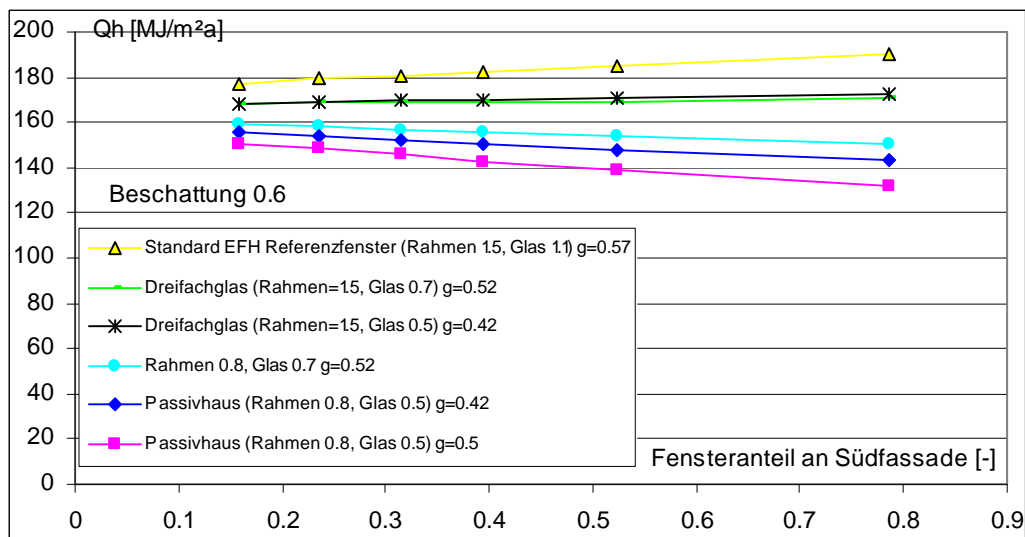
Zwei Vorbehalte müssen für die Betrachtungen in diesem Unterkapitel gemacht werden:

- Diese Betrachtungen gelten für Klimadaten, wie sie für das Mittelland typisch sind (gerechnet wurde mit Zürich SMA). Für Regionen mit höherem winterlichen Sonnenanteil (weniger Hochnebellagen) sieht die Fensterenergiebilanz grundsätzlich positiver aus (u.U. ist in

diesen Lagen aber auch die nächtliche Abstrahlung grösser, denn der Energieverlust wird nicht nur durch die Umgebungstemperatur, sondern auch durch die Strahlungstemperatur bestimmt und diese ist bei unbedecktem Himmel wesentlich tiefer (z.B.  $-20^{\circ}\text{C}$  bei  $0^{\circ}\text{C}$  Umgebungstemperatur); dieser Effekt wird von üblichen Energiebedarfsprogrammen jedoch vernachlässigt).

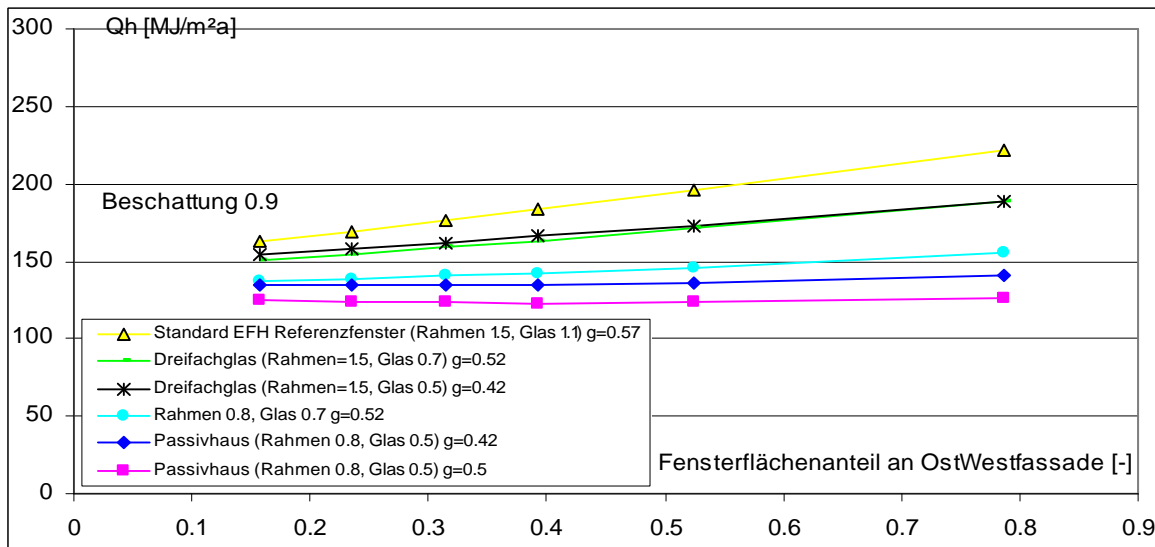
- Bei hohen Fensterflächenanteilen ist es zur präzisen Bestimmung des Heizwärmebedarfs angezeigt, mit einem dynamischen Heizwärmebedarfsprogramm und evtl. mit einem Multizonenmodell zu rechnen. Diese Programme werden den hohen und wechselnden Energiegewinn-, -verlust- und -speicherleistungen im Gebäude besser gerecht, womit u.a. das Risiko für Überhitzung besser eruiert werden. Erfahrene Architekten und Experten sind z.B. der Ansicht, dass beinahe vollverglaste Südseite grosse Räume gegen Süden und möglichst geöffnete Türen zu den übrigen Räumen bedingen.

Trotz dieser Vorbehalte bleibt die Feststellung gültig, dass eine weitgehende Reduktion des Heizwärmebedarfs (auf Niedrigenergie- oder Passivhausniveau) nur möglich ist, wenn gleichzeitig die Transmissionsverluste der Gebäudehülle und möglichst die Lüftungsverluste reduziert werden.



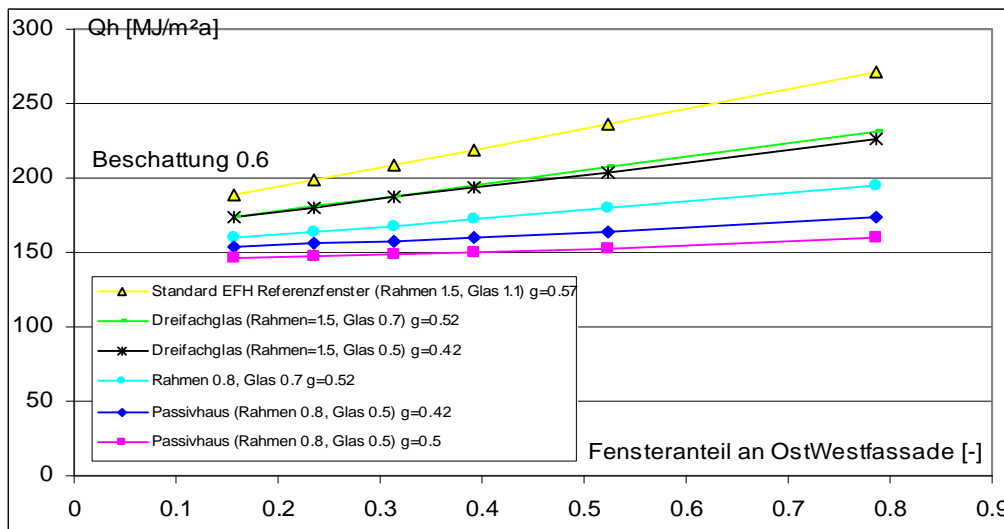
Quelle Berechnungen CEPE mit Entech 380/1

Abbildung 4.2-2 Der Heizwärmebedarf  $Q_h$  in Abhängigkeit der Fensteranteile an der **Südfassade** für verschiedene Fensterqualitäten. Ausgangslage ist ein Einfamilienhaus mit **Wand-U-Wert** von **0.2 W/m<sup>2</sup>K**, **energetisch wirksamen Luftwechsel** von **0.4** und einer **Beschattung** von **0.6**.



Quelle Berechnungen CEPE mit Entech 380/1

Abbildung 4.2-3 Der Heizwärmebedarf  $Q_h$  in Abhängigkeit der Fensteranteile an **Ost- und Westfassade** für verschiedene Fensterqualitäten. Ausgangslage ist ein Einfamilienhaus mit **Wand-U-Wert** von **0.2 W/m²K**, **energetisch wirksamen Luftwechsel** von **0.4** und einer **Beschattung** von **0.9**.



Quelle Berechnungen CEPE mit Entech 380/1

Abbildung 4.2-4 Der Heizwärmebedarf  $Q_h$  in Abhängigkeit der Fensteranteile an der **Ost- und Westfassade** für verschiedene Fensterqualitäten. Ausgangslage ist ein Einfamilienhaus mit **Wand-U-Wert** von **0.2 W/m²K**, **energetisch wirksamen Luftwechsel** von **0.4** und einer **Beschattung** von **0.6**.

Weitere Berechnungen mit Passivhauswandqualität sind im Anhang zu finden. Die grundsätzlichen Schlussfolgerungen sind die selben.

Fazit: Das Element „Fensterflächenoptimierung“ der Solararchitektur und die Wärmegewinnmaximierungsstrategien der 1980er und früheren 1990er Jahre können zwar nach wie vor eingesetzt und es können auch sehr tiefe Heizwärmebedarfe erreicht werden, aber nur kombiniert mit einer Transmissions- und Lüftungsverluststrategie (oder mit einer solchen allein) wird der Schritt zum Passivhaus ermöglicht.

Und last but not least ein wichtiger Hinweis für die Praxis: Der Fensterflächenanteil und die Fensterqualität sollte insbesondere im Hinblick auf den Komfort gewählt werden. Grosse Zweifach-Wärmeschutz-Fensterflächen bringen im Süden zwar energetische Verbesserungen, verschlechtern aber gegenüber einer Wand den Komfort, da die Oberflächentemperatur nachts wesentlich tiefer liegen.

#### 4.2.9 Methodische Hinweise zur Bestimmung der energetischen Wirkung von Energieeffizienz-Massnahmen im Gebäudekontext

Bei der Aggregation der oben beschriebenen Einzelmassnahmen auf (Bauteile) auf das gesamte Gebäude treten bzgl. der energetischen Wirkung Abweichungen auf. Zu beachten sind:

- Die linearen Wärmeverluste zwischen angrenzenden Bauteilen, insbesondere bei der Fensterleibung, im Bereich Sockel/Kellerdecken und Anschluss Dach/Wand, sind zu berücksichtigen. Diese Interaktionen sind in den obigen Unterkapiteln dargestellt und werden auch so bei der Berechnung der Grenzkosten der einzelnen Elemente miteinbezogen.
- Die Reduktion des Transmissionsverlustes oder die Erhöhung/Verminderung der solaren Gewinne hat einen indirekten Einfluss auf den gesamten Energiebedarf des Gebäudes, denn der Ausnutzungsgrad der freien Gewinne  $fg$  ist abhängig vom Verhältnis Transmissions- und Lüftungsverluste zur Summe der freien Bruttowärmegewinne (solar, Elektro, Personen). Deshalb muss zur abschliessenden Beurteilung der energetischen Wirkung der Massnahmen ein bauphysikalisches Gebäudesimulationsprogramm verwendet werden, wie dies auch beim Neubau gesetzlich vorgeschrieben ist.

Wo nicht anders vermerkt, gelangte das Programm Entech zur Anwendung, wobei mit der Monatsmethode gerechnet wurde. Es wurde die Version nach dem „alten“ SIA 380/1 1988 verwendet, hauptsächlich aus folgenden Gründen:

- Vergleichbarkeit mit bisher berechneten oder gemessenen Gebäuden.
- Hoher Bedarf an Parametern beim „neuen“ Berechnungsverfahren SIA 380/1 2001. Schon beim „alten“ Verfahren ist es schwierig, die benötigten Parameter beizubringen, um eine gewisse Repräsentativität der heutigen Neubauten sowie des bestehenden Gebäudeparks beizubringen.
- Die in dieser Studie gemachten Einzelbetrachtungen können ohnehin nicht direkt auf ein konkretes Einzelobjekt angewendet werden, da hierfür zum einen die tatsächlichen Kosten und zum andern die energierelevanten Kennwerte für den konkreten Einzelfall bestimmt werden müssen.

Aufgrund der hohen möglichen Anzahl ist es auch nicht möglich, für alle Massnahmekombinationen ( $n$ -te Massnahmen am Bauteil  $i$ , jeweils bei jeder der  $N \cdot I$  Gesamtgebäudesituationen) die energetische Wirkung im Gebäudekontext zu berechnen. Für die Beurteilung der energetischen Wirkung sowie der Grenzkosten wird deshalb eine ceteris paribus Abschätzung vorgenommen. Direkte Interaktionen – etwa zwischen angrenzenden Bauteilen (Fenster/Fassade, Sockel/Keller, Flachdach/Fassade, Fenster/Lüftung/Luftdichtheit etc) – werden jedoch direkt bei den einzelnen Bauteilen behandelt.

Es wird im folgenden eine Abschätzung gemacht, die aufzeigt, welche Abweichungen bei einer ceteris paribus Abschätzung auftreten können.

Der Gewinnfaktor  $fg$  wird in dem bisher gültigen und auch im für diesen Bericht verwendeten Heizwärmebedarfsberechnungsprogramm (Entech) wie folgt angenähert<sup>1</sup>:

---

<sup>1</sup> Nach der neuen Berechnungsnorm des Heizenergiebedarfs (SIA 380/1 2001) werden die bauphysikalischen Vorgänge, insbesondere die Speicherungs- und Wiederabgabedynamik realitätsnaher erfasst, indem die Energiespeicherfähigkeit der Gebäudemasse mittels einer Zeitkonstanten. Mittels der hier aufgeführten Annäherung wird der Gewinnfaktor eher unterschätzt.

$$fg = 1 - 0.3 * (fw/tv) = 1 - 0.3 * (Q_i + Q_s) / (Q_T + Q_V)$$

wobei  $fw$  = Freie Wärme interne Wärme ( $Q_i$ ) durch Elektrogeräte und Personen sowie Solarstrahlung ( $Q_s$ )

$tv$  = Totale Verluste durch Transmission ( $Q_T$ ) und Lüftung ( $Q_V$ )

Die Elektrowärme wird dabei nicht zu 100%, sondern nur zu 70% der freien Wärme angerechnet.

Die Haupteinflussfaktoren für das Verhältnis freie Wärme zu Verluste sind auf der Seite der Gewinne die Abwärme der Elektrogeräte (70% von 50 MJ/m<sup>2</sup>a bis 100 MJ/m<sup>2</sup>a) sowie die Solargewinne (70 MJ/m<sup>2</sup>a bis 100 MJ/m<sup>2</sup>a) und auf der Seite der Verluste die Qualität der Gebäudehülle (170 MJ/m<sup>2</sup>a bis 200 MJ/m<sup>2</sup>a bei Gebäuden nach dem heutigen Neubaustandard bis zu 100 MJ/m<sup>2</sup>a für das Passivhaus) und die Lüftungsverluste (120 MJ/m<sup>2</sup>a). Die Abwärme der Personen spielt eine eher untergeordnete Rolle (20 MJ/m<sup>2</sup>a bis 30 MJ/m<sup>2</sup>a).

Typische Werte für das Verhältnis freie Wärme zu Verluste sind in der Tabelle 4.2-20 aufgeführt. Selbst bei sehr gut gedämmten und mit Lüftungsanlagen ausgestatteten Wohngebäuden übersteigen die Gewinne die Verluste nur selten.

Tabelle 4.2-20 Abhängigkeit des Ausnutzungsgrades des Gewinnfaktors  $fg$  in Abhängigkeit des Verhältnisses der freien Wärme (brutto) zur Summe der Transmissions- und Lüftungsverluste

	Freie Wärme / Verluste	Gewinnfaktor $fg$ nach SIA 380/11988	Ausnutzungsgrad $\eta_g$ (mit $Fg=0.9$ , $\tau=50$ h)	Ausnutzungsgrad $\eta_g$ (mit $Fg=0.9$ , $\tau \geq 200$ h)
bestehende Gebäude, energetisch nicht erneuert	0.3	0.91	0.9	0.9
Verbesserte Gebäudehülle	0.5	0.85	0.86	0.9
Stark verbesserte Gebäudehülle	0.7	0.79	0.77	0.86
Passivhaus, A/EBF=1.5	1.1	0.67	-	0.85
Passivhaus, A/EBF=1.2 bis 1.5	1.0 bis 1.1	0.67 - 0.7	-	0.8 - 0.85
Passivhaus, hoher Fensteranteil ( $A_F/EBF=0.4$ ), davon 50% Süd, alle als Passivhausfenster ( $U\text{-Wert}_{\text{Fenster}}=0.8$ , $g\text{-Wert}=0.5$ )	1.3	0.61	-	0.7

Quelle SIA Doku 0170, Berechnungen CEPE

Konsequenz für die Grenzkosten, die auf der Ebene der einzelnen Bauteile berechnet wurden:

- Die energetische Wirkung der Massnahmen zur Reduktion der Transmissions- und Lüftungsverluste wird in der Durchschnittsbetrachtung leicht überschätzt (und zwar desto stärker, je mehr die Wärmeschutzmassnahmen das Verhältnis Freie Wärme zu Verluste verändern), weil als indirekte Folge der Gewinnfaktor verringert wird. Diese Überschätzung liegt bei rund 15% bis 30% (von der heutigen Bauweise bis zum Passivhausäquivalent, siehe Tabelle 4.2-20, mit einem Zahlenbeispiel für den „Extremfall eines Gebäudes mit hohem Fensterflächenanteil, das vom heutigen Baustandard zum Passivhaus verändert wird“): Bei Bruttoverlusten vor den Massnahmen von 395 MJ/m<sup>2</sup>a verringert sich die Wirkung von energetischen Massnahmen von rund 190 MJ/m<sup>2</sup>a auf netto 134 MJ/m<sup>2</sup>a, weil die Netto-



wärmegewinne von 216 MJ/m<sup>2</sup>a auf 158 MJ/m<sup>2</sup>a zurückgehen, dies weil sich der Gewinnfaktor von 0.88 auf 0.68 verringert. Die energetische Wirkung der Wärmeschutzmassnahmen wird also um rund 30% überschätzt. Dieses Phänomen kommt jedoch vor allem dann voll zum Tragen, wenn alle Massnahmen gleichzeitig durchgeführt werden; bei einer ceteris paribus Untersuchung wird das Verhältnis Freie Wärme zu Verluste weit weniger beeinflusst. Eine solche ceteris paribus Untersuchung der Grenzkosten (Durchschnittskostenansatz) ist für die Einzelbeurteilung und im Hinblick auf die grenzkostenoptimierte Paketbildung also durchaus zulässig. Die reinen Grenzkosten sind von der Überschätzung noch weniger betroffen, weil sie das G/V-Verhältnis weniger beeinflussen.

Tabelle 4.2-21 Energieflüsse an zwei Gebäuden, die bis auf die Fensterflächenanteile und deren Orientierung identisch sind

	Beispiel 1, A <sub>Fenster</sub> /EBF=0.16, Alle Orientierungen 25%					Beispiel 2 A <sub>Fenster</sub> /EBF =0.35 Süd 50%, Nord 10%, Ost/West 20%									
	Brutto- verlust MJ/m <sup>2</sup> a	Freie Wärme MJ/m <sup>2</sup> a	fg	Wärme- gewinn MJ/m <sup>2</sup> a	Qh MJ/m <sup>2</sup> a	Brutto- verlust MJ/m <sup>2</sup> a	Freie Wärme MJ/m <sup>2</sup> a	fg	Wärme- gewinn MJ/m <sup>2</sup> a	Qh MJ/m <sup>2</sup> a					
Grenzwert	320	134	0.95	127	193	395	245	0.88	216	179					
Passivhaus	152	129	0.80	103	48	203	234	0.68	158	45					
Energetische Wirkung	169			24	145	192			58	134					
Unterschied der energetischen Wirkung zwischen den Ebenen Bruttoverlust und Qh						14 %					30 %				

Quelle: Berechnungen CEPE mit Programm Entech nach Monatsmethode

- Sinken die Wärmegewinne, z.B. Elektrowärme im Sinne paralleler Massnahmen oder wegen effizienterer Geräte, so erhöht sich der Gewinnfaktor wieder und die Einzelberechnungen zu den Grenzkosten im Durchschnittskostenansatz werden wieder genauer.
- Die integrierten Betrachtungen auf Gebäudeebene sowie die Grenzkostenkurven werden mittels Paketbildung und mittels eines gebäudephysikalischen Heizwärmebedarfsprogramms vorgenommen (wo nicht anders erwähnt: Entech nach Monatsmethode).
- Es bleibt zu betonen, dass für energetische Betrachtungen, die auf den **absoluten** Bedarf von Gebäuden von Niedrigenergie oder Passivhäusern abzielen (und also nicht auf den **Unterschied** zwischen heutigem energetischen Standard und z.B. dem Passivhaus), ein Berechnungsverfahren basierend auf der heute gültigen Norm (SIA 380/1 2001) oder ein dynamisches Simulationsprogramm, z.B. HELIOS, angewendet werden sollte.

#### 4.2.10 Berechnung des Wärmeleistungsbedarfs

Die spezifischen Wärmekosten, welche den Grenzkosten gegenüber gestellt werden, werden u.a. von der Grösse (Leistung) der Heizanlage bestimmt. Der spezifische Heizleistungsbedarf ist dabei in Funktion der energetischen Qualität der Gebäudehülle und des Heizungsverteilungssystems zu bestimmen.

Die zur Zeit noch gültige Norm SIA 384/2 zur Berechnung des Heizleistungsbedarfs anhand des Jahreswärmebedarfs stammt aus dem Jahr 1982. Das Berechnungsverfahren ergibt selbst für den Referenzfall (SIA 380/1 wird erfüllt) eine (leichte) Überdimensionierung, welche bei einigen Anlagentypen (z.B. Wärmepumpen) zu erhöhten Investitionskosten führt. Sie trägt dem Aspekt, dass ein bestimmter jährlicher Heizwärmebedarf auf verschiedene Weise realisiert werden kann, nur annäherungsweise Rechnung. Die Annäherung wird jedoch umso ungenügender, je tiefer der Heizleistungs- bzw. der Heizwärmebedarf ist. Nicht zuletzt aus diesem Grund, wird die Norm zurzeit überarbeitet (Schlussversion der entsprechenden CEN-Norm ist in Vernehmlassung).

In Übereinstimmung mit A. Binz von der FHBB (Binz et al., 2002) wird der Heizleistungsbedarf deshalb anhand der Transmissions- und Lüftungsverluste berechnet. Ausgangspunkt für die Berechnung des Heizleistungsbedarfs ist der spezifische Wärmeverlust  $H$  in  $W/K$  pro  $m^2$  EBF. Er setzt sich aus den Komponenten „spezifische Transmissionsverluste“ und „spezifische Lüftungswärmeverluste“ (mit Berücksichtigung der Wärmerückgewinnung) zusammen; vereinfacht dargestellt ergibt sich:

$$H = \frac{\sum_i b_i \cdot A_i \cdot U_i + \dot{V} \cdot \frac{c_a \cdot r_a}{3600}}{EBF} \quad [W/m^2_{EBF}K]$$

mit

$A_i$  = Fläche des Bauteils  $i$  gegen aussen bzw. gegen unbeheizt

$U_i$  = U-Wert des Bauteils  $i$  in  $W/m^2K$

$b_i$  = Reduktionsfaktor des Bauteils  $i$  gemäss SIA 380/1

$\dot{V}$  = thermisch wirksamer Volumenstrom in  $m^3/h$

$c_a \cdot r_a$  = Spezifische Wärme der Luft in  $J/m^3K$

Zur Illustration werden in Tabelle 4.2-22 für verschiedene typische Fälle die Komponenten des Transmissionsverlustes am spezifischen Wärmeverlust  $H$  dargestellt. Ein durchschnittlicher U-Wert der opaken Gebäudehülle von  $0.3 W/m^2K$  und ein Fenster-U-Wert von  $1.5 W/m^2K$  entspricht dabei in etwa der heutigen Neubauweise und ein solcher von  $0.15 W/m^2K$  für die opaken Bauteile bzw. von  $0.8 W/m^2K$  für die Fenster entsprechen dem Passivhausstandard.

Tabelle 4.2-22 Spezifischer Wärmeverlust  $H$ , Komponente Transmissionsverlust, in  $W/m^2K$  (gerundete Werte)

Fensteranteil $m^2$ Fenster / $m^2_{EBF}$	Durchschnittlicher U-Wert opake Gebäudehülle $W/m^2_{OpHülle}K$	Durchschnittlicher Fenster-U-Wert $W/m^2_{Fenster}K$	A/EBF	
			1.5	2
			$W/m^2_{EBF}K$	$W/m^2_{EBF}K$
0.12	0.3	1.5	0.6	0.7
	0.2	1.1	0.4	0.5
	0.15	0.8	0.3	0.4
0.18	0.3	1.5	0.7	0.8
	0.2	1.1	0.5	0.5
	0.15	0.8	0.3	0.4

Quelle Berechnungen CEPE in Anlehnung an Binz 2001

Um den totalen spezifischen Leistungsbedarf  $H$  in  $W/m^2K$  zu erhalten, sind den Werten in Tabelle 4.2-22 die spezifischen Lüftungsverluste zu addieren. Diese betragen  $0,4 W/m^2_{EBF}K$  für einen thermisch wirksamen Luftwechsel von  $1.2 (m^3/h)/m^2_{EBF}$  (Referenzluftwechsel MFH, entsprechend  $0,5/h$  bei einer lichten Raumhöhe von rund  $2.5m$ ) und  $0,1 W/m^2K$  bei einem wirksamen Luftwechsel von  $0,3 (m^3/h)/m^2_{EBF}$  (Komfortlüftung mit WRG).  $H$  liegt bei einem Passivhaus typischerweise  $0,4 W/m^2_{EBF}K$  und sollte diesen Wert nicht wesentlich überschreiten, weil nicht wesentlich höhere Wärmemengen mittels Luftheizung zugeführt werden können (entscheidend ist der Netto-Leistungsbedarf nach Abzug der freien internen Wärmeleistungen, siehe nachfolgende Betrachtungen).

Unter Berücksichtigung der relevanten Temperaturdifferenz und der anrechenbaren internen Wärmeleistungen von Elektrizität und Personen ergibt sich daraus in erster Näherung der Heizleistungsbedarf  $q_h$

$$q_h = H \cdot (T_i - T_a) - q_i \quad [W/m^2_{EBF}]$$

mit

$T_i$  = Innentemperatur

$T_a$  = Aussentemperatur beim Auslegungspunkt gemäss SIA 382/4 (typischerweise  $-8^\circ C$  für das Mittelland)

$q_i$  = Abwärmeleistung aus Elektrizität und Personen gemäss SIA 380/1 oder gemäss tatsächlicher Personenbelegung

Für die häufigkeitsrelevanten typischen Fälle des Mittellandes kann von einer Temperaturdifferenz von  $28 K$  ausgegangen werden. Damit ergibt sich ein Bruttoleistungsbedarf  $H \cdot (T_i - T_a)$  gemäss Tabelle 4.2-23.

Tabelle 4.2-23 Bruttoleistungsbedarf ( $q_h$  vor Anrechnung der freien internen Wärmeleistungen) für ein A/EBF von 1,5, in  $W/m^2$ 

Fensteranteil $m^2$ Fenster / $m^2$ EBF	Durchschnittlicher U-Wert opake Gebäudehülle $W/m_{OpHülle}^2K$	Durchschnittlicher Fenster-U-Wert $W/m_{Fenster}^2K$	Thermisch relevanter Luftwechsel	
			1.2 ( $m^3/h$ )/ $m^2$ EBF	0.3 ( $m^3/h$ )/ $m^2$ EBF
			$q_h$ ( $W/m^2$ )	$q_h$ ( $W/m^2$ )
0.12	0.3	1.5	27	19
	0.2	1.1	22	14
	0.15	0.8	19	11
0.18	0.3	1.5	30	22
	0.2	1.1	24	16
	0.15	0.8	21	12

Die einzelnen Beiträge der internen Abwärmeleistung  $q_i$  sind in Tabelle 4.2-24 und Tabelle 4.2-25 dargestellt:

Tabelle 4.2-24 Durch Personen abgegebene Wärmeleistung gemäss SIA Norm 380/1

	SIA 380/1 (1988)		SIA 380/1 (2001)	
	$m^2/Person$	$W/m^2$	$m^2/Person$	$W/m^2$
EFH	50	0.8	60	0.7
MFH	30	1.3	40	1.0

Quelle SIA 380/1 (1988), SIA-Doku 0170

Der Vorschlag zu Minergie-P schlägt für die Berechnung der freien Wärme-Elektrizität eine verminderte  $EKZ_e$  von  $60 MJ/m^2a$  vor.

Tabelle 4.2-25 Freie Wärmeleistung Elektrizität (Reduktionsfaktor Elektrizität=0.7)

	$MJ/m^2a$	$W/m^2$
EFH	80	1.8
MFH	100	2.2
Vorschlag Minergie-P	60	1.3

Damit ergeben sich für das EFH interne freie Wärmeleistungen von  $2.0 W/m^2_{EBF}$  bis  $2.6 W/m^2_{EBF}$  und für das MFH von  $2.3 W/m^2_{EBF}$  bis  $3.5 W/m^2_{EBF}$ . Zum Vergleich: Der deutsche Passivhausstandard setzt für Wohnbauten generell  $2.1 W/m^2_{EBF}$  voraus (jeweils brutto, vor dem Ausnutzungsfaktor der freien Wärme).

Diese Werte der freien Leistung (Tabelle 4.2-24 und Tabelle 4.2-25) sind von denjenigen der Tabelle 4.2-23 zu subtrahieren, um den Nettowärmeleistungsbedarf in  $W/m^2K$  zu erhalten. Als Fallbeispiel wurde dies für die im nachfolgenden Kapitel 4.3 betrachteten Neubauten durchgeführt (siehe Tabelle 4.2-26). Beim Leistungsbedarf für WW wurden von den Bedarfswerten 90

MJ/m<sup>2</sup>a für MFH und 60 MJ/m<sup>2</sup>a für EFH ausgegangen und angenommen, dass die Warmwasseraufbereitung höchstens zwölf Stunden pro Tag gleichzeitig mit der Raumwärmeerzeugung erfolgen soll.

Tabelle 4.2-26 Wärmeleistungsbedarf für Raumwärme (W/m<sup>2</sup> und kW) sowie für Raumwärme + Warmwasser (kW) in Funktion des Heizwärmebedarfs Q<sub>h</sub>

	Q <sub>h</sub> MJ/m <sup>2</sup> a	MFH			EFH			
		Wärmeleistungsbedarf			Q <sub>h</sub> MJ/m <sup>2</sup> a	Wärmeleistungsbedarf		
		Raumwärme W/m <sup>2</sup>	RW+WW kW	RW+WW kW		Raumwärme W/m <sup>2</sup>	RW+WW kW	RW+WW kW
a) ca. Grenzwert	207	25	18	22	246	28	7	8
b) ca. Zielwert	182	23	16	21	207	25	6	7
c) ca. Minergie-heute	145	19	14	18	165	21	5	6
d) ca. Minergie-GHa	66	12	8	12	84	13	3	4
e) ca. Passivhaus	36	8	6	10	48	9	2	3

Gemäss SIA 380/1 (1988)  
 Minergie-heute: Entspricht ca. dem durchschnittlichen Q<sub>h</sub> der heutigen Minergie-Gebäude  
 Minergie-GHa: Minergie wird mit Massnahmen an Gebäudehülle allein erreicht (Oel/Gas)

Quelle Gebäudedaten gemäss Kapitel 4.3 (HBT), Q<sub>h</sub>-Berechnungen mit Entech (Monatsmethode) und Wärmeleistungsbedarf gemäss obigen Ausführungen (CEPE)

Zu beachten ist, dass ein bestimmter Heizwärmebedarf (Q<sub>h</sub>) mittels verschiedener baulicher Möglichkeiten erreicht werden kann, woraus dann unterschiedliche spezifische Wärmeleistungsbedarfe resultieren. Bei höheren Fensterflächenanteilen steigt der Wärmeleistungsbedarf bei gleichem Wärmeenergiebedarf (bei höheren Fensterflächenanteilen erhöht sich der Wärmeleistungsbedarf immer, weil Fenster höhere Transmissionsverluste aufweisen als Wände gemäss heutigem Baustandard, der Wärmeenergiebedarf jedoch bleibt in der gleichen Grössenordnung oder wird gar kleiner).

Am grundsätzlichen Sachverhalt, dass der Wärmeleistungsbedarf bei sinkenden Q<sub>h</sub> reduziert wird, ändert sich jedoch nichts, insbesondere wenn so markante Q<sub>h</sub>-Verbesserungen betrachtet werden wie es hier der Fall ist, denn die angestrebten Q<sub>h</sub>-Verbesserungen lassen sich nur erreichen, wenn auch die Fenster (insbesondere auf der Verlustseite) markant verbessert werden. Die Rechnungen zeigen jedoch, dass der Wärmeleistungsbedarf weit weniger als proportional zurückgeht.

Fazit: Das beschriebene Verfahren eignet sich gut, um den Wärmeleistungsbedarf für die Heizwärmebedarfe aufgrund der zu untersuchenden Energieeffizienzmassnahmen an Gebäudehülle und bzgl. des Lüftungsverlustes zu berechnen. Damit lassen sich in einem zweiten Schritt die möglichen Minderkosten auf Seite Wärmeerzeugung und -verteilung abschätzen.

#### 4.2.11 Passivhaus

Das Erstellen von Wohnneubauten, die den deutschen Passivhausstandard oder ähnliche energetische Anforderungen erfüllen, stellt hohe Ansprüche an die (energetische) Planung (und an die Bauausführung, *nota bene*), siehe dazu die Übersicht für das deutsche Passivhaus in Abbildung 4.2-5.

Passivhäuser sind Gebäude, deren Jahresheizwärmebedarf so gering ist, dass auf ein gesondertes aktives Heizsystem verzichtet werden kann: Die Restwärmezufuhr ist allein über die ohnehin erforderliche Zuluft möglich. Dafür muss der (tatsächliche) Energiekennwert Heizwärme kleiner oder gleich  $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  sein (Kilowattstunden je Quadratmeter Wohn- bzw. Nutzfläche und Jahr); dann sind in Mitteleuropa auch am kältesten Tag die Heizlasten so gering, dass eine gesonderte Wärmeverteilung und ein gesondertes Wärmeabgabesystem nicht erforderlich sind.

Die Realisierung von Passivhäusern stellt hohe Ansprüche an die verwendeten Komponenten:

- Bei der Dämmung: U-Werte unter  $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .
- Bei Bezug auf das Aussenmass, wärmebrückenfreie Ausführung.
- Durch Drucktest nachgewiesene, ausgezeichnete Luftdichtheit. Der Drucktestkennwert  $n_{150}$  bei 50 Pa Über- bzw. Unterdruck darf  $0,6 \text{ h}^{-1}$  nicht überschreiten.
- Verglasungen mit  $U_g$ -Werten unter  $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  bei hohem Energiedurchlassgrad ( $\geq 50\%$ ), so dass auch im Winter Netto-Wärmegewinne möglich sind.
- Fenster mit  $U_w$ -Werten unter  $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (nach der Europäischen Fensternorm [EN 10077])
- Höchsteffiziente Lüftungswärmerückgewinnung ( $\geq 75\%$ ) bei niedrigem Stromverbrauch
- Niedrige Wärmeverluste bei der Brauchwasserbereitung und -verteilung
- Hocheffiziente Nutzung von elektrischem Haushaltsstrom.

Die blosse Zusammenstellung Passivhaus geeigneter Einzelkomponenten reicht allerdings noch nicht aus, um ein Gebäude zum Passivhaus zu machen: Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile. Die Wechselwirkungen zwischen den Komponenten machen eine integrale Planung notwendig, mit welcher der Passivhausstandard erst erreicht werden kann:

**Passivhausstandard, das bedeutet: Ein Energiekennwert Heizwärme nicht grösser als  $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$  und ein Primärenergie-Kennwert für die Summe aller Anwendungen (Heizung, Warmwasser und Haushaltsstrom) nicht grösser als  $120 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ .**

Quelle: Passivhaus Vorprojektierung 99

Abbildung 4.2-5 Anforderungen zur Erfüllung des deutschen Passivhausstandards

Zwischen dem deutschen Passivhausstandard und dem schweizerischen Vorschlag Minergie-P bestehen zahlreiche Unterschiede, einerseits seitens der Anforderungen und andererseits seitens der Berechnungsverfahren. Dies wird in einer derzeit an der FHBB laufenden Untersuchung detailliert aufgezeigt, weshalb an dieser Stelle nicht der ganze Diskurs wiedergegeben, sondern auf Binz 2001 sowie den zu erwartenden Schlussbericht verwiesen wird. Die wichtigsten Gemeinsamkeiten und Unterschiede sind nachfolgend zusammengefasst.

Zunächst die Gemeinsamkeiten zwischen deutschem Passivhausstandard und dem Vorschlag Minergie-P: Auf der planerischen Ebene ist je eine Vorgabe für folgende Grössen zu erfüllen.

- Tiefer jährlicher spezifischer Heizwärmebedarf ( $\text{kWh/m}^2\text{a}$  bzw.  $\text{MJ/m}^2\text{a}$ )  $\leq 15 \text{ kWh/m}^2_{\text{EBFi}}\text{a}$  (deutscher Passivhausstandard) bzw.  $\leq 20\%$  des Grenzwertes Hg nach SIA 380/1, 2001, siehe auch Tabelle 4.2-27. Bei einem Vergleich dieser Werte sind die unterschiedlichen Definitionen zu beachten, siehe weiter unten.
- Hohe Luftdichtigkeit der Gebäudehülle:  $n_{l50} \leq 0,6 \text{ h}^{-1}$ .
- Tiefer spezifischer maximaler Wärmeleistungsbedarf ( $\text{W/m}^2$ ): Der Vorschlag zu Minergie-P sieht vor, einen Grenzwert von  $10 \text{ W/m}^2$  festzulegen. Der deutsche Passivhausstandard macht keine explizite Vorgabe zum Wert, verlangt aber als zentrale Forderung, dass der Restwärmebedarf über die Zuluft der Lüftungsanlage an die Räume abgegeben wird<sup>1</sup>. Dies bedingt ebenfalls einen Wert um  $10 \text{ W/m}^2$ .

Die Unterschiede zwischen deutschem Passivhausstandard und dem Vorschlag Minergie-P gestalten sich wie folgt:

- Minergie-P stellt eine weitere Anforderungen auf Ebene Endenergie für Wärme (Raumwärme und Warmwasser):  $E_{\text{gew}} \leq 30 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ .
- Das Verfahren zur Berechnung des Heizwärmebedarfs unterscheidet sich in einigen Punkten: Die EBF bezieht sich gemäss schweizerischer Norm auf die Aussenmasse und gemäss deutscher Norm auf die Innenmasse. Gleiches gilt für Berechnung der linearen Wärmeverluste. Ausserdem sind weitere Randbedingungen und das Berechnungsverfahren in einzelnen Punkten unterschiedlich.

Tabelle 4.2-27 Anforderungen an den spezifischen Heizwärmebedarf für den deutschen Passivhausstandard und den Minergie-P-Vorschlag.

Deutscher Passivhausstandard:	Vorschlag Minergie P (=20% des SIA-Grenzwertes Hg)	
	EFH (A/EBF z.B. = 2)	MFH (A/EBF z.B. = 1.5)
$15 \text{ kWh/m}^2\text{a} = 54 \text{ MJ/m}^2_{\text{EBFi}}\text{a}$	$54 \text{ MJ/m}^2_{\text{EBFa}}\text{a}$	$43 \text{ MJ/m}^2_{\text{EBFa}}\text{a}$
Deutsche Berechnungsart (EBF und spezifische lineare Wärmeverluste auf Innenmass bezogen)	Nach neuer Norm SIA 380/1 (EBF und spezifische lineare Wärmeverluste auf Innenmass bezogen)	

Quelle: nach Binz et al, 2002

Die Wahl des Berechnungsverfahrens kann markant unterschiedliche Werte ergeben. Tabelle 4.2-28 zeigt eine Auswahl auf (Binz et al., 2002).

<sup>1</sup> Wenn der Luftwechsel nicht erhöht wird, die Strömungsgeschwindigkeiten unterhalb dem von der Akustik her gegebenen Werte bleiben (ca. 1 m/s) und die Einblastemperaturen einen vom Komfort her gegebenen Wert (ca. 70°C) nicht überschreiten soll, ergibt sich bei einem Gebäude, das die übrigen Passivhaus-Bedingungen erfüllt, in etwa ein Wärmeleistungsbedarf von  $10 \text{ W/m}^2$ .

Tabelle 4.2-28 Unterschiede des spezifischen Heizwärmebedarfs anhand unterschiedlicher Berechnungsverfahren für je ein gleiches EFH und MFH.

	EFH	MFH
Passivhausstandard gemäss PHH-Vorprojekt 99	54	54
SIA 380/1, 1988	32	22 – 25
SIA 380/1, 2001	29	25 – 28
SIA 380/1, nach Randbedingung Minergie	36	32 – 36

Quelle: nach Binz et al., 2002

Die Anforderung an den Heizwärmebedarf ist bei Minergie-P demzufolge etwas weniger stringent als beim deutschen Passivhausstandard.

Unabhängig vom Berechnungsverfahren stellen sich auf der planerischen Ebene eine Reihe von Anforderungen, welche beachtet werden müssen, um den deutschen Passivhausstandard oder den daran orientierten Minergie-P Vorschlag erreichen zu können.



### 4.3 Kosten und energetische Nutzen von Energieeffizienzinvestitionen mit Kostenstand 2000 unter technischem Blickwinkel

Als erstes werden kurz die wesentlichen Faktoren beschrieben, welche die Kosten in Abhängigkeit zunehmender Energieeffizienz bestimmen. Anschliessend wird auf die qualitative Wirkung von architektonischen Massnahmen auf die Zusatzkosten der energetisch verbesserten Neubauweise eingegangen.

In den folgenden Kapiteln werden die spezifischen Kosten (pro m oder pro m<sup>2</sup>) der Bauteile in Funktion der energetischen Effizienz beschrieben.

#### 4.3.1 Determinanten der Kosten in Abhängigkeit der energetischen Effizienz, Unterschiede zwischen Neubau und Erneuerung und Methodisches zur Datenerhebung

Folgende Determinanten bestimmen die Kosten der baulichen Investitionen in Funktion zunehmender Energieeffizienz.

- Erhöhung der spezifischen Kosten (pro m<sup>2</sup> Fassaden- oder Dachfläche, pro m Anschlusslänge etc.) bei zunehmender energetischer Qualität. Beispiel: Kosten der Aussenwärmendämmung von Fassaden nehmen mit zunehmender Dämmstärke zu.
- Veränderung der Basisgrössen, worauf sich die spezifischen Kosten beziehen, insbesondere veränderte Flächen- und Längenanteile. Beispiel: Je höher der Fensterflächenanteil in Neubauten, desto geringer die Längen und damit die Kosten von Leibungsanschlüssen und (teuren) Fensterbänken, weil die verglasten Flächen bis zum Boden reichen.
- Zusätzliche Elemente bei hohem Wärmedämmstandard wie der Einbau einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung.
- Kosteneinsparmöglichkeiten bei zunehmender energetischer Qualität der Gebäudehülle, insbesondere bei den Investitionen in Wärmezeugung und Verteilung (v.a. bei MFH). Beispiel: Bei der Reduktion des  $Q_h$  auf die Hälfte können die Kosten der Wärmeverteilung bei Neubauten um 30% bis 40% reduziert werden.
- Zusätzliche Abbrucharbeiten, um Wärmedämmungen anbringen und Wärmebrücken unterbrechen zu können (z.B. bei Balkonen).

Diese Aufzählung der Kosteneinflüsse deutet darauf hin, dass im Grundsatz eine Wärmedämminvestition in Bezug zu setzen ist zu einem bestimmten Gebäudetyp und eine systemare systematische Kostenbewertung notwendig wäre. Von diesem Bewertungsgrundsatz muss aber in vielen Fällen wegen des hohen Datenaufwandes Abstand genommen werden.

#### a) Grundsätzliche Unterschiede zwischen Neubau und Erneuerung

Im Gebäudebestand muss von einer bestehenden bautechnischen und architektonischen Situation ausgegangen werden (kleinere Planungsfreiheit).

Kritische Bereiche, insbesondere das Beheben von Wärmebrücken und die vollständige Erstellung der Luftdichtigkeit bedingen eine zum Teil hohe Eingriffstiefe und sind häufig mit Baumeisterarbeiten bzw. Abbrüchen verbunden (Balkonabbrüche, Abbruch der Flachdachdämmung) und können bzw. werden, auch aus Kostengründen, nur teilweise oder gar nur selten verwirklicht (z.B. Vergrösserung der Fensteröffnungen).

Bauabläufe sind von vielen Randbedingungen abhängig, die zum Teil nicht oder nur schwierig beeinflusst werden können.

**b) Einfluss der Bauabläufe auf die Kosten**

Im Erneuerungsbereich sind die Kosten der energetischen Erneuerung auch von den Bauabläufen abhängig:

- Im Total ist der Einbau eines Fensters plus die Innenerneuerung kostengünstiger, wenn beide Arbeiten gleichzeitig ausgeführt wird.
- Der Anschluss der Fassade insbesondere an das Steildach ist wesentlich kostengünstiger, wenn die Wärmedämmung an Fassade und Dach gleichzeitig durchgeführt werden (20 Fr/m versus 120 Fr/m), was im EFH bei der Umlegung auf den Overall-Fassadenpreis (m<sup>2</sup>-Preis inkl. alle Anschlüsse) eine Verteuerung um 60 Fr/m<sup>2</sup> bedeuten kann.

**c) Methodik der Kostenermittlung**

Die Herausforderung der Ermittlung der Grenzkosten zunehmender Energie-Effizienz beim Neubauen und Erneuern besteht darin, dass die interessierenden Bauleistungen eher selten ausgeführt werden bzw. entsprechende Kosten- und Energieeffizienzdaten nicht zur Verfügung stehen. Das gilt für die energetische Erneuerung von bestehenden Gebäuden noch mehr als für Neubauten. Besonders im Erneuerungsbereich konnten demzufolge nicht ausgeführte Projekte in Zusammenarbeit mit Immobilienfirmen ausgewertet werden, sondern die Kosten der interessierenden Bauleistungen waren mittels spezialisierter Anfragen direkt bei den bauleistungserbringenden Unternehmen zu erheben.

Umfangreiche Vorabklärungen und die Erhebungen selbst haben gezeigt, dass die Bauleistungen und deren energetische Wirkung nicht für die Vielfalt der bestehenden Gebäude erhoben werden muss, sondern dass mit einem kanonischen, d.h. typisierenden Ansatz gearbeitet werden kann. Bzgl. der spezifischen Preise von wärmetechnischen Massnahmen an der Gebäudehülle und insbesondere deren Preissteigerungen bei zunehmender energetischer Effizienz brauchte nur zwischen einigen wenigen verschiedenen Konstruktionstypen und Gebäudesubstanzzuständen zu unterschieden werden. Denn die Preise variieren ebenso so deutlich mit der Ausführungsart und mit den Bauabläufen. Die Kosten und Nutzen energieeffizienten Bauens und Erneuerns können demzufolge anhand relativ weniger spezifischer Preise bzw. Kosten, der Berechnung derer energetischen Wirkung und der anschliessenden Hochrechnung auf der Basis der Gebäudegeometrien und der energetischen Typologisierung aufgespannt werden. Dies bedeutet:

Die Preise der energie-effizienten Bauleistungen und insbesondere deren Unterschiede bei zunehmender Energieeffizienz hängen relativ wenig vom Konstruktionstyp und von der Gebäudesubstanz ab. So bestimmt beispielsweise der Zustand der bestehenden Wand den Preis einer Aussenwärmedämmung nur in geringem Masse oder der Preis des Montierens von Fenstern unterschiedlicher Qualität wird nicht von der Gebäudesubstanz beeinflusst. Im Einzelfall mag die Gebäudesubstanz oder die Konstruktionsart die Vorgehensweise mitbestimmen (z.B. ob das Dach von unten oder von oben gedämmt wird). Entscheidender ist, ob diese Massnahmen für die jeweiligen Gebäude in den verschiedenen Zuständen bauphysikalisch und energetisch sinnvoll sowie wirtschaftlich vertretbar sind.

Bei der energetischen Wirkung einer bestimmten Massnahme muss jedoch weiter differenziert werden, denn eine gleiche Massnahme (z.B. 12 cm Aussenwärmedämmung) kann je nach Ausgangslage eine unterschiedliche energetische Wirkung haben.

Es kommt demzufolge das folgende analytische, dreistufige Verfahren zur Anwendung.

- Schritt 1** Der Gebäudepark wird energetisch und architektonisch typologisiert.
- Schritt 2** Die Preise werden elementweise und als spezifische Grösse erhoben, entweder pro m<sup>2</sup>, pro m oder pro Stück.
- Schritt 3** Die Bauleistungen werden entsprechend sowie unter Berücksichtigung der Bauabläufe bzw. der architektonischen Pakete zugeordnet. Die Kosten werden anhand der architektonischen Merkmale (Längen, Flächen etc.) berechnet und mit der energetischen Wirkung in Beziehung gesetzt.

Schritt 1 wurde in Kapitel 3 behandelt. Die nachfolgenden Überlegungen in diesem Kap. 4.3 behandeln Schritt 2, während Schritt 3 im Kapitel 4.3 für den Neubau und im Kapitel 6 für die Gebäudeerneuerung behandelt wird.

#### 4.3.2 Methodische Hinweise zur Kostenermittlung im Bereich Wand und Fassade

Im Neubau und bei der energetischen Gebäudeerneuerung wird zwischen den folgenden zwei bzw. drei technischen Möglichkeiten unterschieden:

- Verputzte Aussenwärmedämmung (Kompaktfassade) mit Polystyrol oder Mineralwolle
- Hinterlüftete Fassade mit Mineralwolle
- Holzsystembau

Folgende Preis- bzw. Kostenelemente sind in die energetische Grenzkostenbetrachtung miteinzubeziehen, wobei unterschieden wird zwischen

- Flächenbasierten Elementen (vgl. Tabelle 4.3-1)
- Längenbasierten Elementen: Die linien- bzw. längenbasierten Elemente umfassen Anschlüsse an Fenster (Leibungen, Fensterbänke, Stürze); Anschlüsse an Sockel bzw. eigentliche Perimeterdämmung sowie Anschlüsse an Flach- bzw. Steildach.

Tabelle 4.3-1 Flächenbasierte Preis- bzw. Kostenelemente für verschiedene Fassadentypen

Elemente	Kompaktfassade	Hinterlüftete Fassade
Gerüstkosten	Gerüstkosten (dämmstärkenabhängig)	
Vorbereitungsarbeiten	Waschen/Tiefengrund., evtl. Putz ausbessern (Erneuerung)	Ausreissversuche (Erneuerung)
Wärmedämmung	Wärmedämmung, inkl. verlegen (Arbeitsanteil)	
Befestigungsmaterial	Montagematerial (Kleber / Mörtel, Dübel)	Unterkonstruktion (Holz, Holz-Metall, Metall)
Fassadenhaut	Armierung, Putz, Anstrich	Bekleidung

Diese Elemente weisen unterschiedliche Kosten für den Neubau bzw. die Erneuerung auf, bei letzterer sind die Kosten zusätzlich vom Bauablauf abhängig.

### a) **Methodik der Kostenermittlung**

Das Vorgehen zur Erhebung von Preiselementen berücksichtigte auch den Einfluss der Gröszenstruktur der bauleistungserbringenden Unternehmen und war auf den Organisationsgrad in Verbänden oder Fachvereinigungen angewiesen.

**Kompaktfassaden:** Die Kompaktfassaden werden von grösseren spezialisierten Fassadenfirmen, aber vor allem auch von vielen kleinen Gipsunternehmen appliziert. Sie alle beziehen die Produkte von den sogenannten **Systemhaltern**. Diese stellen sicher, dass die verwendeten Produkte (Mörtel/Kleber, Dämmstoff, mechanisches Befestigungsmaterial, Armierungsgitter, Putz etc.) technologisch zusammenpassen. Da sie ausserdem die applizierenden Firmen, also ihre Kunden, zusätzlich technisch und preislich beraten, kommt den Systemhaltern im Bereich der Kompaktfassaden eine entscheidende Bedeutung zu. Sie sind als grössere Unternehmen ausserdem besser in der Lage, auch etwas aufwendigere Anfragen zu beantworten. Eine Auswahl von Systemhaltern und von Fassadenfirmen wurde also für die Preisanfragen gewählt, wobei die Fassadenfirmen solche sind, welche auch im Bereich der hinterlüfteten Fassaden tätig sind, so dass beide Fassadensysteme aus einem gleichen Ansatz beurteilt wurden.

**Hinterlüftete Fassaden:** Die Unternehmen, welche hinterlüftete Fassaden verlegen, sind zu einem grossen Teil im Schweizerischen Fachverband für Hinterlüftete Fassaden, dem SFHF, organisiert, teilweise auch im SVDW (ursprünglich vom Dach her kommend). Der SFHF konnte für eine Umfrage (Vollerhebung) im Bereich der hinterlüfteten Fassaden gewonnen werden (und im Sinne einer Lastenverteilung wurde der SVDW für den Dachbereich ausgewählt).

Bei beiden Umfragen ging es darum, nicht nur Preise von heute üblichen Bauleistungen (Dämmstärken) zu erheben, sondern auch von solchen, von denen die Preise nicht routinemässig bekannt sind. Aus diesem Grund wurden die Preisfragebogen relativ detailliert gestaltet, um den Ausfüllenden eine Richtschnur zu bieten und sicherzustellen, dass die Preise systematisch und reflektiert angegeben werden können.

### b) **Zusätzliche Gerüstkosten**

Im Neubaufall werden beim Gerüst nur die von der höheren Dämmstärke verursachten Mehrkosten (gegenüber der Referenzdämmstärke) miteingerechnet. Diese werden z.B. durch entsprechende Konsolen oder einen zusätzlichen Arbeitsgang verursacht und betragen 3 CHF/m<sup>2</sup> bis 5 CHF/m<sup>2</sup> bei 20 cm bzw. 5 CHF/m<sup>2</sup> bis 10 CHF/m<sup>2</sup> bei 30 cm Dämmstärke.

#### 4.3.3 **Kompaktfassaden**

Die reinen Flächenpreise von Kompaktfassaden gleichen sich bei hohen Dämmstärken zwischen Neubau und Erneuerung an, weil im Neubaufall ebenfalls gedübelt werden muss, sobald zweilagig gearbeitet wird (meistens ab 20 cm vgl. Abbildung 4.3-1). Neben den Gesamtinvestitionskosten sowie deren Kostenstruktur wurden aus der Erhebung folgende Einzelangaben bekannt:

- Die Kosten für die Leibungsdämmungen sind (bei gleicher Dämmstärke und gleicher Leibungstiefe) bei Neubau und Erneuerung grundsätzlich gleich. Beim Neubau besteht jedoch die Möglichkeit, das Fenster an der Aussenkante des Mauerwerks oder des Wandelements (beim Systembau) anzuschlagen, so dass die Leibungstiefe aussen wesentlich reduziert werden kann. Ein grosser Unterschied besteht jedoch zwischen der in der Erneuerung häufigen 0 cm Dämmung (rund 25 CHF/m<sup>2</sup>) und der 2 cm oder mehr Dämmung (rund 40 CHF/m<sup>2</sup>).

- Fensterbänke: Im Neubau und teilweise auch im Erneuerungsfall kommen entweder gedämmte Fensterbänke oder sogenannte Unterschiebe-Fensterbänke z.B. aus Alu zur Anwendung. Deren Preise variieren in Funktion der Dämmstärke der Aussenwärmedämmung der Fassade. Bei einer Zunahme der Fassadendämmstärke von z.B. 10 cm ergibt sich ein Mehrpreis von 5 bis 10 CHF/m, dies bei einem Preisniveau von 170 bis über 200 CHF/m für gedämmte Fensterbänke und 70 bis 90 CHF/m für Metallfensterbänke.
- Im Erneuerungsfall wird bei erhöhten Dämmstärken entweder das Abtrennen der bestehenden Fensterbank oder das Aussparen der Wärmedämmung mit abschliessender Metallfensterbank notwendig, wobei der Preis letzterer wiederum von der Dämmstärke der Fassade abhängt (Mehrpreise von ca. 10 CHF/m pro 10 cm zusätzlicher Dämmstärke).
- Bei Gebäudeerneuerungen kommt die Vorbereitung des Untergrunds hinzu. Dazu gehört meistens das Waschen und eine Tiefengrundierung (10 CHF/m<sup>2</sup> bis 15 CHF/m<sup>2</sup>), evtl. müssen Ausgleichputze appliziert werden (20 CHF/m<sup>2</sup>) und unter Umständen müssen zuerst alte Putze entfernt werden (25 CHF/m<sup>2</sup>).

Insgesamt ergaben sich leicht progressiv zunehmende Investitionskosten, insbesondere bei Dämmstärken grösser 16 cm (vgl. Tabelle 4.3-2). Unterstellt man als Referenz 12 cm Dämmstärke, so lassen sich von diesem Wärmedämmstandard für weitere Verbesserungen die Grenzkosten bezogen auf die jeweils zusätzlich eingesparte Energie errechnen.

Diese Ergebnisse müssen mit zwei Vorbehalten interpretiert werden:

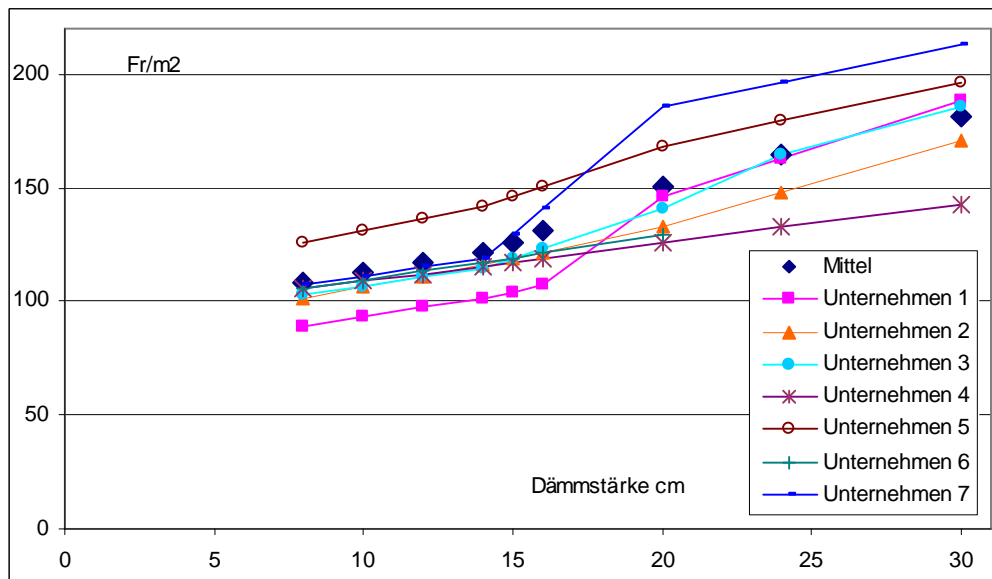
- Da die Nutzungszeit etwa 40 bis 50 Jahre beträgt und die Energiepreise für Heizöl, Erdgas oder andere Endenergieträger mit Sicherheit in dieser Zeitperiode zunehmen werden, sollten die angegebenen Grenzkosten nicht mit den heutigen Wärmekosten von vielleicht 6 bis 8 Rp/kWh<sub>NE</sub> verglichen werden. Ein solcher Vergleich würde den Nutzen der Wärmedämmung oberhalb der Referenzstärke unterschätzen.
- Die Investitionskosten werden auch in Zukunft eher rückläufig sein für die gleiche Dämmstärke, so wie dies auch in den letzten 20 Jahren aufgrund von Rationalisierungen und verbesserten Dämmeigenschaften möglich war. Deshalb werden die Grenzkosten für gleiche Dämmstärken in Zukunft rückläufig sein (vgl. Kapitel 4.4.4).

Fasst man beide Effekte zusammen, so bedeutet dies, dass heute noch unwirtschaftliche Dämmstärken (ohne Berücksichtigung externer Kosten) in fünf oder zehn Jahren wirtschaftlich sein könnten. Diese Überlegungen gelten auch für alle übrigen folgenden Kostenangaben.

Die quantitativen Ergebnisse nachfolgend im einzelnen:

#### **a) Polystyrol Neubau**

Ausgehend von der Darstellung der Erhebungsergebnisse (Abbildung 4.3-1 und Abbildung 4.3-2) werden die Grenzkosten der eingesparten Nutzenergie berechnet (Tabelle 4.3-2). Nachfolgend wird der Einfluss von verlängerten spezifischen Leibungslängen aufgezeigt.

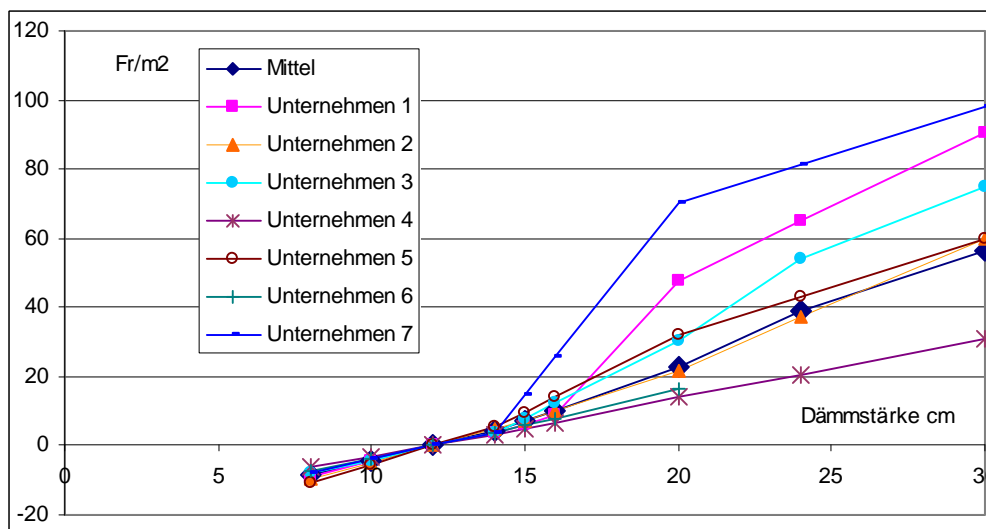


Quelle Erhebung CEPE

Abbildung 4.3-1 Investitionskosten von Kompaktfassaden (Aussenwärmedämmungen mit Polystyrol) für einen 4FH-Neubau, Kosten inkl. Anschlüsse an Fenster (o.45m/m²) und Schrägdach. CHF/m²

Laut den an der Erhebung teilnehmenden Fassadenfirmen ist das Niveau der spezifischen Kosten für Ein- und Mehrfamilienhäuser identisch. Möglicherweise werden bei grossen Aufträgen etwas höhere Rabatte gewährt. Die Preise sind mehr von den architektonischen Formen (Länge der Ecken und Kanten sowie der Anschlüsse an Fenster, Dach, Sockel sowie andere fremde Bauteile) und der Materialwahl abhängig.

Die folgenden Abbildungen reflektieren weitgehend die Antworten der Fassadenunternehmen. Die Erhebungsbogen wurden in den überaus meisten Fällen sehr vollständig ausgefüllt oder konnten durch Rücksprachen komplettiert werden. An einigen wenigen Stellen mussten wegen fehlender Angaben Annahmen getroffen werden, wobei sich diese an den Kostenelementen der übrigen Unternehmen orientierten. Das Preisniveau variiert von Unternehmen zu Unternehmen. Diese Preisunterschiede sind einerseits regional begründet, laut Aussagen der Unternehmen aber auch durch Qualitätsunterschiede. Je optimaler die Abstimmung der einzelnen Komponenten (Kleber, Einbettungsmasse, Putz, Armierungsgitter, Farbe) und je besser die dienstleisterische Unterstützung der applizierenden Kleinunternehmen durch die Systemhalter, desto länger die Lebensdauer der Fassaden.



Quelle Erhebung CEPE

Abbildung 4.3-2 Investitionsmehrkosten von Kompaktfassaden (Aussenwärmedämmungen mit Polystyrol) gegenüber der Referenzdämmstärke von 12 cm für einen 4FH-Neubau, Kosten inkl. Anschlüsse an Fenster (o.45m/m<sup>2</sup>) und Schrägdach. CHF/m<sup>2</sup>

Zwischen 8 cm und rund 16 cm ist die Steigung der Kosten in Funktion der Dämmstärke beinahe identisch für alle Fassadenfirmen. Die aufgrund der Primärangaben berechneten Mehrpreise beginnen ab 20 cm Dämmstärke wesentlich stärker zu streuen. Dies liegt zu einem grossen Teil darin begründet, dass der Markt dieser Dämmstärke noch ein sehr kleines Volumen aufweist und die Preisbildung der Unternehmen und der Marktmechanismus des One-Price-for-one-good seine Wirkung noch nicht entfalten konnte. Insbesondere Unternehmen Nr. 1 und Nr. 7 scheinen noch nicht viel Erfahrung mit Dämmstärken von 20 cm und 30 cm zu haben, weshalb sie nicht in die Mittelwertbildung miteinbezogen werden.

Aufgrund der Mehrinvestitionskosten gegenüber der Referenzdämmstärke 12 cm und dem Effizienzgewinn (Heizwärmebedarfsreduktion) werden darauf die Grenzkosten der verstärkten Wärmedämmung berechnet, und zwar für den Mittelwert der Unternehmen sowie für den festgestellten Best Practice (Unternehmen Nr. 4), siehe Tabelle 4.3-2 und Abbildung 4.3-3.

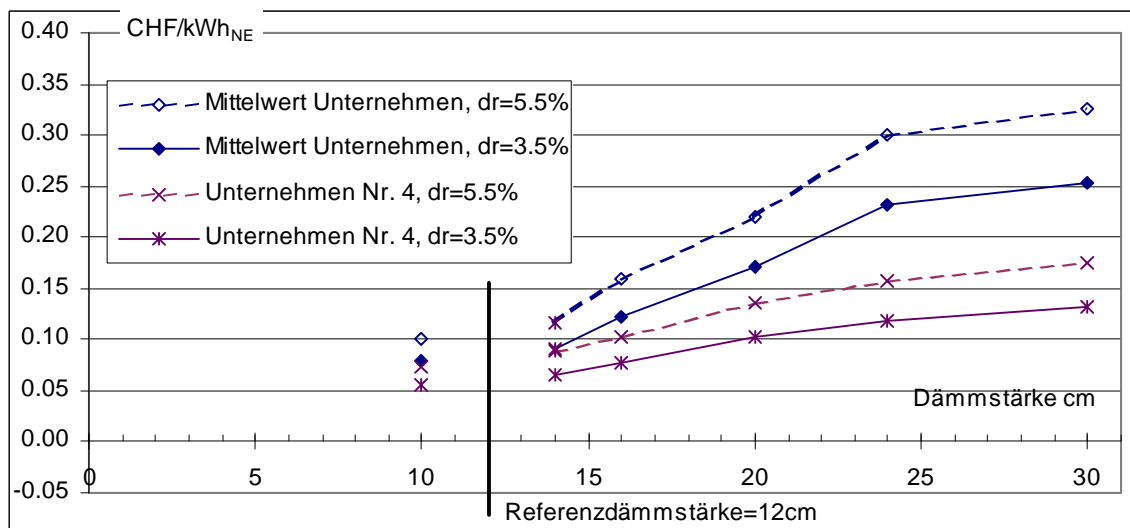
Diese Grenzkosten sind nicht direkt mit dem Energiepreis der Heizungen zu vergleichen, sondern mit dem sogenannten Wärmepreis, der auch die Investitionskosten (bzw. mindestens einen Teil davon) für die Wärmeerzeugung und -verteilung enthält (weitere Vorbemerkungen zum Wärmepreis zu Beginn des Kapitels).

Tabelle 4.3-2 Investitions-, Investitionsmehrkosten, Effizienzgewinn und Grenzkosten (Durchschnittskostenansatz) gegenüber Referenzdämmstärke 12 cm für Aussenwärmedämmungen bei Neubauten (Kompaktfassade mit Polystyrol) inkl. Anschlüsse an Fenster ( $0.45\text{m}^2$ ) und Schrägdach.

Dämmstärke U-Wert	Nutzenenergie- gewinn gegen- über Referenz	Grenzkosten der eingesparten Energie <sup>1)</sup> (Durchschnittskostenansatz)						
		Investitionskosten		Mittelwert Unternehmen		Best Practice		
		Mittelwert	Bestwert	$dr=0.055$	$dr=0.035$	$dr=0.055$	$dr=0.035$	
cm	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	$\text{kWh}/\text{m}^2_{\text{Wand a}}$	$\text{Fr}/\text{m}^2_{\text{Wand}}$	$\text{Fr}/\text{m}^2_{\text{Wand}}$	$\text{CHF}/\text{kWh}_{\text{NE}}$	$\text{CHF}/\text{kWh}_{\text{NE}}$	$\text{CHF}/\text{kWh}_{\text{NE}}$	$\text{CHF}/\text{kWh}_{\text{NE}}$
10	0.31	-3	112	109	0.10	0.08	0.07	0.06
12	0.28	0	117	112				
14	0.25	2	121	115	0.12	0.09	0.09	0.07
16	0.23	4	127	119	0.16	0.12	0.10	0.08
20	0.20	6	140	126	0.22	0.17	0.14	0.10
24	0.18	8	156	133	0.30	0.23	0.16	0.12
30	0.15	11	174	143	0.33	0.25	0.18	0.13

<sup>1)</sup> Annahmen für Kapitalkostenermittlung 40 Jahre Nutzungszeit, 3,5% bzw. 5,5 % Realverzinsung

Quelle Erhebungen und Berechnungen CEPE



Quelle Erhebungen und Berechnungen CEPE

Abbildung 4.3-3 Grenzkosten der eingesparten Nutzenergie (Durchschnittskostenansatz) in Abhängigkeit der Dämmstärke, für Aussenwärmedämmungen bei Neubauten (Kompaktfassade mit Polystyrol) inkl. Anschlüsse an Fenster ( $0.45\text{m}^2$ ) und Schrägdach.



Folgende Feststellungen können anhand dieser Berechnungen gemacht werden

- Die Grenzkosten (im Durchschnittskostenansatz) nehmen zunächst (bis ca. 16 cm) beinahe linear zu. Der Anstieg beginnt dann ab ca. 20 cm abzuflachen.
- Die Grenzkosten reagieren wie erwartet sensitiv auf den angenommenen Realzinssatz, siehe dazu auch die Sensitivitätsbetrachtungen im Kapitel 4.1.2 a).
- Bei den berechneten bzw. dargestellten Grenzkosten handelt es sich um Bruttogrenzkosten, d.h. die Minderkosten aufgrund der eingesparten Wärmekosten sind davon nicht abgezogen. Diese Wärmekosten betragen im Neubau je nach Energiepreis (Durchschnitt über die nächsten 40 Jahre, gemäss Lebensdauer der Wanddämmung) und Wärmeerzeugungssystem 8 Rp/kWh<sub>NE</sub> bis 11 Rp/kWh<sub>NE</sub>. Legt man den Mittelwert der Unternehmen und den tieferen Zinssatz zugrunde, sind rund 16 bis 18 cm im Bereich der Wirtschaftlichkeit. Beim Best Practice, dem Unternehmen mit dem geringsten Kostenanstieg, sind beim EFH 30 cm beinahe wirtschaftlich, beim MFH rund 25 cm (die vermiedenen Wärmekosten sind beim EFH etwas geringer und die Grenzkosten aufgrund des höheren Zinssatzes höher).
- Die Grenzkosten reagieren sehr sensitiv auf die Mehrinvestitionskosten. Während beim Mittelwert der Unternehmen die Grenzkosten (im Durchschnittskostenansatz) von 4 cm zusätzlicher Dämmstärke 12 Rp/kWh<sub>NE</sub> bzw. 16 Rp/kWh<sub>NE</sub> betragen, sind es beim Unternehmen mit dem geringsten Kostenanstieg nur 6 Rp/kWh<sub>NE</sub> bzw. 8 Rp/kWh<sub>NE</sub>, also rund die Hälfte. Bis zur Dämmstärke 30 cm akzentuiert sich der Unterschied gar noch etwas. Dabei ist zu betonen, dass das Unternehmen mit dem geringsten Kostenanstieg nicht etwa durch ein allgemein hohes Kostenniveau bei der Referenzdämmstärke auffällt, was evtl. einen geringeren Anstieg teilweise erklärt hätte.
- Aus dieser Gegenüberstellung lässt sich auch ein Benchmark ableiten, wieviel denn die Mehrkosten betragen dürften, damit die Effizienzinvestitionen im Wirtschaftlichkeitsbereich bzw. knapp darüber liegen. 12 bis 14 CHF/m<sup>2</sup> dürften sie bei Dämmstärke 20 cm betragen und rund 25 bis 30 CHF/m<sup>2</sup> bei 30 cm.

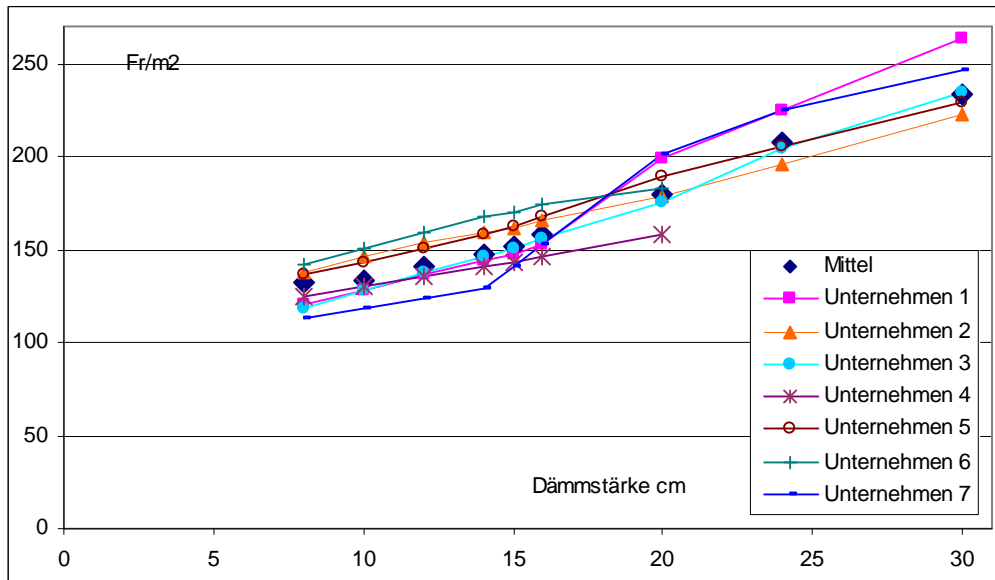
#### **b) Mineralwolle Neubau**

Kompaktfassaden lassen sich auch mit dem Dämmmaterial Mineralwolle erstellen. Das absolute Kostenniveau ist etwas höher als beim Dämmstoff Polystyrol, wird aber trotzdem gewählt, unter anderem wegen der höheren Diffusionseigenschaften und wegen der mechanischen Festigkeit.

Die Mehrinvestitionen der Steinwolle- und der Polystyrol-Kompaktfassade sind im Verlauf zunehmender Dämmstärken sehr ähnlich, wie der Vergleich von Abbildung 4.3-2 mit Abbildung 4.3-5 zeigt. Auch hier ist eine relativ grosse Streuung festzustellen. Die Unternehmen Nr. 1 und Nr. 7 werden wiederum aus den oben genannten Gründen von der Mittelwertbildung ausgeklammert.

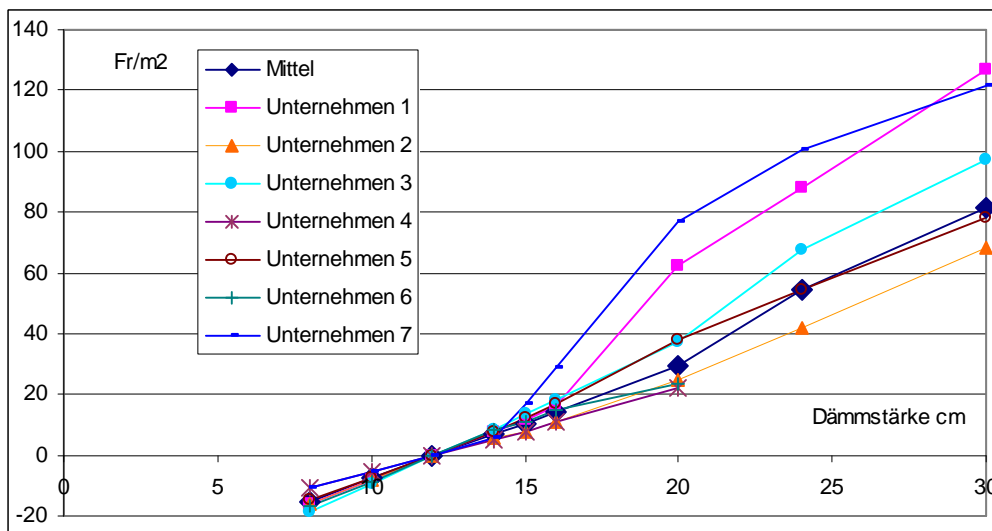
Die Mehrkosten in Funktion zunehmender Dämmstärke liegen rund 30% höher als beim Polystyrol. Aufgrund der besseren mechanischen Eigenschaften ist diese Variante jedoch weniger empfindlich gegen Beschädigungen und es kann mit einer allgemein höheren Lebensdauer gerechnet werden. Die Grenzkosten, welche ja auf einer Lebensdauerbetrachtung basieren, liegen demzufolge noch ca. 15% bis 20% höher wenn kein wegfallender Unterhalt eingerechnet wird. Wenn wegfallende Unterhaltskosten von ca. 10 bis 20 CHF/m<sup>2</sup> eingerechnet werden, sind die Grenzkosten leicht tiefer oder höchstens ca. 10% höher.

Für die verarbeitenden Unternehmen ist es ausserdem ein Vorteil, dass der Dämmstoffpreis nicht so sensitiv auf den Preis der fossilen Energie reagiert (was beim Polystyrol deshalb stark der Fall ist, weil Erdöl der Ausgangsrohstoff desselben ist).



Quelle Erhebung CEPE

Abbildung 4.3-4 Investitionskosten von Kompaktfassaden (Aussenwärmedämmungen mit Steinwolle) für einen 4FH-Neubau, Kosten inkl. Anschlüsse an Fenster (0.45m/m<sup>2</sup>) und Schrägdach. CHF/m<sup>2</sup>

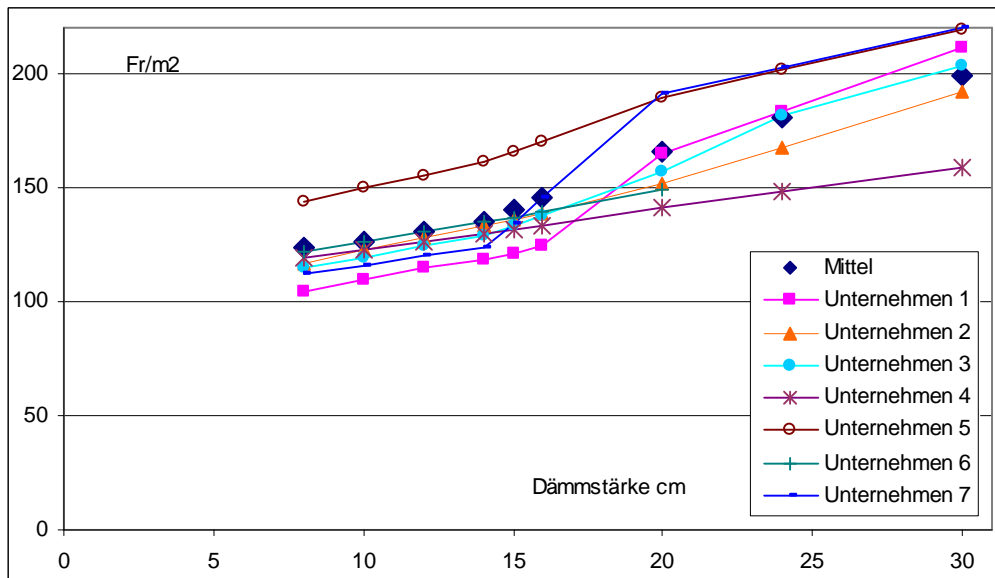


Quelle Erhebung CEPE

Abbildung 4.3-5 Investitionsmehrkosten von Kompaktfassaden (Steinwolle) gegenüber der Referenzdämmstärke von 12 cm für einen 4FH-Neubau, Kosten inkl. Anschlüsse an Fenster (0.45m/m<sup>2</sup>) und Schrägdach. CHF/m<sup>2</sup>

### c) Einfluss der architektonischen Formen auf die Kosten von Aussenwärmedämmungen

Die spezifische Anschlusslänge (m Anschlusslänge pro  $m^2$  Fassadenfläche) hat einen Einfluss auf die Kosten der Fassadenaussenwärmedämmung, wie der Vergleich von Abbildung 4.3-1 mit Abbildung 4.3-6 zeigt. Längere Anschlüsse wirken sich jedoch vor allem auf das absolute Niveau der Kosten aus und weniger auf die Steigung der Kosten in Funktion der Dämmstärke.

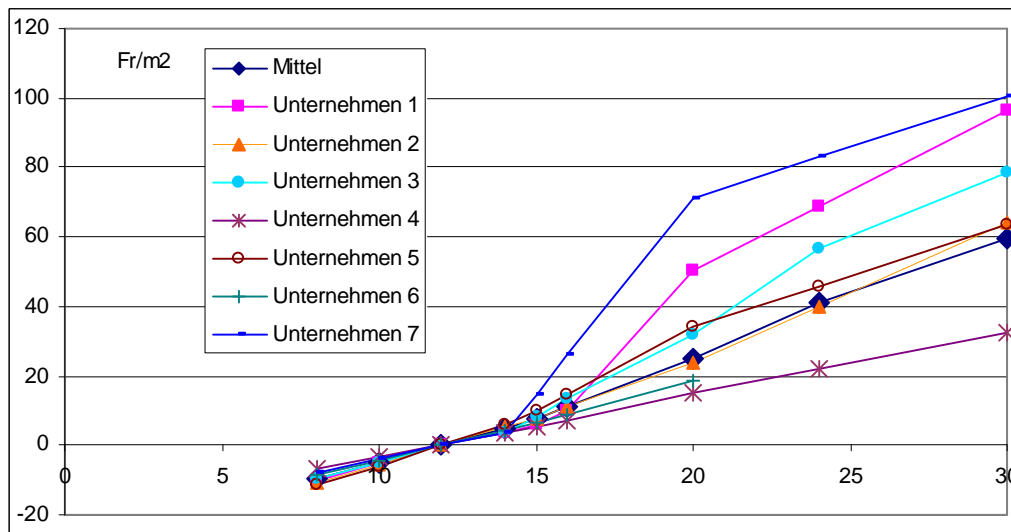


Quelle Erhebung CEPE

Abbildung 4.3-6 Investitionskosten von Kompaktfassaden (Aussenwärmedämmungen mit Polystyrol) für einen 4FH-Neubau bei gesamthaft längeren Fensteranschlüssen ( $0.7 \text{ m/m}^2$ ). Kosten inkl. alle Anschlüsse an Fenster, Dach. CHF/ $m^2$

Im Gegensatz zum absoluten Niveau der Investitionskosten unterscheiden sich die Mehrkosten gegenüber der Referenz jedoch kaum für unterschiedliche Anschlusslängen. Dies geht aus dem Vergleich der Abbildung 4.3-2 mit Abbildung 4.3-7 hervor. Dasselbe gilt auch für die Kompaktfassaden mit Steinwolle.

Die Grenzkosten einer Fassadenaussenwärmedämmung als Kompaktfassade sind bei der untersuchten Anschlusslänge  $0.65 \text{ m/m}^2$  ca. 10% höher als bei  $0.45 \text{ m/m}^2$ , wie der Vergleich zwischen Tabelle 4.3-2 und Tabelle 4.3-3 zeigt, zum einen wegen der linearen Kostenzuschläge und zum anderen wegen der etwas höheren linearen Wärmeverluste.



Quelle Erhebung CEPE

Abbildung 4.3-7 Investitionsmehrkosten von Kompaktfassaden (Aussenwärmedämmungen mit Steinwolle) gegenüber der Referenzdämmstärke von 12 cm für einen 4FH-Neubau bei gesamthaft längeren Fensteranschlüssen ( $0.7 \text{ m}^2/\text{m}^2$ ), Kosten inkl. Anschlüsse an Fenster ( $0.65 \text{ m}^2/\text{m}^2$ ) und Schrägdach. CHF/ $\text{m}^2$

Tabelle 4.3-3 Investitions- und Grenzkosten für Aussenwärmedämmungen bei Neubauten (Kompaktfassade mit Polystyrol) bei gesamthaft längeren Fensteranschlüssen ( $0.65 \text{ m}^2/\text{m}^2$ ). Kosten inkl. alle Anschlüsse an Fenster, Dach. CHF/ $\text{m}^2$

Dämmstärke cm	U-Wert $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	Nutzenergie- gewinn gegen- über Referenz $\text{kWh}/\text{m}^2_{\text{Wand a}}$	Investitionskosten		Grenzkosten der eingesparten Energie <sup>1)</sup> (Durchschnittskostenansatz)			
			Mittelwert $\text{Fr}/\text{m}^2_{\text{Wand}}$	Best Practice $\text{Fr}/\text{m}^2_{\text{Wand}}$	Mittelwert Unternehmen $\text{dr}=0.055$ CHF/ $\text{kWh}_{\text{NE}}$	Best Practice $\text{dr}=0.035$ CHF/ $\text{kWh}_{\text{NE}}$	Mittelwert Unternehmen $\text{dr}=0.055$ CHF/ $\text{kWh}_{\text{NE}}$	Best Practice $\text{dr}=0.035$ CHF/ $\text{kWh}_{\text{NE}}$
10	0.33	-3.3	128	123	0.10	0.07	0.07	0.05
12	0.30		133	126				
14	0.27	2.2	137	130	0.13	0.10	0.10	0.07
16	0.25	3.7	144	133	0.18	0.14	0.12	0.09
20	0.23	5.8	158	141	0.27	0.20	0.16	0.12
24	0.20	8.5	175	148	0.31	0.23	0.16	0.12
30	0.18	10.3	193	159	0.37	0.28	0.20	0.15

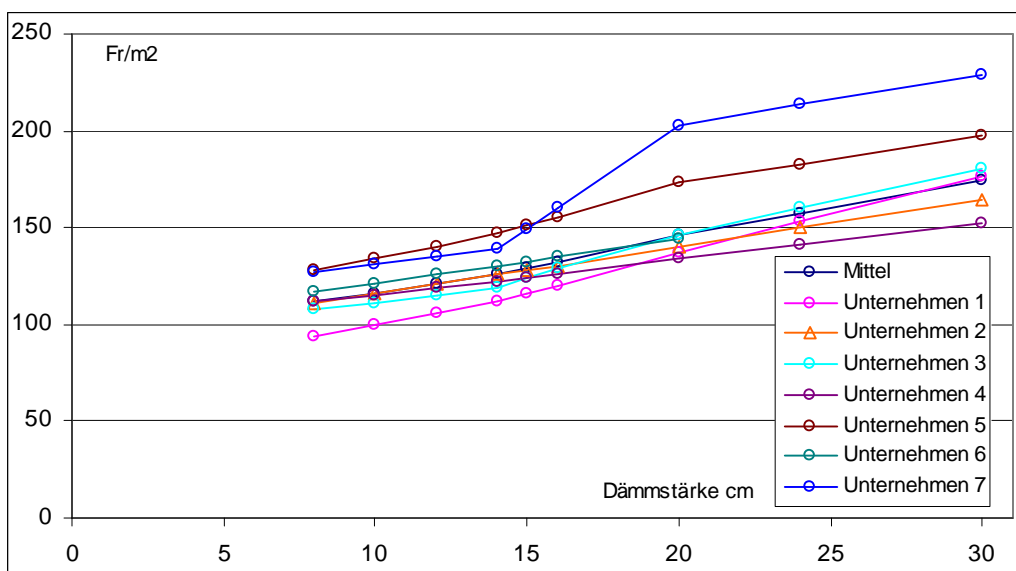
<sup>1)</sup> Annahmen für Kapitalkostenermittlung 40 Jahre Nutzungszeit, 3.5% bzw. 5.5 % Realverzinsung

Quelle Erhebungen und Berechnungen CEPE

#### d) Fassadenerneuerung im Gebäudebestand

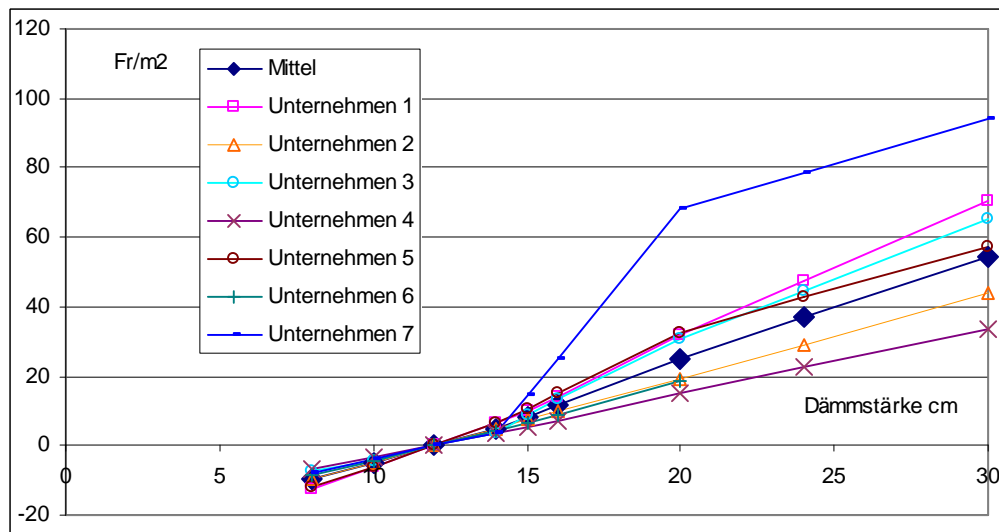
Das allgemeine Kostenniveau ist in der Erneuerung höher als im Neubau, zum einen wegen der Vorbereitungsarbeiten und zum anderen wegen der Notwendigkeit, die Dämmplatten zusätzlich zum Kleben zu dübeln. Diese Unterschiede sind jedoch gering. Beim Vergleich der Mehrkosten gegenüber der Referenzdämmstärke zwischen Neubau (Abbildung 4.3-2) und Erneuerung (Abbildung 4.3-9) fällt auf, dass der Anstieg ab rund 20 cm sogar etwas weniger stark ausfällt, u.a. deshalb, weil ab dieser Dämmstärke dann auch im Neubau zusätzlich mechanisch befestigt werden muss (dübeln), während bei der Erneuerung dies auch bei der Referenzdämmstärke erforderlich ist.

Im Fall des Gebäudebestandes sind die Investitionskosten nicht nur mit der Referenzdämmstärke zu vergleichen, sondern auch mit den Kosten des Referenzfalls „Instandsetzung“, welche eine Putzenerneuerung (falls nötig) und einen Neuanstrich umfasst (keine Wärmedämmung). Diese Kosten betragen inkl. Gerüst 30 CHF/m<sup>2</sup> bis 40 CHF/m<sup>2</sup>. Dabei ist anzumerken, dass die Sensitivität dieser Annahme auf die Grenzkosten klein ist, denn es wird die Differenz zu einem Kostenlevel gebildet, das 120 CHF/m<sup>2</sup> und höher liegt. Die rund 10 CHF/m<sup>2</sup> Unsicherheit beim Referenzfall wirken sich bei den Grenzkosten also nur zu ca. 10% aus.



Quelle Erhebung CEPE

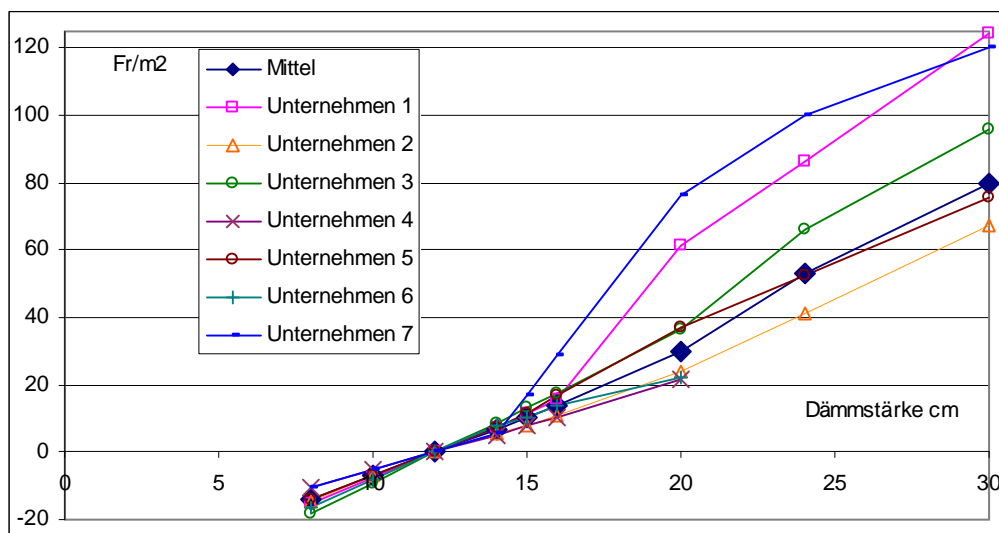
Abbildung 4.3-8 Investitionskosten von Kompaktfassaden (Aussenwärmedämmungen mit Polystyrol) für eine MFH-Erneuerung, Kosten inkl. Gerüst und inkl. Anschlüsse an Fenster (0.33m<sup>2</sup>) und Schrägdach. CHF/m<sup>2</sup>



Quelle Erhebung CEPE

Abbildung 4.3-9 Investitionsmehrkosten von Kompaktfassaden (Aussenwärmedämmungen mit Polystyrol) gegenüber der Referenzdämmstärke von 12 cm für eine MFH-Erneuerung, Kosten inkl. Anschlüsse an Fenster ( $0.33\text{m}^2$ ) und Schrägdach. CHF/m<sup>2</sup>

Nebst dem Dämmstoff Polystyrol wird die Kompaktfassade auch mit Mineralwolle (davon bis jetzt zum überwiegenden Teil Steinwolle) realisiert, siehe die Investitionskostenangaben der Unternehmen dazu in Abbildung 4.3-1.



Quelle Erhebung CEPE

Abbildung 4.3-10 Investitionsmehrkosten von Kompaktfassaden (Aussenwärmedämmungen mit Mineralwolle) gegenüber der Referenzdämmstärke 12cm für eine MFH-Erneuerung, Kosten inkl. Anschlüsse an Fenster ( $0.33\text{m}^2$ ) und Schrägdach. CHF/m<sup>2</sup>

Wie beim Neubau reagieren die Grenzkosten sensitiv auf die selben zwei Parameter: Realzinssatz (siehe Tabelle 4.3-4) und Kostenanstieg in Funktion der Dämmstärke. Werden wie im Neubaufall die Best-Practice statt der Durchschnittswerte der Unternehmen als Basis genommen, reduzieren sich die Grenzkosten gemäss Tabelle 4.3-3 um mehr als ein Drittel, denn der Kostenanstieg des Bestwertes ist um diesen Wert geringer, wie aus Abbildung 4.3-9 abgelesen werden kann.

Eine energetische Erneuerung kann auch anstelle einer Fassadeninstandsetzung mit nur Putz-ausbesserung oder Fassadenanstrich treten. In diesem Fall entfalten die ersten 10 cm Wärmedämmung eine sehr grosse energetische Wirkung, was sich in relativ tiefen Grenzkosten ausdrückt, siehe Tabelle 4.3-5.

Im Durchschnittskostenansatz steigen die spezifischen Energie-Effizienzkosten in Funktion weitergehender Dämmstärken kaum an, wenn die Kosten gegenüber der Referenz „Erneuerung ohne Wärmedämmung“, also gegenüber der Instandsetzung der Fassade gerechnet werden, siehe dazu die Tabelle 4.3-5. Der sehr viel flachere Anstieg der Durchschnittskosten ist ebenfalls auf den vergleichsweise sehr grossen Effizienzgewinn des ersten Schritts zurückzuführen. Dies aus arithmetischen Gründen, denn die dazukommenden Beiträge seitens der Kosten und des Effizienzgewinns vermögen den Durchschnittswert nicht mehr stark zu verändern.

Dies zeigt gleichzeitig die Sensitivität auf, welcher die Durchschnittskosten bzgl. der Annahme des Referenzfalles unterliegen. Gegenüber der Referenzdämmstärke von 12 cm betragen die Durchschnittskosten einer 20 cm Dämmung rund 16 Rp/kWh und gegenüber der Instandsetzung nur 7 Rp/kWh (Realzins 3.5%).

Tabelle 4.3-4 Investitions- und Grenzkosten gegenüber Referenzdämmstärke 12 cm für Aussenwärmedämmungen bei Erneuerungen (Kompaktfassade mit Polystyrol). Kosten inkl. Dämmung Fensterleibung 4 cm und Anschluss an Schrägdach. CHF/m<sup>2</sup>

Dämmstärke cm	Investitions- kosten CHF/m <sup>2</sup> Wand	Differenz		Grenzkosten der eingesparten Nutzenergie <sup>1)</sup> (Durchschnittskostenansatz)	
		Investitionskosten gegenüber Referenz CHF/m <sup>2</sup> Wand	Differenz Nutzenergie gegenüber Referenz kWh/m <sup>2</sup> Wand·a	dr=0.055 CHF/kWh <sub>NE</sub>	dr=0.035 CHF/kWh <sub>NE</sub>
10	116	5.0	3.3	0.10	0.07
12 (Ref)	121	0.0			
14	126	4.9	2.4	0.13	0.09
16	132	11	4.3	0.16	0.12
20	146	25	7.1	0.22	0.16
24	157	36	8.8	0.26	0.19
30	174	53	10.7	0.31	0.233

<sup>1)</sup> Annahmen für Kapitalkostenermittlung 40 Jahre Nutzungszeit, 3.5% bzw. 5.5 % Realverzinsung

Quelle Erhebungen und Berechnungen CEPE

Tabelle 4.3-5 Investitions- und Grenzkosten für Aussenwärmedämmungen bei Erneuerungen (Kompaktfassade mit Polystyrol). Referenz = Instandsetzung, Ausgangs-U-Wert<sub>Fläche</sub>=1.1 W/m<sup>2</sup>K. (Bauperiode bis ca. 1975). Kosten inkl. Dämmung Fensterleibung 4 cm und Anschluss an Schrägdach.

Dämmstärke cm	Investitions- kosten CHF/m <sup>2</sup> Wand	Differenz		Grenzkosten der eingesparten Nutzenergie 1) (Durchschnittskostenansatz)	
		Investitionskosten gegenüberReferenz CHF/m <sup>2</sup> Wand	Differenz Nutzenergie gegenüber Referenz kWh/m <sup>2</sup> Wand.a	dr=0.055 CHF/kWhNE	dr=0.035 CHF/kWhNE
0 (Ref)	30				
10	116	86	67	0.080	0.060
12	121	91	70	0.081	0.061
14	126	96	72	0.083	0.062
16	132	102	74	0.086	0.065
20	146	116	77	0.094	0.070
24	157	127	79	0.101	0.076
30	174	144	81	0.111	0.084

1) Annahmen für Kapitalkostenermittlung 40 Jahre Nutzungszeit, 3,5% bzw. 5,5% Realverzinsung

Quelle Erhebungen und Berechnungen CEPE

Die Grenzkosten (im Durchschnittskostenansatz) einer energetischen Erneuerung gegenüber einer Instandsetzung hängen auch vom energetischen Ausgangszustand der Fassade ab. Ist der energetische Ausgangszustand „schlechter“, der U-Wert der Flächenelemente also tiefer als für Tabelle 4.3-6 angenommen, wird der Effizienzgewinn grösser und ausserdem sinken die Grenzkosten.

Ist der Ausgangszustand hingegen besser (z.B. Flächen-U-Wert 0.6 W/m<sup>2</sup>K statt 1.1 W/m<sup>2</sup>K), z.B. bei Gebäuden der Bauperioden nach 1975, so wirkt sich das auf den Effizienzgewinn bei einer gleichen Dämmstärke (z.B. 10 cm) wie folgt aus:

- Muss die bestehende Wärmedämmung abgebrochen werden, so wird der Unterschied zwischen dem Zustand vor der Erneuerung (z.B. bestehende WD mit 4 cm) und nach der Erneuerung kleiner als beim schlechteren Ausgangszustand. Die Grenzkosten erhöhen sich dadurch, wie aus dem Vergleich von Tabelle 4.3-6 (Fall A) mit Tabelle 4.3-5 ersichtlich wird.
- Kann die bestehende Wärmedämmung mitgenutzt werden, z.B. in einem Zweischalenmauerwerk, ist der erwähnte Effekt nicht so stark und die Grenzkosten liegen entsprechend tiefer, wie der Vergleich von Fall B mit Fall A zeigt (Tabelle 4.3-6). Aber auch in diesem Fall liegen die Grenzkosten noch etwas höher als in Tabelle 4.3-5 mit dem schlechteren Ausgangswert.



Tabelle 4.3-6 Investitions- und Grenzkosten für Aussenwärmedämmungen bei Erneuerungen (Kompaktfassade mit Polystyrol). Referenz = Instandsetzung, Ausgangs-U-Wert<sub>Fläche</sub>=0.6 W/m<sup>2</sup>K (ca. Bauperiode 1975-1985). Kosten inkl. Dämmung Fensterleibung 4 cm und Anschluss an Schrägdach.

			A: Bestehende Dämmung wird abgebrochen				B: Bestehende Dämmung wird genutzt			
Dämmstärke cm	Investitionskosten CHF/m <sup>2</sup> <sub>Wand</sub>	Psi Leibung W/mK	U-Wert Fläche (ohne Leibung)	U-Wert Fläche inkl. Leibung	Grenzkosten der eingesparten Nutzenergie (Durchschnittskosten- ansatz)		U-Wert Fläche inkl. Leibung W/m <sup>2</sup> K	Grenzkosten der eingesparten Nutzenergie (Durchschnittskosten- ansatz)		
			W/m <sup>2</sup> K	W/m <sup>2</sup> K	dr=0.055 CHF/kWh <sub>NE</sub>	dr=0.035 CHF/kWh <sub>NE</sub>		dr=0.055 CHF/kWh <sub>NE</sub>	dr=0.035 CHF/kWh <sub>NE</sub>	
0 (Ref)	35	0.08	0.60	0.63						
10	116	0.1	0.29	0.33	0.18	0.13	0.63	0.15	0.11	
12	121	0.11	0.25	0.29	0.17	0.12	0.26	0.15	0.11	
14	126	0.12	0.22	0.26	0.17	0.12	0.24	0.15	0.11	
16	132	0.12	0.20	0.24	0.17	0.12	0.22	0.15	0.11	
20	146	0.13	0.16	0.21	0.18	0.13	0.21	0.17	0.12	
24	157	0.14	0.14	0.19	0.19	0.14	0.19	0.18	0.13	
30	174	0.15	0.11	0.17	0.21	0.15	0.17	0.20	0.15	

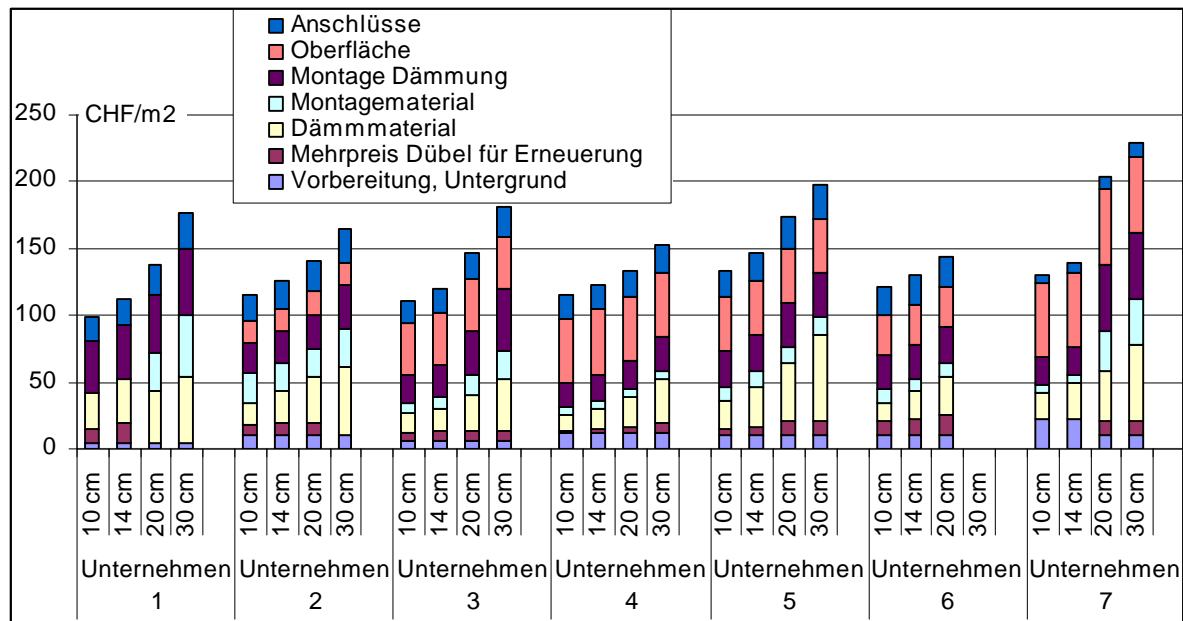
Quelle Erhebungen und Berechnungen CEPE

Bei einer noch besseren Ausgangslage, z.B. bei einem Flächen-U-Wert von 0.5 W/m<sup>2</sup>K, betragen die Grenzkosten von 10 cm gegenüber der Instandsetzung 0.14 CHF/kWh<sub>NE</sub> (dr=5.5%) bzw. 0.10 CHF/kWh<sub>NE</sub> (dr=3.5%), wenn die bestehende Wärmedämmung nicht abgebrochen werden muss. Muss sie abgebrochen werden, sind die Grenzkosten natürlich höher, denn dann dienen die ersten (z.B. 5) cm dazu, den Effekt der alten Wärmedämmung wiederherzustellen. Die Grenzkosten liegen dann bei 0.14 CHF/kWh<sub>NE</sub> (dr=5.5%) bzw. 0.10 CHF/kWh<sub>NE</sub> (dr=3.5%).

Auffallend ist auch hier, im Fall der Grenzkostenbetrachtung (Durchschnittskostenansatz) gegenüber der Instandsetzung bei besserer Ausgangslage, dass der Anstieg der Durchschnittskosten in Funktion zunehmender Dämmstärke sehr flach verläuft. Es ist sogar so, dass die spezifischen Kosten der Energieeffizienz bei 12 cm bis 16 cm leicht tiefer sind als bei 10 cm (wenn die bestehende Wärmedämmung abgebrochen werden muss).

#### e) **Kostenstruktur von Kompaktfassaden**

Die Kenntnis der Kostenstruktur ist hilfreich für das Verstehen des Anstiegs der Mehrkosten bei grösseren Dämmstärken sowie im Hinblick auf die Überlegungen zur Dynamisierung von Kosten und Technik, siehe Kapitel 4.5. Eine Zusammenstellung der Kostenstruktur ist in Abbildung 4.3-11 dargestellt



Quelle Erhebung CEPE

Abbildung 4.3-11 Kostenstruktur der Investitionskosten von MFH-Erneuerungen mittels Kompaktfassaden mit Polystyrol, Anschlüsse 0.33 m/m<sup>2</sup>. CHF/m<sup>2</sup>

Mehrkosten werden nicht nur vom zusätzlichen Dämmmaterial verursacht, sondern auch vom zusätzlichen Verlegeaufwand, d.h. wegen des höheren Arbeitseinsatzes aufgrund des aufwendigeren handlings. So sind zum Beispiel bei 10 cm Dämmstärke 6 Platten in einem Paket, während es bei 30 cm nur noch ein Drittel davon ist. Dieser Arbeitsmehraufwand nimmt mit einem Sprung zu, sobald zweilagig verarbeitet werden muss. Weitere Punkte mit Kostenanstieg bei zunehmender Dämmstärke: Konsolen für Gerüste, Montagematerial (längere Dübel). Auch die Kosten der Anschlüsse nehmen graduell mit der Dämmstärke zu.

#### 4.3.4 Hinterlüftete Fassaden

Die hinterlüftete Fassade besteht aus folgenden Elementen:

- Unterkonstruktion
- Dämmstoff
- Bekleidung durch vorgehängte Fassadenelemente.

Im Bereich der hinterlüfteten Fassaden ist die Konstruktionsvielfalt gross und die Preise der einzelnen Elemente können sich gegenseitig beeinflussen. Es ging also zunächst darum, allfällige Preisunterschiede zwischen diesen verschiedenen Konstruktions- und Bauweisen durch eine Erhebung aufzuzeigen, um zu entscheiden, in welcher Differenzierung die Preise dargestellt werden müssen und inwieweit sie zusammengefasst betrachtet werden können.

Folgende gegenseitige Beeinflussungen können auftreten, insbesondere hinsichtlich unterschiedlicher Dämmstärken: Die Bekleidung bestimmt die Preise der Unterkonstruktion über die Art (Gewicht, Material) und die Fläche der einzelnen Bekleidungs-elemente. Während der

Einfluss von Art und Fläche durchaus für den Wohnungsbau relevant ist, spielt das Gewicht im Wohnungsbau kaum eine Rolle, da kaum Schwerlastfassaden (z.B. Natur- oder Kunststeine) zur Anwendung kommen. Höchstens bei Zweischalenmauerwerken ist bei markanten Dämmstärken evtl. mit Zusatzkosten zu rechnen, wenn die Statik eine Abstützung der Last der Bekleidung auf die innere Schale erfordert und entsprechende Konsolen gesetzt werden müssen.

Die Preis- bzw. Kostenunterschiede sind nicht nur für die gesamtschweizerische Gewichtung der Grenzkosten wesentlich, sondern auch, weil es – aus konstruktiven, bautechnischen oder preislichen Gründen - in Abhängigkeit der Dämmstärke Verschiebungen geben kann, siehe Tabelle 4.3-7. So sind bei Wandstärken bis 16 cm die Holzunterkonstruktionen am häufigsten eingesetzt (ca. 40 %), während bei Dämmstärken über 20 cm die Metall- oder Holz-/Metallunterkonstruktionen dominieren (ca. 80 %).

Tabelle 4.3-7 Häufigkeit der Unterkonstruktionstypen (UK-Typ) in Abhängigkeit der Dämmstärke, in %.

Befragtes Unternehmen	Dämmstärke	Unterkonstruktionstyp				Total
		Holz	Holz-Metall	Metall	Andere	
Unternehmen HF3 (Marktschätzung in % der m <sup>2</sup> Fassadenfläche)	Bis 16 cm	40	35	20	5	100
	16 cm bis 20 cm	5	45	45	5	100
	20 cm bis 30 cm	5	10	80	5	100
Unternehmen HF7	Bis 16 cm	50	35	15	-	100
	16 cm bis 20 cm	-	70	30	-	100
	20 cm bis 30 cm	-	90	10	-	100
Unternehmen HF11 (Spezielles UK-Unternehmen)	Bis 16 cm	25	30	40	5	100
	16 cm bis 20 cm	15	35	45	5	100
	20 cm bis 30 cm	5	30	60	5	100

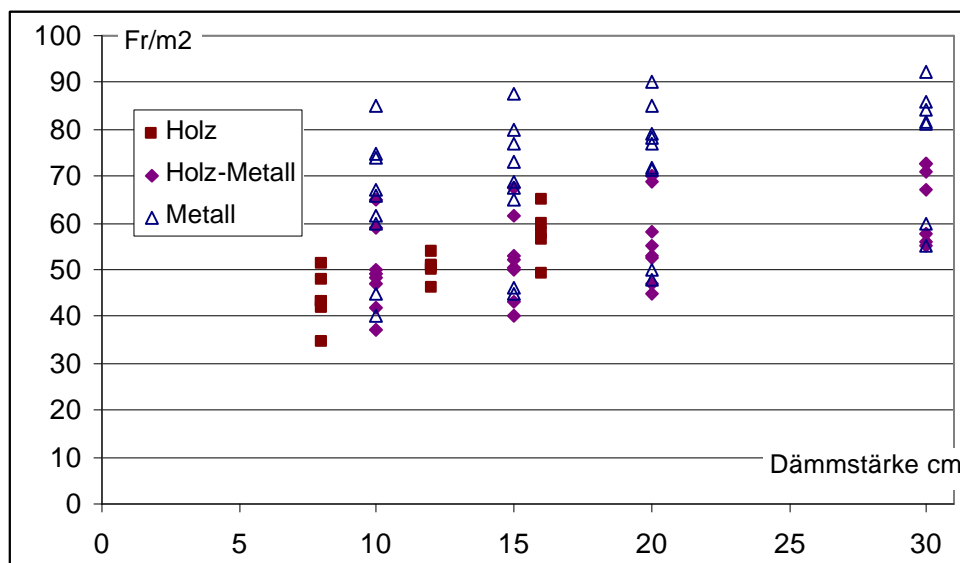
Quelle CEPE-Umfrage bei SFHF und weiteren Unternehmen.

#### a) Unterkonstruktion (UK)

Die Unternehmen differenzieren teilweise die Preise für Unterkonstruktionen für verschiedene Bekleidungselemente. Diese Preisunterschiede sind allerdings gering und verändern sich mit etwa 15CHF/m<sup>2</sup> zwischen 8 cm und 30 cm Dämmstärke (vgl. Abbildung 4.3-12). Die Unterschiede innerhalb eines Unternehmens betragen für Holz-UK und Holz-Metall-UK 2 CHF/m<sup>2</sup> bis 7 CHF/m<sup>2</sup> und sind von einer Ausnahme abgesehen konstant für alle Dämmstärken. Die UK sind (mit einer Ausnahme) für grossflächige Elemente leicht kostengünstiger und noch etwas kostengünstiger für Verputzelemente. Für reine Metall-UK differenzieren die Unternehmen etwas stärker zwischen den verschiedenen Bekleidungselementtypen (2 CHF/m<sup>2</sup> bis 7 CHF/m<sup>2</sup>) und die Unterschiede nehmen auch etwas stärker zu bei zunehmenden Dämmstärken.

Bedeutender sind die Preisunterschiede zwischen den verschiedenen UK-Typen, sowohl was das absolute Niveau wie die Preissteigerung bei zunehmenden Dämmstärken betrifft (siehe Abbildung 4.3-12). Diese unterschiedliche Preissteigerung motiviert auch den oben be-

schriebenen Wechsel der verwendeten UK bei unterschiedlichen Dämmstärken (vgl. Tabelle 4-3-7).



Quelle CEPE-Umfrage bei SFHF- und weiteren Unternehmen.

Abbildung 4.3-12 Preise für Unterkonstruktionen für hinterlüftete Fassaden

Als Besonderheiten zu vermerken sind Zweischalenmauerwerke und Hochhäuser. Die äussere Schale eines bestehenden Zweischalenmauerwerkes ist zum Teil (ca. 50% der Fälle) nicht in der Lage, die statische (horizontale) Last einer nachträglichen angebrachten hinterlüfteten Fassade aufzunehmen. In diesen Fällen muss diese mit einer zusätzlichen Konsole auf die innere Schale übertragen werden, was mit entsprechenden Mehrkosten von ca. 5 bis 30 CHF/m<sup>2</sup> verbunden ist (vgl. Tabelle 4.3-8). Bei Hochhäusern ab ca. 8 Stockwerken (22 m) erlauben die feuerpolizeilichen Vorschriften keine Holz- oder Holz-Metallkonstruktionen mehr.

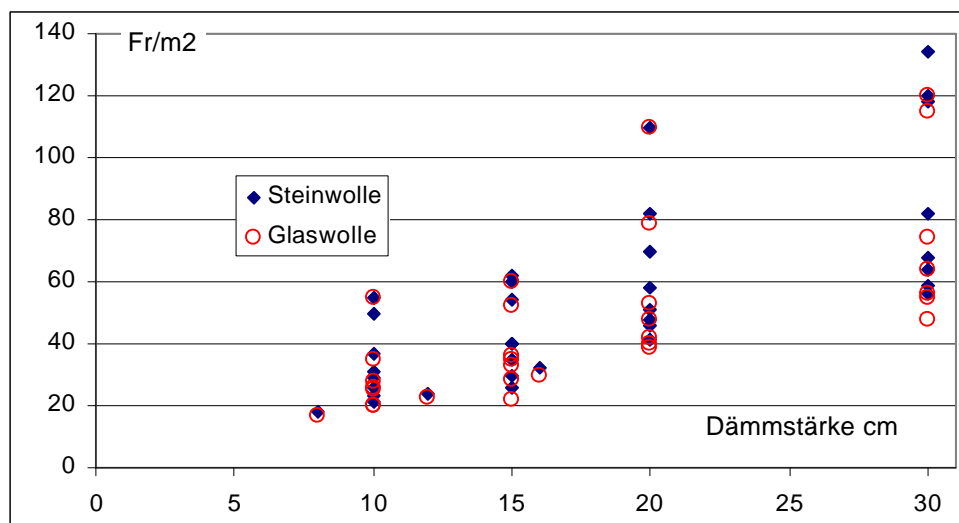
Tabelle 4.3-8: Zuschläge für hinterlüftete Fassaden bei energetischen Erneuerungen von Zweischalenmauerwerken und Hochhäusern, CHF/m<sup>2</sup>

	Dämmstärke in cm	Zweischalenmauerwerke	Hochhäuser
Unternehmen HF 3	generell	30	k.A.
Unternehmen HF 6	10	4 - 6	10 - 12
	15	6 - 10	14 - 16
	20	10 - 15	18 - 20
	30	15 - 20	26
Unternehmen HF 7	10	8 - 15	15
	15	10 - 15	15
	20	12 - 15	15
	30	15	15

Quelle CEPE-Umfrage bei SFHF- und weiteren Unternehmen

## b) Dämmstoff und Montage

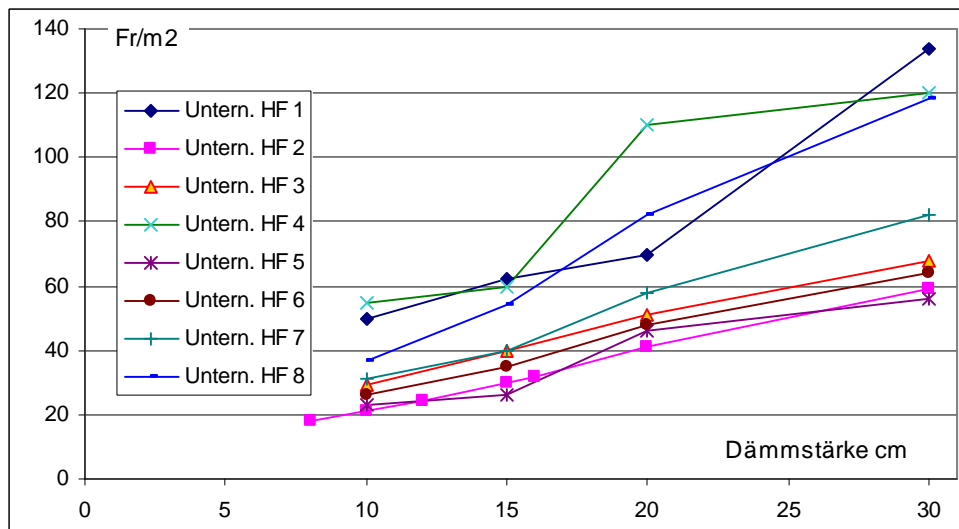
Die Gesamtkosten der Aussenwärmedämmung steigen wegen des zusätzlich benötigten Materials und wegen der steigenden Arbeitskosten als Funktion der Dämmstärke an. Zunehmende Dämmstärken bedeuten aufwendigeres Handling bei der Verarbeitung/Montage. Während bei 12 cm 5 Platten in einem Paket gebündelt zur Verarbeitungsstelle an der Fassade gebracht werden können, sind es bei 20 cm nur noch drei Platten und bei 30 cm nur noch zwei Platten. Ab 18 cm bis 22 cm, manchmal schon bei tieferen Dämmstärken, wird die Wärmedämmung ausserdem meistens zweilagig verarbeitet, was mit einem weiteren Anstieg der Arbeitskosten verbunden ist.



Quelle CEPE-Erhebung bei SFHF- und weiteren Unternehmen

Abbildung 4.3-13: Hinterlüftete Fassaden: Preise von Dämmstoff inkl. Montage in Abhängigkeit der Dämmstärke für Stein- und Glaswolle

Die beiden Dämmstoffe, die hauptsächlich im Bereich der hinterlüfteten Fassaden zur Anwendung kommen, sind Steinwolle und Glaswolle. Die beiden liegen vielleicht 10-15% auseinander, wie Abbildung 4.3-13 zeigt. Die Wahl des Dämmstoffs hängt nebst des Preises oder der technischen Eigenschaften auch von den traditionellen Handelsbeziehungen und Vorlieben der installierenden Unternehmen ab. Der Unterschied der angegebenen Preise je m<sup>2</sup> hinterlüftete Fassade sind auch unter Berücksichtigung der Art des Dämmmaterials mit 15 CHF/m<sup>2</sup> bei 10 cm Dämmstärke und gut 60 CHF/m<sup>2</sup> bei 30 cm Dämmstärke sehr unterschiedlich, d.h.  $\pm 20$  bis 30% Preisvariation vom Durchschnittspreis. Diese Unterschiede deuten sowohl auf einen relativ intransparenten Markt als auch auf regionale Preisunterschiede hin. Bei den hohen Dämmstärken (>20 cm) handelt es sich möglicherweise auch um Preise für Pioniermärkte oder "Angstzuschläge" seitens der Verarbeiter.



Quelle CEPE-Erhebung bei SFHF- und weiteren Unternehmen

Abbildung 4.3-14 Hinterlüftete Fassaden: Flächenpreise (ohne Anschlüsse) von Dämmstoff inkl. Montage in Abhängigkeit der Dämmstärke für verschieden Unternehmen

**c) Fassadenbekleidung**

Die wesentlichen Bekleidungsmaterialien im Wohnungsbau (Neubau und Erneuerung) sowie ihre Kosten sind in Tabelle 4.3-9 zusammengestellt.

Am preisgünstigsten erweist sich mit 80 CHF/m<sup>2</sup> die kleinformatische Faserzementfassade sowie bei einigen Unternehmen die Aluminiumelemente, teilweise auch die Keramik- und die Putzelemente. Die drei letztgenannten variieren im Vergleich zu den Faserzementfassaden ganz erheblich. Keramikbekleidungen variieren von 45 CHF/m<sup>2</sup> bis 240 CHF/m<sup>2</sup>, Verputzelemente und Metall-Bekleidungen von 80 CHF/m<sup>2</sup> bis 140 CHF/m<sup>2</sup>, was nicht zuletzt auf bestimmte Oberflächeneffekte und Gestaltungen zurückzuführen sein dürfte, die auf der teuren Seite nicht für Wohngebäude, sondern für Geschäftshäuser gültig sein dürften.

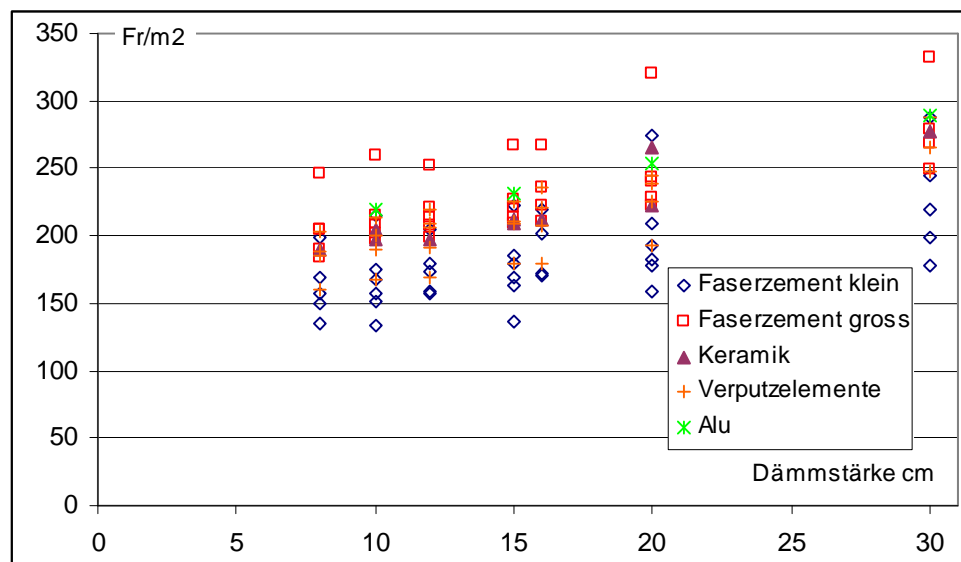
Tabelle 4.3-9 Preise von Bekleidungen von hinterlüfteten Fassaden, angegeben als reine Flächenpreise. CHF/m<sup>2</sup>

	Faserzement klein	Faserzement gross	Keramik	Verputzelemente	Alu
Unternehmen HF 1			45 - 240		
Unternehmen HF 2	90	130	130	100	
Unternehmen HF 3	90	140	110	140	80
Unternehmen HF 4	95	140	85	80	110
Unternehmen HF 5	70	130	140	140	80
Unternehmen HF 6	75	130	130	130	
Unternehmen HF 7	95	130	165		140
Unternehmen HF 8				117	

Quelle CEPE-Umfrage bei SFHF-Mitgliedfirmen.

#### d) Gesamte Flächenpreise

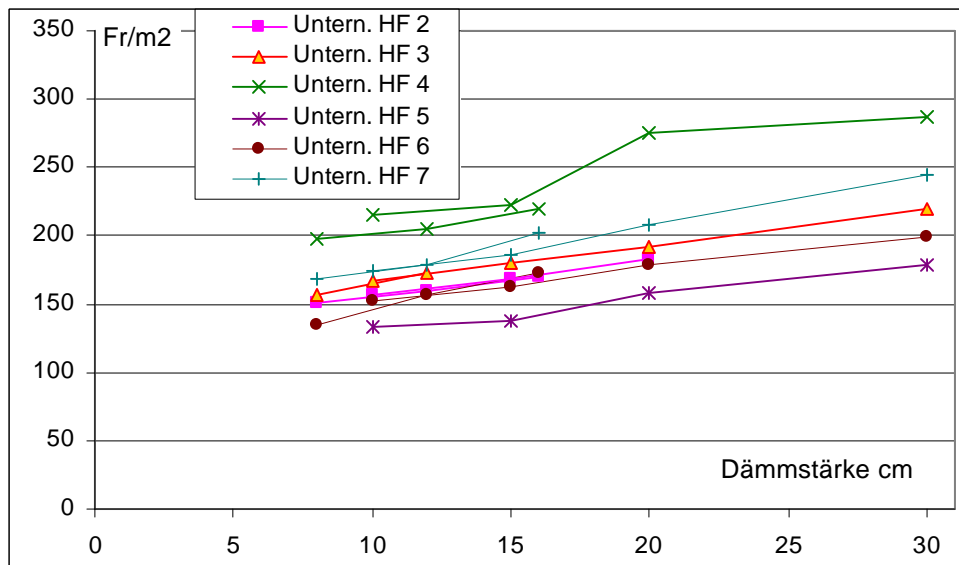
Die obigen Kostenelemente (Dämmstoff inkl. Montage, Unterkonstruktion, Fassadenbekleidung) zusammengefasst, ergeben Flächenpreise gemäss Abbildung 4.3-15, in der alle Bekleidungsmaterialien dargestellt sind.



Quelle CEPE-Umfrage bei SFHF- und anderen Unternehmen.

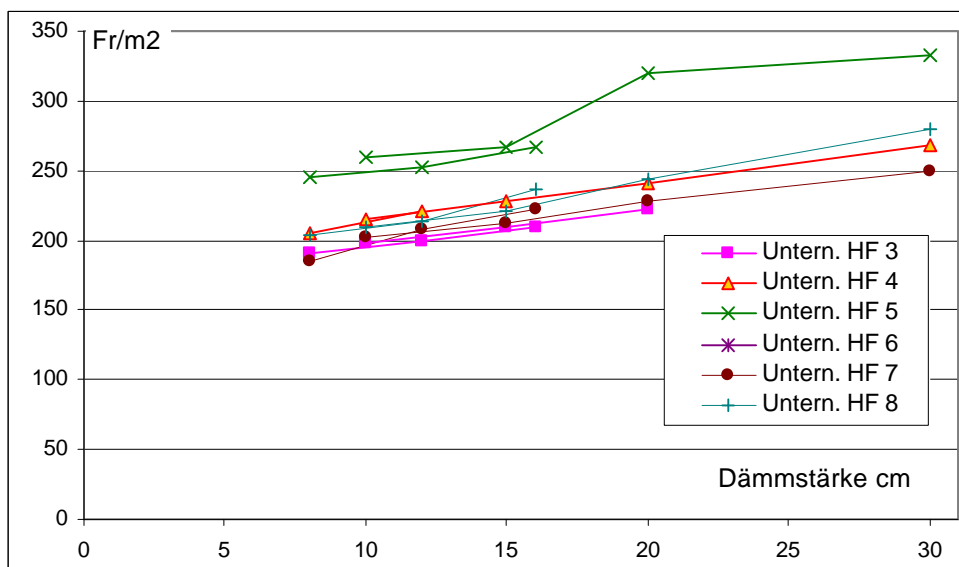
Abbildung 4.3-15 Gesamte Flächenpreise (ohne Anschlüsse) für die häufigsten Typen der hinterlüfteten Fassaden. Dämmstärken 8 cm, 12 cm, 16 cm: Holz-UK.  
Dämmstärken 10 cm, 15 cm, 20 cm, 30 cm: Holz-Metall-UK.

Auf Niveau der gesamten Flächenpreise sind die verschiedenen Fassadenbekleidungen ablesbar, dies trotz der festgestellten Streuungen bei den einzelnen Kostenelementen, welche die systematischen Unterschiede nicht vollständig überlagern. Zum Teil hat sich die Streuung der einzelnen Elemente jedoch wieder kompensiert. Trotz der Gesamtstreuung ist ein Trend in Funktion der Dämmstärke ablesbar.



Quelle CEPE-Umfrage bei SFHF- und anderen Unternehmen, Holz- und Holz-Metall-UK

Abbildung 4.3-16 Gesamte Flächenpreise (ohne Anschlüsse) von kleinformatigen Faserzementfassaden. Dämmstärken 8 cm, 12 cm, 16 cm: Holz-UK. Dämmstärken 10 cm, 15 cm, 20 cm, 30 cm: Holz-Metall-UK.



Quelle CEPE-Umfrage bei SFHF- und anderen Unternehmen, Holz- und Holz-Metall-UK

Abbildung 4.3-17 Gesamte Flächenpreise (ohne Anschlüsse) von grossformatigen Faserzementfassaden. Dämmstärken 8 cm, 12 cm, 16 cm: Holz-UK. Dämmstärken 10 cm, 15 cm, 20 cm, 30 cm: Holz-Metall-UK.

### e) Längenbasierte Preise

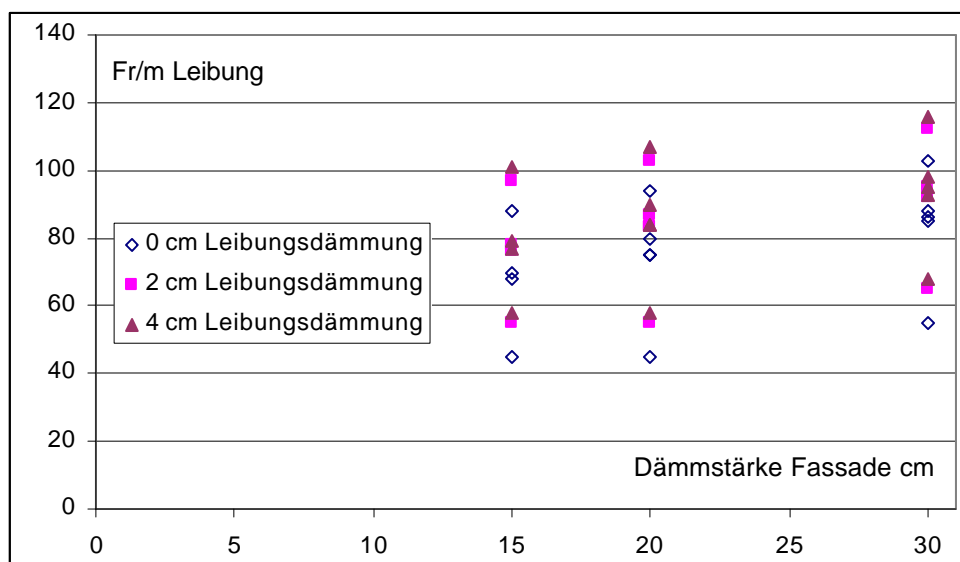
Längenbasierte Preiselemente können die gesamten Investitionskosten auch etwas beeinflussen und sind zu verzeichnen für zusätzliche Kanten und Ecken von architektonischen



Formen wie z.B. Balkonnischen, Anschlüsse an Fenster bzw. Dämmung von Fensterleibungen und –stürzen, Anschlüsse an fremde Bauteile, insbesondere Steil- und Flachdach, aber auch Balkone und Dämmung des Sockels.

Im Fall der hinterlüfteten Fassaden sind z.B. die Leibungsanschlüsse zum einen von der Dämmstärke der Leibung abhängig, und zum andern auch von der Dämmstärke der Fassade und gleichzeitig vom Bekleidungsmaterial. Letzteres ist durch den Materialmehrverbrauch begründet (je höher die Dämmstärke in der Fläche, desto mehr Bekleidungsmaterial wird bei der Leibung benötigt). Dies gilt auch wenn die Dämmstärke der Leibung 0 cm ist, denn der Anschluss muss trotzdem ausgeführt werden.

Die Preise der Leibungsdämmung werden pro laufenden Meter angegeben und beginnen ab einer Dämmstärke von 15 cm bis 20 cm in Funktion der Dämmstärke anzusteigen (vgl. Abbildung 4.3-18). Die Preise der Leibungsanschlüsse unterscheiden sich laut Firmenangaben entweder nicht zwischen klein- und grossformatigem Faserzement oder in umgekehrtem Sinn verglichen mit den Flächenpreisen: die Anschlüsse sind bei grossformatigen Elementen etwas kostengünstiger als bei kleinformatigen. Andere Materialien sind manchmal kostengünstiger, manchmal höher (Verputz-Elemente), oder sie liegen preislich generell höher (Keramik/Feinsteinzeug).



Quelle CEPE-Umfrage bei SFHF- und weiteren Unternehmen.

Abbildung 4.3-18 Längenbasierte Preise von Leibungsdämmungen in Abhängigkeit der Dämmstärke der hinterlüfteten Fassade am Beispiel der kleinformatigen Faserzementelemente

Zum Einfluss dieser Preise der Leibungsanschlüsse auf die Kosten der gesamten Aussenwärmedämmung mittels hinterlüfteter Fassaden sind folgende Überlegungen zu machen: Das Verhältnis Leibungslänge zu Fassadenfläche wird durch das Verhältnis Fensterfläche zu Fassadenfläche (nicht linear) bestimmt und liegt typischerweise bei 0.2 m Leibungslänge pro  $m^2$  Fassadenfläche bis 0.6  $m/m^2$ , (vgl. Kapitel 2 bzw. 3). Bei einem mittleren Leibungspreis von 80 CHF/m bei 15 cm Fassadendämmstärke bis 95 CHF/m bei 30 cm Fassadendämmstärke ergeben sich umgerechnet auf den Flächenpreis Zuschläge von knapp 20 CHF/ $m^2$  bei geringen Fensterflächenanteilen bis zu 50 CHF/ $m^2$  bei hohen Fensterflächenanteilen (vgl. Tabelle 4.3-10).

Tabelle 4.3-10 Auf die Fläche umgerechnete Preise der Leibungsdämmung, CHF/m<sup>2</sup>

Fensterfläche/Fassadenfläche* m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	Leibungslänge/Fassadenfläche* m/m <sup>2</sup>	Dämmstärke		
		15 cm	20 cm	30 cm
		Typischer Leibungspreis		
		80 Fr/m	85 Fr/m	95 Fr/m
0.06	0.2	16	17	19
0.12	0.4	32	34	38
0.24	0.6	48	51	57

\* Gesamte Fläche (Aussenwärmedämmung inkl. Fensterfläche)

Quelle Berechnungen CEPE

### f) Kostenstruktur und gesamte Preise inkl. Anschlüsse

Nach der getrennten Erfassung der Kostenelemente für wärmedämmte vorgehängte Fassaden werden nunmehr für einige häufig verarbeitete Kombinationen der Gesamtpreis als Funktion von der Dämmstärke dargestellt.

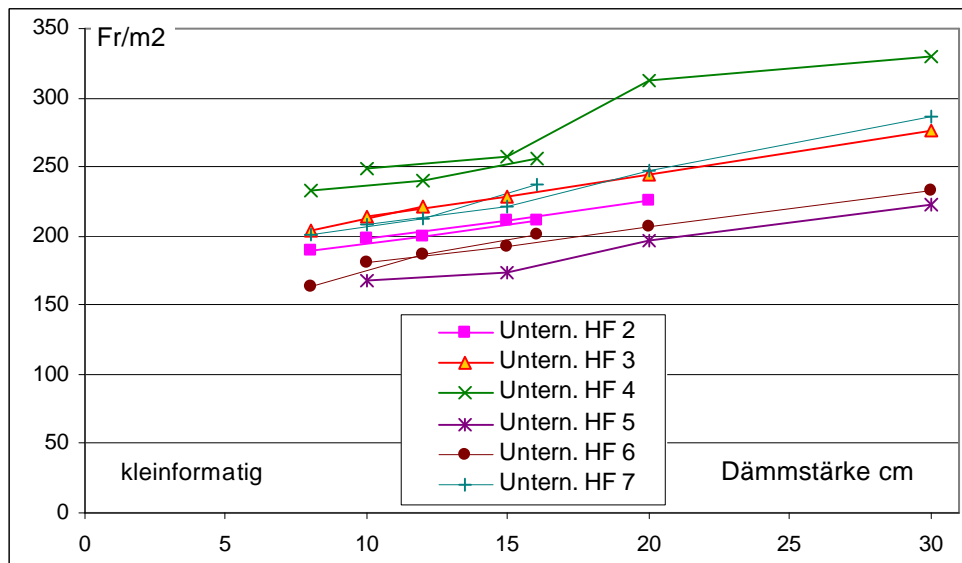
Tabelle 4.3-11 Kostenstruktur der hinterlüfteten Fassaden am Beispiel der kleinformatischen Faserzementfassade bei 0.45 m/m<sup>2</sup>, CHF/m<sup>2</sup>

Dämmstärke	12 cm	20 cm	30 cm
Gerüst, Vorbereitung	20	23	27
Dämmmaterial	23	39	55
Montage Dämmmaterial	15	25	33
UK	52	58	67
Fensterleibungen	37	40	44
Bekleidung (Fläche)	53	53	53
Bekleidung, Montage	34	34	34
Total	234	272	313

Quelle Berechnungen CEPE

Aus diesen Ergebnissen zu den totalen Preisen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

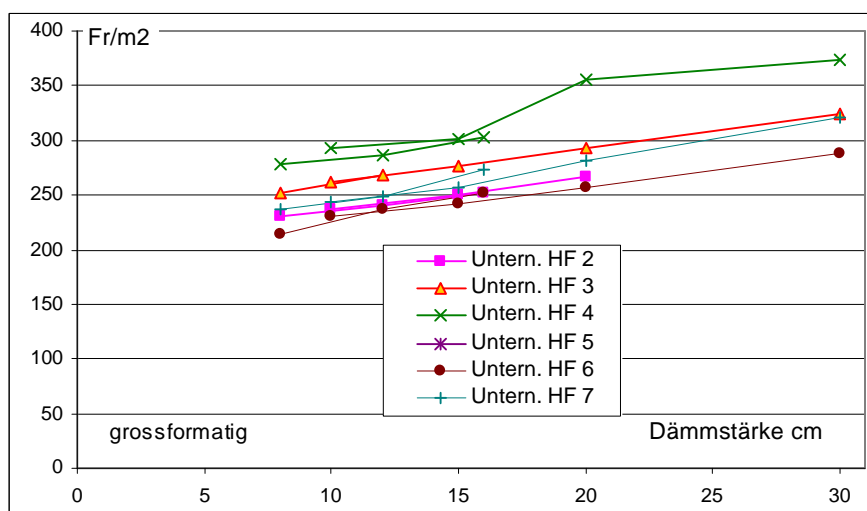
Für kleinformatische Faserzementfassaden sind die Preise mit 160 bis 200 CHF/m<sup>2</sup> bei 10 cm Dämmstärke und gut 220 bis 280 CHF/m<sup>2</sup> bei 30 cm am günstigsten (vgl. Abbildung 4.3-19).



Quelle CEPE-Umfrage bei SFHF- und weiteren Unternehmen

Abbildung 4.3-19 Gesamte Investitionskosten von hinterlüfteten Fassaden mit kleinformatigen Elementen, inkl. Anschlüsse 0.45m/m²

Die Kosten der grossformatigen Faserzementfassaden sind durchgehend über die Dämmstärken um ca. 60 CHF/m² höher als jene für die kleinformatigen Fassadenelemente (vgl. Abbildung 4.3-20).

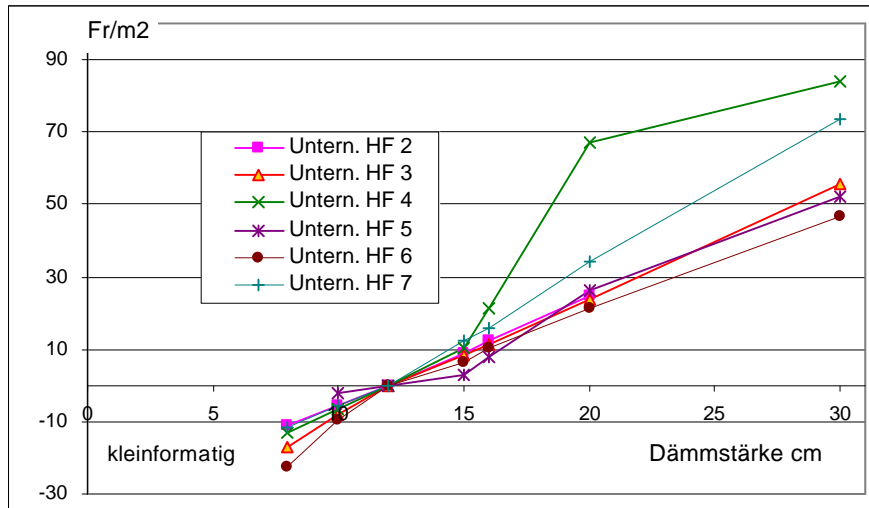


Quelle CEPE-Umfrage bei SFHF- und weiteren Unternehmen

Abbildung 4.3-20 Gesamte Investitionskosten von hinterlüfteten Fassaden mit grossformatigen Elementen, inkl. Anschlüsse 0.45m/m²

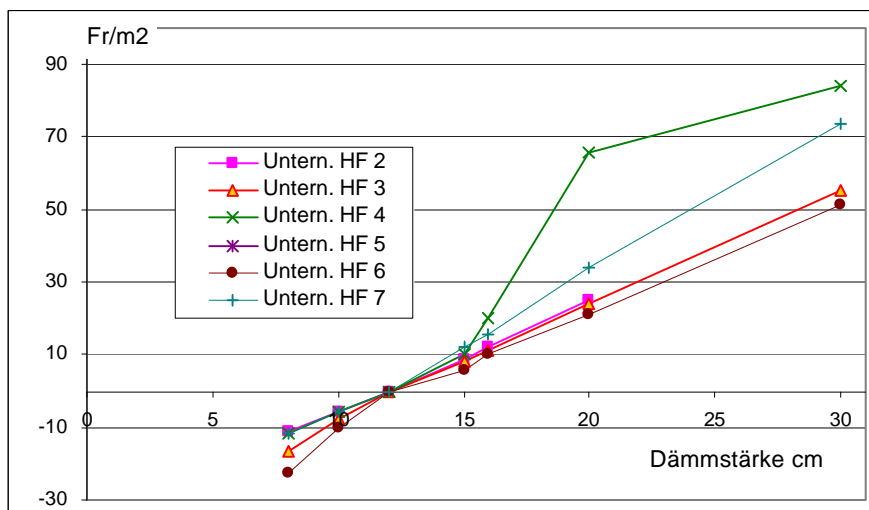
Die kleinformatigen Faserzementelemente sind als kostengünstigste Variante der hinterlüfteten Fassaden um etwa 40 bis 90 CHF/m² teurer als die Kompaktfassade. Der Kostenunterschied bleibt über den gesamten Dämmstärkenbereich beinahe konstant, nimmt aber bei

hohen Dämmstärken tendenziell eher ab. Die Mehrkosten gegenüber der Referenzdämmstärke liegen also eher etwas unter denjenigen der Kompaktfassade, wie die Gegenüberstellung von Abbildung 4.3-21 mit Abbildung 4.3-2 (S. 103) aufzeigt. Dasselbe gilt für die grossformatige Faserzementfassade (Abbildung 4.3-22) sowie die Keramikfassade (Abbildung 4.3-23) und für die hier nicht abgebildeten Fassaden mit hinterlüfteten Verputzelementen.



Quelle CEPE-Umfrage bei SFHF- und weiteren Unternehmen

Abbildung 4.3-21 Mehrinvestitionskosten der kleinformatischen Faserzementfassade gegenüber der Referenzdämmstärke 12 cm



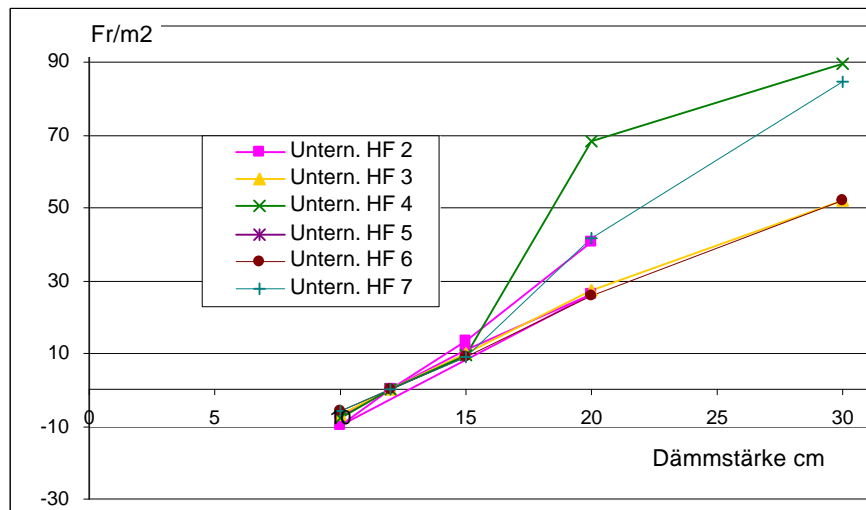
Quelle CEPE-Umfrage bei SFHF- und weiteren Unternehmen

Abbildung 4.3-22 Mehrinvestitionskosten der grossformatigen Faserzementfassade gegenüber der Referenzdämmstärke 12 cm

In einzelnen Bereichen können die Angaben der Firmen beträchtlich abweichen. Diese Abweichungen in den einzelnen Preiselementen heben sich aber teilweise wieder gegenseitig

auf, weil der Ursprung dieser Unterschiede (auch) in den unterschiedlichen Kalkulationsmodellen liegt, welche die Unternehmen anwenden (stärkere oder weniger starke Differenzierung in längen- und flächenbasierte Elemente).

In den Mehr(investitions-)kosten unterscheiden sich die grossformatigen Faserzementfassaden kaum von den kleinformatischen. Auch die Keramikfassaden sind bzgl. der Mehrinvestitionskosten gegenüber der Referenzdämmstärke vergleichbar mit den Faserzementfassaden. Die Mehrkosten liegen gar noch etwas tiefer, was damit zu tun hat, dass die Kosten der Metall-UK in der Referenz zwar höher liegen, aber in Funktion der Dämmstärke nicht so stark zunehmen.



Quelle CEPE-Umfrage bei SFHF- und weiteren Unternehmen

Abbildung 4.3-23 Mehrinvestitionskosten der Keramikfassade gegenüber der Referenzdämmstärke 12 cm

### g) Vergleich der hinterlüfteten Fassade mit der Kompaktfassade und Grenzkostenberechnung

Als Fazit lässt sich ziehen, dass die Investitionskosten der hinterlüfteten Fassaden zwar ein höheres Niveau aufweisen, dass die Mehrkosten in Funktion zunehmender Dämmstärken aber eher weniger stark ansteigen als bei den Kompaktfassaden. Die Grenzkosten gegenüber einer Referenzdämmstärke von 10 cm bis 12 cm sind demzufolge bei hinterlüfteten Fassaden in der gleichen Grössenordnung wie bei der Kompaktfassade (solange Unterkonstruktionen mit geringen Wärmebrücken zur Anwendung kommen, also z.B. Holz oder Holz-Metall).

Für folgende Fälle sind die Grenzkosten des energie-effizienten Bauens bzw. Erneuerns mittels hinterlüfteter Fassade mit derjenigen der Kompaktfassade vergleichbar, wenn im Referenzfall je der entsprechende Fassadentyp zugrunde gelegt wird, d.h. wenn die Mehrkosten der Kompaktfassade mit der Referenzkompaktfassade und die Mehrkosten der hinterlüfteten Fassaden mit der hinterlüfteten Referenzfassade verglichen werden:

- Neubau
- Referenzfall: energetische Erneuerung mit Referenzdämmstärke

Dies unter der Annahme, dass die Unterhaltskosten in diesen Fällen für die beiden Fassadentypen je unabhängig von der Dämmstärke sind und sich bei der Grenzkostenbetrachtung herauskürzen. Diese Annahme ist nicht zutreffend wenn die Unterhaltskosten in Funktion der Dämmstärke bei der Kompaktfassade zunehmen (z.B. stärkere Veralgung bei hohen Dämmstärken) und bei der hinterlüfteten Fassade nicht.

Gegenüber der Referenz „Instandsetzung“ sind die Grenzkosten der hinterlüfteten Fassaden leicht höher als bei den Kompaktfassaden, denn in diesem Fall sind die Mehrkosten aufgrund des höheren Kostenniveaus höher, da sie mit der gleichen Referenz, nämlich der Instandsetzung verglichen werden (ca. 30 bis 40 CHF/m<sup>2</sup>). Für den abschliessenden Vergleich sind für die Berechnung der Grenzkosten (Durchschnittskostenansatz) nebst den Kapitalkosten die Unterhaltskosten miteinzubeziehen (Tabelle 4.3-12). Der vermiedene Unterhalt der hinterlüfteten Fassade wird erst in 25 Jahren das erste Mal als kostenwirksamer Unterschied relevant und ist deshalb auf den heutigen Zeitwert abzudiskontieren. Bei einer langfristigen Realverzinsung von 3% beträgt der Wert 16 CHF/m<sup>2</sup>.

Tabelle 4.3-12 Unterhaltskosten (CHF/m<sup>2</sup>) bei Fassadeninstandsetzungen bzw. -erneuerungen

Referenzfall	Energetische Erneuerung	
	Kompaktfassade	Hinterlüftete Fassade
Putzausbesserung und Fassadenanstrich		
Jetzt + 35 Fr/m <sup>2</sup> alle 25 Jahre	35 Fr/m <sup>2</sup> alle 25 Jahre, das erste Mal in 25 Jahren	0 CHF/m <sup>2</sup>

Auch bei der hinterlüfteten Fassade steigen die Durchschnittskosten in Funktion grösserer Dämmstärken nur moderat an, wie Tabelle 4.3-13 zeigt.

Tabelle 4.3-13 Investitions- und Grenzkosten für hinterlüftete Fassaden bei Erneuerungen. Referenz = Instandsetzung, Ausgangs-U-Wert<sub>Fläche</sub>=1.1 W/m<sup>2</sup>K. (Bauperiode bis ca. 1975). Kosten inkl. Dämmung Fensterleibung 4 cm und Anschlüsse.

Dämmstärke cm	Investitions- kosten CHF/m <sup>2</sup> <sub>Wand</sub>	Differenz Investitionskosten gegenüber Referenz		Grenzkosten der eingesparten Nutzenergie <sup>a</sup> (Durchschnittskostenansatz)	
		CHF/m <sup>2</sup> <sub>Wand</sub>	Differenz Nutzenergie gegenüber Referenz kWh/m <sup>2</sup> <sub>Wand</sub> ·a	dr=0.055 CHF/kWh <sub>NE</sub>	dr=0.035 CHF/kWh <sub>NE</sub>
0 (Ref)	51*				
10	195	144	69	0.12	0.08
12	200	149	72	0.11	0.08
14	205	154	75	0.11	0.08
16	211	160	77	0.12	0.08
20	226	175	80	0.12	0.09
24	243	192	82	0.13	0.09
30	283	231	84	0.16	0.11

<sup>a</sup>) Annahmen für Kapitalkostenermittlung 50 Jahre Nutzungszeit, 3.5% bzw. 5.5% Realverzinsung  
\* inkl. Unterschied beim Unterhalt.

Quelle Erhebungen und Berechnungen CEPE

#### 4.3.5 Holzsystembau (Neubau)

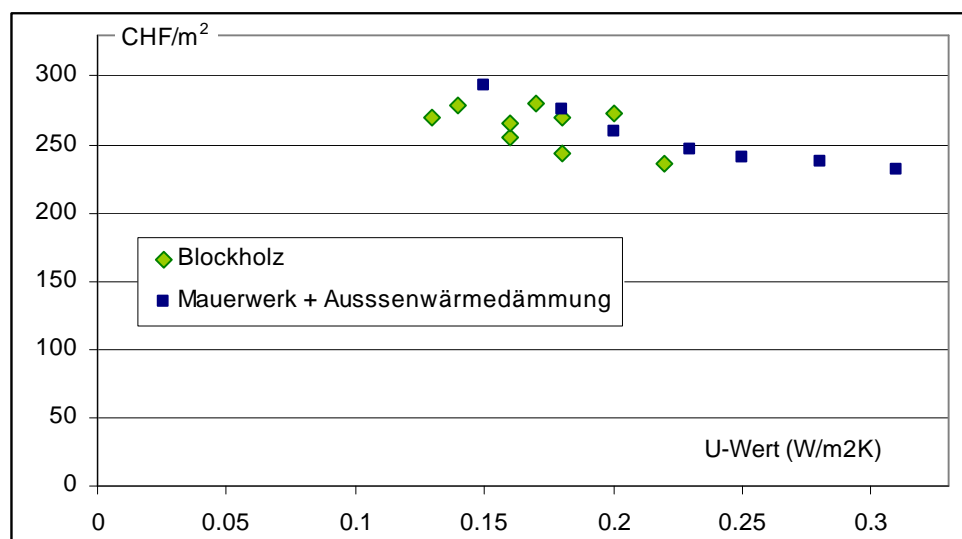
Im Neubau ist der Holzsystembau eine interessante Variante, sowohl kosten- als auch energieeffizient zu bauen. Der Holzsystembau weist gegenüber dem Mauerwerk folgende Vorteile auf:

- Geringe Gesamtstärke, vor allem auch bei guter Wärmedämmung, da die Funktion der Statik und der Wärmedämmung vom selben Bauelement übernommen werden kann.
- Kurze Bauzeiten (auf der Baustelle)
- Potential zum industriellen Bauen, mit den Vorteilen der tiefen Kosten und der gut möglichen Qualitätskontrolle, z.B. was die Luftdichtheit betrifft
- Rationalisierungspotential zwischen Planung und Fertigung (Daten vom planenden direkt zum fertigenden Unternehmen)
- Je nach Ausführung vorteilhafte bauphysikalische Eigenschaften (Feuchtigkeitshaushalt)

In der Abbildung 4.3-24 sind beispielhaft die Kosten von Aussenwänden von verschiedenen Typen der sogenannten Blockholzbauweise dargestellt. Im Vergleich zu einer weit verbreiteten konventionellen Bauweise (Mauerwerk 120 CHF/m<sup>2</sup> plus Aussenwärmedämmung gemäss Tabelle 4.3-2) fällt auf, dass

- die Blockholz-Aussenwand im Standard geringere U-Werte aufweist (0.22 W/m<sup>2</sup>K)
- der Kostenanstieg in Funktion grösserer Dämmstärken (geringerer U-Werte) eher weniger stark ist, in etwa im Bereich der Bestwerte der Aussenwand mit Aussenwärmedämmung (hier nicht dargestellt)

Die Grenzkosten der Energie-Effizienz der Blockholz-Bauweise sind demzufolge mindestens so tief wie diejenigen der konventionellen Bauweise, vgl. Tabelle 4.3-2, S. 104.



Quelle Holzbausystemproduzent, Annahmen CEPE (Oberflächenabschluss)

Abbildung 4.3-24 Investitionskosten von Blockholzwänden (inkl. Wärmedämmung und Oberfläche) im Vergleich zu konventionellem Mauerwerk mit Aussenwärmedämmung (Kompaktfassade)

Nicht berücksichtigt in der Abbildung 4.3-24 sind die Kostenvorteile aufgrund der geringeren Bautiefe der Wandelemente. Je nach anzusetzender Bewertung, d.h. je nach Knappheitsfaktor, müssen bei höheren Dämmstärken Mehrkosten für das Bauland oder Mindererträge aufgrund kleinerer Wohnfläche eingerechnet werden (bei gegebenem Bauland und Beschränkungen bei der Ausnützung bzw. den Grenzabständen). Bei einer Reduktion der Bautiefe der Aussenwand um beispielsweise 10 cm kann dies mit 40 bis 60 CHF/m<sup>2</sup><sub>Wand</sub> zu Buche schlagen (auf der Ebene der Investitionskosten).



### 4.3.6 Verglasungen

Die Abhängigkeit der Preise von Fenstern hinsichtlich der energetischen Qualität ist einerseits durch die Glasqualität und andererseits durch die Rahmenqualität gegeben. Im Hinblick auf die Bewertung der Co-Benefits wurde ausserdem der schalltechnische Aspekt miteinbezogen.

Betrachtet man die Kostenstruktur der Fensterherstellung, beträgt der Kostenanteil der Gläser nur ca. 10% bis 15%. Da die energetische Qualität des Gesamtfensters aber sehr stark von der Glasqualität abhängt, wird der Zusammenhang zwischen Energieeffizienz und Preisen bzw. Kosten in einem ersten Schritt für die Isoliergläser und in einem zweiten Schritt für das Fenster als Gesamtsystem untersucht.

#### a) *Isoliergläser*

Anhand der Preise der Glashersteller bzw. –händler und –importeure lassen sich noch keine direkten Schlüsse auf die Kosten und Nutzen von Fenstern unterschiedlicher Qualität ziehen. Nichtsdestotrotz ist eine Darstellung dieser Preise von Interesse, denn sie stellen einen Kostenfaktor der Fensterhersteller dar.

Die in diesem Unterkapitel wiedergegebenen  $m^2$ -Kosten- bzw.  $m^2$ -Preisinformationen sind vor dem Hintergrund zu sehen, dass die  $m^2$ -Kosten bzw.  $m^2$ -Preise des Gesamtfensters 400 CHF/ $m^2$  bis 600 CHF/ $m^2$  betragen (inkl. Montage).

Die energetische Qualität der Gläser und auch der Preis der Gläser wird durch drei Merkmale bestimmt:

- U-Wert, flächiger Transmissionswärmeverlust, gemessen in  $W/m^2K$
- g-Wert, Gesamtenergiedurchlasswert, gemessen in %
- $\psi$ -Wert (Psi-Wert), gemessen in  $W/mK$ . Zu bemerken ist dabei, dass der exakte Wert erst bestimmt werden kann, wenn das Glas im Rahmen eingebaut ist, der Wert für eine bestimmte Fläche näherungsweise jedoch recht gut angegeben werden kann.

Die vergangene Entwicklung der Gläser hinsichtlich energetischer und wirtschaftlicher Effizienz ist beachtlich, siehe dazu z.B. Tabelle 4.4-10. Noch vor zwei bis drei Jahren war ein U-Wert von  $1.3 W/m^2K$  üblich. Heute (2001/2002) kann ein U-Wert von  $1.1 W/m^2K$  als Referenz betrachtet werden (bei einer Minderheit der Projekte werden möglicherweise immer noch Gläser mit  $1.3 W/m^2K$  eingesetzt). Laut Glasherstellern ist die Nachfrage nach qualitativ hochstehenden Gläsern (solchen mit U-Wert von  $0.7 W/m^2K$  oder  $0.5 W/m^2K$ ) in letzter Zeit steigend.

Relevant für die energetische Qualität einer Verglasung ist aber nicht nur der U-Wert, sondern auch der g-Wert, also der Gesamtenergiedurchlasswert, besonders für Fenster, die in Richtung mit einer Südkomponente montiert werden. Die heute auf dem Markt erhältlichen Gläser weisen Kennwerte gemäss Tabelle 4.3-14 auf.

Tabelle 4.3-14 Kennwerte der heute am Markt erhältlichen Isoliergläser

U-Wert	g-Wert Standard	Verbesserter* g-Wert
1.1 bis 1.3	57% bis 63%	70%
0.7	50% bis 52 %	59% (Extraweiss)
0.5	40-42%	50%
* verbessert hinsichtlich der winterlichen Situation		

Quelle: Führende Schweizer Glashersteller

U-Werte von 0.7 W/m<sup>2</sup>K oder 0.5 W/m<sup>2</sup>K werden beim heutigen Stand der Technik mittels Dreifachverglasungen, welche zwei Beschichtungen aufweisen, erreicht. Mit zwei Beschichtungen ist üblicherweise eine Reduktion des g-Wertes (und des Lichttransmissionswertes) verbunden. Eine Reduktion des g-Wertes kann aber zu relativ geringen Mehrkosten vermieden werden, wenn für alle drei Gläser die optiwhite-Qualität (Extraweiss) verwendet wird. Dies ist allerdings mit einem Mehrpreis von 65% verbunden (Beispiel beim U-Wert von 0.7, Verbesserung von 51% auf 59%).

Tabelle 4.3-15 Preis von Wärmeschutzverglasungen für verschieden U- und g-Werte

U-Wert W/m <sup>2</sup> K	Unternehmen 1		Unternehmen 2		Unternehmen 3	
	g-Wert	Preis CHF/m <sup>2</sup>	g-Wert	Preis CHF/m <sup>2</sup>	g-Wert	Preis CHF/m <sup>2</sup>
1.3	57%	110				
1.1	54% - 65%	120	61%	90	63%	120
1.1			63%	100	70%	170
1.0	55%	130	61%	110		
1.0			63%	120		
0.7			45%	160	42%	220
0.7			49%	210	51%	230
0.7					59%	380
0.5			45%	200 - 260*	42%	240
0.5					50%	260
* höhere Lichtdurchlässigkeit						

Quelle: führende schweizerische Isolierglashersteller (Erhebung CEPE)

Vergleichsweise kostengünstig ist eine energetische Verbesserung des Randverbundes. Der auf die Fläche umgelegte Zuschlag ist abhängig von der Fensterfläche und von der Fensterunterteilung. Je nachdem, ob es sich um ein-, zwei oder mehrflügelige Fenster handelt, beträgt die flächenspezifische Glasrandlänge bei kleinen Fenstern (<1m<sup>2</sup>) 4 m/m<sup>2</sup> bis zu über 10 m/m<sup>2</sup> und bei mittleren bis grossen Fenstern von 2 m/m<sup>2</sup> bis 3 m/m<sup>2</sup> bis zu rund 6 m/m<sup>2</sup>, siehe Abbildung 4.3-25. Eines der Unternehmen gibt dafür einen Zuschlag von 1.5 CHF bis 2 CHF pro Meter Glasrand, was bei kleinen Fenstern einem auf die Fläche umgelegten Mehrpreis von 6 CHF/m<sup>2</sup> bis 16 CHF/m<sup>2</sup> und bei mittleren Fenstern einen Mehrpreis von 3 CHF/m<sup>2</sup> bis

12 CHF/m<sup>2</sup> entspricht. Es handelt sich also um relativ geringe Zuschläge, bei mittleren Flächen entspricht dies bezogen auf den Gesamtglaspreis 4% bis 12%. Ein anderes Unternehmen gibt für einen verbesserten Randverbund einen generellen Zuschlag von 10% des Preises für die Verglasung an. Verglichen mit dem Gesamtfensterpreis verursacht der verbesserte Glasverbund also einen Mehrpreis von weniger als 2%.

Der Grund, weshalb die verbesserten Glasrandverbunde sich am Markt nicht besser durchsetzen liegt darin begründet, dass die zwar bescheidenen Mehrkosten eben doch einen Konkurrenznachteil darstellen, solange die verbesserten Glasrandverbunde in der Devisierung nicht vorgegeben werden, sie also vom Markt, d.h. von den Architekten, privaten Bauherren und Immobilienfirmen, nicht verlangt werden.

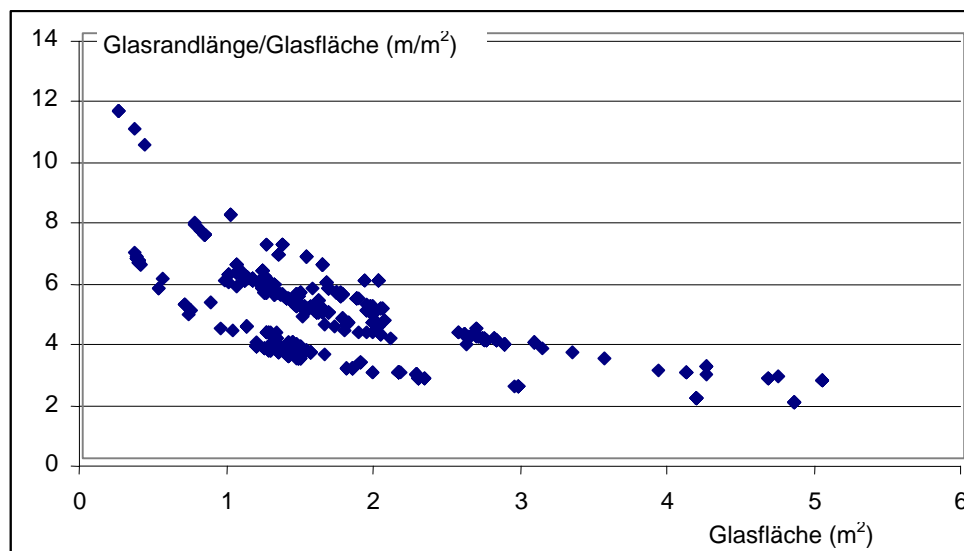


Abbildung 4.3-25 Spezifische Glasrandlänge (m Glasrand / m<sup>2</sup> Glasfläche) in Funktion der Glasfläche

Bezogen auf die gewonnene Energieeffizienz stellt die Verbesserung des Glasrandverbundes eine sehr attraktive Effizienzmassnahme dar. Der Effizienzgewinn des Materialwechsels des Glasabstandshalters vom heute üblichen Aluminium zum Edelstahl oder Kunststoff beträgt typischerweise 0.02 W/mK bis 0.03 W/mK. Beträgt das Verhältnis zwischen Glasrandlänge und Glasfläche 5 m/m<sup>2</sup> ist dies äquivalent zu einer Verbesserung des U-Wertes von beachtlichen 0.1 W/m<sup>2</sup>K bis 0.15 W/m<sup>2</sup>K. Bei einem Mehrpreis von 1.5 CHF/m und einer Annuität von 0.069 (dr=5.5%, 30 Jahre) bzw. 0.054 (dr=3.5%, 30 Jahre) ergeben sich spezifische Kosten des Effizienzgewinns von 3 Rp/kWh bis 5.5 Rp/kWh.



#### 4.3.7 Das Fenster als Gesamtsystem

Das Fenster ist nicht nur in energetischer Hinsicht ein sehr wichtiges Bauteil, sondern auch wegen der vielfältigen Funktionen, die es wahrzunehmen hat (Tageslichtnutzung, Bezug zur Aussenwelt, Luftdichtigkeit, Witterungsschutz, Lärmschutz etc.). Einige dieser Attribute sind relevant für die im Kapitel 4.5 untersuchten nicht-energetischen Nutzen, die Co-Benefits.

Gemäss der Zielsetzung des Grenzkostenprojekts, auch empirisch abgestützte Grundlagen zu erarbeiten, wurde auch im Bereich Fenster eine umfangreiche Erhebung und Recherche durchgeführt, um den Zusammenhang zwischen Kosten, energetischen und weiteren Nutzen ergründen zu können.

##### a) Die Erhebung

Das Ziel der Erhebung war, die Preise in Funktion ihrer beiden hauptsächlichen Nutzenkomponenten, nämlich der

- energetischen Qualität (in drei bis vier Stufen der Glasqualität sowie in drei bis vier Stufen der energetischen Rahmenqualität) und der
- schalltechnischen Qualität (drei Stufen)

zu ermitteln, letzterer Punkt im Hinblick auf die Co-Benefits. Die Aussagen sollten einerseits repräsentativ für die Schweiz sein, andererseits auch die innovativen, aber heute schon verfügbaren Möglichkeiten des energie-effizienten Bauens und Erneuerns aufzeigen.

Gemäss dieser Ziele und ausgehend von der heutigen Marktstruktur wurde deshalb die Erhebung bei den folgenden drei Typen von Fensterherstellern erhoben:

- Grosse, führende Hersteller (zusammen ca. 15% bis 30% Marktanteil, je nach Fenstertyp). Anfragen bei den grössten Fensterherstellern mit dem Hinweis, dass die Anfrage im Zusammenhang mit einer Untersuchung (dem Grenzkostenprojekt) steht.
- Kleine und mittlere Fensterhersteller. Einholen von Richtofferten an rund 110 zufällig ausgewählte Fensterhersteller in der Schweiz, versandt durch das CEPE, durch Bürgi & Raaflaub, Bern sowie Jeker Blanckarts Architekten, Basel. Die Richtofferten wurden so realitätsnah wie möglich verfasst.
- Recherche nach innovativen Fensterherstellern mit Angeboten an wesentlich verbesserten Rahmenqualitäten bis hin zum Passivhausfenster: Dies betrifft sowohl grosse wie kleine Unternehmen. Preisanfragen mit dem Hinweis, dass die Anfrage im Zusammenhang mit einer Untersuchung (dem Grenzkostenprojekt) steht.
- Auswertung von Vergleichsofferten eines realisierten Passivhauses in der Schweiz.

Bei allen Unternehmen wurde nach **marktnahen** Richtpreisen gefragt.

Zunächst wurden die energetischen und schalltechnischen Kennwerte der heute am Markt erhältlichen Fenster recherchiert, wobei sowohl auf die Breite des Marktes wie auch auf die Spitze fokussiert wurde.

Tabelle 4.3-16 Charakterisierung der Glasqualität und deren Bedeutung im Fenstermarkt im Jahr 2000

U-Wert (W/m <sup>2</sup> K)	1.3	1.1	0.9 – 1.0	0.7	0.5	≤0.4
Anzahl Gläser	2	2	2, evtl. 3	3	3	3
Gasfüllung	Luft	Ar/Kr	Kr	Kr	Kr	Xe
Verbreitung, Bedeutung	Stark im Rückgang	Grosse Mehrheit	Selten (wenn energieeffizient, dann gleich 0.7 oder 0.5=	Bei energie-effizientem Bauen wie Minergie oder Passivhausstandard (0.5 für letzteren)		Sehr selten, da Edelgas selten und teuer

Quelle EMPA, Glas- und Fensterhersteller, Erhebung CEPE

Nach Möglichkeit wurde auch nach dem Mehrpreis für verbesserte (höhere, im Sinn des winterlichen Wärmeschutzes im Wohnungsbau) g-Werte gefragt. Das Thema des g-Wertes und dessen Einbezug scheint aber sowohl auf der Nachfrageseite (in den Ausschreibungen wird kaum nach einem verbesserten g-Wert verlangt) wie auch auf der Verkaufsseite (der g-Wert ist kaum ein Verkaufsargument) eine eher geringe Bedeutung zu haben. Es ist jedoch durchaus so, dass auch Gläser mit tiefem U-Wert (0.7 W/m<sup>2</sup>K bis 0.5 W/m<sup>2</sup>K) einen g-Wert von 0.5 und höher aufweisen können, siehe dazu auch das obige Unterkapitel und Tabelle 4.3-15).

U-Werte unter 0.5 haben bis jetzt noch kaum eine Bedeutung, da beim konventionellen Vorgehen (arbeiten mit Beschichtungen und Gasfüllungen) auf das Füllgas Xenon gewechselt werden müsste, das sehr selten und teuer ist. Weitere Verbesserungen können durch Folien zwischen den Gläsern (am Markt erhältlich) oder durch sogenannten Vakuum-Glaser (am Markt noch nicht erhältlich [?]) erzielt werden, siehe dazu weitere Ausführungen im Kapitel 4.4 zur Dynamisierung).

Um die einzelnen Unternehmen nicht über ein vertretbares Mass hinaus zu belasten, wurde nicht von allen Unternehmen die gesamte Variationsmöglichkeit an energetischen und schalltechnischen Qualitäten und Massen abgefragt. Zu diesem Zweck wurde ein sogenannter statischer Versuchsplan erstellt (unvollständig besetzt). Aus den grundsätzlich 36 Möglichkeiten wurden 22 ausgewählt (siehe Anhang A) und für jede dieser Kombinationen wurden Anfragen für Richtofferten an zwei bis sechs verschiedene Unternehmen geschickt (siehe ebenfalls Anhang A).

Für verschiedene Fenstergrössen (von 1 m<sup>2</sup> bis rund 6 m<sup>2</sup>), Ausführungen (Balkontüre, ein- bis dreiflügelig, Holz-, Holz-Metall und Kunststoffrahmen) und Einbausituationen (Neubau, Erneuerung) waren von den einzelnen Unternehmen jeweils Preise für unterschiedliche energetische und / oder schalltechnische Qualitäten anzugeben. Bei den kleinen und mittleren Unternehmen waren dies drei Ausführungsvarianten/-grössen und vier energetische / schalltechnische Qualitäten (also vier Felder der Matrix bzw. eine Zeile gemäss Tabelle A-1 im Anhang A), bei den grossen Unternehmen wurde möglichst die gesamte Vielfalt des Angebots erhoben. Indem pro Unternehmen nach mehreren energetischen / schalltechnischen Varianten gefragt wurde, sind aufgrund der erhobenen Daten Preisvergleiche und Grenzkostenbetrachtungen möglich (dies wäre nur bedingt der Fall, wenn pro Unternehmen nur jeweils eine energetische / schalltechnische Qualität abgefragt worden wäre).

Um die Richtofferten realistisch zu gestalten, wurden 11 Gebäudetypen (kleine bzw. grosse Neubauten bzw. Gebäude mit unterschiedlichem Baujahr) charakterisiert, jeder Gebäudetyp drei Fenstertypen/-grössen/Einbausituationen aufweisend. Erhoben wurden folgende Preise für Neubauten

**b) Rücklauf**

Von den 119 zufällig ausgewählten kleinen und mittleren Unternehmen beantworteten 46 (knapp 40%) die Richtpreisofferte, woraus 563 Gesamtpreise zu Fenstern resultierten. Einige davon betreffen Unternehmen, die sich als relativ gross herausgestellt hatten, weshalb bei diesen zusätzliche Anfragen gemacht wurden. Zusätzlich konnten 349 Gesamtpreise von 8 auf Innovation spezialisierten Unternehmen und von 5 grossen Unternehmen (mit teilweise ebenfalls innovativen Produkten) erhoben werden. Insgesamt ergibt dies 912 Gesamtpreisfensterpreise von 60 Unternehmen. Davon sind 26 Unternehmen in der Lage, verbesserte bzw. gedämmte Holz- bzw. Holz-/Metallrahmen (20 Unternehmen, Rahmen-U-Wert  $\leq 1.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) bzw. Kunststoffrahmen (6 Unternehmen, Rahmen-U-Wert  $\leq 1.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) anzubieten

Von insgesamt konnten 913 Preisinformationen von Gesamtpreisfenstern für Neubauten in die Auswertung miteinbezogen werden.

Dazu kommen für zahlreiche Mehrpreise für Abbrüche, Entsorgungen oder verschiedene Einbauvarianten bzw. -situationen (Montagekosten für Renovationsfenster, alleinigen Fensterersatz, Fensterersatz bei gleichzeitiger Aussenwärmedämmung, Fensterersatz gleichzeitig mit Innenerneuerung, Fensterersatz bei Gebäudetotalrenovation).

**c) Beschreibende Statistik**

Aufgrund der Erkenntnisse aus der Erhebung lassen sich folgende qualitative Feststellungen machen:

- Die Wärmeschutzverglasung mit einem U-Wert von  $1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$  ist in der Schweiz weitgehend Standard, vereinzelt kommen noch Glas-U-Werte von  $1.3 \text{ W/m}^2\text{K}$  zum Einsatz
- Die Dynamik im Bereich der Rahmen war in den vergangenen Jahren weniger stark als bei den Verglasungen, aber:
- Es gibt in der Schweiz mittlerweile zahlreiche Fensterhersteller, die verbesserte Rahmen anbieten, und zwar im Bereich der Holz und Holz-Metall-Rahmen, wo mit Verbundmaterialien eine Verbesserung erreicht wird und auch im Bereich der Kunststoffrahmen, wo andere Armierungsmaterialien und/oder Schäume zum Einsatz kommen.
- Eine (noch) kleine Anzahl Unternehmen ist auch in der Lage, Fenster nach den hohen Anforderungen des Passivhausstandards anzubieten.

Der Preis eines Fensters hängt von verschiedenen Einflussfaktoren ab und einige der interessierenden Einflussfaktoren lassen sich wiederum auf weitere Grössen zurückführen. Nützlich ist demzufolge eine Charakterisierung des Samples bezüglich dieser Faktoren.

Der **Rahmenanteil** beeinflusst einerseits den U-Wert des Gesamtpreisfensters (siehe Formel im Kapitel 4.2.7a) und andererseits die Herstellungskosten des Fensters. Mit zunehmender Fensterfläche nimmt der relative Rahmenanteil ab, ebenso mit abnehmender Flügellanzahl. Die Anzahl der Flügel hat ausserdem einen direkten Einfluss auf die Herstellungskosten.

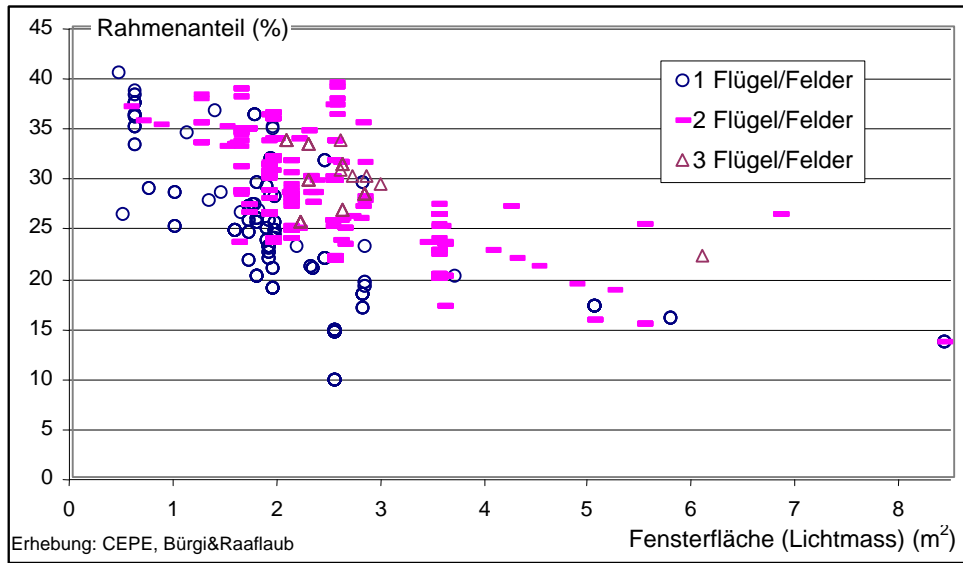


Abbildung 4.3-26 Rahmenanteil in Funktion der Fensterfläche und der Flügelanzahl

Die beeinflusst einerseits den U-Wert des Gesamtfensters (siehe Formel im Kapitel 4.2.7a) und andererseits über die Kosten des Abstandhalters die Herstellungskosten des Fensters. Mit zunehmender Fensterfläche nimmt die spezifische Glasrandlänge ab.

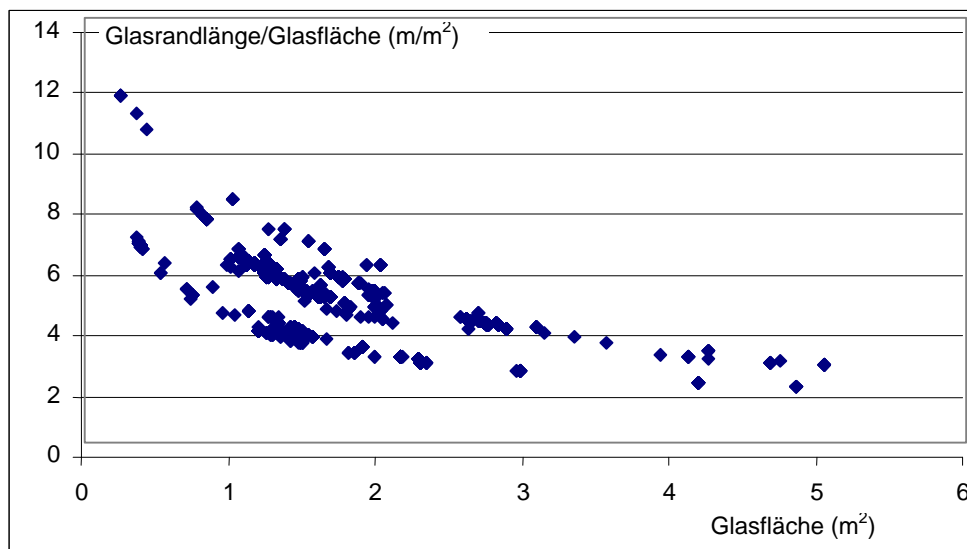


Abbildung 4.3-27 Spezifische Glasrandlänge (m Glasrand / m<sup>2</sup> Glasfläche) in Funktion der Glasfläche

Zunächst folgt eine Darstellung der spezifischen Fensterpreise in Funktion der energetischen Komponente des Nutzens, danach in Funktion der schalltechnischen Komponente.



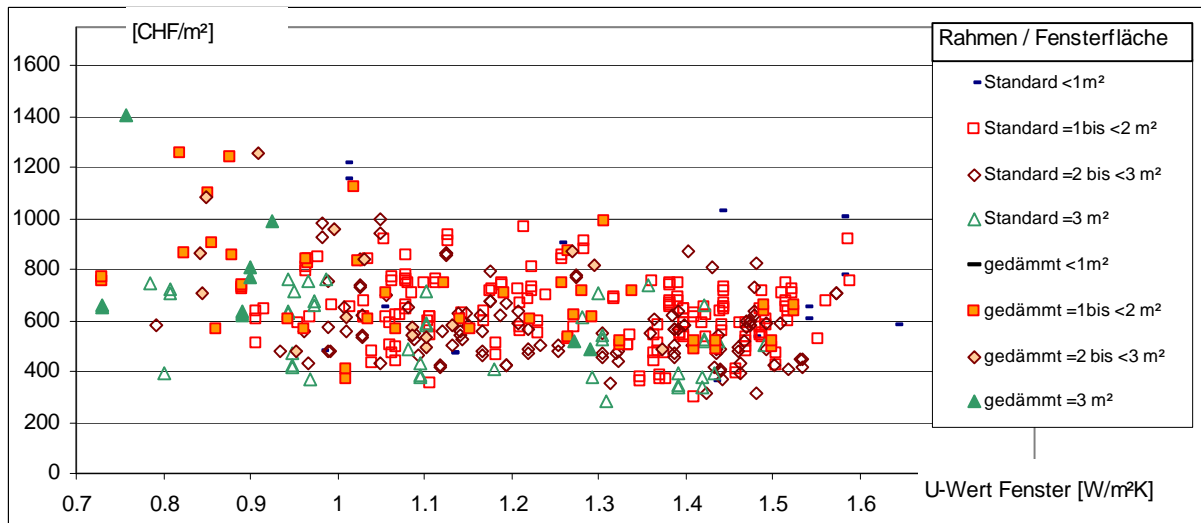


Abbildung 4.3-28 Spezifische Fensterpreise (CHF/m<sup>2</sup>, inkl. Montage) von Holzfenstern für verschiedene Fenstergrößen und Rahmenqualitäten (Standard / gedämmt) in Funktion des Fenster-U-Wertes

Das Preisniveau der Holzfenster liegt tiefer als dasjenige der Holz-Metallfenster, aber höher als dasjenige der Kunststofffenster. Ein Anstieg der Preise in Funktion abnehmenden U-Wertes als Mass der verbesserten energetischen Qualität ist bei allen drei Rahmenarten festzustellen. Zu vermuten ist ein Zusammenhang nach einem Potenzgesetz. Festzustellen ist auch, dass die spezifischen Preise in Funktion der zunehmenden Fensterfläche abnehmen. Ob ein bestimmter Fenster-U-Wert (bei gleicher Fläche) kostengünstiger mittels ungedämmtem (heutiger Standard) oder mittels gedämmtem Rahmen erreicht werden kann, ist jedoch nur aufgrund der Abbildungen nicht ersichtlich, dazu werden die statistischen Auswertungen mehr Aufschluss geben.

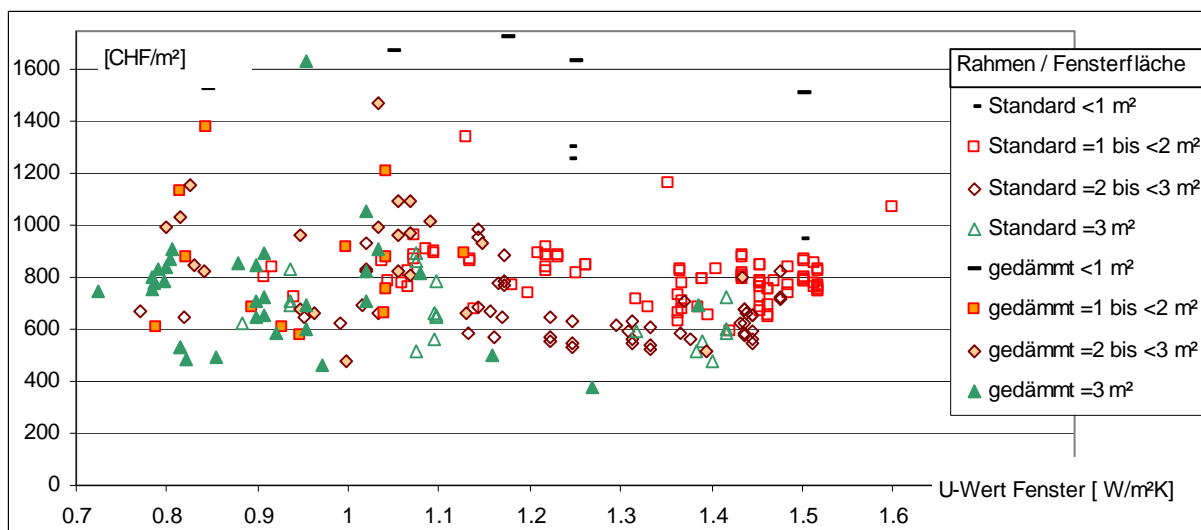


Abbildung 4.3-29 Fensterpreise (inkl. Montage) von Holz-Metallfenstern für verschiedene Fenstergrößen und Rahmenqualitäten (Standard / gedämmt) in Funktion des Fenster-U-Wertes

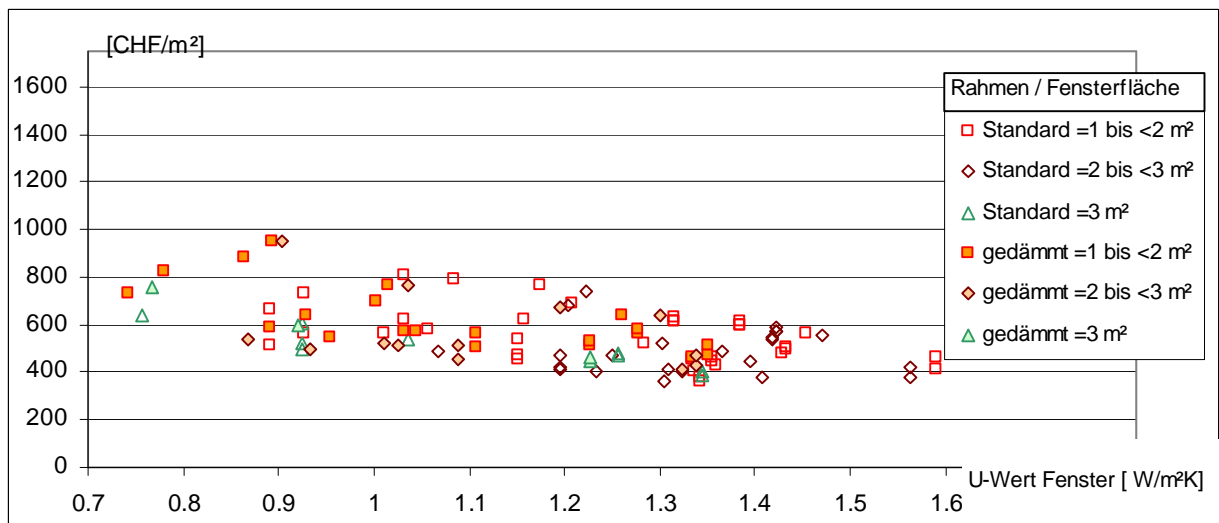


Abbildung 4.3-30 Fensterpreise (inkl. Montage) von Kunststofffenstern für verschiedene Fenstergrößen und Rahmenqualitäten (Standard / gedämmt) in Funktion des Fenster-U-Wertes

Der Zusammenhang zwischen energetischer Fensterqualität und Fenstergrösse lässt sich auch umgekehrt, gemäss Abbildung 4.3-31 (Beispiel für Holzrahmenfenster), darstellen. Es kann ein Zusammenhang mit der Fenstergrösse nach einem Potenzgesetz vermutet werden. Die anderen Rahmenarten verhalten sich ähnlich, siehe dazu den Anhang.

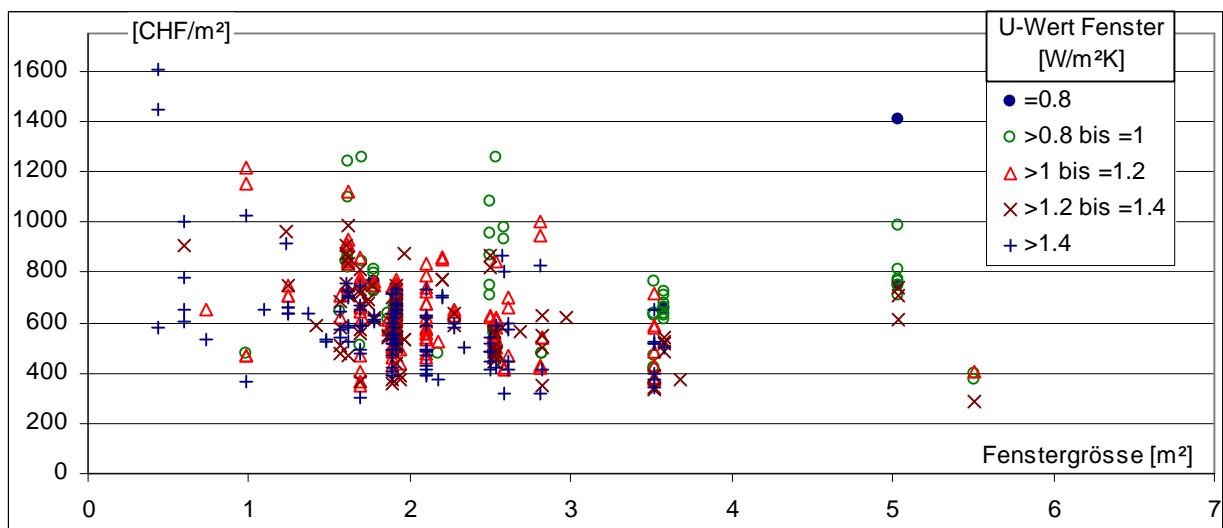


Abbildung 4.3-31 Spezifische Fensterpreise (CHF/m²) in Abhängigkeit ihrer Fenstergrösse für Fenster mit **Holzrahmen**, aufgeteilt nach Fenster-U-Wert-Klassen

Im folgenden interessiert die Frage, ob zwischen energetischer Qualität bzw. dem U-Wert des Fensters und der schalltechnischen Qualität ein Zusammenhang, im besten Fall ein Synergieeffekt besteht. Rein aufgrund der Abbildung 4.3-32 lässt sich ein solcher nicht feststellen; die Fenster weisen bei gegebenem U-Wert nicht systematisch tiefere Preise für erhöhte Schalldämmmasse auf.

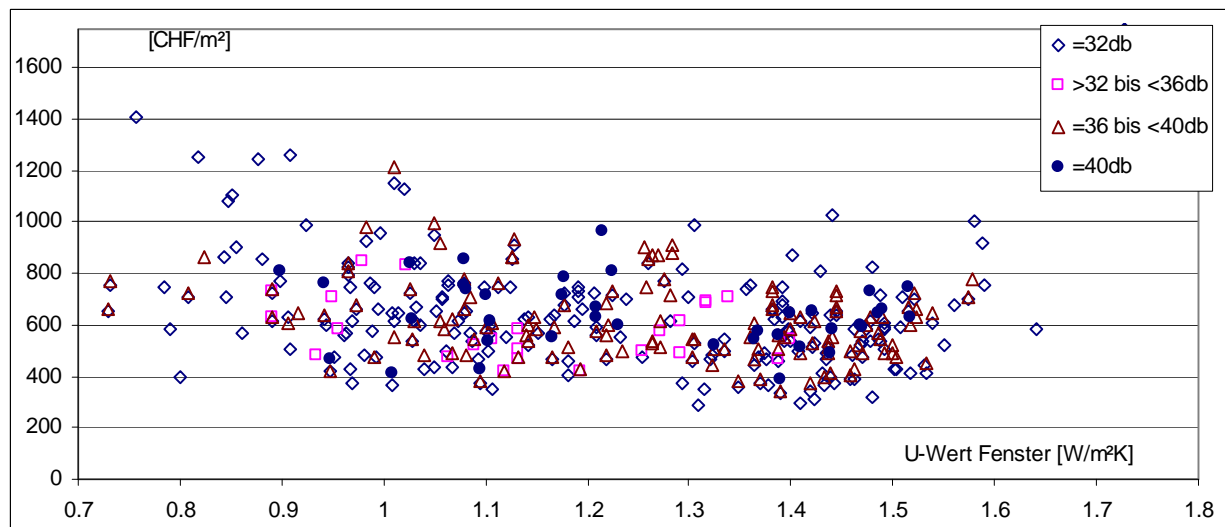


Abbildung 4.3-32 Spezifische Fensterpreise (CHF/m<sup>2</sup>) in Abhängigkeit der Fenster-U-Werte für Fenster mit **Holzrahmen**, aufgeteilt nach Schalldämm-Klassen.

Ebenfalls im Anhang ist die Abhängigkeit des Fensterpreises als Funktion des U-Wertes gruppiert nach den einzelnen Unternehmen ersichtlich, jeweils für Holz-, Holz-Metall- und Kunststoffenster.

#### d) Die Auswertung der Erhebung (deduktive Statistik)

Um die Fensterpreise als Funktion der interessierenden Einflussgrößen bzw. der Nutzenkomponenten quantifizieren zu können, ist die Erstellung eines statistischen Modells notwendig. Damit lässt sich der Fensterpreis als Funktion der Einflussfaktoren berechnen (vorhersagen) und es kann unterschieden werden zwischen dem systematischen Einfluss der energetisch relevanten Kennwerte, den übrigen Einflussfaktoren und der zufälligen Streuung. Bzgl. der Einflussfaktoren besteht eine gewisse Wahlmöglichkeit, weil diese untereinander teilweise „deterministisch“ voneinander abhängen (der Fenster-U-Wert als Funktion des Glas-U-Wertes, des Rahmenanteils, der Glasrandlänge und des Abstandhalters (siehe Gleichung im Kapitel 4.2.7a)). Ausserdem besteht grundsätzlich die Wahlmöglichkeit, erstens mehr und detailliertere bzw. zweitens weniger und zusammenfassendere Einflussfaktoren mit einzubeziehen. Im ersten Fall weist das Modell eine höhere Präzision auf, dafür müssen mehr (technische) Details bekannt sein, um den Fensterpreis berechnen zu können. Im zweiten genügen weniger Angaben (nur der Gesamtfenster-U-Wert statt die einzelnen U-Werte sowie die Flächenanteile), dafür ist das Fenster weniger gut charakterisiert, was die Grenzkostenberechnungen erschwert. Im folgenden werden beide Ansätze verfolgt:

Die Ausgangshypothese ist, dass folgende Grössen (unabhängige Variablen) den Fensterpreis bestimmen (abhängige Variable):

- Fläche Glas
- U-Wert Glas
- Fläche Rahmen
- U-Wert Rahmen
- Länge Glasrand
- Qualität Abstandhalter
- Rahmenmaterial (Holz, Holz-Metall, Kunststoff)
- Rahmen gedämmt (Code 1 bei gedämmten Rahmen oder Rahmen mit Verbundmaterialien (Holz, Holz-Metall) bzw. mit wärmetechnisch verbesserter Armierung (Kunststoffrahmen))
- Schalldämmmass (dB)
- Anzahl Flügel
- Öffnungsmechanismus (Code=1, falls Drehkipp-Fenster)
- Montage (Code=1, falls Montage im angegebenen Preis inbegriffen)
- Offerte Menge (Mengenrabatt)
- Absender (hat der Absender der Offerte einen Einfluss auf den Offertpreis?)

oder  
Fläche Fenster  
U-Wert Gesamtfenster

Grundsätzlich sind verschiedene Modellansätze möglich; als abhängige Variable kann z.B. entweder der spezifische Flächenpreis (CHF/m<sup>2</sup>) oder der absolute Fensterpreis (CHF) geschätzt werden. Die abhängige Variable kann linear bzw. nicht-linear in den erklärenden Variablen sein. Und das Modell kann bzgl. der erklärenden Variablen entweder additiv oder multiplikativ sein.

Auch aufgrund der Scatterplots (Abbildung 4.3-28 bis Abbildung 4.3-30) wurde bzgl. der energetischen Variablen eine Abhängigkeit nach einem Potenzgesetz oder einem Exponentialgesetz mit negativem Koeffizienten vermutet. Potenzgesetz und Exponentialgesetz stimmen numerisch gut überein, solange die x-Werte sich zwischen 0.5 und ca. 1.2 bewegen, wie es für die U-Werte der Fall ist. Bezüglich der Abhängigkeit von der Fensterfläche ist ein Skaleneffekt festzustellen (Abbildung 4.3-31). Vereinfacht dargestellt bedeutet dies einen Ansatz gemäss Gleichung m<sub>11</sub> oder m<sub>12</sub>.

$$\text{Preis}_{\text{Fenster}} = C_1 \cdot e^{-a_1 \cdot U_g} \cdot e^{-b_1 \cdot U_f} \cdot A_g^{-c_1} \cdot A_f^{-d_1} \cdot F_i \quad \text{Gleichung m}_{11}$$

$$\text{Preis}_{\text{Fenster}} = C_2 + m_2 U_g^{-a_2} + n_2 U_f^{-b_2} + p_2 A_g^{-c_2} + q_2 A_f^{-d_2} + F_i \quad \text{Gleichung m}_{12}$$

$$\text{Spez. Preis}_{\text{Fenster}} (\text{CHF/m}^2) = C_3 + m_3 U_g^{-a_3} + n_3 U_f^{-b_3} + c_3 \cdot \log(A_g) + d_3 \cdot \log(A_f) + F_i \quad \text{Gleichung m}_{13}$$

<i>U</i>	U-Wert
<i>A</i>	Fläche
<i>g</i>	Glas
<i>f</i>	Rahmen (frame)
<i>C</i>	zu schätzender Proportionalitätsfaktor
<i>a bis d</i>	zu schätzende Koeffizienten

$m, n, p, q$  zu schätzende Koeffizienten

$F_i$  weitere Einflussfaktoren

Um einen linearen Regressionsansatz anwenden zu können, waren die Variablen demzufolge zu transformieren und zwar mittels Logarithmus, da die Exponenten unbekannt waren und insbesondere vermutet wurde, dass sie nicht  $-1$  betragen. Damit ergibt sich als Konsequenz ein multiplikativer Ansatz (Gleichung  $m_{11}$ ). Eine Veränderung eines Einflussfaktors um  $x\%$  bewirkt eine Preisänderung um  $x\%$  oder um  $x^k\%$ , d.h. bei einem teureren Fenster, z.B. weil es flächenmässig grösser ist, wirkt sich eine Verbesserung des U-Wertes, ein zusätzlicher Flügel oder die Montage betragsmässig stärker auf den Fensterpreis aus als bei einem kostengünstigeren, kleineren Fenster, was durchaus plausibel ist. Im Gegensatz dazu würde bei einem linearen Modell gemäss Gleichung  $m_{12}$  eine Verbesserung des U-Wertes betragsmässig immer die gleiche Preisänderung ergeben, unabhängig davon, ob es sich um ein kleines oder ein grosses Fenster handelt. Dies wäre höchstens für Einflussfaktoren mit Fixkostencharakter plausibel, z.B. wenn die Montage für ein kleines und für ein grosses Fenster gleich teuer wäre. An dieser Stelle kann nicht auf alle Details des Vorgehens zur Modelletablierung eingegangen werden. Abschliessend lässt sich festhalten, dass ein Ansatz mit spezifischem Flächenpreis (ähnlich wie Gleichung  $m_{13}$ ) und der Ansatz mit absoluten Fensterpreisen mit linearer Abhängigkeit der Variablen nicht zum Erfolg führte (die Residuen waren jeweils nicht normalverteilt).

Grundsätzlich wären weitere funktionale Formen denkbar, welche zum Beispiel mittels eines Translog Ansatzes zu bestimmen wären. Im Rahmen dieser Arbeiten war es jedoch nicht möglich, diesen Ansatz weiter zu verfolgen.

Bei der Modellspezifikation wurde grundsätzlich nach dem Ansatz „**general to specific**“ vorgegangen, d.h. als Erstes wurden alle Variablen, von denen ein Erklärungsgehalt vermutet wurde, in das Modell mit einbezogen. Schritt für Schritt wurden darauf die nicht signifikanten Variablen aus dem Modell entfernt.

Die Regressionsanalyse wurde **nicht** für die drei Fenstertypen Holz, Holz-Metall und Kunststoff separat durchgeführt, weil zum einen bzgl. der wichtigen interessierenden Variablen ein ähnliches Verhalten erwartet wurde und zum anderen die Datenmenge insbesondere für die Kunststoffenster eher klein geworden wäre. Den Unterschieden der Fenster mit unterschiedlichen Rahmenmaterialien kann man gerecht werden, indem mit entsprechenden Dummy-Variablen gearbeitet wird, welche bei Bedarf in Interaktion mit weiteren Variablen gebracht werden können. Der Nachteil der nicht-getrennten Analyse bei einem multiplikativen Modell ist, dass ein Faktor, der eigentlich bei allen Fenstern *absolut* gesprochen den gleichen Einfluss haben müsste, bei diesem Ansatz einen gleichen *prozentualen* Einfluss hat. Ein Drehkippsverschluss z.B. ist so beim Holzmetallfenster aus dem Ansatz heraus teurer als beim Holzfenster.

Geprüft wurden nebst der oben aufgeführten Variablen folgende qualitative bzw. zählende (diskrete) Variablen:

- $U_{\text{Glas}} < 0.9$  bzw. Anzahl Gläser  $> 2$ : Gibt es einen Preissprung, sobald der Glas-U-Wert unter  $0.9 \text{ W/m}^2\text{K}$  zu liegen kommt bzw. sobald drei Gläser eingesetzt werden?
- Fensterfläche  $< 0.7 \text{ m}^2$  bzw. Fensterfläche  $> 6 \text{ m}^2$ . Häufig beschreiben Regressionsmodelle einen bestimmten Zusammenhang nur innerhalb eines bestimmten Gültigkeitsbereichs. Mit dieser Variable wird geprüft, ob das Modell auch für sehr kleine bzw. sehr grosse Fenster anwendbar ist.
- Schalldämmmass  $> 38 \text{ dB}$ : Aufgrund der Gespräche mit Fenster- bzw. Glasherstellern lässt sich vermuten, dass eine Verbesserung des Schalldämmmasses, die wesentlich über  $36 \text{ dB}$

hinaus geht, nur durch kostenrelevante Zusatzmassnahmen (schwerere Gläser) erreicht werden; nur durch ein zusätzliches (drittes) Glas kann dies nicht erreicht werden.

- Rahmen gedämmt: Gibt es einen Preissprung, sobald die energetische Verbesserung des Rahmens durch eine neue Qualität von Massnahmen (d.h. nicht nur durch eine Erhöhung der Rahmenstärke) verbessert wird?

Geprüft wurden nicht nur einzelne Variablen, sondern auch **vermutete Interaktion**, insbesondere bei den qualitativen Variablen (den sogenannten Dummy- bzw. Codierungsvariablen), welche z.B. das Rahmenmaterial charakterisieren. Dabei geht es darum festzustellen, ob der Exponent bzgl. dem U-Wert des Rahmenmaterials oder der Fläche des Rahmens für die verschiedenen Rahmenmaterialien verschieden ist.

Geprüft wurden im Einzelnen folgende Interaktionen:

- $U_{\text{Glas}}$  \* Schalldämmass: Gibt es einen Synergieeffekt zwischen den Zielen Energieeffizienz und Schalldämmung?
- $U_{\text{Glas}}$  \* Anzahl Gläser: Ist der Verlauf des Preisanstiegs in Funktion des abnehmenden Glas-U-Wertes für Fenster mit zwei bzw. mit drei Gläsern verschieden, d.h. ist der Exponent bzgl.  $U_{\text{Glas}}$  ein anderer?
- $U_{\text{Rahmen}}$  \* Rahmenmaterial: Ist der Verlauf des Preisanstiegs in Funktion des abnehmenden Glas-U-Wertes für Fenster mit unterschiedlichem Rahmenmaterial (Holz, Holz-Metall, Kunststoff) verschieden?

### Modellansatz 1 (technischer Approach)

Dieser Ansatz geht davon aus, dass die geometrischen Masse und die energietechnischen Kennwerte der einzelnen Fensterbestandteile (Glas, Rahmen, Abstandhalter) bekannt sind.

Folgende Feststellungen können anhand der statistischen Regressionsanalysen gemacht werden (siehe Tabelle 4.2-15):

- Das Regressionsmodell ist hoch signifikant (F-Statistik=264.4), weist einen hohen Erklärungsgehalt auf (Adjusted  $R^2 > 0.8$  bei über 700 Freiheitsgraden) und die Regressionskoeffizienten (Schätzer) sind ebenfalls hoch signifikant (p Statistik grösstenteils  $< 0.0001$ , im „schlechtesten“ Fall 0.015)
- Werden nur die Koeffizienten betrachtet, wirkt sich die Verbesserung der Rahmen-U-Werte leicht stärker vertuernd aus als die Verbesserung der Glas-U-Werte (28% statt 24% bei einer Verbesserung um  $0.6 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Da der Glas-U-Wert aber flächengewichtet stärker in den Gesamtfenster-U-Wert einfließt, ist eine Glas-U-Wert Verbesserung doch wesentlich kosteneffizienter.
- Das Schalldämmass als solches geht nicht signifikant in das Modell ein, auch nicht in Interaktion mit dem Glas-U-Wert. Eine angestrebte Verbesserung von mehr als 38 dB wirkt sich jedoch signifikant vertuernd aus. Die Interaktion zwischen der Variable 38 dB und dem U-Wert war nicht signifikant, d.h. es ist kein Synergieeffekt festzustellen (dies im Unterschied zum Modellansatz 2, siehe weiter unten).
- Es kann kein Kostensprung aufgrund des zusätzlich notwendigen Glases bei tiefen Glas-U-Werten festgestellt werden; der Kostenanstieg kann allein durch den Koeffizienten des Glas-U-Wertes erklärt werden. Die Verbesserung des Glas-U-Wertes scheint demzufolge ein gradueller Prozess zu sein (von 1.3 oder 1.1 über 0.9 zu 0.7 und 0.4: bessere Beschichtung, andere Gasfüllung, zusätzliches Glas mit Beschichtung mit „normaler“ Gasfüllung, wieder bessere Gasfüllung etc)

- Das Kostenniveau der Holz-Metallfenster ist, ceteris paribus, rund 20% höher als dasjenige der Holzfenster (bei einem Rahmenanteil von 30%).
- Die Montage schlägt mit einem Preisanteil von 25% relativ markant zu Buche.
- Weitere Feststellungen: Kleine Fenster ( $<0.7 \text{ m}^2$ ) erzeugen einen Preiszuschlag, die Anzahl Flügel geht mit 13% pro Flügel in den Preis ein, das feature des Drehkippmechanismus mit 15%.
- Die Qualität des Abstandhalters hat keinen signifikanten Einfluss auf den Fensterpreis, auch nicht in Interaktion mit dem Logarithmus der Glasrandlänge.

Tabelle 4.3-17 Übersicht über das statistische Regressionsmodell gemäss Ansatz 1

Erklärte Variable $\text{Log}_{10}$ (Fensterpreis)				
Freiheitsgrade	Modell: 13	Störterm: 719		
Bestimmtheitsmass	$R^2=0.8270$	Adjusted $R^2 =0.8239$		
Modellstatistik		F-Statistik 264.44	p-Wert <0.0001	
Erklärende Variablen	Schätzer	Standardfehler	t-Statistik	p Wert
C	3.277	0.029	112.4	<0.0001
$\text{Log}_{10}$ (Fläche <sub>Glas</sub> )	0.247	0.010	23.8	<0.0001
$\text{Log}(\text{Fläche}_{\text{Rahmen}})$	0.123	0.015	8.1	<0.0001
$\text{Log}(\text{Fläche}_{\text{Rahmen}})$ Rahmen <sub>Holz-Metall</sub>	-0.125	0.010	-12.55	<0.0001
$F < 0.7 \text{ m}^2$	0.149	0.023	6.51	<0.0001
$U_{\text{Glas}}$	-0.155	0.013	-12.1	<0.0001
$U_{\text{Rahmen}}$	-0.177	0.015	-11.7	<0.0001
$U_{\text{Rahmen}} * \text{Rahmen}_{\text{gedämmt}}$				Nicht signifikant
$U_{\text{Rahmen}} * \text{Rahmen}_{\text{KS}}$	-0.017	0.007	-2.44	0.015
$\text{Rahmen}_{\text{gedämmt}}$				Nicht signifikant
$U_{\text{Rahmen}} * \text{Rahmen}_{\text{gedämmt}} * \text{Rahmen}_{\text{KS}}$	-0.044	0.013	-3.46	0.006
AnzGläser =3				Nicht signifikant
dB > 38	0.050	0.008	6.03	<0.0001
Montage	0.097	0.011	8.82	<0.0001
drehkipp	0.060	0.007	8.28	<0.0001
Anzahl Flügel	0.053	0.008	7.01	<0.0001
$\text{Log}_{10}$ (Menge)	-0.033	0.007	-5.06	<0.0001

Quelle Statistische Auswertung, CEPE

### Modellansatz 2 (Architekten- bzw. Energie- und andere Planer- bzw. Bauherren-Approach)

Bei diesem Ansatz werden die Fensterpreise nach weniger technischen Details bestimmt als im Ansatz 1. Anhand dieses Modells lassen sich aufgrund grober Anhaltspunkte zur gewünschten

Fensterqualität die Preise bestimmen. Nicht der Glas- und der Rahmen-U-Wert sind das Mass für die Fensterqualität, sondern der gesamte Fenster-U-Wert. Dazu muss selbstverständlich der Fenstertyp bekannt sein (Rahmenmaterial) sowie die Fenstergrösse, Anzahl Flügel, Verschlussmechanismus etc. Die Regressionsanalyse hat ausserdem gezeigt, dass die Tatsache, ob ein bestimmter Fenster-U-Wert mit konventionellem oder mit „gedämmtem“ Rahmen (Verbundmaterialien, andere Armierung bei Kunststofffenstern etc.) erreicht wird, einen Einfluss auf den Fensterpreis hat.

Bei der Interpretation der Resultate der statistischen Analyse gemäss Tabelle 4.3-19 ist der Gültigkeitsbereich des Modells zu beachten. Insbesondere kann nicht jeder Fenster-U-Wert ohne Rahmendämmung erreicht werden. Ab einem Fenster-U-Wert kleiner als gemäss Tabelle 4.3-18 findet also ein technologischer Wechsel statt und die Dummy-Variablen „Rahmen gedämmt“ sind auf 1 zu setzen.

Tabelle 4.3-18 Erreichbarer Fenster-U-Wert ( $W/m^2K$ ) mit heute erhältlicher sehr guter Verglasung (Glas-U-Wert= $0.5 W/m^2K$ )

Fensterfläche	Holz oder Holz-Metall			Kunststoff		
	1.7 m <sup>2</sup>	3 m <sup>2</sup>	5 m <sup>2</sup>	1.7 m <sup>2</sup>	3 m <sup>2</sup>	5 m <sup>2</sup>
Erreichbarer Fenster U-Wert bei Glas-U-Wert ( $0.5 W/m^2K$ )	1.0	0.8	0.7			



Tabelle 4.3-19 Übersicht über das statistische Regressionsmodell gemäss Ansatz 2

Erklärte Variable $\text{Log}_{10}$ (Fensterpreis)				
Freiheitsgrade	Modell: 15	Störterm: 717		
Bestimmtheitsmass	$R^2=0.849$	Adjusted $R^2 = 0.846$		
Modellstatistik		F-Statistik 269.08	p-Wert <0.0001	
Erklärende Variablen	Schätzer	Standardfehler	t-Statistik	p-Wert
C	2.977	0.029	103.8	<0.0001
$\text{Log}_{10}$ (Fensterfläche)	0.250	0.011	22.5	<0.0001
Fensterfläche < 0.7 m <sup>2</sup>	0.114	0.023	5.0	<0.0001
Fensterfläche > 6 m <sup>2</sup>	0.077	0.026	3.0	0.003
U-Wert Fenster	-0.253	0.016	-16.1	<0.0001
Rahmen gedämmt	0.032	0.008	3.9	<0.0001
$U\text{-Wert}_{\text{Fenster}} * \text{Rahmen}_{\text{Holz-Metall}}$	0.083	0.005	15.7	<0.0001
$U\text{-Wert}_{\text{Fenster}} * \text{Rahmen}_{\text{Kunststoff}}$	-0.020	0.010	-2.1	0.0383
$U\text{-Wert}_{\text{Fenster}} * \text{Rahmen}_{\text{Kunststoff}} * \text{Rahmen}_{\text{gedämmt}}$	-0.045	0.014	-3.2	0.0017
$U\text{-Wert}_{\text{Fenster}}^{-1} * \text{dB}_{38}$	0.054	0.010	5.7	<0.0001
Abstandhalter verbessert	0.675	0.312	2.2	0.0306
$\text{Log}_{10}$ (Menge)	-0.040	0.006	-6.6	<0.0001
Dreh-kipp (dummy)	0.044	0.007	6.4	<0.0001
Anzahl Flügel	0.067	0.006	10.8	<0.0001
Montage (dummy)	0.099	0.105	9.5	<0.0001
Absender=3	-0.056	0.011	-4.9	<0.0001

Quelle Statistische Auswertung: CEPE

Übersetzt auf die einzelnen Fenstertypen lässt sich also folgende Abhängigkeit des Fensterpreises vom Fenster-U-Wert feststellen (Tabelle 4.3-20/Tabelle 4.2-18).

Tabelle 4.3-20 Regressionskoeffizienten (Schätzer) für den Fenster-U-Wert und abgeleitete Preissteigerung bei einer Fenster-U-Wert-Verbesserung von 10% (zu beachten ist der Gültigkeitsbereich gemäss Tabelle 4.3-18).

		Regressionskoeffizienten für U-Wert <sub>Fenster</sub>		
		Holz	Holz-Metall	Kunststoff
	konv. Rahmen	-0.253	-0.170	-0.273
	gedämmte Rahmen	-0.222	-0.139	-0.318
Preissteigerung bei Fenster-U-Wert-Verbesserung um 10%		Holz	Holz-Metall	Kunststoff
ab einem U-Wert von 1.4 W/m <sup>2</sup> K	konv. Rahmen	8.5%	5.6%	9.2%
	gedämmte Rahmen	7.4%	4.6%	10.8%
ab einem U-Wert von 1.0 W/m <sup>2</sup> K	konv. Rahmen	6.0%	4.0%	6.5%
	gedämmte Rahmen	5.2%	3.2%	7.6%

Der Nachteil des Modellansatzes 2 ist, dass sich von einem Gesamtfenster-U-Wert nicht ohne weiteres auf die Glasqualität und damit auf den g-Wert schliessen lässt. Wie die nachfolgenden Grenzkostenberechnungen zeigen, hat dieser jedoch einen markanten Einfluss auf die Energiebilanz der Fenster und damit auf die spezifischen Grenzkosten.

Zwischen dem U-Wert<sub>Fenster</sub><sup>-1</sup> und der Variable Schalldämmmass  $\gt 38$  dB ist eine Interaktion festzustellen. Das führt zu einem dazu, dass das Kostenniveau der Schallschutzfenster rund 9% (energetische Referenzqualität, U<sub>w</sub> 0.9 W/m<sup>2</sup>K) bis 14% (U<sub>w</sub> 0.9 W/m<sup>2</sup>K) höher ist. Für die Fenster mit Schalldämmmass ab 38 dB ist also eine **stärkere** Kostensteigerung in Funktion der verbesserten energetischen Qualität (sinkender U-Wert) festzustellen. Bei einer Fenster-U-Wertverbesserung von 10% beträgt die Preissteigerung 9.6% statt 8.5% (ab einem Fenster-U-Wert von 1.4 W/m<sup>2</sup>K) bzw. 7.6 % statt 6.1 % ab einem Fenster-U-Wert von 0.9 W/m<sup>2</sup>K. Zwischen den beiden Zielen Energieeffizienz und Schallschutz zeigt sich also kein positiver Synergieeffekt. Dies bestätigen die Fenster- bzw. Glashersteller im Wesentlichen. Für einen weitergehenden Schallschutz sind schwerere und damit teurere Gläser einzusetzen; ein drittes Glas bringt gegenüber der Zweifachverglasung nur eine kleine schalltechnische Verbesserung (zB. 34 dB statt 32 dB). Allerdings ist hier festzuhalten, dass die Auswertungen die heutige Marktsituation reflektieren. Eine Verbesserung beider Ziele wird wenig nachgefragt (energetisch weitergehend wird vorwiegend an ruhigen Orten gebaut bzw. beim Einsatz von Schallschutzfenstern gibt man sich mit der gegenüber dem Ausgangszustand erreichten Verbesserung zufrieden) und dementsprechend ist dieses Angebotssegment auf der Herstellerseite nicht kostenoptimiert. Aus technischem Blickwinkel könnte nämlich ein gewisser Synergieeffekt relativ leicht ausgenützt werden: der Glasabstand zwischen den drei Gläsern ist asymmetrisch zu halten. Dies führt zu einer dB Verbesserung von ..... auf ..... dB und zu geringen Mehrkosten von schätzungsweise ..... CHF/m<sup>2</sup>.

#### e) Die Ergebnisse der Auswertung

Die in der Abbildung 4.3-33 angegebenen acht Datenpunkte für je eine gleiche Rahmenqualität (je parallel der durchgezogenen Linie) stehen für die Glas-U-Werte 1.1 W/m<sup>2</sup>K, 0.9 W/m<sup>2</sup>K, 0.7 W/m<sup>2</sup>K und 0.5 W/m<sup>2</sup>K. Die Datenpunkte einer gleichen Glasqualität (parallel der gestrichelten Linie) stehen für die unterschiedlichen Rahmen-U-Werte 1.5 W/m<sup>2</sup>K, 1.3 W/m<sup>2</sup>K, 1.1 W/m<sup>2</sup>K und 0.8 W/m<sup>2</sup>K, wobei die letzteren beiden als „gedämmt“ codiert sind.

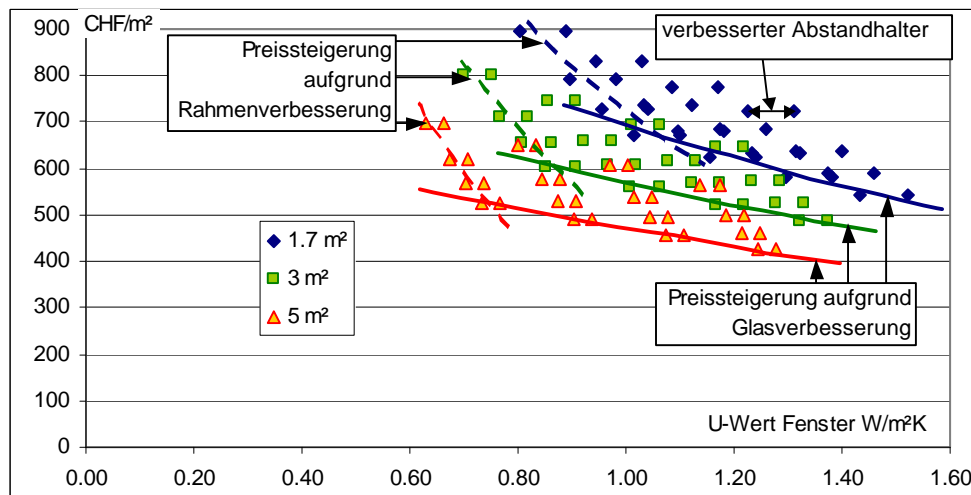


Abbildung 4.3-33 Fensterpreise für **Holz-Fenster** in Funktion des Fenster-U-Wertes für verschiedene energetische Rahmen- und Glasqualitäten, sowie für konventionelle und verbesserte Glasabstandhalter, Fläche 1.7 m<sup>2</sup>, 3 m<sup>2</sup> und 5 m<sup>2</sup>, Rahmenanteil 30%, 22% und 15%.

Der Rahmen-U-Wert von Holzfenstern kann verbessert werden, indem

- Der Rahmen dicker ausgestaltet wird, z.B. 68 mm oder 74 mm statt 54mm
- Eine besser dämmendes Material, z.B. eine Faserdämmplatte, aufgedoppelt wird
- Der Rahmen im Kern gedämmt wird, z.B. mit PU

Bei Rahmen-U-Werten, die tiefer sind als rund 1.3 W/m<sup>2</sup>K, wurde eine der obigen Massnahmen ergriffen. Die damit verbunden Mehrpreise sind graduell; es erfolgt KEIN Kostensprung bei einem bestimmten U-Wert. In diesen Modellansatz passen selbst Passivhausfenster mit Rahmen-U-Werten von 0.8 W/m<sup>2</sup>K.

Aus der Kenntnis der Daten heraus liegt die Vermutung nahe, dass die Preis- bzw. Kostensteigerung der Rahmenverbesserung der Holzfenster stark geprägt ist durch die Passivhausfenster. Dabei ist zu betonen, dass es sich dabei um Preise eines Pioniermarktes handelt, welcher ein sehr geringes Volumen aufweist. Die entsprechenden Fensterhersteller bestätigen denn auch im Gespräch, dass die Produktionsvolumina sehr gering sind und Fenster dieser Qualität beinahe in Einzelanfertigung hergestellt werden müssen. Da es sich meistens um kleinere bis mittlere Unternehmen handelt, sind diese nicht in der Lage, während einer gewissen Einführungsphase die Preise der Passivhausfenster mit dem Verkauf von konventionellen Fenstern querzufinanzieren, um den Preis tiefer zu halten, damit die Nachfrage zu stimulieren und damit dann die Kosten senken zu können. Eine Stimulierung der Nachfrage durch Verbreitung eines Labels wie Passivhaus- oder Minergie-P, ein Druck seitens der Norm und/oder eine zeitlich beschränkte Anschubfinanzierung könnte helfen, über den Mengendegressionseffekt die Kosten zu senken.

Tabelle 4.3-21 Fensterpreise und Fenster-U-Werte für verschiedene energetische Rahmen- und Glasqualitäten, Holzfenster, Fläche 1.7 m<sup>2</sup>, Rahmenanteil 30%.

	Rahmen 1.5		Rahmen 1.3		Rahmen 1.1		Rahmen 0.8	
	Fenster-U-Wert W/m <sup>2</sup> K	Preis Fr/m <sup>2</sup>	Fenster-U-Wert W/m <sup>2</sup> K	Preis Fr/m <sup>2</sup>	Fenster-U-Wert W/m <sup>2</sup> K	Preis Fr/m <sup>2</sup>	Fenster-U-Wert W/m <sup>2</sup> K	Preis Fr/m <sup>2</sup>
Glas-U-Wert 1.1	1.52	543	1.46	589	1.39	639	1.29	722
0.9	1.36	583	1.29	633	1.23	686	1.13	776
0.7	1.20	626	1.13	680	1.06	737	0.97	833
0.5	1.04	673	0.97	730	0.90	792	0.80	894

Quelle Auswertung Fenstererhebung CEPE

Eine Verbesserung des Glas-U-Wertes von 1.1 W/m<sup>2</sup>K auf 0.5 W/m<sup>2</sup>K ist bei der für den Gebäudebestand typischen Grösse von 1.7 m<sup>2</sup> mit Mehrkosten von rund 25% bzw. 130 CHF/m<sup>2</sup> Fenster verbunden, siehe Tabelle 4.3-21 (100 CHF/m<sup>2</sup> Fenster bei grossflächigen Fenstern, siehe Tabelle 4.3-23). Damit lässt sich bei den kleinflächigen Fenstern eine Fenster-U-Wert-Verbesserung von 0.42 W/m<sup>2</sup>K, von 1.52 W/m<sup>2</sup>K auf 1.1 W/m<sup>2</sup>K, erreichen, bei den grössten Flächen eine solche von 1.28 W/m<sup>2</sup>K auf 0.74 W/m<sup>2</sup>K, also eine Verbesserung von 0.54 W/m<sup>2</sup>K. Eine Verbesserung der Rahmen von 1.5 W/m<sup>2</sup>K (heutiger Standard) auf 0.8 W/m<sup>2</sup>K (passivhausähnlich) verursacht Mehrkosten von rund 33%, was 180 CHF/m<sup>2</sup><sub>Fenster</sub> bei kleinflächigen und 140 CHF/m<sup>2</sup><sub>Fenster</sub> bei grossflächigen Fenstern bedeutet. Bei kleinflächigen Fenstern ist damit eine Fenster-U-Wert-Verbesserung von 0.33 W/m<sup>2</sup>K und bei grossflächigen eine solche von 0.17 W/m<sup>2</sup>K verbunden. Die kombinierte Verbesserung von Rahmen und Gläsern vom Referenzfenster hin zum Passivhausfenster ist mit Mehrkosten von rund zwei Dritteln verbunden. An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass es sich bei den Rahmenverbesserungen und den Passivhausfenstern um Werte eines sich erst bildenden Marktes und von sehr kleinen Produktionsserien handelt.

Es sei an dieser Stelle auch darauf hingewiesen, dass aus diesen Kostenbetrachtungen keine direkten Schlüsse auf die Kosteneffizienz der Energieeffizienz durch Fensterqualitätsverbesserung gezogen werden dürfen, denn für die Beurteilung der Energieeffizienz ist der g-Wert und die Einbausituation (Orientierung, Verschattung) mit zu berücksichtigen.

Tabelle 4.3-22 Fensterpreise und Fenster-U-Werte für verschiedene energetische Rahmen- und Glasqualitäten, Holzfenster, Fläche 3.5 m<sup>2</sup>, Rahmenanteil 22%.

	Rahmen 1.5		Rahmen 1.3		Rahmen 1.1		Rahmen 0.8	
	Fenster-U-Wert W/m <sup>2</sup> K	Preis Fr/m <sup>2</sup>	Fenster-U-Wert W/m <sup>2</sup> K	Preis Fr/m <sup>2</sup>	Fenster-U-Wert W/m <sup>2</sup> K	Preis Fr/m <sup>2</sup>	Fenster-U-Wert W/m <sup>2</sup> K	Preis Fr/m <sup>2</sup>
Glas-U-Wert 1.1	1.36	475	1.31	515	1.26	559	1.19	632
0.9	1.19	510	1.14	554	1.09	600	1.02	678
0.7	1.02	548	0.97	594	0.93	645	0.86	728
0.5	0.85	588	0.81	638	0.76	692	0.69	782

Quelle Auswertung Fenstererhebung CEPE

Der Vergleich von Tabelle 4.3-22 und Tabelle 4.3-23 mit Tabelle 4.3-21 verdeutlicht einen ausgeprägten Grössendegressionseffekt (obgleich ein Teil der Kostendegression aufgrund der geringeren Rahmenanteile zustande kommt). Das Fenster des energetischen Referenzfalles ist grossflächig (5 m<sup>2</sup>) um rund 120 CHF/m<sup>2</sup> kostengünstiger als bei der kleinflächigen Variante und ausserdem ist der Gesamtfenster-U-Wert beim grossflächigen Fenster tiefer. Und ein Fenster mit einem Gesamt-U-Wert von z.B. 0.89 W/m<sup>2</sup>K kostet bei der kleinflächigen Variante rund 890 CHF/m<sup>2</sup> (Rahmen 0.8, Glas 0.5) und bei der grossflächigen nur 700 CHF/m<sup>2</sup> (Rahmen 1.3 W/m<sup>2</sup>K, Glas 0.7 W/m<sup>2</sup>K) und dies bei höherem g-Wert und höherem Glasanteil.

Tabelle 4.3-23 Fensterpreise und Fenster-U-Werte für verschiedene energetische Rahmen- und Glasqualitäten, Holzfenster, Fläche 5 m<sup>2</sup>, Rahmenanteil 15%.

	Rahmen 1.5		Rahmen 1.3		Rahmen 1.1		Rahmen 0.8	
	Fenster-U-Wert W/m <sup>2</sup> K	Preis Fr/m <sup>2</sup>	Fenster-U-Wert W/m <sup>2</sup> K	Preis Fr/m <sup>2</sup>	Fenster-U-Wert W/m <sup>2</sup> K	Preis Fr/m <sup>2</sup>	Fenster-U-Wert W/m <sup>2</sup> K	Preis Fr/m <sup>2</sup>
Glas-U-Wert 1.1	1.28	425	1.25	461	1.21	500	1.16	564
0.9	1.10	456	1.07	495	1.03	536	0.99	606
0.7	0.92	490	0.89	531	0.86	576	0.81	651
0.5	0.74	526	0.71	570	0.68	618	0.63	699

Quelle Auswertung Fenstererhebung CEPE

In Abbildung 4.3-34 kommen für die Fenster mit Kunststoffrahmen die gleichen Glas-U-Werte zur Anwendung, während die Datenpunkte einer je gleichen Glasqualität (je parallel der gestrichelten Linie) für die unterschiedlichen Rahmen-U-Werte 1.6 W/m<sup>2</sup>K, 1.5 W/m<sup>2</sup>K, 1.2 W/m<sup>2</sup>K und 1.1 W/m<sup>2</sup>K, wobei die letzteren beiden als „gedämmt“ codiert sind.

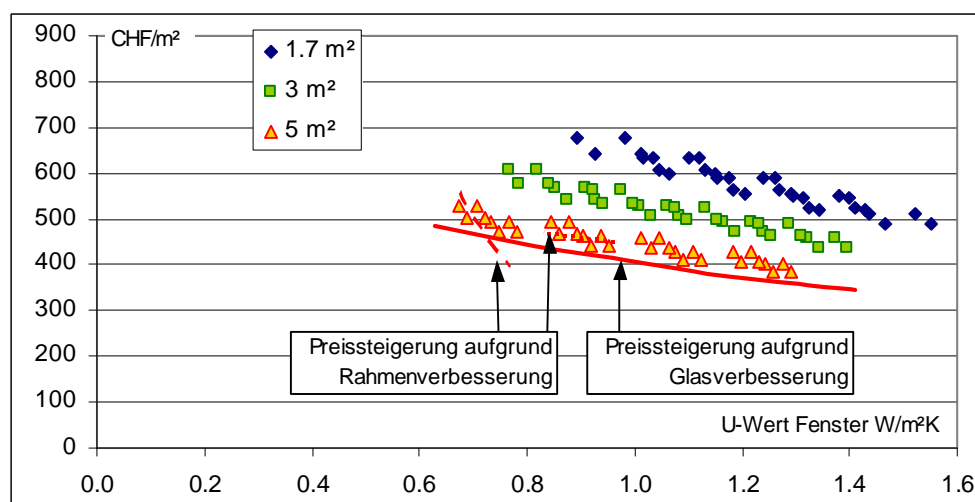


Abbildung 4.3-34 Fensterpreise für **Kunststoff**-Fenster in Funktion des Fenster-U-Wertes für verschiedene energetische Rahmen- und Glasqualitäten, sowie für konventionelle und verbesserte Glasabstandshalter, Fläche 1.7 m<sup>2</sup>, 3 m<sup>2</sup> und 5 m<sup>2</sup>, Rahmenanteil 30%, 22% und 15%.

Beim Wechsel von zwei (tiefster möglicher U-Wert ca. 1.0. evtl. 0.9) auf drei Gläser (U-Werte von 0.7 bzw. 0.5) ist weder bei den Holz- noch den Kunststoffenstern ein **Kostensprung** festzustellen, sondern nur eine graduelle, kontinuierliche Kostensteigerung. Das heisst, die Mehrpreise folgen für zwei bzw. drei Gläser dem gleichen numerischen Zusammenhang.

Man erkennt, dass bei den Holzfenstern die Steigung bei der Verbesserung des Glas-U-Wertes weniger steil ist als bei der Verbesserung des Rahmen-U-Wertes. Bei den Kunststoffenstern ist dies im Durchschnitt der möglichen Rahmenverbesserungen weniger ausgeprägt der Fall. Mit speziell „gedämmten“ Rahmen (gepunktete Linie in Abbildung 4.3-34) ist eine Verbesserung des Fenster-U-Wertes nicht steiler als die der Glasverbesserung (durchgezogene Linie). Bei den Kunststoffenstern ist der erreichte (tiefste) U-Wert des Rahmens allerdings höher als bei den Holzfenstern. Dies erklärt zum einen, dass die Preissteigerung aufgrund der Rahmenverbesserung bei den KS-Fenstern leicht geringer ist, denn die letzte Herausforderung, nämlich die Erfüllung der Passivhausanforderung ist noch nicht in den Daten enthalten. Zum anderen bewirkt dies besonders bei den kleinen Fenstern, dass bei den Kunststoffenstern ein nicht gleich tiefer Gesamtfenster-U-Wert erreichbar ist, wobei insbesondere die Passivhausanforderung bei der kleinen Fläche nur knapp erreicht werden kann.

## Modellansatz 2

Beim Modellansatz 2 lassen sich die Effekte der Glas- und der Rahmenverbesserung nicht mehr so gut trennen wie im Ansatz 1. Wie im Ansatz 1 lässt sich ein bestimmter Gesamtfenster-U-Wert durch unterschiedliche Möglichkeiten erreichen (Glasverbesserung, mit konventionellem oder verbessertem Glasabstandhalter, Rahmenverbesserung, graduell oder gedämmt), was sich in einer entsprechenden Streuung bei den Kosten ausdrückt.

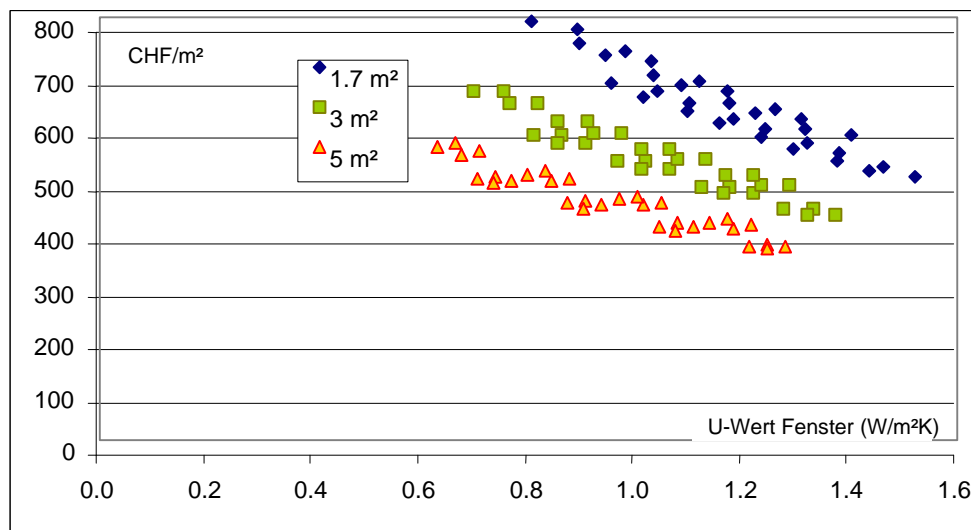


Abbildung 4.3-35 Fensterpreise für **Holzfenster** in Funktion des Fenster-U-Wertes für „gedämmte“ und konventionelle Rahmen, Fensterfläche 1.7 m<sup>2</sup>, 3 m<sup>2</sup> und 5 m<sup>2</sup>, Rahmenanteil 30%, 22% und 15%.

Das allgemeine Preis- bzw. Kostenniveau ist bei den Holzfenstern (Abbildung 4.3-35) höher als bei den Kunststoffenstern (Abbildung 4.3-36) und auch die Preissteigerung in Funktion des abnehmenden Gesamtfenster-U-Wertes ist bei den Holzfenstern etwas ausgeprägter. Ausserdem scheint sich bei den Kunststoffenstern eine Verbesserung der Rahmen nicht in allen Fällen negativ auf die Kosten-/Energieeffizienz auszudrücken.

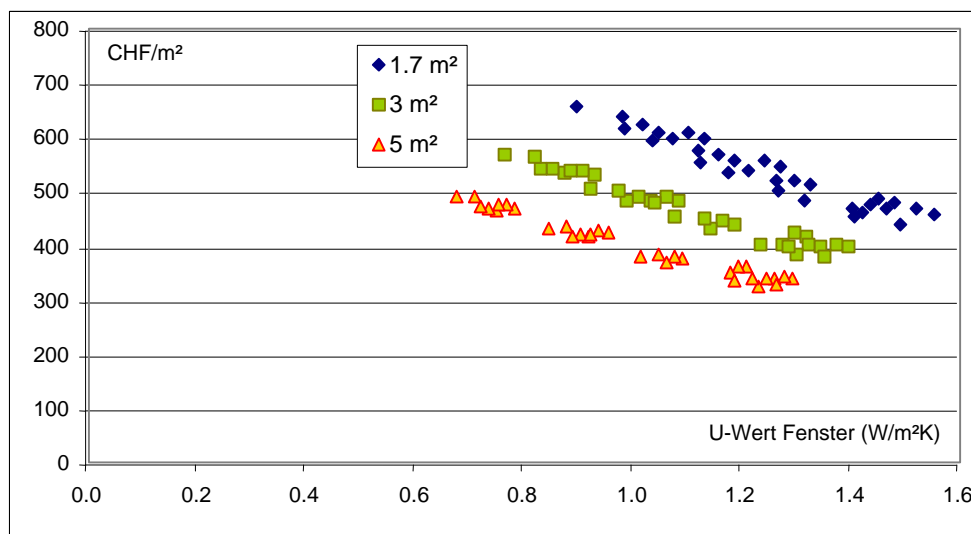


Abbildung 4.3-36 Fensterpreise für Kunststofffenster in Funktion des Fenster-U-Wertes für konventionelle und „gedämmte“ Rahmen, Fensterfläche 1.7 m<sup>2</sup>, 3 m<sup>2</sup> und 5 m<sup>2</sup>, Rahmenanteil 30%, 22% und 15%.

### Vergleich Modellansatz 1 und 2, Fazit

Beide Modellansätze sind statistisch hoch signifikant. Aufgrund der unterschiedlichen funktionalen Form ergeben sich zwangsweise auch Unterschiede bei der Anwendung der Modellergebnisse. Insgesamt kann jedoch von einer guten Übereinstimmung gesprochen werden, insbesondere beim Kunststofffenster. Beim Holzfenster ist das allgemeine Preis- bzw. Kostenniveau generell etwas höher. Im folgenden gelangt der Modellansatz 1 zur Anwendung, weil dieser den Vorteil hat, dass das Fenster technisch besser beschrieben werden kann und sich damit besser für den Grenzkostenansatz eignet.

Bei beiden Modellansätzen lässt sich sowohl bei den Holz- wie bei den Kunststofffenstern ein ausgeprägter Grössendegressionseffekt feststellen. Grossflächigere Fenster weisen bei gleichen Rahmen und Glasqualitäten aufgrund der geometrischen Verhältnisse und des im allgemeinen tieferen Glas-U-Wertes einen tieferen Gesamtfenster-U-Wert auf. Beim Neubau besteht damit ein Kosten- und Energieoptimierungspotential durch das Zusammenlegen der geplanten Fensterflächen zu grossflächigeren, aber weniger Fenstern (bei gleicher Gesamtfensterfläche). Die Erhöhung der Fensterflächenanteile (was wiederum die Chance für grösserflächige und damit energetisch verbesserte und kostengünstigere Fenster erhöht) ist jedoch erst im Gesamtgebäudekontext zu beurteilen, siehe dazu die Betrachtungen zur Energiebilanz und zu den Grenzkostenberechnungen.

### Kosten bei der Gebäudeerneuerung

Die oben beschriebene Analyse bezieht sich auf das Preis- bzw. Kostenverhältnis für den Neubau. Bei der Gebäudeerneuerung gelten in etwa die selben Preise. Hingegen kommen Kosten für den Demontage und die Entsorgung der alten Fenster hinzu. Diese spielen bei der Grenzkostenbetrachtung „Was kostet der Energieeffizienzgewinn durch den Einbau eines gegenüber dem Standard verbesserten Fensters“ keine Rolle, hingegen bei der Fragestellung „Was kostet der Energieeffizienzgewinn eines Austausches des alten Fensters durch ein neues. [Die Kosten zu Demontage und Entsorgung folgen].“

### Fensterpreis bei Fenstern mit verbessertem g-Wert

Die oben beschriebene Analyse basiert auf Fenstern mit Gläsern, die bzgl. Glas-U-Wert und g-Wert alle ungefähr gleich sind; ein U-Wert von 1.1 W/m<sup>2</sup>K bedeutet üblicherweise einen g-Wert von 0.57, ein Glas-U-Wert von 0.7 W/m<sup>2</sup>K einen g-Wert von 0.52 und ein solcher von 0.5 W/m<sup>2</sup>K einen von 0.42. Soll der g-Wert demgegenüber verbessert werden, ist mit Mehrkosten für die Verglasung gemäss Kapitel 4.3.6 zu rechnen. Direkte Erhebungen bei Fensterherstellern bzgl. der Auswirkungen dieser Mehrkosten auf den Fensterpreis wurden keine durchgeführt. Wir schätzen, dass sich die Mehrkosten der Verglasung mit einer Preissteigerung von ca. 30% auf den Fensterpreis übertragen lassen. Annahme: plus 30 CHF/m<sup>2</sup> für eine Verbesserung des g-Wertes von 0.42 auf 0.5 bei der Dreifach-WS-Verglasung mit U-Wert 0.5 W/m<sup>2</sup>K (bei grossflächigen Fenstern und 23 CHF/m<sup>2</sup>).

### f) Die Anwendung der Auswertungsergebnisse im Grenzkostenprojekt

Im Bereich der Fenster gibt es verschiedene Möglichkeiten, die Energieeffizienz zu verbessern, wobei einige dieser Möglichkeiten nur für den Neubau im Vordergrund stehen, andere für Neubau und Gebäudeerneuerungen, siehe die diesbezüglichen Fallunterscheidungen gemäss Tabelle 4.3-24.

Tabelle 4.3-24 Fallunterscheidungen bei der Grenzkostenbetrachtung im Fensterbereich

Fall		Bedeutung für	
		Neubau	Erneuerung
1	Verbesserung der energetischen Fensterqualität (je nach Orientierung: tieferer Fenster-U-Wert, Erhöhung des g-Wertes)	hoch	hoch
2	Verbesserung der energetischen Fensterqualität bei gleichzeitigem Einsatz grösserflächiger Fenster (geringerer Fenster-U-Wert, höherer Glasanteil, tiefere spezifische Kosten)	Sehr attraktiv, sofern architektonisch o.k.	Nicht zutreffend
3	Erhöhung der Fensterflächenanteile bei gleichbleibender energetischer Fensterqualität	nach Süden	gering
4	Erhöhung der Fensterflächen und gleichzeitige Verbesserung der energetischen Fensterqualität	v.a. nach Süden	gering
5	Verlagerung der Fensterflächen gegen Süden (von Ost/West/Nord) bzw. gegen Ost/West (von Nord)	hoch, wenn architektonisch o.k.	Nicht zutreffend

Die Fälle 2 bis 5 bieten beim Neubau die Möglichkeiten, die Kosten und damit die Grenzkosten zu optimieren: Indem die Flächenmasse der einzelnen Fenster vergrössert und die Anzahl der Fenster verkleinert wird (bei gleichbleibender Gesamtfläche), fallen aufgrund des Skaleneffekts geringere Zusatzkosten an und gleichzeitig wird als Nebeneffekt die Energieeffizienz nochmals verbessert (weil der Rahmenanteil von grossen Fenstern kleiner ist als bei kleinen Fenstern, siehe Abbildung 4.3-26).

Die Fälle 2 bis 5 sind vor allem für den Neubau relevant. Die entsprechenden Massnahmen können bei unterschiedlichsten Voraussetzungen (energetische Wandqualität, energetisches Gewinn-/Verlustverhältnis im Gebäude) ergriffen werden. Es muss an dieser Stelle betont werden, dass nicht alle möglichen Massnahmenkombinationen berechnet werden können und müssen. Es handelt sich bei den folgenden Rechnungen vielmehr um ein exploratives Vorgehen, um die kosteneffizienten architektonischen und planerischen Möglichkeiten der Energieeffizienzverbesserung zu eruieren. Mithilfe dieses Vorwissens und mit den im Bericht dargestellten Kostenelementen können dann verschiedene architektonische Konzepte durch-



gerechnet werden. Dabei können auch verschiedene Referenzfälle zur Anwendung kommen, denn je nach Ausgangslage können die Grenzkosten der Energieeffizienz unterschiedlich ausfallen.

Tabelle 4.3-25 Annahmen zu den Kosten für Fenster (inkl. Montage) unterschiedlicher energetischer Qualität für die Grenzkostenberechnungen in diesem Kapitel

	U-Wert Fenster (W/m <sup>2</sup> K)		Kosten (CHF/m <sup>2</sup> )	
	kleinflächig	grossflächig	kleinflächig	grossflächig
Referenzfenster (Rahmen 1.5, Glas 1.1) g=0.57	1.52	1.28	543	425
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.7) g=0.52	1.24	0.94	626	490
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.42	1.10	0.77	673	526
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.5	1.10	0.77	703	549
Rahmen 0.8, Glas 1.1 g=0.57	1.31	1.17	722	564
Rahmen 0.8, Glas 0.7 g=0.52	1.03	0.83	833	651
Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.42	0.80	0.66	894	699
Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.5	0.80	0.66	924	722

### Fall 1 Verbesserung der energetischen Fensterqualität

In diesem ersten Fall werden die Kosten und Nutzen der Verbesserung der energetischen Fensterqualität gegenüber dem Referenzfenster betrachtet. Die Mehrkosten der verschiedenen Fensterqualitäten gegenüber dem Referenzfenster (Rahmen 1.5, U-Wert 1.1, g-Wert 0.57) werden dem energetischen Effizienzgewinn gegenüber gestellt. Dabei wird bei den energetischen Berechnungen davon ausgegangen, dass die Fensterqualität für alle vier Orientierungen jeweils gleich ist. Die Berechnungen werden sowohl für eher klein- als auch für grossflächige Fenster gemacht.

Es fällt auf, dass die Grenzkosten bei denjenigen Ausgangslagen tiefer liegen, bei denen die Beschattung höher ist (siehe Tabelle 4.3-26 und Tabelle 4.3-27), vor allem bei der Südorientierung. Weiter fällt auf, dass die Grenzkosten je tiefer liegen, je weniger die Orientierung gegen Süden liegt und je mehr gegen Norden. Das bedeutet, dass in diesen Fällen der Energie-Effizienzgewinn kosteneffizienter realisiert werden kann als bei besonnter Ausgangslage (es bedeutet natürlich nicht, dass die Fenster beschattet werden oder nach Norden ausgerichtet werden sollen; verglichen wird nur innerhalb derselben Ausgangslage! Das erste Ziel, das ausserdem am kosteneffizientesten wenn nicht kostenlos zu realisieren ist, sofern es denn aus der Situation heraus möglich ist, muss natürlich eine im Winter möglichst beschattungsfreie Situation sein und möglichst viel Fensterflächen gegen Süden bzw. Westen und Osten, siehe dazu die Überlegungen zu den Energiebilanzen, z.B. Tabelle 4.2-18). Der „Preis“ eines tieferen g-Wertes, der bei verbessertem U-Wert zu bezahlen ist, ist also in Südlage zu gross.

Ausserdem ist festzustellen, dass die Grenzkosten der Rahmenverbesserung höher liegen als diejenigen der Gläserverbesserung.

Tabelle 4.3-26 Grenzkosten (CHF/kWh<sub>NE</sub>) der Verbesserung der energetischen Fensterqualität von Holzfenstern, eher kleine Fenstermasse (1.7 m<sup>2</sup>), Rahmenanteil 30%, Realzins 3.5%, Lebensdauer 30 Jahre

U <sub>w</sub> W/m <sup>2</sup> K		Ausgangslage: Beschattung 0.9				Ausgangslage: Beschattung 0.7			
		Süd	Ost	West	Nord	Süd	Ost	West	Nord
1.52	<b>Referenzfenster (Rahmen 1.5, Glas 1.1) g=0.57</b>								
1.24	<b>Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.7) g=0.52</b>	0.42	0.27	0.27	0.22	0.33	0.24	0.25	0.21
1.10	<b>Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.42</b>	NA	0.49	0.54	0.27	1.53	0.37	0.40	0.25
1.10	Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.5	0.50	0.33	0.34	0.27	0.40	0.31	0.31	0.26
1.31	Rahmen 0.8, Glas 1.1 g=0.57	0.55	0.54	0.54	0.53	0.54	0.53	0.53	0.53
1.03	Rahmen 0.8, Glas 0.7 g=0.52	0.55	0.45	0.46	0.40	0.50	0.43	0.43	0.39
0.8	Passivhaus* (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.42	0.86	0.47	0.49	0.36	0.62	0.42	0.43	0.35
0.8	Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.5	0.48	0.40	0.40	0.36	0.44	0.38	0.38	0.35
		Ausgangslage: Beschattung 0.5				Ausgangslage: Beschattung 0.3			
1.24	<b>Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.7) g=0.52</b>	0.27	0.22	0.23	0.20	0.23	0.20	0.21	0.19
1.10	<b>Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.42</b>	0.53	0.30	0.31	0.23	0.31	0.24	0.25	0.21
1.10	Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.5	0.34	0.28	0.29	0.25	0.29	0.26	0.26	0.25
1.31	Rahmen 0.8, Glas 1.1 g=0.57	0.53	0.53	0.53	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52
1.03	Rahmen 0.8, Glas 0.7 g=0.52	0.45	0.41	0.41	0.38	0.41	0.39	0.39	0.37
0.8	Passivhaus* (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.42	0.48	0.38	0.39	0.33	0.39	0.34	0.35	0.32
0.8	Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.5	0.40	0.36	0.36	0.34	0.36	0.35	0.35	0.33

Quelle Erhebungen, Auswertungen und Grenzkostenberechnungen: CEPE

Dieselben Grenzkostenberechnungen lassen sich für Fenster mit grösserflächigen Fenstern Massen realisieren. Weil bei diesen das absolute Kostenniveau markant tiefer ist (um 22% bei tieferem Gesamt-Fenster-U-Wert, vgl. Tabelle 4.3-21 und Tabelle 4.3-23), sind es im gleichen Mass auch die Grenzkosten. Gleichzeitig nimmt auch der Rahmenanteil ab. Das verbessert die Energiebilanz (vergleiche Tabelle 4.2-18 mit Tabelle 4.2-17). Weil sich jedoch die Energiebilanz für das Referenzfenster am meisten verbessert (der hohe Rahmen-U-Wert tritt beim grossflächigen in den Hintergrund), ist der Effizienzgewinn der effizienteren Fenster kleiner, so dass die Grenzkosten nicht ganz so stark sinken wie die Kosten der Fenster. Bemerkung: bei diesem Vergleich werden Fenster mit dem jeweils gleichen Mass verglichen (Referenz- und Effizienzfenster); der Effekt des Wechsels von kleineren zu grösseren und damit kostengünstigeren Massen wird bei Fall 3 aufgezeigt.

Dieselben Berechnungen lassen sich für MFH mit höherem Zinssatz machen, siehe dazu den Anhang (to be done); die Grenzkosten steigen proportional zur Annuität um 27%.

Fazit: die Resultate in Tabelle 4.3-26 und Tabelle 4.3-27 erlauben es prinzipiell, die Wahl der Fensterqualität ökonomisch zu optimieren, indem die Grenzkosten untereinander und im Vergleich zu den übrigen Bauteilen möglichst angeglichen werden. Dazu können folgende weiteren inhaltlichen Fazits gezogen werden:

- Die Energieeffizienz lässt sich bei grossen Fenstern weit kosteneffizienter verbessern
- Die Energieeffizienz ist in Südlage, gleichbleibende Fensterflächen vorausgesetzt, nur mit relativ hohen Grenzkosten zu verbessern. Als kritisch erweist sich insbesondere das dreifach verglaste Fenster mit dem tieferen U-Wert ( $0.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) und dem tiefen g-Wert von 0.42, der heutige Standard ist für diese Verglasungsqualität
- Die Grenzkosten sind bei der Nordorientierung am tiefsten. Es lohnt sich dort als sehr, die Fensterqualität zu verbessern, gerade auch im Vergleich zu anderen Bauteilen.
- Ebenfalls vergleichsweise tief sind die Grenzkosten bei verschatteten Lagen, besonders bei Ost- und Westorientierungen (bei Nordorientierungen spielt die Verschattung einen geringen Einfluss).

Die selben Grenzkostenberechnungen lassen sich auch für die Kunststoffenster machen. Da bei diesen die Kostensteigerung in Funktion des tieferen Fenster-U-Wertes etwas geringer ist, gilt dies auch für die Grenzkosten. [Eine Berechnung im Anhang folgt].

Tabelle 4.3-27 Grenzkosten ( $\text{CHF/kWh}_{\text{NE}}$ ) der Verbesserung der energetischen Fensterqualität von Holzfenstern, **grossflächige Fenster ( $5 \text{ m}^2$ )**, Rahmenanteil 15%, Realzins 3.5%, Lebensdauer 30 Jahre

$U_w$ $\text{W/m}^2\text{K}$		Ausgangslage: Beschattungsfaktor 0.9				Ausgangslage: Beschattungsfaktor 0.7			
		Süd	Ost	West	Nord	Süd	Ost	West	Nord
1.28	<b>Referenzfenster (Rahmen 1.5, Glas 1.1) <math>g=0.57</math></b>								
0.94	<b>Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.7) <math>g=0.52</math></b>	0.28	0.18	0.18	0.14	0.22	0.16	0.16	0.13
0.77	<b>Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) <math>g=0.42</math></b>	2.25	0.26	0.28	0.16	0.61	0.22	0.23	0.16
0.77	Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) $g=0.5$	0.35	0.22	0.23	0.18	0.27	0.20	0.20	0.17
1.17	Rahmen 0.8, Glas 1.1 $g=0.57$	1.07	0.94	0.95	0.87	0.95	0.88	0.89	0.84
0.83	Rahmen 0.8, Glas 0.7 $g=0.52$	0.64	0.44	0.45	0.36	0.52	0.40	0.41	0.35
0.66	Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) $g=0.42$	1.51	0.51	0.53	0.35	0.87	0.45	0.46	0.34
0.66	Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) $g=0.5$	0.61	0.42	0.43	0.35	0.50	0.38	0.39	0.33
		Ausgangslage: Beschattungsfaktor 0.5				Ausgangslage: Beschattungsfaktor 0.3			
0.94	<b>Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.7) <math>g=0.52</math></b>	0.18	0.15	0.15	0.13	0.15	0.13	0.13	0.12
0.77	<b>Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) <math>g=0.42</math></b>	0.32	0.19	0.19	0.15	0.20	0.16	0.16	0.14
0.77	Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) $g=0.5$	0.22	0.18	0.19	0.16	0.19	0.17	0.17	0.16
1.17	Rahmen 0.8, Glas 1.1 $g=0.57$	0.87	0.84	0.85	0.83	0.83	0.82	0.82	0.82
0.83	Rahmen 0.8, Glas 0.7 $g=0.52$	0.43	0.37	0.37	0.34	0.37	0.34	0.34	0.33
0.66	Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) $g=0.42$	0.57	0.39	0.40	0.32	0.40	0.33	0.34	0.30
0.66	Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) $g=0.5$	0.41	0.35	0.36	0.32	0.36	0.33	0.33	0.31

Quelle Erhebungen, Auswertungen und Grenzkostenberechnungen: CEPE

Bei der **Gebäudeerneuerung** sind bei der Grenzkostenbetrachtung die drei Fälle gemäss Tabelle 4.3-28 zu unterscheiden.

Tabelle 4.3-28 Fallunterscheidung bei der Fenster-Grenzkostenbetrachtung bei der Gebäudeerneuerung

Fall	Referenz	Weitergehende Energieeffizienz
E	Erneuerung = Ersatz des alten Fensters durch ein Fenster der Referenzqualität ( $U_{\text{Rahmen}}=1.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ , $U_{\text{Glas}}=1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$ )	Ersatz des alten Fensters durch ein Fenster mit gegenüber dem <b>Referenzfenster</b> verbesserten energetischen Kennwerten
IS	Instandsetzung = Ersatz des alten Fensters durch ein Fenster der gleichen Qualität ( $U_{\text{Rahmen}}=1.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ , $U_{\text{Glas}}=1.6 \text{ bis } 3.0 \text{ W/m}^2\text{K}$ , je nach Fensterzustand oder sonstige lebensdauerverlängernde Massnahmen	Ersatz des alten Fensters durch ein Fenster mit gegenüber dem <b>alten Fenster</b> verbesserten energetischen Kennwerten (u.a. durch ein heutiges Standardfenster) oder andere Effizienzmassnahmen (siehe Erb, 2001)
IH	Instandhaltung (Farbanstrich)	Wie beim Fall IS

Quelle CEPE

Im **Fall IH** ist der Referenzfall hingegen ein Belassen des Fensters im alten Zustand oder nur ein Unterhalt (=Instandhaltung). In diesem Fall sind bei den Mehrkosten die Kosten für Demontage und Entsorgung mitzurechnen, denn diese fallen bei der Instandhaltung nicht an. Für die Kosten der Instandhaltung kann auf die Untersuchung von Eicher + Pauli (Erb, 2001) zurückgegriffen werden. [Berechnungen für diesen Fall folgen].

Bei der Energieeffizienzwirkung der oben genannten Massnahmen ist für die Fälle **IS** und **IH** zu berücksichtigen, dass nebst der Reduktion der Transmissionsverluste eine Reduktion der Lüftungsverluste erfolgt. Im Ausgangszustand (Fenster<sub>alt</sub>) betragen die Lüftungsverluste bei einer Einfachverglasung (EV)  $700 \text{ MJ/m}^2_{\text{Fea}}$  und bei einer Doppelverglasung (DV) rund  $400 \text{ MJ/m}^2_{\text{Fea}}$  (Erb, 2001). Beim Ersatz dieser Fenstertypen wird der Lüftungsverlust auf ca.  **$200 \text{ MJ/m}^2_{\text{Fea}}$  bis  $300 \text{ MJ/m}^2_{\text{Fea}}$**  reduziert. Damit ergibt sich für die EV ein Effizienzgewinn von  $400 \text{ MJ/m}^2_{\text{Fea}}$  bis  $500 \text{ MJ/m}^2_{\text{Fea}}$  und bei den DV ein solcher von  $100 \text{ MJ/m}^2_{\text{Fea}}$  bis  $200 \text{ MJ/m}^2_{\text{Fea}}$ . Bei einem typischen Verhältnis  $A_{\text{Fe}}/\text{EBF}$  von **0.15** ergibt sich damit eine Reduktion des spezifischen Heizwärmebedarfs von  $60 \text{ MJ/m}^2_{\text{EBFa}}$  bis  $75 \text{ MJ/m}^2_{\text{EBFa}}$  (EV) bzw. von  $15 \text{ MJ/m}^2_{\text{EBFa}}$  bis  $30 \text{ MJ/m}^2_{\text{EBFa}}$  (DV). Dies ist in etwa kohärent zur Tabelle 4.2-10, wo der Lüftungsanteil des Heizwärmebedarfs für verschiedene Fälle aufgelistet ist.

Im Fall E ist der Effekt der Lüftungsverlustreduktion bereits Bestandteil des Referenzfalls.

## Fall 2 Verbesserung der energetischen Fensterqualität bei gleichzeitigem Einsatz grösserflächiger Fenster

Aufgrund der festgestellten Kostendegression der grösseren Fensterfläche und wegen der besseren Gesamtenergieeffizienz eines grossen Fensters verglichen mit einem kleinen (bei gleichen Glas- und Rahmen-U-Werten), interessiert im folgenden die Frage, welche Grenzkosten die Fensterverbesserung aufweist, wenn gleichzeitig die gegebene Fensterfläche mittels grösserflächiger Fenster realisiert wird.

Tabelle 4.3-29 Grenzkosten (CHF/kWh<sub>NE</sub>) der Verbesserung der energetischen Fensterqualität von Holzfenstern bei gleichzeitigem Wechsel von klein- (1.7 m<sup>2</sup>) zu grossflächigen Fenstern (5 m<sup>2</sup>), Realzins 3.5%, Lebensdauer 30 Jahre

U <sub>w</sub> W/m <sup>2</sup> K	Ausgangslage: Beschattung 0.9				Ausgangslage: Beschattung 0.3			
	Süd	Ost	West	Nord	Süd	Ost	West	Nord
1.52	<b>Referenzfenster, kleine Fläche (Rahmen 1.5, Glas 1.1) g=0.57</b>							
1.28	<b>Zweifachglas, grosse Fläche (U<sub>rahmen</sub> 1.5, Glas 1.1)</b>							
0.94	<b>Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.7) g=0.52</b>							
0.77	<b>Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.42</b>							
0.77	Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.5							
1.17	Rahmen 0.8, Glas 1.1 g=0.57							
0.83	Rahmen 0.8, Glas 0.7 g=0.52							
0.66	Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.42							
0.66	Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.5							

Quelle Erhebungen, Auswertungen und Grenzkostenberechnungen: CEPE

Negative Werte in Tabelle 4.2-25 bedeuten einen wirtschaftlichen Gewinn, denn beim Wechsel von kleinflächigen zu grossflächigen Fenstern sinken einerseits die Kosten der Fenster und andererseits wird ein Energieeffizienzgewinn erzielt, weil der Gesamtfenster-U-Wert zurückgeht und der Glasanteil und damit die solaren Gewinne steigen. Diese Massnahme ist selbstredend nur für den Neubau anwendbar und hat natürlich architektonische Beschränkungen. Es bietet sich hier aber für den Architektinnen und Architekten eine Möglichkeit, Kosten zu sparen und gleichzeitig energieeffizienter zu bauen.

Es handelt sich hier um ein Fallbeispiel. In der Realität wird die durchschnittliche Fenstergrösse im Neubau kaum nur 1.7 m<sup>2</sup> betragen und sie kann kaum auf durchschnittlich 5 m<sup>2</sup> gesteigert werden. Die Resultate in Tabelle 4.2-25 zeigen aber immerhin auf, wie sehr es sich auszahlt, die Fensterflächen mit möglichst grossflächigen Fenstern zu realisieren. Die Aufgabe der ArchitektInnen ist es, diese Erkenntnis möglichst architektur- und wohngerecht umzusetzen.

### Fall 3 Erhöhung der Fensterflächenanteile bei gleichbleibender energetischer Fensterqualität

Nebst der Frage nach den Grenzkosten der unterschiedlichen Fensterqualität interessiert im Neubau insbesondere die Frage nach dem Verhältnis Fenster zu Fassade. Diese Frage stellt sich bei gegebener Fensterqualität (hier behandelte Fall 3) und bei gleichzeitiger Verbesserung der Fensterqualität gegenüber dem heutigen Baustandard (Fall4).

In Fall der Fensterflächenvergrösserung bei gleichbleibender Fensterqualität (U-Werte Rahmen und Glas) kann ein Effizienzgewinn realisiert werden in denjenigen Fällen, in denen die Energiebilanz der Fenster besser ist als die der Wand. Zwei Fälle gilt es zu unterscheiden: Bei der Vergrösserung der Fensteranteile an der Fassade können mehr Fenster der gleichen Grösse eingesetzt werden (Fall 3a) oder es kann gleichzeitig die Fensterfläche pro Fenster vergrössert werden (Fall 3b). Im zweiten Fall wird die Energiebilanz zusätzlich verbessert, weil die Fenster

einen geringeren Fenster-U-Wert aufweisen (kleinerer Rahmenanteil) und einen höheren Glasanteil (höhere Gewinne).

Ist der Energieeffizienzgewinn positiv, stellt sich die Frage nach den Kosten. Nebst den Mehrkosten für die zusätzliche Fensterfläche fallen in der Nettobetrachtung auch Minderkosten an. Im Neubau können die Kosten der vermiedenen Wand eingespart werden (rund 220 CHF/m<sup>2</sup> bis 300 CHF/m<sup>2</sup> für die kostengünstigsten Wandvarianten, je nach Dämmstärke). Bei der Erneuerung ist entweder keine Kostenersparnis oder sie fällt wesentlich geringer aus. Eine Kostenersparnis ergibt sich, wenn die Wand gleichzeitig wärmegeklämt wird und durch die Fensterflächenvergrößerung weniger Fläche zu dämmen ist (rund 120 CHF/m<sup>2</sup> bis 200 CHF/m<sup>2</sup>). Diese Kostenersparnis wird teilweise wieder wettgemacht durch die Abbruchkosten der Wand (50 CHF/m<sup>2</sup> bis 80 CHF/m<sup>2</sup>, to be checked). Nebst diesen eigentlichen Baumeisterkosten sind ausserdem die Unannehmlichkeiten für die Mieterinnen oder Hausbesitzer und evtl. damit verbundene Kosten zu nennen, welche diese Massnahme bei bestehenden Gebäuden unattraktiv machen; entsprechend selten wird sie ausgeführt.

Grenzkostenberechnung im Fall 3:

$$\text{Kosten (Wand}_{\text{kleiner Fensteranteil}} + \text{Fenster}_{\text{kleiner Anteil}} - (\text{Wand}_{\text{grosser Fensteranteil}} + \text{Fenster}_{\text{grosser Anteil}})) / \text{Energiebilanz}(\text{Wand}_{\text{kleiner Fensteranteil}} + \text{Fenster}_{\text{kleiner Anteil}} - (\text{Wand}_{\text{grosser Fensteranteil}} + \text{Fenster}_{\text{grosser Anteil}}))$$

Die Fragestellung hier ist, inwiefern es sich bei gegebenen U-Werten für die Wand sowie die Rahmen und Gläser lohnt, die Gesamtfensterfläche zu vergrössern. Die Rechnungen gelten also für den Fall, wo die Fensterqualität (U-Werte von Rahmen und Glas) schon entschieden ist, und es noch um die Festlegung der Fensterfläche pro Fassade geht. Dabei sind in den folgenden Tabellen hauptsächlich die Zeilen des Referenzfensters für den Grenzkostenansatz gemäss dem Ziel des Berichts relevant. Die weiteren Zeilen dienen den Architekten, Planern und Eigentümern, um bei gegebener Fensterqualität zu beurteilen, wie sich eine Erhöhung der Fensterflächenanteile auswirkt.

Die Rechnungen werden am Beispiel der Wand mit Minergiequalität ausgeführt. Dies im Hinblick darauf, dass die Wandqualität im Grenzkostenkurvenansatz ebenfalls verbessert würde. Die Grenzkosten der Erhöhung der Fensterflächenanteile sind bei einer Wand gemäss heutiger Bauweise tiefer (die wegfallenden Kosten der Wand sind zwar leicht tiefer, aber die Energiebilanz dieser Wand schlechter ist als diejenige der Minergiewand und der Effizienzgewinn im Endeffekt kosteneffizienter). Bei der Passivhauswand können die Kosten höher oder tiefer ausfallen, siehe entsprechende Sensitivitätsbetrachtungen.

### Fall 3a Gleich grosse, aber mehr Fenster, bei gleichbleibenden U-Werten für Glas und Rahmen

Die folgenden Resultate beinhalten keine Kosten von evtl. zusätzlich notwendigem Sonnenschutz. Solche Kosten sind jedoch insbesondere bei unverschatteten Lagen mit hohem Fensterflächenanteil zu berücksichtigen, z.B. für Direktsolargewinnhäuser mit hohem Glasanteil gegen Süden. Bei sehr hohen Anteilen wird ein automatisch gesteuerter Sonnenschutz notwendig (ausfahrend, damit sich die BewohnerInnen nicht eingeschlossen fühlen. Bei kleineren Anteilen kann evtl. ein fix montierter Sonnenschutz angebracht werden, welcher die Sonne im Winter ins Gebäude lässt und im Sommer abhält. Bei Ost- und vor allem Westlagen sind hohe Glasanteile vor allem bzgl. sommerlichem Wärmeschutz kritisch, vor allem zu Zeiten der tiefstehenden Sonne. Ausfahrender Sonnenschutz ist hier weniger wirksam als das Storensystem.

Tabelle 4.3-30 Grenzkosten (CHF/kWh<sub>NE</sub>) der Vergrößerung der Fensterflächenanteile mittels mehr kleiner bzw. mehr grosser Fenster bei Südorientierung (Fallbeispiel Minergie-Wand, U-Wert<sub>Wand</sub>=0.2 W/m<sup>2</sup>K)

Süden	Mehr kleine Fenster				Mehr grosse Fenster			
	Beschattungssituation (Beschattungsfaktor)							
	0.9	0.7	0.5	0.3	0.9	0.7	0.5	0.3
Referenzfenster (Rahmen 1.5, Glas 1.1) g=0.65	0.33	0.79			0.15	0.22	0.58	
Referenzfenster (Rahmen 1.5, Glas 1.1) g=0.57	0.45	2.03			0.17	0.27	1.15	Energiebilanz nicht positiv oder Kosten über 1 CHF / kWh <sub>NE</sub>
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.7) g=0.52	0.44	1.02	Energiebilanz der Massnahme ist nicht positiv oder Kosten liegen über 1 CHF/kWh <sub>NE</sub>		0.18	0.26	0.52	
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.42	0.66	1.86			0.23	0.33	0.64	
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.5	0.46	0.90			0.20	0.27	0.47	
Rahmen 0.8, Glas 1.1 g=0.57	0.48	1.05			0.24	0.37	1.02	
Rahmen 0.8, Glas 0.7 g=0.52	0.49	0.85			0.26	0.36	0.63	
Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.42	0.59	0.95			0.32	0.43	0.74	
Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.5	0.46	0.70			0.28	0.37	0.58	

Quelle Erhebungen, Auswertungen und Grenzkostenberechnungen: CEPE

Unter Berücksichtigung des evtl. zusätzlichen Sonnenschutzes könnten sich die untenstehenden Kosten also erhöhen. Je nach architektonischer Lösung der Erhöhung der Fensterflächen fallen die Kosten unterschiedlich aus. Handelt es sich um eine Vergrößerung der einzelnen Fensterflächen (Verbreiterung, Verlängerung, Fall 3b) fallen die Zusatzkosten tiefer aus, als wenn zusätzliche Fenster hinzukommen.

Wie Tabelle 4.3-30 zeigt, liegen die Kosten der Fensterflächenvergrößerung, also von mehr Fensterfläche pro Wandfläche, durch den Einsatz von mehr (gleichflächigen) Fenstern relativ hoch. Dies gilt bei relativ kleinen Fenstern (<=1.7m<sup>2</sup>) noch mehr als bei grossen. Die Grenzkosten steigen ausserdem schon bei mässiger Verschattung (Beschattungsfaktor<0.7) und relativ schnell ist der Punkt erreicht, ab dem ein Einsatz von mehr Fenstern entweder keine energetische Verbesserung mehr bringt oder die Grenzkosten über einem Franken pro kWh<sub>NE</sub> zu liegen kommen.

Bei Ost- und Westlage (siehe Tabelle 4.3-31) lässt sich ein Energieeffizienzgewinn (zu Kosten unter 1 CHF/m<sup>2</sup>) gar nur mittels mehr grossflächiger Fenster realisieren (und beim Wechsel von klein- zu grossflächigen, siehe Fall 3b) und auch dies nur für mehr oder weniger unverschattete Lagen (Beschattungsfaktor>=0.9) und zu relativ hohen Grenzkosten (>= 0.6 CHF/m<sup>2</sup>). Mehr kleine Fenster ergeben in Ost- oder Westlage entweder keine energetische Verbesserung oder Grenzkosten über 1 CHF/kWh<sub>NE</sub>.

Tabelle 4.3-31 Grenzkosten (CHF/kWh<sub>NE</sub>) der Vergrößerung der Fensterflächenanteile mittels **mehr grosser** Fenster bei Ost- und Westorientierung (Fallbeispiel Minergie-Wand, U-Wert<sub>Wand</sub>=0.2 W/m<sup>2</sup>K)

	Beschattung 0.9		Beschattung 0.7	
	Ost	West	Ost	West
Referenzfenster (Rahmen 1.5, Glas 1.1) g=0.65	1.16	0.79	Energiebilanz der Massnahme ist nicht positiv oder Kosten liegen über 1 CHF/kWh <sub>NE</sub>	
Referenzfenster (Rahmen 1.5, Glas 1.1) g=0.57	5.29	1.67		
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.7) g=0.52	0.72	0.60		
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.42	0.79	0.68		
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.5	0.59	0.52		
Rahmen 0.8, Glas 1.1 g=0.57	1.93	1.30		
Rahmen 0.8, Glas 0.7 g=0.52	0.82	0.71		
Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.42	0.88	0.79		
Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.5	0.71	0.64		

Quelle Erhebungen, Auswertungen und Grenzkostenberechnungen: CEPE

Hinweis: Die Berechnungen in Tabelle 4.3-30 und Tabelle 4.3-31 gehen von nur marginal mehr Fenstern aus, d.h. der Effekt, dass bei mehr Fenstern der Faktor fg zurückgeht, wurde nicht berücksichtigt. Bei massiv mehr Fenstern wäre das zu berücksichtigen und die Grenzkosten würden etwas höher liegen.

Sensitivitätsrechnungen ergeben für die Südorientierung rund 5% bis 12% tiefere Grenzkosten, wenn die Fensterfläche in einer Wand in Referenzbauweise (U-Wert=0.28) statt in Minergiebauweise vergrössert wird. Grund: die Energiebilanz wird bei der Referenzwand stärker verbessert als die vermiedenen Wandkosten kleiner werden (minus 25 CHF/m<sup>2</sup>). Bei der Passivhauswand sind die Grenzkosten ungefähr gleich, leicht höher oder leicht tiefer als gemäss Tabelle 4.3-30. Grund hier: Der Effekt, dass die Effizienzverbesserung durch grössere Fensterflächen kleiner ist als bei der Minergiewand hält sich die ungefähr die Waage mit dem Effekt, dass die vermiedenen Kosten der Passivhauswand wesentlich höher sind (plus 50 CHF/m<sup>2</sup>). Bei der Ost- oder Westorientierung liegen die Grenzkosten rund 10% bis 20% tiefer als gemäss Tabelle 4.3-31, wenn die Fensterflächenvergrößerung an einer Wand gemäss heutiger Bauweise (U-Wert=0.28) vorgenommen wird. Für die Passivhauswand liegen die Kosten 5% bis 15% höher.

### Fall 3b Wechsel zu grösserflächigen Fenstern

Bei einer Erhöhung der Fensterflächen im Verhältnis zur Fassadenfläche bietet sich die Möglichkeit, statt mehr Fenster grössere Fenster einzusetzen und damit den Kostendegressionseffekt auszunützen. Damit

- fallen sowohl die hohen Kosten des kleinflächigen Fensters (ab 540 CHF/m<sup>2</sup>) weg zugunsten der tiefen Kosten des grossflächigen Fensters (ab rund 425 CHF/m<sup>2</sup>)
- kommt die bessere Energiebilanz des grossflächigen gegenüber dem kleinflächigen Fenster zum Tragen
- wird der Unterschied zwischen den spezifischen Kosten der Fenster zu denjenigen der Wand geringer (Wand: rund 250 CHF/m<sup>2</sup> bei 16 bis 20 cm Wärmedämmung)



Tabelle 4.3-32 Grenzkosten der Vergrößerung der Fensterflächenanteile bei gleichzeitigem Wechsel von kleinflächigen zu grossflächigen Fenstern, Südorientierung (Fallbeispiel Minergie-Wand,  $U\text{-Wert}_{\text{Wand}}=0.2 \text{ W/m}^2\text{K}$ ), gemessen am kleinflächigen Fenster der jeweiligen Qualität

Süden	Beschattungssituation			
	0.9	0.7	0.5	0.3
Referenzfenster (Rahmen 1.5, Glas 1.1) $g=0.65$	0.07	0.09	0.15	1.17
Referenzfenster (Rahmen 1.5, Glas 1.1) $g=0.57$	0.07	0.10	0.18	
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.7) $g=0.52$	0.09	0.11	0.16	0.41
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) $g=0.42$	0.11	0.13	0.19	0.40
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) $g=0.5$	0.10	0.12	0.17	0.32
Rahmen 0.8, Glas 1.1 $g=0.57$	0.13	0.17	0.32	
Rahmen 0.8, Glas 0.7 $g=0.52$	0.15	0.18	0.26	0.65
Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) $g=0.42$	0.18	0.23	0.34	0.79
Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) $g=0.5$	0.17	0.21	0.29	0.59

Quelle Erhebungen, Auswertungen und Grenzkostenberechnungen: CEPE

Bei der Orientierung Süd sind die Grenzkosten der Vergrößerung der Fensteranteile (mehr Fenster und weniger Wand) bei geringer Beschattung (Beschattungsfaktor  $>0.7$ ) sehr tief (Tabelle 4.3-32). Dies gilt, in etwas vermindertem Masse, auch für die Passivhausfenster was dadurch zu erklären ist, dass eine relativ starke Grössendegression der Kosten (von der Fensterfläche  $1.7 \text{ m}^2$  auf  $5 \text{ m}^2$ ) zugrunde liegt. Ausserdem ist der Gesamtfenster-U-Wert der grösseren Fenster tiefer.

Bei höherer Beschattung steigen die Grenzkosten wegen der sich rasch verschlechternden Energiebilanz an und bei der grossen Verschattung von 70% (Beschattungsfaktor  $=0.3$ ) ist kaum mehr eine energetische Verbesserung durch Fensterflächenvergrößerung möglich.

Auch bei Ost- und Westorientierung lässt sich ein Energieeffizienzgewinn durch Fenstervergrößerung realisieren, allerdings zu wesentlich höheren Grenzkosten und realistischerweise nur bei sehr geringer Verschattung (Beschattungsfaktor  $=0.9$ , siehe Tabelle 4.3-33).

Tabelle 4.3-33 Grenzkosten der Vergrößerung der Fensterflächenanteile bei gleichzeitigem Wechsel von kleinflächigen zu grossflächigen Fenstern, Ost- und Westorientierung (Fallbeispiel Minergie-Wand,  $U\text{-Wert}_{\text{Wand}}=0.2 \text{ W/m}^2\text{K}$ ), gemessen am kleinflächigen Fenster der jeweiligen Qualität

	Beschattung 0.9		Beschattung 0.7	
	Ost	West	Ost	West
Referenzfenster (Rahmen 1.5, Glas 1.1) $g=0.65$	0.29	0.25	0.62	0.46
Referenzfenster (Rahmen 1.5, Glas 1.1) $g=0.57$	0.36	0.29	1.35	0.77
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.7) $g=0.52$	0.25	0.22	0.37	0.32
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) $g=0.42$	0.27	0.25	0.38	0.34
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) $g=0.5$	0.24	0.23	0.32	0.29
Rahmen 0.8, Glas 1.1 $g=0.57$	0.58	0.48	1.72	1.11
Rahmen 0.8, Glas 0.7 $g=0.52$	0.39	0.36	0.56	0.50
Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) $g=0.42$	0.47	0.43	0.66	0.59
Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) $g=0.5$	0.41	0.38	0.54	0.49

Quelle Erhebungen, Auswertungen und Grenzkostenberechnungen: CEPE

Sensitivität: Die Resultate für die Fälle der Fensterflächenvergrößerung bei einer Wand gemäss heutiger Bauweise (Tabelle C.3-1 und Tabelle C.3-2) bzw. bei einer Wand in Passivhausqualität (Tabelle C.3-3 und Tabelle C.3-4) sind sehr ähnlich, die Tabellen befinden sich im Anhang.

#### Fall 4 Erhöhung der Fensterflächen und gleichzeitige Verbesserung der energetischen Fensterqualität

Im diesem Fall 4 gelangt die Verbesserung der energetischen Fensterqualität, der Einsatz grösserflächiger Fenster (Fall 2) und die Vergrößerung der Fensterflächenanteile pro  $\text{m}^2$  Fassade (Fall 3) kombiniert zur Anwendung. Die Berechnungsmethodik ist deshalb eine Kombination der beiden Fälle; auf eine Wiedergabe kann an dieser Stelle verzichtet werden.

Der Referenzfall besteht bei der Südorientierung aus  $18\text{m}^2$  kleinflächigen Fenstern der Referenzqualität (Rahmen  $1.4 \text{ W/m}^2\text{K}$  bis  $1.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ , Glas  $1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) und  $58 \text{ m}^2$  Wand. Die Grenzkostenberechnung basiert auf  $40 \text{ m}^2$  grossflächigen Fenstern mit verbesserter Energieeffizienz (siehe Tabelle 4.3-34) und  $36 \text{ m}^2$  Wand. In Richtung Ost und West beträgt die Fläche der kleinen Fenster  $12 \text{ m}^2$  und für die Grenzkostenberechnung  $30 \text{ m}^2$ , bei jeweils gleicher totaler Brutto-Wandfläche wie in Richtung Süden, wobei es sich um eine Wand mit Minergiequalität handelt ( $U\text{-Wert}=0.2 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Für die Berechnung wurde davon ausgegangen, dass die Massnahme gegen Süd sowie gegen Ost und West gleichzeitig durchgeführt werden. Würden sie einzeln ausgeführt, ergäben sich kleine Verschiebungen, jedoch ohne Einschränkung der Allgemeingültigkeit der Resultate. Dasselbe gilt auch für andere Wandqualitäten, siehe dazu die Sensitivitätsbetrachtungen im Fall 3.

Erwartungsgemäss liegen die Grenzkosten zwischen den Fällen 2 und 3 (vgl. z.B. Tabelle 4.3-34 mit Tabelle 4.3-30 und Tabelle 4.3-29 für die Südorientierung).

Tabelle 4.3-34 Grenzkosten (CHF/m<sup>2</sup>) der Fensterqualitätsverbesserung bei gleichzeitiger Vergrößerung der Fensterflächenanteile und Wechsel von kleinflächigen zu grossflächigen Fenstern, Südorientierung (Fallbeispiel Minergie-Wand, U-Wert<sub>Wand</sub>=0.2 W/m<sup>2</sup>K), **gemessen am kleinflächigen (1.7 m<sup>2</sup>) Referenzfenster**

Süden	Beschattungssituation			
	0.9	0.7	0.5	0.3
Referenzfenster (Rahmen 1.5, Glas 1.1) g=0.57	0.07	0.10	0.18	NA
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.7) g=0.52	0.11	0.13	0.18	0.34
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.42	0.16	0.19	0.24	0.37
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.5	0.14	0.16	0.20	0.31
Rahmen 0.8, Glas 1.1 g=0.57	0.18	0.23	0.37	1.52
Rahmen 0.8, Glas 0.7 g=0.52	0.22	0.25	0.32	0.52
Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.42	0.28	0.32	0.39	0.54
Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.5	0.24	0.27	0.33	0.46

Quelle Erhebungen, Auswertungen und Grenzkostenberechnungen: CEPE

Durch die Ausnützung des Grössenskaleneffekts und die verbesserte Energiebilanz der Fenster gegenüber der Wand können insbesondere in nicht oder wenig verschatteter Südlage tiefe Grenzkosten erreicht werden. In Übereinstimmung mit den Resultaten von Fall 3 steigen die Grenzkosten der Fensterflächenvergrößerung/Fensterverbesserung bei zunehmender Verschattung, **dies im Gegensatz zu Fall 1** (nur Verbesserung der energetischen Fensterqualität, siehe Tabelle 4.3-26 und Tabelle 4.3-27).

Tabelle 4.3-35 Grenzkosten (CHF/m<sup>2</sup>) der Fensterqualitätsverbesserung bei gleichzeitiger Vergrößerung der Fensterflächenanteile und Wechsel von kleinflächigen zu grossflächigen Fenstern, Ost- und Westorientierung (Fallbeispiel Minergie-Wand, U-Wert<sub>Wand</sub>=0.2 W/m<sup>2</sup>K), **gemessen am kleinflächigen (1.7 m<sup>2</sup>) Referenzfenster**

	Beschattung 0.9		Beschattung 0.7		Beschattung 0.5	
	Ost	West	Ost	West	Ost	West
Referenzfenster (Rahmen 1.5, Glas 1.1) g=0.57	0.36	0.29	NA	0.77	NA	NA
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.7) g=0.52	0.25	0.23	0.33	0.30	0.55	0.50
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.42	0.31	0.29	0.37	0.35	0.51	0.48
Dreifachglas (Rahmen 1.5, Glas 0.5) g=0.5	0.27	0.25	0.32	0.30	0.42	0.40
Rahmen 0.8, Glas 1.1 g=0.57	0.57	0.50	1.02	0.84	NA	NA
Rahmen 0.8, Glas 0.7 g=0.52	0.41	0.39	0.51	0.47	0.71	0.66
Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.42	0.47	0.45	0.54	0.52	0.67	0.65
Passivhaus (Rahmen 0.8, Glas 0.5) g=0.5	0.41	0.39	0.46	0.44	0.57	0.55

Quelle Erhebungen, Auswertungen und Grenzkostenberechnungen: CEPE

Die Grenzkosten steigen im hier vorliegenden Fall 4 wie im Fall 3 bei der Ost- und Westorientierungen gegenüber der Südorientierung und bei zunehmender Verschattung an

(Tabelle 4.3-35). Bei der Verschattung 70% und mehr (Beschattungsfaktor  $\leq 0.3$ ) liegen sie durchwegs über 0.8 CHF/kWh<sub>NE</sub>, weshalb sie hier nicht mehr tabellarisch dargestellt werden.

Bei der Interpretation der Resultate dieses Falls 4 ist im Auge zu behalten, dass dabei eine Vergrößerung der Fläche pro Fenster von 1.7 m<sup>2</sup> auf 5 m<sup>2</sup> zugrunde liegt, eine Möglichkeit, die in der Realität bestimmt nicht für die gesamte Fensterfläche eines Neubaus angewendet werden kann. Bei kleineren Flächen, z.B. 3 m<sup>2</sup> bis 4 m<sup>2</sup> pro Fenster, liegen die Kosten entsprechend etwas höher.

### Fall 5 Verlagerung der Fensterflächen gegen Süden bzw. gegen Ost/West

Sofern es architektonisch und aus Sicht der Bewohnbarkeit möglich ist, zahlt sich eine Verlagerung der Fensterflächen gegen Süden (von Ost/West/Nord) bzw. gegen Ost/West (von Nord) bei gleicher Fensterqualität und gleicher Verschattung immer aus. Denn diese Massnahme ist für den Neubau kostenlos (allenfalls Planungskosten) und bringt eine energetische Verbesserung. Grenzen sind der Massnahme aus architektonischen Gründen (Ästhetik), aus den Bedürfnissen nach Tageslicht in einzelnen Räumen und aus Gründen der Überhitzung von einzelnen Räumen gesetzt. Bei „normaler“ Zweifachwärmeschutzverglasung sollten die Anteile pro Fassade ausserdem aus Komfortgründen nicht zu dominant ausfallen (kalte Strahlung, Kaltluftströme).

#### g) Zusammenfassung und Fazit

Nebst der Höhe der Grenzkosten stellt sich auch die Frage, wieviel der Energiebedarf mit den entsprechenden Massnahmen reduziert werden kann. Dies ist in den folgenden drei Abbildungen für die Orientierungen Süd, West und Nord graphisch dargestellt am Beispiel der Verschattung von 30% (Beschattungsfaktor = 0.7). Bei der Interpretation der Graphiken ist zu beachten: Der Energieeffizienzgewinn und auch die Grenzkosten gelten für die getroffenen Annahmen (siehe oben im Text). Die Ergebnisse dürfen nicht linear auf andere Situationen (insbesondere andere Verhältnisse von Wärmegewinn zu Verlust) übertragen werden. Dennoch erlauben die Darstellungen, diejenigen Bereiche zu identifizieren, wo durch die Wahl der Fensterqualität und/oder durch architektonische Massnahmen sowohl ein hoher Effizienzgewinn als auch relativ tiefe Kosten resultieren.

Folgende Fazits können aus der Grenzkostenbetrachtung gezogen werden, wovon einige davon überraschen mögen, aber nachvollzieh- und erklärbar sind.

#### 1) Wahl der Fensterqualität

- Die **Grenzkosten einer Fensterqualitätsverbesserung sind desto tiefer, je höher die Verschattung** ist, z.B. bei vorgegebener Situation im Gebäudebestand. Es lohnt sich also eher, bei verschatteten Lagen in verbesserte Fenster zu investieren als bei unverschatteten.
- Dasselbe gilt aus analogem Grund auch für die Orientierung: je weniger die Fenster gegen Süden und je mehr gegen West und Ost und insbesondere **gegen Norden** orientiert sind, **desto tiefer** sind die Grenzkosten einer Fensterqualitätsverbesserung. Bei den Fenstern, die in Richtung West/Ost und insbesondere Nord gegeben sind (z.B. im Gebäudebestand oder durch die Minimalanforderung oder den individuellen Bedarf), kann also eine relativ **kosteneffiziente Energiebedarfsminderung** erreicht werden.
- Relativ hoch jedoch sind die Grenzkosten der Verbesserung der Glas-U-Werte und der Rahmen-U-Werte (heute noch) gegen Süden, besonders bei geringer Verschattung.
- Das Dreifach-IV-Fenster mit Glas-U-Wert 0.7 ist aufgrund seines relativ tiefen U-Wertes und seines hohen g-Wertes relativ grenzkosteneffizient. Das Dreifach-IV-Fenster mit Glas-

U-Wert 0.5 und seinem relativ tiefen g-Wert von 0.42 weist vielfach vergleichsweise hohe Grenzkosten aus, besonders gegen Süden, aber auch gegen West/Ost. Aus energetischer (winterlicher) Sicht ist deshalb auf einen hohen g-Wert zu achten.

- Nicht bei jeder Orientierung bzw. Verschattungssituation bringen die gleiche Massnahmen die grösste Energieeffizienz bzw. die tiefsten Grenzkosten. So weist das Passivhausfenster zwar meistens, aber nicht in jedem Fall die grösste Energieeffizienz auf, hat aber umgekehrt auch nicht in jedem Fall die höchsten Kosten.

## 2) Architektonische Möglichkeiten

- Die Wahl von grossflächigen statt kleinflächigen Fenstern ermöglicht Grenzkosten, die im Negativen liegen oder unter dem heutigen Energiepreis, dies bei gleichzeitig hoher Energieeffizienz. Wenn immer möglich, sollten also grossflächige statt kleinflächige Fenster gewählt werden. Ist dieses Potential ausgeschöpft (die gesamte im Referenzfall konzipierte Fensterfläche wird in Form von grossflächigen Fenstern realisiert), gibt es weitere Effizienzmöglichkeiten:
- Eine Erhöhung der Anteile der Fensterfläche an der Fassadenfläche ist gegen Süden attraktiv, besonders wenn grosse Fenster hinzugefügt werden und noch verstärkt, wenn gleichzeitig grosse Fenster anstelle von kleinen gewählt werden. Die Kosten sind dann für einige Fenstertypen tiefer oder mindestens im Bereich der Wärmekosten, selbst wenn die heutigen tiefen Energiepreise zugrunde gelegt werden.
- Eine Erhöhung der Fensterflächen gegen stark verschattete Südlagen, gegen teilverschattete Ost- und Westlagen oder generell gegen Nordlagen bringt entweder keinen Effizienzgewinn oder die Grenzkosten liegen relativ hoch.
- Bei wenig verschatteten Ost- und Westlagen kann eine Erhöhung der Fensterflächenanteile pro Fassadenfläche durchaus in Betracht gezogen werden, vor allem, wenn grosse statt kleine Fenster eingesetzt werden.

## 3) Methodisch

Die Grenzkostenbetrachtung im Neubau ist „ziemlich mehrdimensional“. Es gibt nicht nur eine architektonische Strategie, energieeffizient mit möglichst geringen Kosten zu bauen. **Nicht** im Widerspruch zueinander stehen insbesondere die beiden Strategien

- Maximale Reduktion des Heizwärmebedarfs (**Minergie-P / Passivhaus**) durch die sehr hohe Reduktion der Transmissionsverluste
- Markante, aber nicht ganz so weitgehende Reduktion der Transmissionsverluste bei gleichzeitiger Erhöhung der Gewinne durch zusätzliche Fensterflächen gegen Süden (**Direktgewinnsolarhaus**)

Anhand der gezeigten Resultate und anhand der dargestellten Inputwerte (Kosten für Fenster unterschiedlicher Qualität und Grösse) ist es für den Planer oder die Bauträgerschaften jedoch möglich, die Fensterqualität kosten-/energieeffizient zu wählen und ebenso zu planen. Einige der Energiebedarfsnachweisprogramme lassen sich mit externen Datenquellen verknüpfen. So kann relativ einfach die Konsequenz der Fensterwahl und der Architektur auf die gesamten Mehrkosten und den gesamten Heizwärmebedarf sichtbar gemacht werden.

Interpretationshinweis: In Abbildung 4.3-37 und Abbildung 4.3-38 sind für die Fälle 3a und 3b nur die mit einem Kreis bezeichneten Punkte für das Grenzkostenprojekt relevant; die übrigen dienen den Architekten und Planerinnen zur Information, wie die Grenzkosten und die Energieeffizienz der Erhöhung der Fensterflächenanteile liegen, wenn die Fensterqualität bereits entschieden ist (siehe auch die entsprechenden Ausführungen zum Fall 3 im Text).

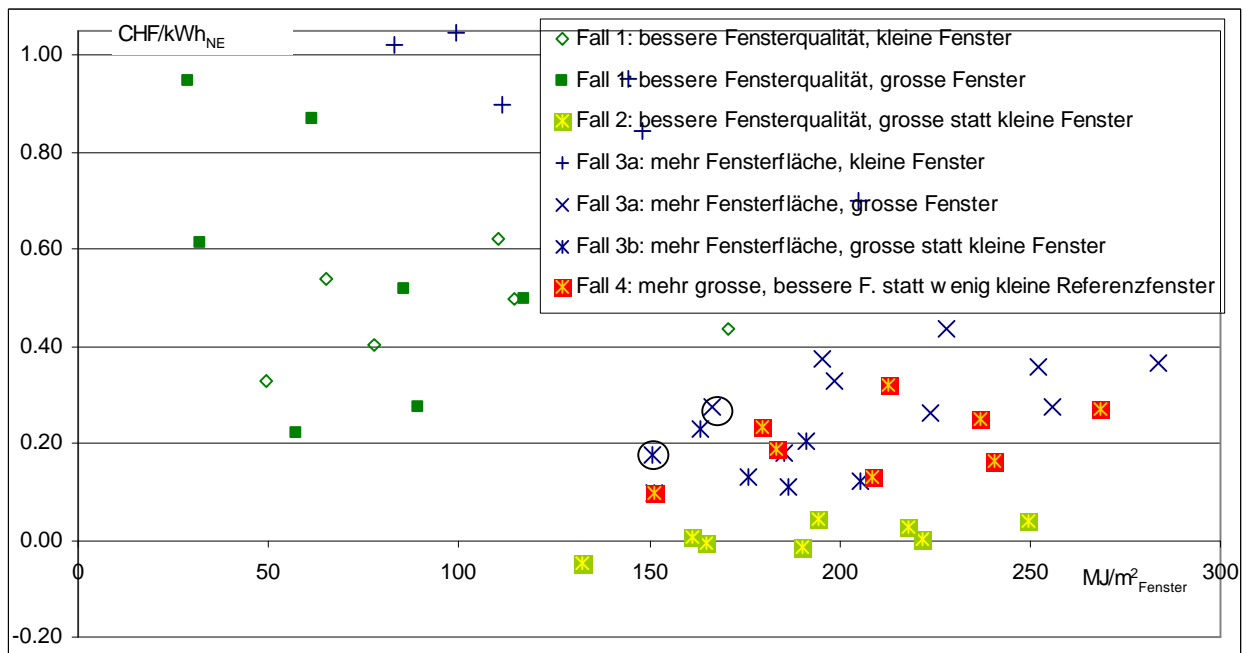


Abbildung 4.3-37 Grenzkosten in Funktion des Energieeffizienzgewinns pro m<sup>2</sup> Fensterfläche (Südlage, Beschattungsfaktor 0.7)

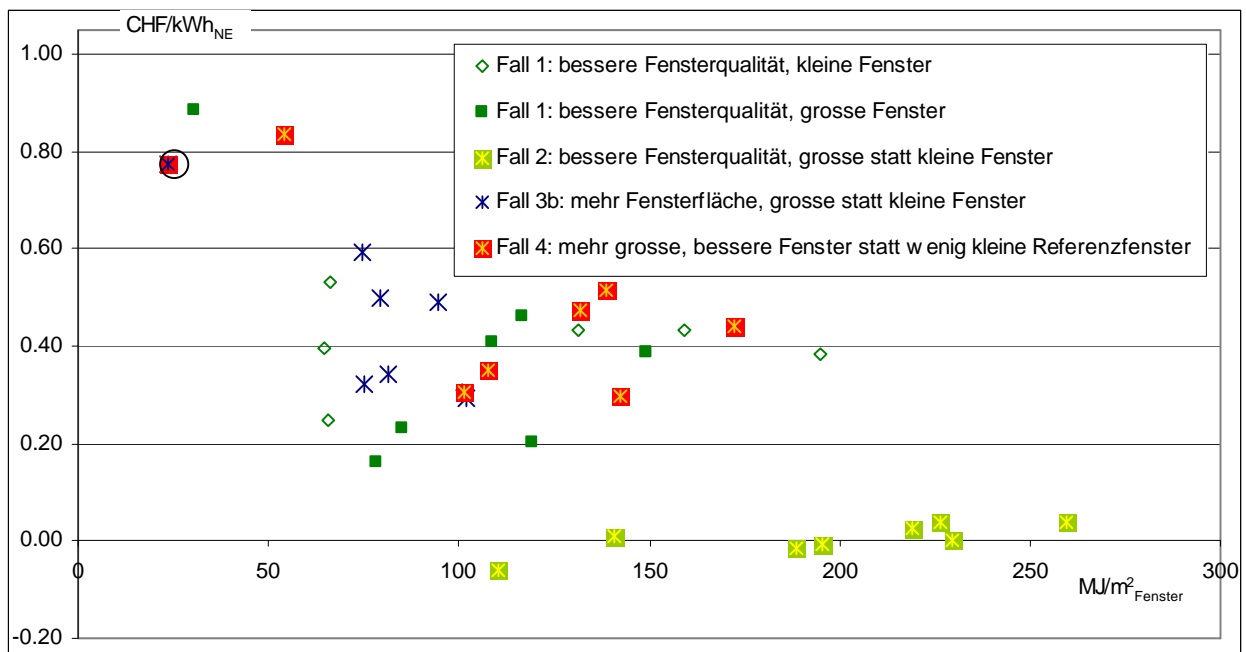


Abbildung 4.3-38 Grenzkosten in Funktion des Energieeffizienzgewinns pro m<sup>2</sup> Fensterfläche (Westlage, Beschattungsfaktor 0.7)

Bei der Nordorientierung ergibt sich durch eine Vergrößerung der Fensterflächenanteile keine Effizienzverbesserung, weshalb diese Massnahme in (Abbildung 4.3-39) fehlt.

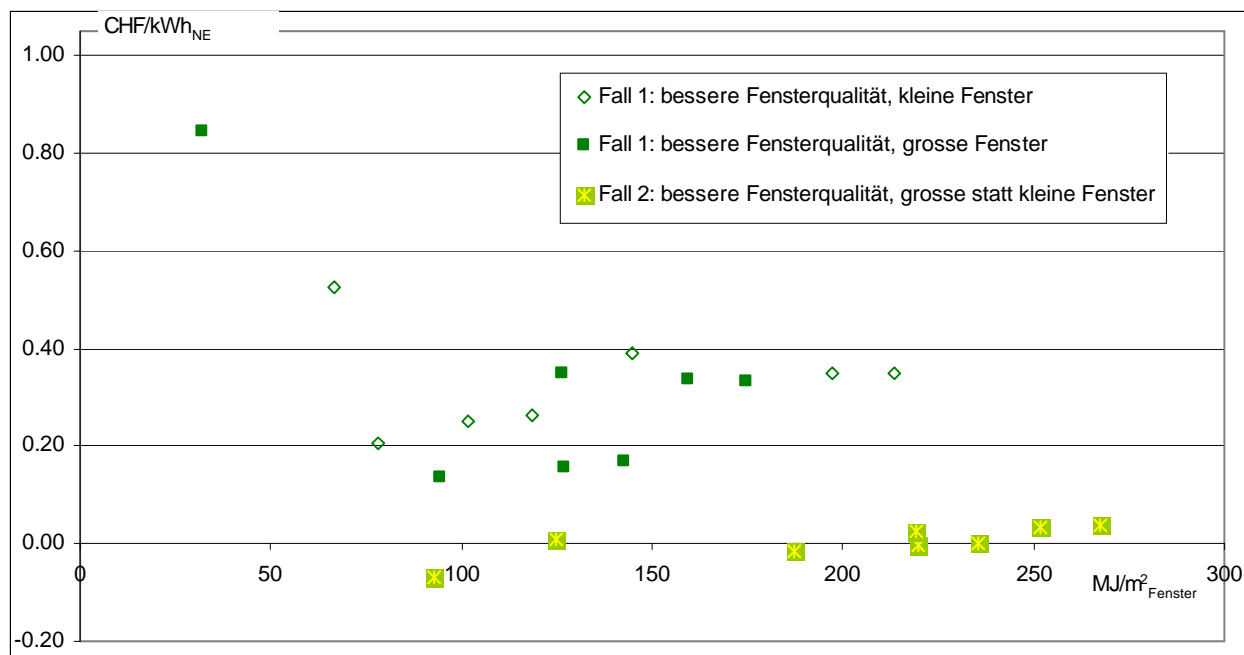


Abbildung 4.3-39 Grenzkosten in Funktion des Energieeffizienzgewinns pro m<sup>2</sup> Fensterfläche (Nordlage, Beschattungsfaktor 0.7)

#### h) Fenstererneuerung im Gebäudebestand

Bzgl. der Grenzkosten der Fenstererneuerung im Gebäudebestand sind zwei Fälle zu unterscheiden:

- Statt einer ohnehin erfolgenden Fenstererneuerung mit einem Fenster gemäss heutigem Standard (Glas-U-Wert 1.1 W/m<sup>2</sup>K, Holzrahmen U-Wert rund 1.4 W/m<sup>2</sup>K bis 1.5 W/m<sup>2</sup>K, KS 1.5 W/m<sup>2</sup>K bis 1.6 W/m<sup>2</sup>K) wird ein Fenster mit besserer energetischer Qualität eingesetzt. Die Grenzkosten sind dann gleich denjenigen dem Neubau gemäss Fall 1 (siehe 154). Die Grenzkosten sind gleich, weil sich die zusätzlichen Kosten- und Energieeffizienzelemente im Grenzkostenansatz „herauskürzen“; die Kosten für Abbruch und Entsorgung der alten Fenster würden im Referenzfall ebenfalls anfallen und der energetische Effizienzgewinn für tiefere Lüftungsverluste (Undichtheiten) treten im Referenzfall ebenfalls auf
- Vorzeitiger Fensterersatz: Anfallende Kosten: Restwert des bestehenden Fensters. Dieser entspricht dem Fehlbetrag, der dadurch dem Erneuerungsfonds entsteht (falls ein solcher vorhanden ist). Die jährlichen Einzahlungen in einen solchen Fonds entsprechen der Abschreibung und Verzinsung des alten Fensters („reaktiver“ Zahlungsstrom) oder sie sind gleich der Abschreibung und Verzinsung eines neuen Fensters inkl. Abbruch/Entsorgung des alten Fensters („proaktive Fondsbewirtschaftung“). Die Beträge sind in etwa gleich, denn die Preise der Fenster sind in den letzten Jahren in etwa gleich geblieben (siehe Kap. 4.5) und damit auch Kosten für den Gebäudebesitzer. Energetischer Effizienzgewinn (während der Dauer zwischen vorzeitigem Ersatz und ohnehin notwendigem Ersatz): Verbesserte Energiebilanz des Fenster sowohl bzgl. Wärmeschutz bzw. auch bzgl. Lüftungsverluste. Je nach Situation (Orientierung und Verschattung) und je nach erreichter Verbesserung der Lüftungsverluste betragen die Grenzkosten beim vorzeitigem Ersatz von EV-Fenster durch ein heutiges Standardfenster 14 bis 19 Rp/kWh<sub>NE</sub> und beim DV-Fenster 30 bis 40 Rp/kWh<sub>NE</sub>. Werden die alten Fenster vorzeitig durch ein dreifach-WS-Fenster ersetzt, betragen die Grenzkosten 16 bis 20 Rp/kWh<sub>NE</sub> beim EV und knapp 30 bis 37 Rp/kWh<sub>NE</sub> beim DV-Fenster. Anzumerken ist an dieser Stelle dreierlei: 1) Nicht berücksichtigt sind die Wertvermehrung

und die Co-Benefits, die gerade im Fall des vorzeitigen Fensterersatzes von grosser Bedeutung sein können, denn die zu erreichende Verbesserung bzgl. Wärmeschutz, erhöhte Fensterscheiben-Oberflächentemperaturen, verminderte Zugerscheinungen und die Verbesserung der Lärmsituation können markant sein. 2) Der Energieeffizienzgewinn und die Grenzkosten fallen nur während der Periode der Vorzeitigkeit an (nachher würden die Fenster ohnehin ersetzt). 3) Ein vorzeitiger Fensterersatz sollte fachgerecht erfolgen (am besten gleichzeitig mit einer energetischen Fassadenerneuerung), um bauphysikalischen Risiken zu begegnen.

- Weitere Fälle der energetischen Verbesserung durch Renovationen, bei denen am Fenster punktuelle Massnahmen ergriffen werden, hat Eicher + Pauli untersucht (Erb, 2001). Die Jahreskosten aller Massnahmen sind ähnlich hoch, weshalb an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen wird.

Die übrigen Fälle für den Neubau behandelten Fälle in den vorangehenden Kapiteln (Fall 2 bis Fall 5) wie die Vergrösserung der Fensterflächen haben aus Sicht der Grenzkosten kaum eine Bedeutung, denn die Kosten wären im Vergleich zum Neubau markant höher. Nicht nur können keine Kosten für „vermiedene“ Wandflächen in Abzug gebracht werden, sondern es kommen im Gegenteil Kosten für den Abbruch der Wand bzw. für die Vergrösserung der bestehenden Fensteröffnung hinzu. Wenn in der Praxis trotzdem (selten) auch im Gebäudebestand Fenster vergrössert, so geschieht das in den Fällen mit ungenügenden Lichtverhältnissen und/oder aus dem modernen Bedürfnis nach lichtdurchfluteten Wohnungen heraus.



### 4.3.8 Dach

Im Dachbereich gibt es sowohl beim Neubau wie auch bei der Erneuerung von Gebäuden eine Vielfalt von Bauweisen, Ausgangslagen und Erneuerungsvarianten. Beim Neubau wie bei der Dacherneuerung des Gebäudebestands ist grundsätzlich zwischen Flachdach, Steildach mit Wärmedämmung und Steildach mit Estrichboden- bzw. Deckendämmung zu unterscheiden. Bei jeder dieser grundsätzlichen Bauweisen gibt es eine oder mehrere technische Varianten der Wärmedämmung. Diese unterscheiden sich teilweise bei Neubau und Erneuerung, je nach Ausgangslage im Dachbereich.

#### a) Methodik der Kostenermittlung im Dachbereich

Für die Ermittlung der Kosten weitergehender Wärmedämmmassnahmen im Dachbereich konnte der SVDW (Schweizerischer Verband für Dach und Wand) für eine Zusammenarbeit gewonnen werden. Zunächst wurde eine Typisierung vorgenommen und die wichtigsten zu untersuchenden Fälle festgelegt. Kriterien waren die Relevanz (erwartete Häufigkeit) und zu erwartende Kostenunterschiede, insbesondere bzgl. der Unterschiede zwischen unterschiedlichen Dämmstärken.

Für die in Tabelle 4.3-36 dargestellten Fälle wurde bei den SVDW-Mitgliedfirmen die Kosten des Dachneubaus bzw. der Dacherneuerung für verschiedene Dämmstärken erhoben. Damit die Belastung der Unternehmen in vertretbarem Rahmen gehalten werden konnte, wurden pro Unternehmen die Kosten für nur jeweils einen grundsätzlichen Fall erhoben, jedoch für rund vier Wärmedämmstufen, denn die Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Dämmstärken steht im Focus des Grenzkostenprojekts.

Tabelle 4.3-36 Preiserhebungsbögen zuhanden der Unternehmen, total 9 verschiedene Preis-Erhebungsbögen, pro Unternehmen nur 1 Preis-Erhebungsbogen

	Nr	Referenzerneuerung	Weitergehende Erneuerung
Neubau Steildach	1	Dämmung auf den Sparren	Dämmung zwischen und auf den Sparren
	2	Dämmung zwischen den Sparren	Dämmung zwischen und unter den Sparren
	3	Dämmung des Dachbodens	
Neubau Flachdach	4	Flachdach, 2 Fälle: mit Gefällsüberzug oder Gefällswärmeplatten	
Erneuerung Steildach	5	Erneuern der Dachwohnung bzw. Dämmen von innen. 2 Fälle: bereits ausgebauter Dachraum und Dachraumausbau	Dämmung zwischen und unter den Sparren, ausgeführt von innen
	6	Dach reparieren / erneuern	Dämmung zwischen und auf den Sparren, von aussen. 2 Fälle : Bereits ausgebauter Dachraum und Dachraumausbau
	7	Estrichboden dämmen, 2 Fälle: selbsttragende Platten oder mit Unterkonstruktion	
Erneuerung Flachdach	8	Lokale Reparatur der Abdichtung	Abbrechen der bestehenden Abdichtung und neue Wärmedämmung
	9	Wärmedämmung über bestehende Flachdachabdichtung	

Wie im Fassadenbereich ist auch im Dachbereich grundsätzlich zwischen flächen- und längenbasierten Kosten- bzw. Preiselementen zu unterscheiden. Miteinzubeziehen sind nebst der eigentlichen Wärmedämmung und deren Verarbeitung insbesondere die übrigen Kostenelemente, welche von der Dämmstärke abhängen. Bei der Flachdacherneuerung ist dies zum Beispiel die Erhöhung der Brüstung, die zusätzliche Schutzblechabwicklung u.a.; beim Steildach die Lattungen mit höheren Querschnitten oder die längeren Distanzschrauben sowie zusätzliche Verlegeunterlagen beim Wechsel der Dämmvariante von z.B. „auf den Sparren“ zu „auf und zwischen den Sparren“. Auf die einzelnen Elemente wird in den nachfolgenden Unterkapiteln bei der Darstellung der Kosten eingegangen.

Nebst den Preiselementen wurden die Unternehmen auch zu Häufigkeiten verschiedener Ausführungsvarianten und deren typischen Dämmstärken befragt, dies, um für den Grenzkostenansatz die Preisinformationen gewichten zu können und einen energetisch- und bautechnischen Referenzpunkt zu erhalten. Die Ergebnisse dieses Befragungsteils sind im Kapitel 3 dokumentiert und dienen in den folgenden Unterkapiteln als Grundlage für die Grenzkostenbetrachtung.

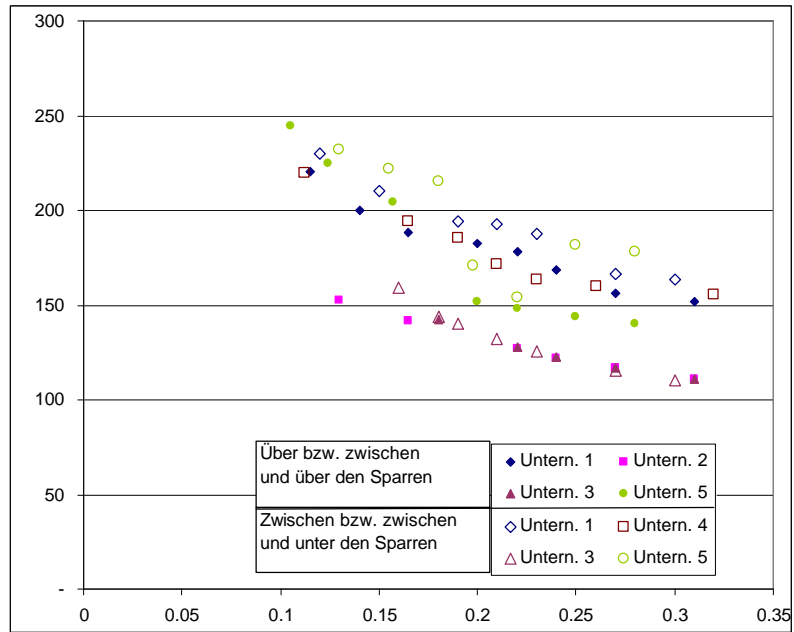
### **b) Neubau, Steildachdämmung**

Die Kosten der Tragkonstruktion sind in den Preisen nicht enthalten, da sie unabhängig von der Dämmstärke sind. Das zusätzliche Gewicht des Dämmmaterials bei erhöhten Dämmstärken hat keine Relevanz für die Dimensionierung der Tragkonstruktion. Ebenfalls nicht enthalten sind die Kosten der Ziegellattung und der Eindeckung, da diese ebenfalls unabhängig von der Dämmstärke sind (enthalten ist jedoch die Konterlattung).

Enthalten sind neben den Kosten für das Dämmmaterial insbesondere Zusatzkosten für Lattungen mit erhöhten Querschnitten bzw. für zusätzliche Lattungen falls solche für höhere Dämmstärken notwendig werden. Die Mehrkosten bei zunehmenden Dämmstärken werden denn auch vor allem verursacht durch den zusätzlichen Dämmstoff, die zusätzliche Lattung (z.B. wenn nicht nur zwischen, sondern zusätzlich unter den Sparren gedämmt wird), Lattungen mit erhöhten Querschnitten, zweilagiges Verarbeiten der Dämmung, zusätzliche Verlegeunterlage sowie längere Distanzschrauben (Doppelgewindeschrauben) oder Konsolen (z.B. bei „Flumserdach“ oder Isover Luro-Tafixe).

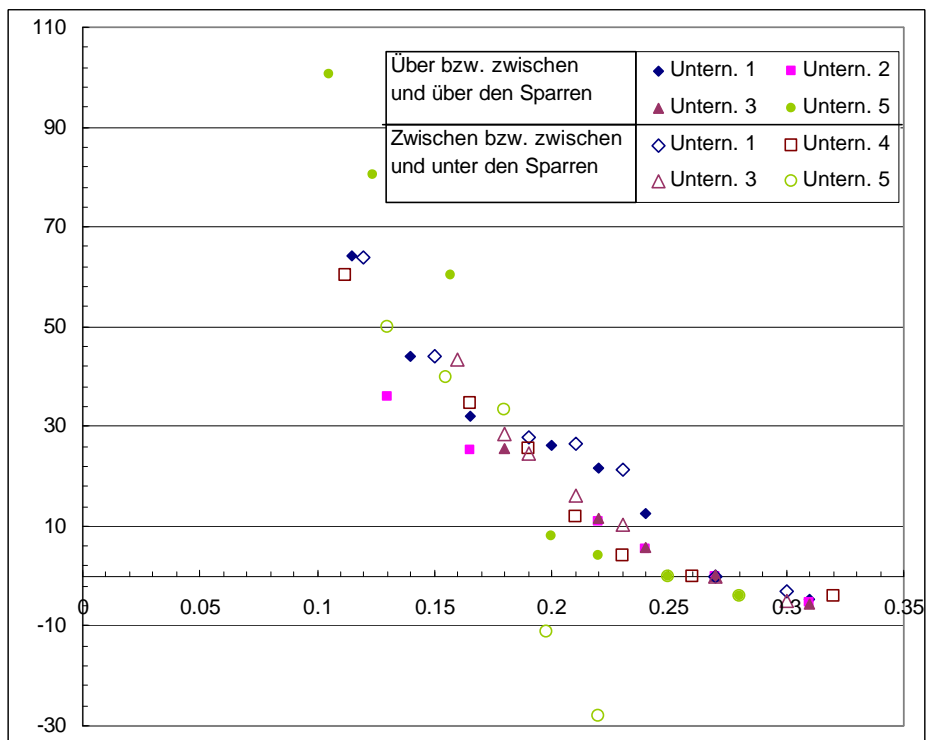
Der Sprung der Dämmung von „zwischen“ nach „zwischen und unter“ ist bei rund 16 cm bis 18 cm zu verzeichnen (Sparrenhöhe plus evtl. Lattung), der Sprung von „nur auf“ den Sparren zu „auf und zwischen“ den Sparren bei rund 18 cm bis 24 cm, da ansonsten die aufgebaute Konstruktionshöhe zu mächtig wird (vgl. Abbildung 4.2-9 und 4.2-10). Nimmt man einen U-Wert von  $0,7 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  als Referenzwert an, so errechnen sich die in Tabelle 4.2-10 aufgeführten Grenzkosten bei Zusatzinvestitionskosten von ca. 6.- CHF/m (für  $U = 24$ ) bis 70.- CHF/m<sup>2</sup> (für  $U = 0,11$ ).

Das absolute Kostenniveau unterscheidet sich zwischen den beiden grundsätzlichen Varianten (zum einen über bzw. zwischen und über den Sparren und zum andern zwischen und zwischen und unter den Sparren) nicht systematisch. Es ist jedoch eine Streuung des Kostenniveaus von plus minus rund 25% festzustellen, die jedoch als Funktion der Dämmstärke nicht wesentlich zunimmt. Diese Streuung rührt u.a. auch von der Materialwahl beim Unterdach oder der Dachschalung her und ist nicht direkt relevant für die Grenzkostenbetrachtung.



Quelle CEPE-Umfrage bei SVDW-Mitglied Unternehmen

Abbildung 4.2-9: Preise (CHF/m²) von Dachneubauten in Funktion des U-Wertes (W/m²K) der Dachkonstruktion



Quelle CEPE-Umfrage bei SVDW-Mitgliedunternehmen

Abbildung 4.2-10: Mehrpreise (CHF/m²) von Dachneubauten gegenüber der Referenzbauweise in Funktion des U-Wertes (W/m²K) der Dachkonstruktion

In einigen Fällen sind bei zunehmenden Dämmstärken Minderkosten zu verzeichnen. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn bei geringen Dämmstärken (z.B. 10 cm oder 12 cm), die kleiner als die Sparrenhöhe sind, eine zusätzliche Befestigung oder eine Schalung vorgesehen werden muss, für die erhöhte Dämmstärke jedoch nicht, da in diesem Fall die zusätzliche Befestigung bzw. Schalung nicht notwendig ist.

Tabelle 4.2-10: Brutto-Grenzkostenberechnung (Durchschnittskostenansatz gg. Referenz) für Dachwärmedämmungen bei Neubauten, EFH: 3.5%, MFH 5.5% real, 50 Jahre, Referenz: 0.27 W/m<sup>2</sup>K

U-Wert W/m <sup>2</sup> K	Mehr- investitions- kosten CHF/m <sup>2</sup> von bis		EFH dr=3.5% a=0.043		MFH dr=5.5% a=0.059		Wärme- transmissions- verlust kWh/m <sup>2</sup> a Absolut Reduktion		Grenzkosten gg. Referenz (Durchschnittskostenansatz)				
			Kapitalmehrkosten CHF/m <sup>2</sup> <sub>Dach</sub> ·a						EFH CHF/kWh		MFH CHF/kWh		
			von	bis	von	bis			von	bis	von	bis	
0.27	0							23					
0.24	5	7	0.2	0.3	0.3	0.4	21	2.6	0.08	0.11	0.11	0.16	
0.21	14	18	0.6	0.8	0.8	1.1	18	5.2	0.11	0.15	0.16	0.20	
0.18	26	32	1.1	1.4	1.5	1.9	16	7.8	0.14	0.17	0.20	0.24	
0.15	39	48	1.7	2.0	2.3	2.8	13	10	0.16	0.20	0.22	0.27	
0.13	50	60	2.1	2.6	3.0	3.5	11	12	0.18	0.21	0.24	0.29	
0.11	64	75	2.7	3.2	3.8	4.4	10	14	0.20	0.23	0.27	0.32	

Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

### c) Erneuerung bei Gebäuden mit Steildächern

Die Tabelle 4.3-37 zeigt eine Übersicht über die möglichen Erneuerungsvarianten im Steildachbereich sowie die dazu definierten Referenzerneuerungen, an denen die Mehrkosten im Grenzkostenansatz gemessen werden.

Tabelle 4.3-37 Übersicht über die Erneuerungsvarianten im Steildachbereich

Anwendungsfall	Erneuerungsvariante	Referenzerneuerung 1	Referenzerneuerung 2
Dachraum bereits ausgebaut	Dämmung von oben (inkl. neues Unterdach)	Ersatz Unterdach plus Eindeckung	14 cm WD, Abbruch evtl. bestehender WD
Dachraumausbau	Dämmung von oben (inkl. neues Unterdach)	14 cm WD	
Dachraumausbau	Dämmung von unten	14 cm WD	
Keine Dachraumnutzung	Dämmung Estrichboden	Keine WD	12 cm WD

Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

Bei der Definition der Referenzfälle im Dachbereich muss zwischen folgenden Ausgangslagen unterschieden werden.

- Ist der **Dachraum bereits ausgebaut**, steht eine Wärmedämmung von oben im Vordergrund (eine Wärmedämmung von innen bzw. von unten ist in diesen Fällen sehr selten). Zwei Referenzfälle sind zu unterscheiden:
  1. Der Auslöser für die Dacherneuerung ist ein zu erneuerndes Unterdach und/oder eine zu erneuernde Eindeckung; bzgl. Wärmedämmung werden keine Änderungen vorgenommen und
  2. Die Erneuerung des Unterdachs bzw. der Eindeckung wird zum Anlass genommen, eine Wärmedämmung (von ca. 14cm im Referenzfall) anzubringen, wobei eine evtl. bereits bestehende Wärmedämmung abgebrochen wird.
- Bei der Ausgangslage des **Dachraumausbaus** gibt es für zwei bautechnische Erneuerungsvarianten (Wärmedämmung von unten bzw. von oben) je nur einen Referenzfall: 14 cm Wärmedämmung
- Wird der **Dachraum nicht genutzt** und kann oder soll er auch später nicht genutzt werden, ist der Referenzfall die Dämmung des Estrichbodens und zwar mit rund 12 cm.

Es sind also die Kosten der folgenden Erneuerungsvarianten, welche dann als Basis für die Grenzkostenbetrachtung dienen, zu untersuchen:

- Steildacherneuerung mit Wärmedämmung von oben
- Steildacherneuerung mit Wärmedämmung von unten
- Dämmung des Estrichbodens

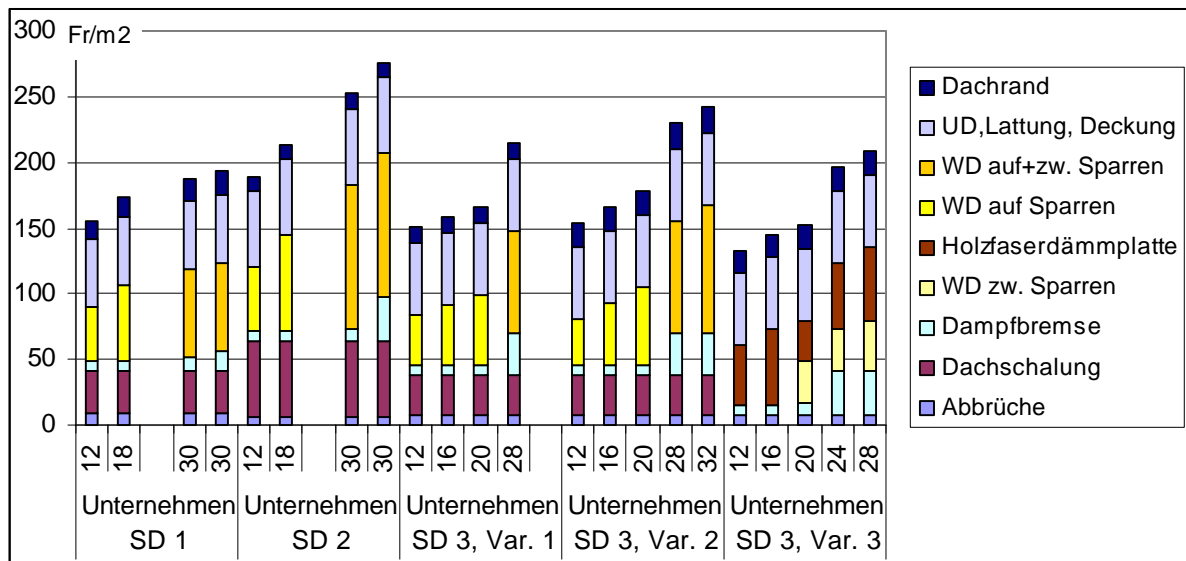
Als weiterer möglicher Fall ist der Ersatz des gesamten Dachaufbaus zu nennen, dies wenn die Tragstruktur sehr erneuerungsbedürftig ist (durch Feuchtigkeit oder Holzwurmbefall) oder wenn das Dachraumvolumen vergrössert werden soll. Die Grenzkosten sind in diesem Fall gleich denjenigen beim Neubau und werden deshalb im folgenden nicht explizit erfasst.

#### **d) Steildacherneuerung von oben**

Eine Steildacherneuerung von oben bietet die beste Möglichkeit, eine Wärmedämmung wirkungsvoll und inklusive einer fachgerechten Lösung der Konstruktionsdetails und Bauanschlüsse anzubringen. Die einfachste Variante ist das Anbringen einer Dachschalung sowie das Wärmedämmen auf den Sparren. Dies gilt sowohl für den Fall, in dem schon eine Dachwohnung besteht, als auch wenn der Dachraum zu Wohnzwecken ausgebaut werden soll. Dazu werden eine Verlegeunterlage und eine Dampfbremse auf die Sparren montiert. Ab einer Dämmstärke von ca. 20 cm wird üblicherweise sowohl auf wie auch zwischen den Sparren gedämmt. Als Verlegeunterlage für die Zwischensparrendämmung dient in einen Fall die bestehende Innenraumbekleidung und im anderen Fall die neu zu erstellende Innenraumbekleidung; in beiden Fällen wird wie bei der Dämmung „nur auf den Sparren“ eine Verlegeunterlage auf die Sparren montiert. Die Kosten für nicht sichtbare Dachschalungen betragen rund 25 CHF/m<sup>2</sup> bis 30 CHF/m<sup>2</sup>. Die Mehrkosten für sichtbare Dachschalungen werden dem Grenzkostenansatz gemäss dem neuen Dachraum zugeordnet. Die Dampfsperre wird im Fall des Dachraumausbaus unter die Sparren montiert, muss hingegen im Fall der schon bestehenden Dachwohnungen zwischen die Sparren verlegt werden, was mit signifikantem Mehraufwand verbunden ist (über 30 CHF/m<sup>2</sup> statt rund 10 CHF/m<sup>2</sup>).

Als Verlegeunterlage oder gar als Substitut kann auch eine Holzfaserplatte (z.B. Pavatherm) verwendet werden, welche ebenfalls wärmedämmend ist. Damit können die Kosten der Verlegeunterlage eingespart werden. Der Lambda-Wert dieser Faserplatten liegt bei

0.045 W/mK und ist damit wesentlich tiefer als bei Holz (0.14 W/mK), aber rund 30% höher als bei mineralischen Dämmstoffen (0.035 W/mK). Deshalb verursacht eine bestimmte Dämmwirkung im Vergleich zu mineralischen Dämmstoffen einen erhöhten Aufbau, so dass dem alleinigen Einsatz solcher Platten aus architektonischen und konstruktiven Gründen gewisse Grenzen gesetzt sind. Sie sind jedoch in Kombination mit einer konventionell verlegten WD mit (Kreuz-)lattung durchaus interessant. Bei der Abbildung 4.3-40 ist auf die Dämmstärken der Rubriken zu achten: Bei der Variante 3 des Unternehmens 3 ist zu beachten, dass die Dämmwirkung bei vergleichbarer Dämmstärke geringer ist, siehe dazu die Bemerkungen weiter oben.



Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

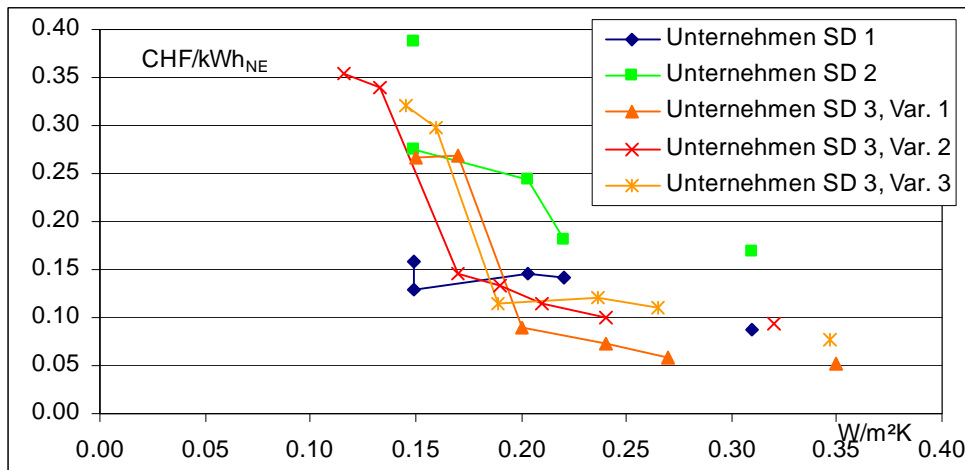
Abbildung 4.3-40 Kostenstruktur von Dacherneuerungen, von oben ausgeführt, inkl. Zuschlag für First sowie Dachrand / Anschluss an Fassade (0.46m/m²), einfache Dachform für EFH

Die kostensteigernden Faktoren sind die WD-Lattung, die Wärmedämmung sowie die Verlegearbeiten (in der Abbildung in einer Rubrik zusammengefasst) und das Verlegen der Dampfsperre, sobald aufgrund der Dämmstärke nicht mehr nur oben, sondern auch zwischen den Sparren gedämmt werden muss. Die Kosten für den Dachrandabschluss und die Zuschläge für Kehle und Grate hingegen fallen nicht sehr stark ins Gewicht, weder bei der Referenzdämmstärke noch als Funktion der zunehmenden Dämmstärke. Nimmt die Formenvielfalt zu, z.B. für Kreuzfirste oder bei Gauben und Lukarnen, erhöhen sich die linearen Kostenanteile. Die Relevanz kann anhand der obigen Kostenstruktur abgeschätzt werden. Die Kostenstruktur für das MFH ist ähnlich, ausser dass der Kostenanteil des Dachrandes geringer ausfällt.

Architektonische Aspekte: Zunehmende Dämmstärken lassen das Dach wuchtig aussehen, wenn die Wärmedämmung nur auf die Sparren aufgebracht wird. Diesem optischen Effekt lässt sich jedoch begegnen, indem der Ortrand gebrochen wird, d.h. indem zwei hintereinander versetzte Ortbretter angebracht werden, oder indem das sogenannte Stichermodell zur Anwendung kommt, bei dem die WD nur bis und mit Fassadenfläche geführt wird, das Vordach aber ohne WD bleibt.

Die in der Abbildung 4.3-43 dargestellten spezifischen Kosten der Energieeffizienz sind gegenüber folgenden Referenzfällen mit den entsprechenden Annahmen gerechnet.

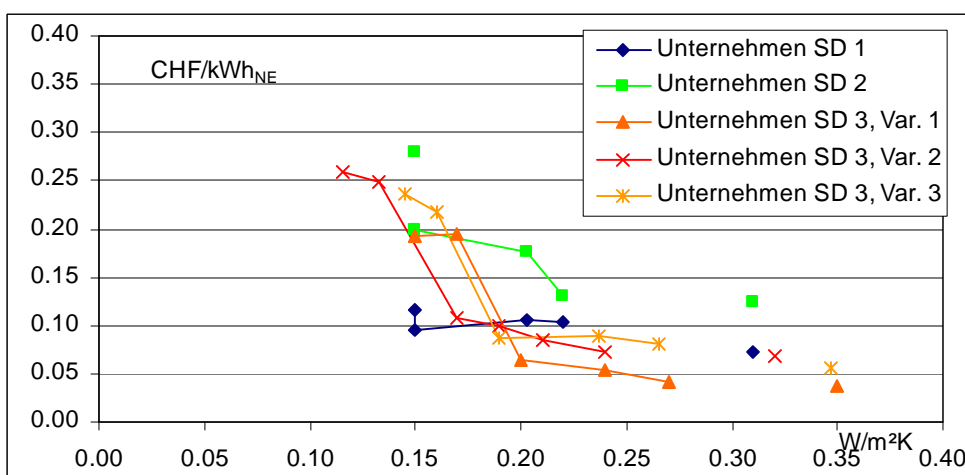
- Erneuerung des Unterdachs und der Eindeckung (ohne weitere Massnahmen an der vorhandenen Wärmedämmung), U-Wert 0.85 W/m<sup>2</sup>K
- Verstärkte Wärmedämmung gegenüber der Referenzdämmstärke, U-Wert 0.27 W/m<sup>2</sup>K (ca. 14 cm bei Kreuzlattung, ca 12 cm bei Distanzschrauben)



Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

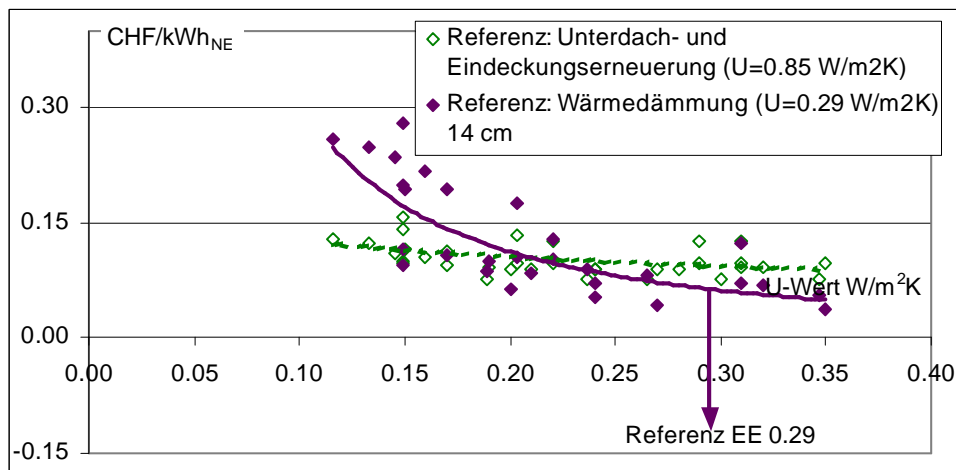
Abbildung 4.3-41 Grenzkosten (Durchschnittskostenansatz) von Dachwärmédämmungen für EFH bei bereits ausgebautem Dachraum, von oben ausgeführt

Aus der Abbildung 4.3-42 für MFH geht wiederum die Streuung der berechneten Grenzkosten aufgrund der Unternehmensangaben hervor. Selbst bei einem gleichen Unternehmen variieren die Angaben für verschiedene bautechnische Varianten.



Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

Abbildung 4.3-42 Grenzkosten (Durchschnittskostenansatz) von Dachwärmédämmungen für MFH bei bereits ausgebautem Dachraum, von oben ausgeführt

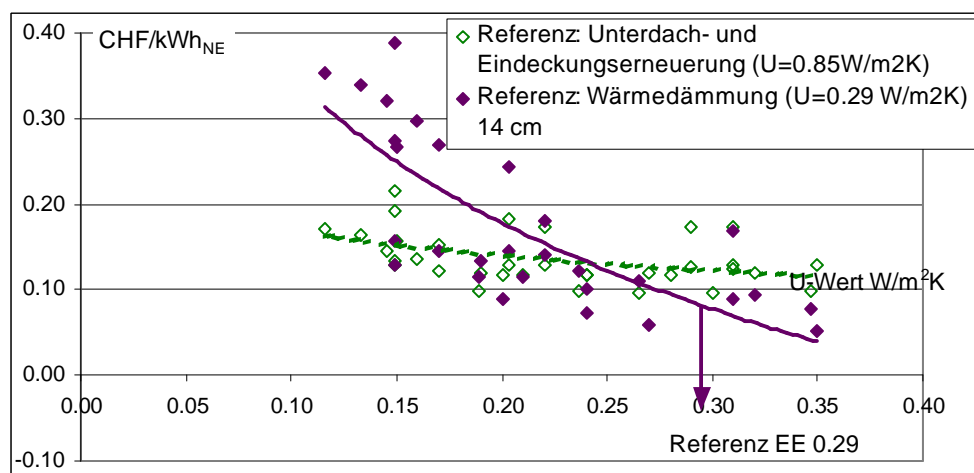


Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

Abbildung 4.3-43 Grenzkosten (Durchschnittskostenansatz) von Dachwärmedämmungen für EFH bei bereits ausgebautem Dachraum, von oben ausgeführt

Die Grenzkosten im Durchschnittskostenansatz steigen gegenüber dem Referenzwert  $0.85 \text{ W/m}^2\text{K}$  naturgemäss in Funktion des mit der Wärmedämmung erreichten U-Wertes viel weniger steil an als gegenüber dem Referenz-U-Wert  $0.29 \text{ W/m}^2\text{K}$  (Abbildung 4.3-43 und Abbildung 4.3-44).

Stellt man sich also beim Referenzfall „Unterdach- und Eindeckungserneuerung“ die Frage nach der Dämmstärke, so ist festzustellen, dass die Erhöhung der Dämmstärke nur zu einem geringen Anstieg der spezifischen Energieeffizienzkosten führt. Die Reduktion des U-Wertes von  $0.85 \text{ W/m}^2\text{K}$  auf  $0.30 \text{ W/m}^2\text{K}$  kostet ca.  $9 \text{ Rp/kWh}_{\text{NE}}$  und eine solche auf  $0.15 \text{ W/m}^2\text{K}$  ca.  $11 \text{ Rp/kWh}_{\text{NE}}$  (EFH) bzw.  $12 \text{ Rp/kWh}_{\text{NE}}$  und  $15 \text{ Rp/kWh}_{\text{NE}}$  (MFH).



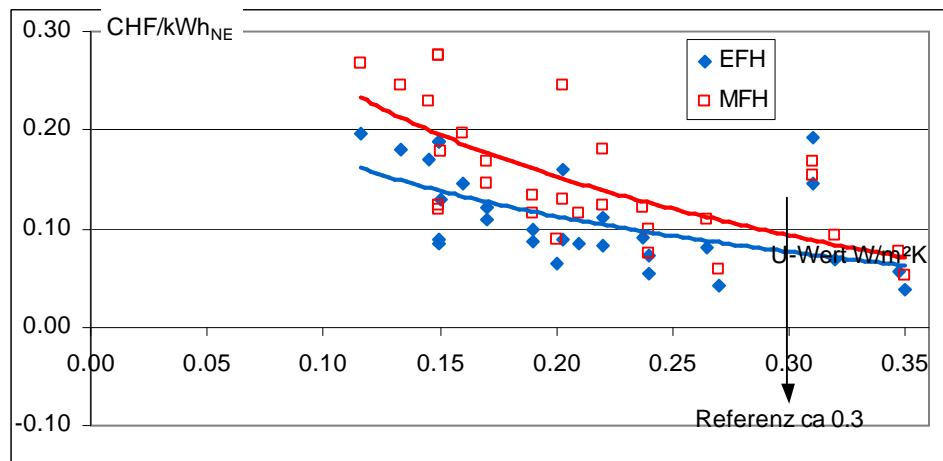
Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

Abbildung 4.3-44 Grenzkosten (Durchschnittskostenansatz) von Dachwärmedämmungen bei MFH bei bereits ausgebautem Dachraum, von oben ausgeführt



Die Ausgangssituation hat einen Einfluss auf die Grenzkosten. Ist der Dachraum bereits ausgebaut (Abbildung 4.3-43 und Abbildung 4.3-44) so ist das Verlegen der Wärmedämmung und insbesondere der Dampfbremse wesentlich aufwändiger als wenn die Wärmedämmung zusammen mit dem Ausbau des Dachraums angebracht wird Abbildung 4.3-45.

Deshalb sind die Grenzkosten beim bereits ausgebauten Dachraum (gegenüber dem Referenzfall, in dem eine Wärmedämmung angebracht wird) höher als beim Dachraumausbau.



Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

Abbildung 4.3-45 Grenzkosten (Durchschnittskostenansatz) von Steildachwärmedämmungen (von oben ausgeführt) für EFH und MFH bei Dachraumausbau, Referenzdämmstärke = 14 cm

### e) *Steildacherneuerung von innen*

Nachteil der Steildachsanieuerung und der Wärmedämmung von innen ist für die Bauträgerschaft vor allem der Verlust an Nutzhöhe, also des verkleinerten Dachraums. Dies ist gerade deshalb relevant, wenn der Dachraum ausgebaut werden soll (ansonsten könnte auch der Estrichboden gedämmt werden) und macht sich umso stärker bemerkbar, je mehr gedämmt werden soll. Das kann entweder ein Hinderungsgrund für diese Variante sein oder es müssten für den verlorenen Dachraum zusätzliche Kosten oder ein Mindernutzen in Funktion der Dämmstärken in Rechnung gestellt werden. Andererseits hat die Variante Dämmen von innen natürlich wie bei der Estrichbodendämmung den Vorteil, dass sie auch vom privaten Hausbesitzer selbst realisiert werden kann, wobei eben auch hier das selbe gilt: bauphysikalische Risiken sollten beachtet werden und der Beizug einer Fachperson ist zu empfehlen.

Weitere Nachteile liegen beim Dämmen von innen auf der ausführungstechnischen Ebene. Das saubere Anschliessen an das Unterdach ist aufwändig und das Anschliessen an die Aussenwärmedämmung ist von innen eher schwierig zu realisieren; auch Unterbrüche im Dämmperimeter und bei der Luftdichtigkeitsfolie müssen u.U. in Kauf genommen werden. Die Erneuerung von innen ist bei den Dachunternehmen nicht sehr beliebt und der Rücklauf der Befragung war in diesem Bereich gering weil mögliche bauphysikalischer Risiken bestehen und weil Dämmen zwischen den Sparren und das Anbringen von Lattungen wegen des beschränkten Raums aufwändiger ist im Vergleich zu Aussenarbeiten. Möglicherweise wären die Zimmerleute die besseren Ansprechpartner, aber dies war nicht Inhalt der Befragung.

Bei der Erneuerung von innen wäre der Referenzfall typischerweise der, dass der Dachraum zu Wohnzwecken ausgebaut wird der Ausbau dieses geplant ist (wenn nicht, kann könnte gleich der Estrichboden gedämmt werden). Bei der Dämmung von innen müssten also die Kosten für die Innenraumbekleidung dem Zweck "Dachraumausbau" zugeordnet werden. Dem Zweck Energieeffizienz bleibt dann die Luftdichtigkeitsfolie, der eigentliche Dämmstoff, deren Befestigungsmaterial (z.B. durch Lattung oder Dachschalung) sowie zusätzliche Lattung, wenn die Dämmstärke die Sparrenhöhe übersteigt. Bei der Variante Dämmung von innen sind dann die Arbeitskosten tendenziell höher, da das Befestigen der Luftdichtigkeitsfolie aufwendiger ist und im Innern mit den langen Lattungen nicht so rationell gearbeitet werden kann.

Fazit: Die Mehrkosten des Dämmens von innen sind eher höher als beim Dämmen von aussen die absoluten Kosten jedoch eher geringer (wobei dann eben auch nicht derselbe Nutzen da ist, nämlich ein frisch erneuertes Unterdach. Quintessenz: Durchaus beide Varianten sind in Betracht zu ziehen, eine Fachperson beizuziehen ist sicher immer ratsam, gerade auch im zweiten Fall.

Eine ausführungstechnisch und bei fachgerechter Ausführung auch bauphysikalisch attraktive Variante ist – wie im Fall der Estrichbodendämmung – das Wärmedämmen mit Schüttdämmung, vor allem bei bereits ausgebautem Dachraum.

Der Dämmstoff kann dann da mittels Öffnungen, die für diesen Zweck erstellt werden, zwischen Innenraumbekleidung und Unterdach eingeblasen werden. Nachteile hier: Dämmstärke beschränkt (im Vergleich zu den über 20 bis 30 cm, von denen sonst die Rede ist), es besteht ein Risiko dass der Dämmstoff ab einigen Stellen nur in unzureichendem Masse hingelangt (eine Thermographie ist deshalb empfohlen, insbesondere da deren Kosten moderat sind), mögliches Setzen des Dämmstoffs in Zukunft, Umweltverträglichkeit (Papier muss chemisch behandelt werden). Vorteil: Diese Variante weist relativ geringe Investitionskosten auf (z.B. im Vergleich eines Umdeckens und Dämmens oder im Vergleich zu einer kompletten Demontage der Innenraumbekleidung) und es kann eine doch merkliche energetische Verbesserung erreicht werden.

#### **f) Estrichbodendämmung**

Die Dämmung des Estrichbodens ist in wirtschaftlicher und ausführungstechnischer Hinsicht eine attraktive Wärmedämmmassnahme, da sie einfach und ohne grosse begleitende Kosten ausgeführt werden kann. Sie kann auch unabhängig von übrigen Bauabläufen realisiert werden. Diese Attraktivität darf jedoch nicht darüber hinweg täuschen, dass gerade diese Massnahme bauphysikalische Risiken enthält, wenn sie nicht fachgerecht ausgeführt wird. Insbesondere auf das sorgfältige Anschliessen der Luftdichtigkeitsfolie ist zu achten. Je nach bestehender Konstruktion des Dachs und der Vordachunterschalung ist ausserdem an der Pfeute oder am Kniestock mit schwierig zu dämmenden Längen oder Teilflächen zu rechnen, dies insbesondere, wenn die Fassade nicht oder nicht gleichzeitig wärme gedämmt wird. Liegt das Niveau des Estrichboden ausserdem oberhalb des Kniestocks (d.h. wenn die obersten Wohnungen teilweise in der Schräge liegen), kann der Dämmperimeter nicht geschlossen werden, d.h. zwischen Dachbodendämmung und Aussenwand bleibt ein Bereich ungedämmt. Auch der Unterbruch der Estrichbodendämmung bei unterteilenden Estrichwänden kann eine Inhomogenität bewirken, welche die energetisch Wirkung im Vergleich zum homogenen Fall verkleinert.

Im Beispiel der Konstruktion der Periode 1925 – 1965 erhöht sich der zu berücksichtigende Linienzuschlag bei einer reinen Estrichbodendämmung von 0.32 auf 0.42. Beim Beispiel aus der Periode bis 1900 verringert er sich jedoch, weil Estrichbodendämmung im Zwischenboden ausgeführt optimal an den in der Wand eingelassenen Balken anschliesst (SIA, 1993).

Tabelle 4.3-38 Flächenspezifische U-Werte ( $W/m^2K$ ) von Wand und Estrichboden sowie lineare Wärmeverlustkoeffizienten ( $W/mK$ ) für verschiedene Bauperioden

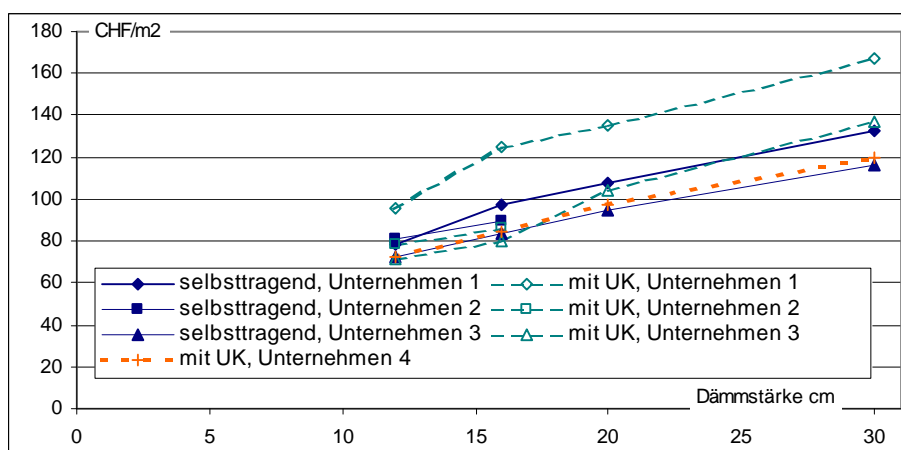
	Wand $W/m^2K$			Estrichboden $W/m^2K$			Linienzuschlag Kniestock $W/mK$		
	Bis 1900	1900-1925	1925-1965	Bis 1900	1900-1925	1925-1965	Bis 1900	1900-1925	1925-1965
Ausgangslage	1.55	1.0	1.16	0.72	0.87	0.88	0.08	0.10	0.32
Nur Estrichbodendämmung	1.55	1.0	1.16	0.29	0.30	0.26	0.03	k.A.	0.42
Nur Wandaussenwärmedämmung	0.32	0.29	0.30	0.72	0.87	0.88	0.33	0.17	0.23
Estrichbodendämmung und Wandaussenwärmedämmung	0.32	0.29	0.30	0.29	0.30	0.26	0.03		0.10

Quelle SIA-Wärmebrückenatlas 3, Altbaudetails, Schätzungen CEPE

Bei der Estrichbodendämmung gibt es zwei technische Möglichkeiten:

- Dämmung mit selbsttragenden Dämmplatten, welche Spanplatten/Riemenboden tragen
- Dämmung mit Unterkonstruktion für Spanplatten/Riemenboden

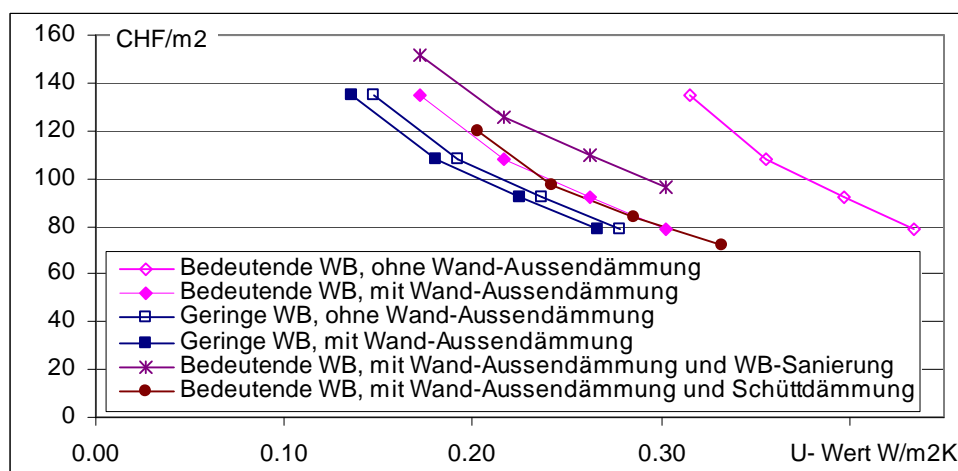
Im ersten Fall ist der die Dämmwirkung des Dämmstoffes kleiner und im zweiten Fall wird die Dämmwirkung durch die Inhomogenität der UK gemindert. Die beiden Effekte heben sich in etwa auf. Im zweiten Fall trägt nebst dem Dämmstoff und deren Verlegung die Unterkonstruktion (UK) zu steigenden Kosten bei zunehmenden Dämmstärken bei. Im ersten Fall ist dafür der Dämmstoff bei gleicher Dämmstärke teurer. Die flächenbasierten Kosten betragen 70 bis 90 CHF/m<sup>2</sup> bei 12 cm Dämmstärke und 110 bis 160 CHF/m<sup>2</sup> bei 30 cm. Davon beträgt der Boden (Riemen oder Spanplatten rund 30 CHF/m<sup>2</sup>). Nebst den flächenspezifischen Kosten sind lineare Kosten für das sorgfältige Anschliessen der Dampfsperre / Luftdichtungsfolie am Dachrand (Kniestock, Pfette, Ortswand) einzurechnen. Ohne besonderen Schwierigkeitsgrad oder Zusatzmassnahmen betragen diese 9 bis 11 CHF/m<sup>2</sup> bei 12 cm Dämmstärke und 18 bis 20 CHF/m<sup>2</sup> bei 30 cm Dämmstärke.



Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

Abbildung 4.3-46 Kosten von Estrichbodendämmungen, inkl. lineare Zuschläge für 0.4 m/m<sup>2</sup>

Abbildung 4.3-47 verdeutlicht, dass die energetische Wirkung einer gleichen Massnahmen je nach Randbedingung sehr unterschiedlich sein kann. Besteht zum Beispiel eine bedeutende Wärmebrücke am Kniestock und an der Ortswand, erhöht sich der rechnerisch energetische Wert der linearen Wärmeverluste unter Umständen sogar, wenn nur der Estrichboden, nicht aber die Aussenwand gedämmt wird und die Wirkung der Wärmedämmung wird entsprechend geschmälert. Werden andererseits die Kosten für besondere Massnahmen am Kniestock oder an der Ortswand miteingerechnet, z.B. das temporäre Entfernen des bestehenden Estrichbodens (Aufschneiden) und das Dämmen des Zwischenbodens am Randbereich oder das Aufborden der Wärmedämmung, so kann zwar die energetische Situation verbessert werden, können sich die Kosten doch deutlich bemerkbar machen (Annahmen in Abbildung 4.3-47: 50 CHF/m). Eine kostengünstige und bauphysikalisch vorteilhafte und risikovermindernde Möglichkeit kann das Dämmen mit Schüttdämmung darstellen.



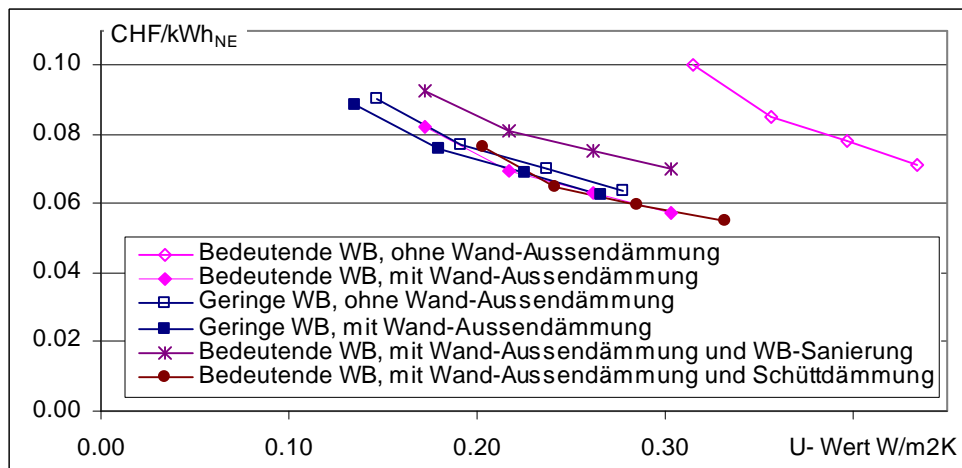
Quelle SIA 1993, Erhebungen und Berechnungen CEPE

Abbildung 4.3-47 Kosten von Estrichbodendämmungen als Funktion ihrer energetischen Wirkung für unterschiedliche Fälle bei einem EFH (0.4m<sup>2</sup> Dachrand).

Fazit: Wenn möglich sollte die Aussenwand gleichzeitig mit dem Estrichboden gedämmt werden. Falls dies nicht möglich ist, sollte nicht zuletzt auch aus bauphysikalischen, beim Dachrand geprüft werden, ob unter Umständen spezielle Massnahmen angebracht sind.

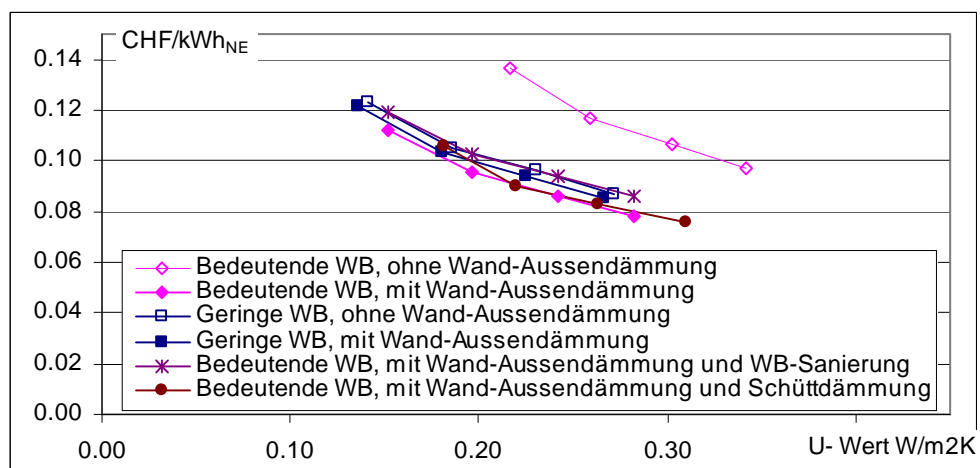
In den folgenden Betrachtungen (Abbildung 4.3-48) wird von einem Ausgangs-Flächen-U-Wert von 0.85 W/m<sup>2</sup>K ausgegangen. Unter Berücksichtigung der Dachrandverluste ergeben sich 0.88 W/m<sup>2</sup>K respektive 0.98 W/m<sup>2</sup>K für die Fälle mit geringer respektive bedeutender Wärmebrücke (0.08 W/mK bzw 0.32 W/mK).

Gegenüber der Referenz, bei der keine Wärmedämmung angebracht würde, liegen die Grenzkosten von Estrichbodendämmungen bei den EFH im Bereich von 5.5 bis 6.5 Rp/kWh<sub>NE</sub> bei 12 cm Dämmstärke und rund 9 Rp/kWh<sub>NE</sub> bei 30 cm, falls die Aussenwand gleichzeitig aussenwärmegeklämt wird (wobei diese Kosten der Aussenwärmedämmung zugerechnet werden). Bestehen bedeutende Wärmebrücken (z.B. Gebäude der Periode 1925 – 1965) liegen die Kosten bei 7 Rp/kWh<sub>NE</sub>, entweder weil Zusatzkosten für die Wärmebrückensanierung anfallen (z.B. 50 CHF/m für das Auftrennen des Estrichbodens und das Dämmen des Zwischenbodens) oder weil die gleichen Kosten eine geringere Wirkung entfalten (und damit der Divisor kleiner ist). Im letzteren Fall ist ausserdem der erreichte U-Wert höher und damit das gesamte Effizienzpotential kleiner



Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

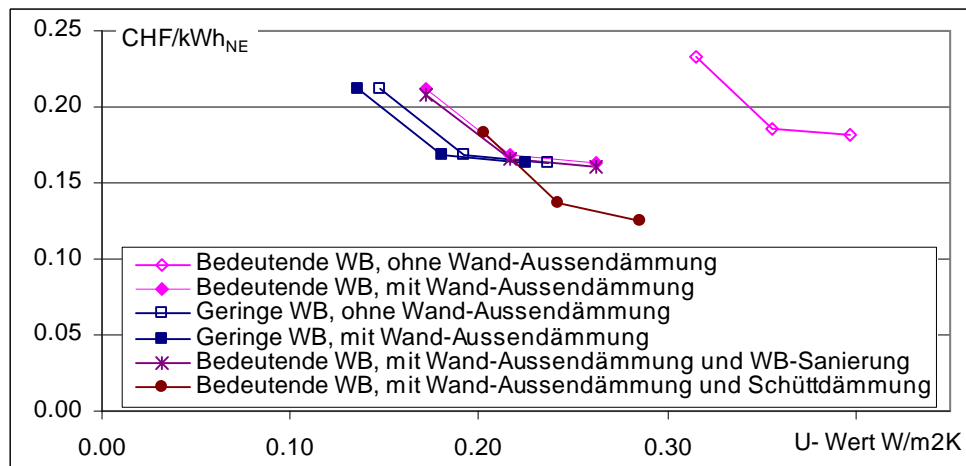
Abbildung 4.3-48 Grenzkosten (Durchschnittskostenansatz) von Estrichboden-Wärmedämmungen bei EFH als Funktion des erreichbaren U-Wert (inkl. Berücksichtigung der Dachrandverluste) gegenüber der Referenz „keine Dämmung“, Realzinssatz 3.5%, 50 Jahre Lebensdauer.



Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

Abbildung 4.3-49 Grenzkosten (Durchschnittskostenansatz) von Estrichboden-Wärmedämmungen bei MFH als Funktion des erreichbaren U-Wert (inkl. Berücksichtigung der Dachrandverluste) gegenüber der Referenz „keine Dämmung“, Realzinssatz 5.5%, 50 Jahre Lebensdauer.

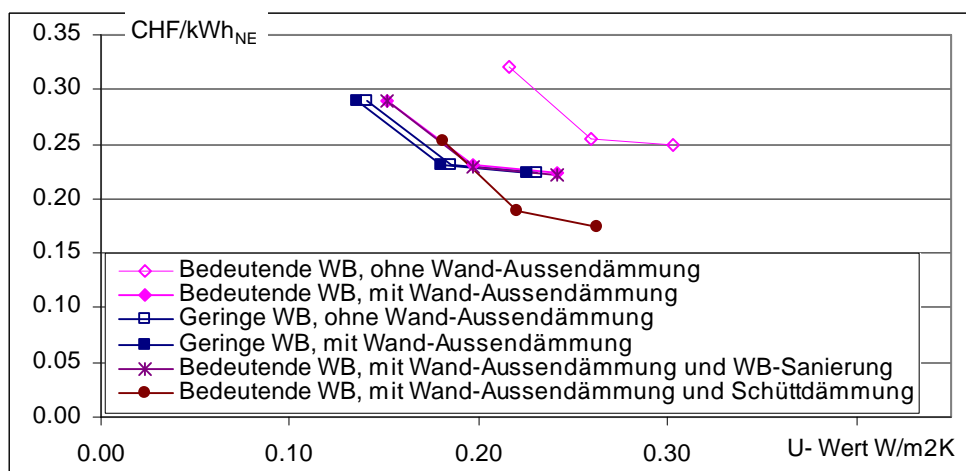
Aufgrund des höheren Realzinssatzes liegen die Grenzkosten im MFH-Bereich erwartungsgemäss höher als bei den EFH, nämlich zwischen rund 8 Rp/kWh<sub>NE</sub> bei 12 cm Dämmstärke und 12 Rp/kWh<sub>NE</sub> bei 30 cm. Aus der Abbildung 4.3-50 geht auch hervor, dass bei den MFH sowohl energie- wie die kostenseitigen Randeffekte weniger Bedeutung haben.



Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

Abbildung 4.3-50 Grenzkosten (Durchschnittskostenansatz) von Estrichboden-Wärmedämmungen beim EFH als Funktion des erreichbaren U-Wert (inkl. Berücksichtigung der Dachrandverluste) gegenüber der Referenzdämmstärke 12 cm. Realzinssatz 3,5%, 50 Jahre Lebensdauer.

Gegenüber der Referenzdämmstärke 12 cm liegen die Grenzkosten (im Durchschnittskostenansatz) bis zu einer Dämmstärke von 20 cm bei rund 20Rp/kWh und bei 30 cm gegenüber 12 cm bei 25 Rp/kWh. Im Fall, in dem die Wärmebrücke nicht saniert wird, liegen sie leicht höher, weil der rechnerische lineare Wärmeverlustwert bei zunehmender Dämmstärke leicht zunimmt.



Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

Abbildung 4.3-51 Grenzkosten (Durchschnittskostenansatz) von Estrichboden-Wärmedämmungen beim MFH als Funktion des erreichbaren U-Wert (inkl. Berücksichtigung der Dachrandverluste) gegenüber der Referenzdämmstärke 12 cm. Realzinssatz 5,5%, 50 Jahre Lebensdauer.

**g) Dachstockersatz**

Wenn der Dachstock als ganzes ersetzt wird, z.B. wenn die Tragstruktur sehr erneuerungsbedürftig ist (durch Feuchtigkeit oder Holzwurmbefall) oder wenn das Dachraumvolumen vergrössert werden soll, kann bautechnisch gleich vorgegangen werden wie im Neubau. Auch hier besteht die Möglichkeit, den Dachstock in Zimmermannsmanier auf der Baustelle zu errichten oder den Dachstock vorgefertigt inklusive Wärmedämmung anzuliefern. Die Grenzkosten sind in beiden Fällen gleich denjenigen im Neubau anzusetzen (weshalb auf Kap. 4.3.8b) verwiesen wird).

**h) Flachdachneubau**

Die Mehrkosten der Flachdachneubauten in Funktion der Dämmstärke setzen sich aus den gleichen Kostenelementen zusammen wie diejenigen der Flachdacherneuerung.

- Mehrkosten für Dämmmaterial
- Mehraufwand für aufwändigeren Transport und Verarbeitung (Handling)
- Mehrkosten beim Dachrand (Dämmmaterial, erhöhte Abwicklungen von Schutzblechen etc.)

Im Unterschied zur Erneuerung kann jedoch der Dachrandabschluss so gestaltet werden, dass der Dachrand wärmetechnisch vom Flachdach und von der Aussenwand getrennt ist (z.B. bei Dachvorsprungelementen) oder der Einbezug des Dachrandes in den Dämmperimeter dem Standardvorgehen entspricht (Brüstung).

Beim Flachdach wird davon ausgegangen, dass im Referenzfall die Brüstung gedämmt wird und der gewichtete U-Wert (Flächen-U-Wert unter anteilmässiger Berücksichtigung der linearen Verluste des Dachrandes)  $0.3 \text{ W/m}^2\text{K}$  beträgt. Ausgehend von dieser energetischen und kostenseitigen Referenzdefinition können die auch den Neubau betreffenden Kostenelemente von Unterkapitel i) herangezogen werden, um die Grenzkosten der zunehmenden Energieeffizienz von Flachdachneubauten berechnet werden.

Tabelle 4.3-39 Investitionskosten (CHF/m<sup>2</sup>) und Brutto-Grenzkosten (CHF/kWh<sub>NE</sub>) der zunehmenden Energieeffizienz von Flachdachneubauten

EFH			MFH			
U-Wert*	Investitionsmehr- kosten	Grenzkosten dr=0.035	U-Wert*	Investitionsmehr- kosten	Grenzkosten dr=0.035	Grenzkosten dr=0.055
W/m <sup>2</sup> K	CHF/m <sup>2</sup> *	CHF/kWh <sub>NE</sub>	W/m <sup>2</sup> K	CHF/m <sup>2</sup> *	CHF/kWh <sub>NE</sub>	CHF/kWh <sub>NE</sub>
0.30	<b>0</b>		0.30	0		
0.25	<b>9</b>	0.09	0.25	7	0.07	0.09
0.21	<b>25</b>	0.13	0.21	18	0.10	0.13
0.18	<b>38</b>	0.15	0.17	33	0.12	0.17
0.14	<b>60</b>	0.18	0.13	54	0.15	0.21
0.11	<b>88</b>	0.22	0.10	81	0.19	0.27

Energetische und kostenseitige Berücksichtigung des Dachrandes: EFH 0.4m/m<sup>2</sup>, MFH 0.18 m/m<sup>2</sup>

Quelle Erhebungen bei SVDW-Mitgliedfirmen und Berechnungen CEPE

Die Brutto-Grenzkosten der zunehmenden Energieeffizienz liegen bei den Flachdachneubauten (Tabelle 4.3-39) etwas höher als bei der Flachdacherneuerung (Tabelle 4.3-41), dies obwohl dort

die Investitionsmehrkosten bei gleichem U-Wert höher liegen. Dieser Sachverhalt erklärt sich insbesondere durch den Referenz-U-Wert, der beim Neubau mit  $0.3 \text{ W/m}^2\text{K}$  tiefer liegt als bei der Erneuerung ( $0.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ , jeweils unter Berücksichtigung des Dachrandes), und sich deshalb an einem steileren Ort im Verlauf des Mehrkostenanstiegs befindet. (Remember: wenn die Kosten linear in Funktion der Dämmstärke ansteigen, so steigen sie in Funktion des U-Wertes progressiv an).

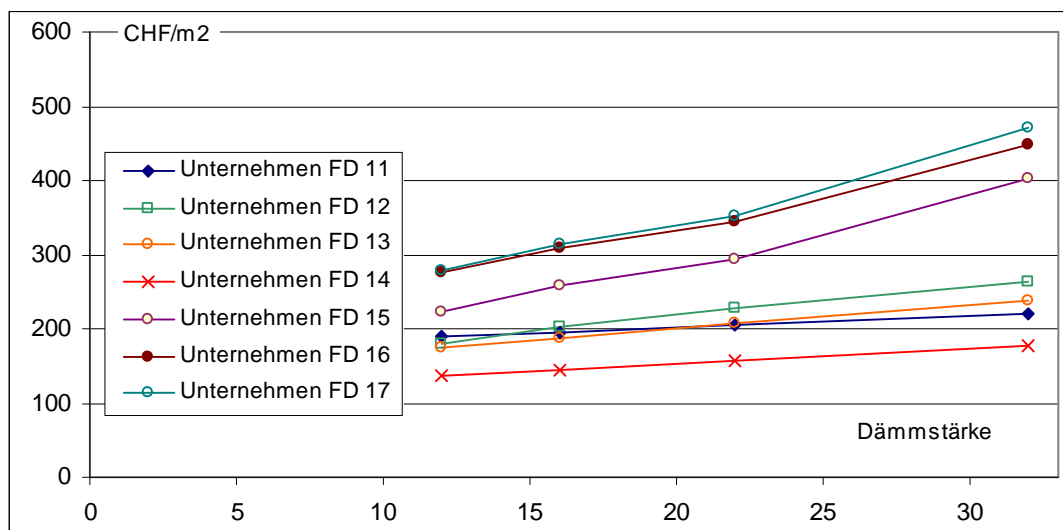
### i) Flachdacherneuerung

Bei der Flachdacherneuerung gilt es, im wesentlichen zwischen zwei Fällen zu unterscheiden, siehe dazu auch die Ausführungen im Kapitel 3.2.

- Abbrechen der bestehenden Abdichtung / Wärmedämmung und Neuaufbau, insbesondere bei schadhafter Abdichtung.
- Zusätzliche Wärmedämmung auf bestehendes Flachdach (Plusdach, Doppeldach) bei intakter Flachdachabdichtung

#### Fall 1: Schadhafte Abdeckung

Wie bei den Fassaden und den übrigen Bauteilen wird zwischen flächenspezifischen und längenspezifischen Kostenelementen unterschieden. Zunächst werden die reinen flächenspezifischen Investitionskosten in Funktion der Dämmstärke dargestellt (Abbildung 4.3-53).



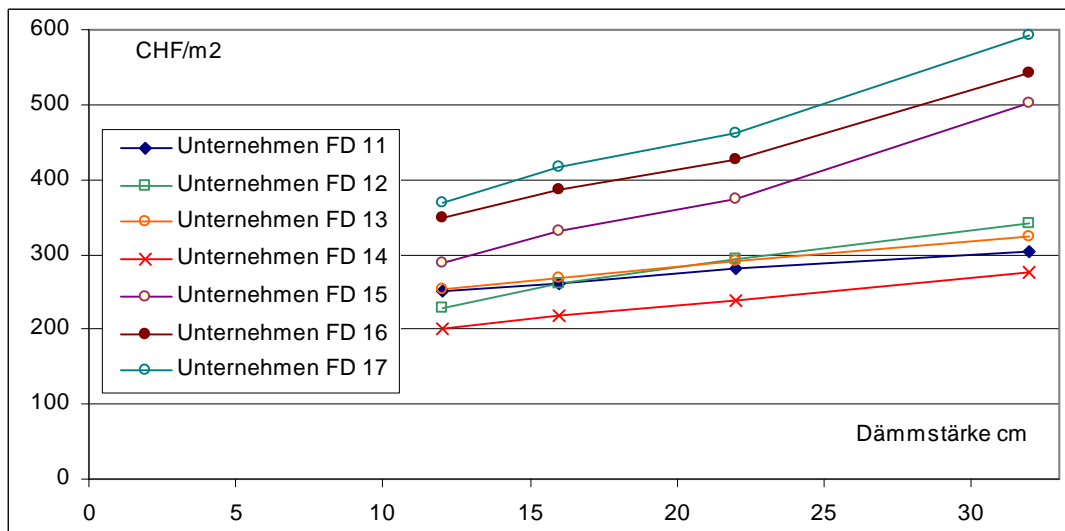
Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

Abbildung 4.3-52 Flächenpreise (ohne Dachrandabschluss) von Flachdacherneuerungen als Funktion der Dämmstärke (Fall Kompletterneuerung der schadhafte Abdichtung)

Bei der Abbildung 4.3-52 (Flächenpreise) und auch bei der Abbildung 4.3-53 (Flächenpreise inkl. Dachrandabschluss mit  $0.4 \text{ m/m}^2$ ) fällt auf, dass das Kostenniveau und insbesondere der Kostenanstieg in Funktion der Dämmstärke bei drei Unternehmen markant höher ist als bei den übrigen Unternehmen. Dies hat damit zu tun, dass diese drei Unternehmen die Kosten für den Dämmstoff Foamglas angegeben hatten, einem markant teurerem Dämmstoff, wie anhand der Abbildung 4.3-54 gut hervorgeht. Beim Vergleich der Abbildungen ist also darauf zu

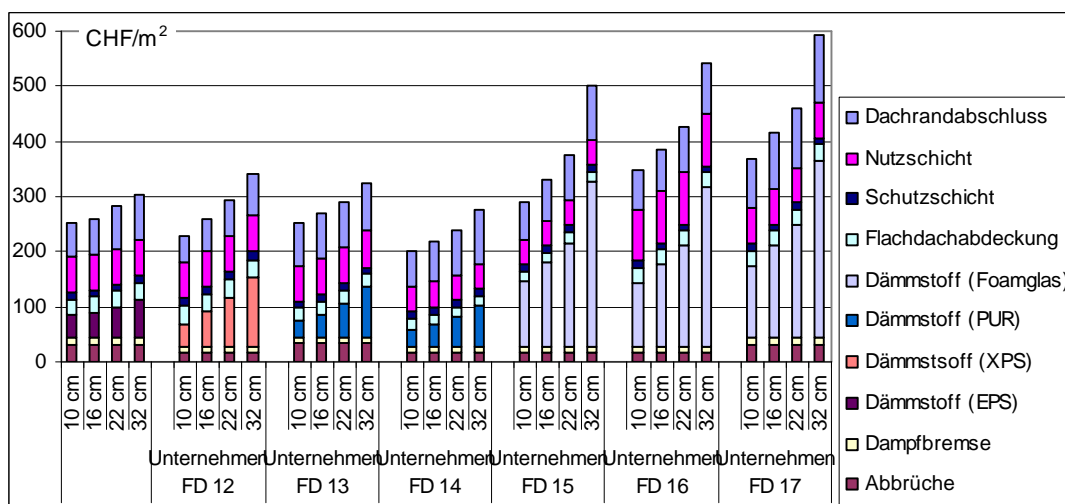


achten, dass sehr unterschiedliche Dämmstoffe mit spezifischen Eigenschaften, energetischen Kennwerten und demzufolge auch Preisen vorgeschlagen werden, siehe dazu auch die Kostenstruktur in Abbildung 4.3-54. Vor allem die Erneuerung mit Foamglas ist eine eher teure Varianten und die spezifische Funktionalität des Foamglas wird eher selten benötigt.



Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

Abbildung 4.3-53 Investitionskosten von Flachdacherneuerungen als Funktion der Dämmstärke (Fall Kompletterneuerung der schadhaften Abdichtung) inkl. Erneuerung und Wärmedämmung des Dachrandabschluss für EFH (0.4m / m<sup>2</sup> Dachfläche)



Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

Abbildung 4.3-54 Kostenstruktur bei Flachdacherneuerungen (Fall Kompletterneuerung der schadhaften Abdichtung) inkl. Erneuerung und WD des Dachrandabschluss für EFH (0.4m Dachrand / m<sup>2</sup> Dachfläche)

Auch bei der Beurteilung der energetischen Wirkung der Flachdacherneuerungen sind nicht nur die flächenbasierten U-Werte zu betrachten, sondern auch die längenbasierten

Wärmeverluste. Wie bei der Fensterleibung können die rechnerischen Werte der linearen Wärmeverluste des Dachrandes je nach Situation sogar ansteigen, wenn die angrenzenden Flächen (Flachdach, Fassade) wärmegeklämt wird, der Dachrand jedoch nicht. Das ist insbesondere bei Dachvorsprüngen oder bei den weit verbreiteten Flachdachbrüstungen der Fall, wie Tabelle 4.3-40 zeigt. Aus der gleichen Tabelle geht auch hervor, dass der lineare Psi-Wert bei nicht gedämmter Brüstung beträchtlich ist.

Tabelle 4.3-40 Lineare U-Werte (Psi-Werte) für Flachdachbrüstungen bei verschiedenen Dämmstärken der Wand, des Dachs und für verschiedene Erneuerungsfälle im Brüstungsbereich. Annahmen: Wand: Backstein, Dach/Brüstung: Beton, Wanddämmung: PS, Lambda=0.04 W/mK, Dach/Brüstung PU, Lambda=0.027 W/mK

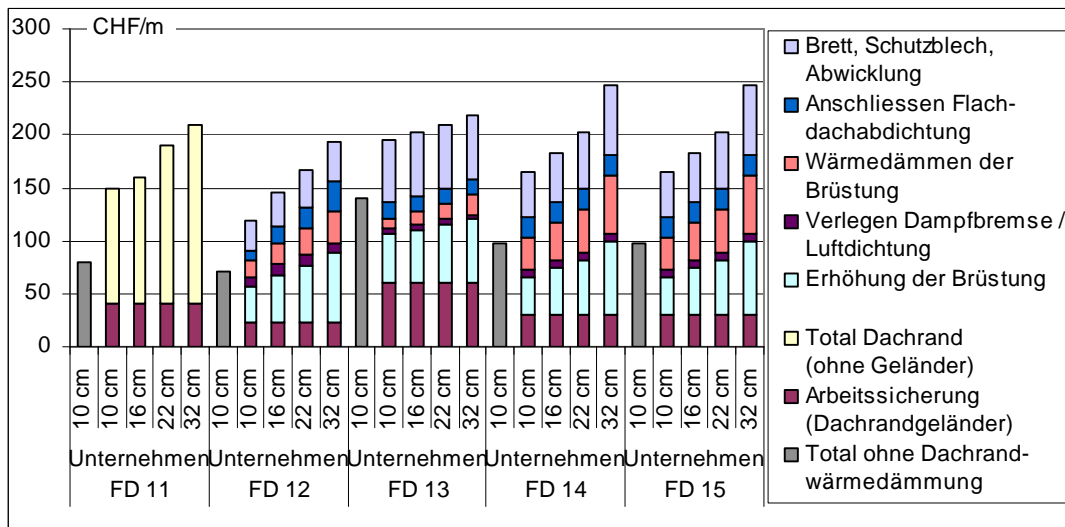
Fassade DS cm	Dach DS cm	Brüstung nicht gedämmt Psi lin W/mK	Brüstung nur aufborden		Brüstung gedämmt			
			DS cm	Psi lin W/mK	„gut“		gering	
					DS cm	Psi lin W/mK	DS cm	DS cm
6	6	0.24	4	0.15				
6	12	0.24	4	0.17	4	0.05		
12	12	0.30	10	0.23	6	0.05	4	0.08
12	20	0.27	10	0.21	8	0.05	5	0.05
20	20	0.30	10	0.23	10	0.04	5	0.06
20	30	0.26	10	0.20	10	0.05	5	0.09

Quelle Berechnungen CEPE mit EUROKOBRA, Wärmebrückenatlas auf PC (EMPA, 2001)

Werden die linearen U-Werte für den Fall eines EFH-Flachdachs auf die Fläche umgerechnet und mit U-Wert\* bezeichnet (typische Dachrandlänge beim EFH: 0.4m/m<sup>2</sup>), wird ersichtlich, dass mit der Dämmung der Brüstung von rund 6 bis 8 cm eine vergleichsweise grosse U-Wert\*-Verbesserung erreicht werden kann, typischerweise rund 0.08 bis 0.1 W/m<sup>2</sup>K (Rechenbeispiel: 0.4m/m<sup>2</sup> Verbesserung von 0.3W/mK auf 0.05W/mK). Zum Vergleich: Um diese U-Wert-Verbesserung mit Massnahmen in der Fläche zu erreichen, müsste die gesamte Fläche von 12 cm auf 20 cm verbessert werden.

Wichtig ist vor allem, dass die Wärmedämmung an der Brüstung nicht nur aufgebordet wird, denn der lineare Psi-Wert kann in diesem Fall nur unwesentlich verbessert werden. Zu empfehlen ist die Wärmedämmung der Brüstung und das Anschliessen der Wärmedämmung an diejenige des Flachdachs. Die Dämmstärke der Brüstung sollte dabei etwas auf die Dämmstärke des Flachdachs und der Fassade abgestimmt sein. Aus der Tabelle 4.3-40 ist ersichtlich, wie hoch die Dämmstärke sein muss, damit der lineare Psi-Wert auf unter 0.05 W/mK (Kolonne „gut“) bzw. 0.1 W/mK gesenkt werden kann.

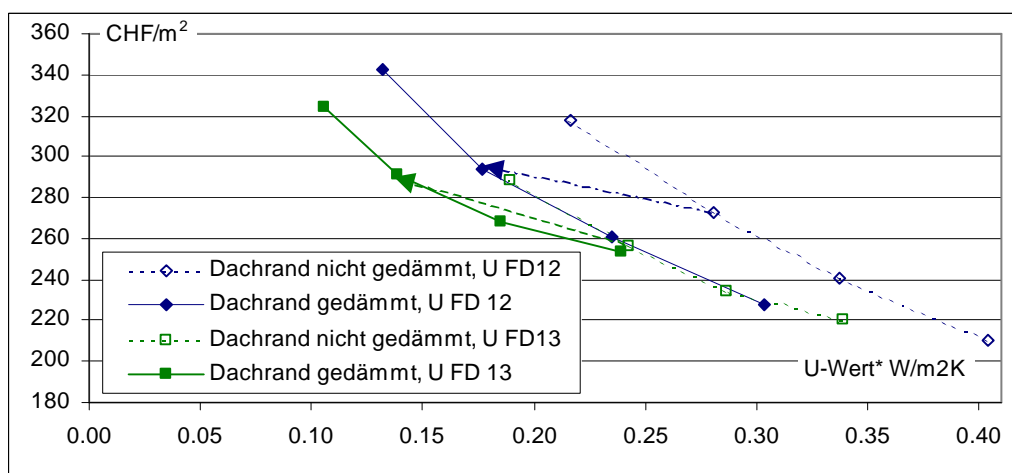
Wird die Brüstung wärmegeklämt, ist mit Mehrkosten von rund 50 bis 80 CHF/m zu rechnen, (siehe Abbildung 4.3-55) denn der grösste Teil der Kosten des Dachrandabschluss fällt ohnehin an, nämlich die Kosten für das Schutzblech, das Anschliessen der Abdichtung, das Dachrandgeländer. Beim EFH ergibt dies umgerechnet auf die Fläche 20 bis 30 CHF/m<sup>2</sup>. (Annahme: 40 m Dachrand pro 100 m<sup>2</sup> Dachfläche).



Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

Abbildung 4.3-55 Kostenstruktur pro Laufmeter für den Dachrandabschluss bei der Erneuerung von Flachdächern mit Brüstung in Funktion der Dämmstärke des Flachdachs

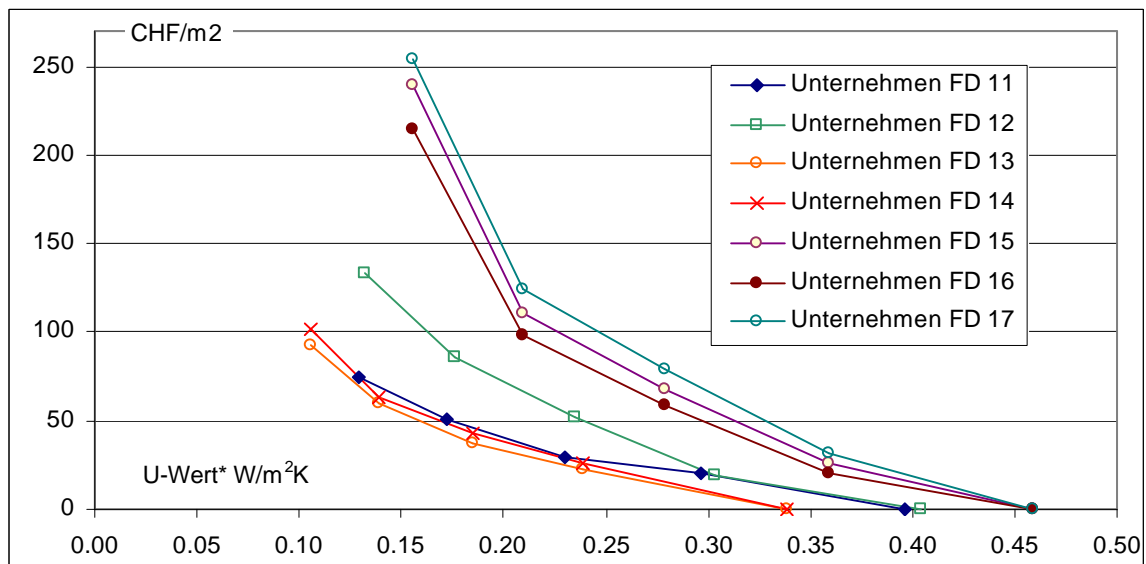
In den meisten Fällen ist es also aus Sicht der Kosteneffizienz zu empfehlen, den Dachrand ebenfalls wärmetechnisch zu erneuern. Eine Dachranderneuerung ist solange kosteneffizienter als eine Erhöhung der Dämmstärke in der Fläche, als in der Abbildung 4.3-56 die Verbindung zwischen „Dachrand wird nicht wärmegeädämmt“ und „Dachrand wird wärmegeädämmt“ (Pfeil) weniger steil ist als der Kostenverlauf in Funktion der Dämmstärke (jeweils gestrichelt verbundene Punkte). Zugrunde liegen den in der Abbildung 4.3-56 dargestellten Berechnungen die Brüstungsdämmstärke der Spalte „gut“ der Tabelle 4.3-40 sowie 12 cm, 16 cm, 22 cm und 32 cm als Dämmstärke der Dachfläche.



Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

Abbildung 4.3-56 Investitionskosten der Flachdacherneuerung für die Fälle i) Brüstung wird bzw. ii) wird nicht wärmegeädämmt am Fallbeispiel der Unternehmen FD 12 und FD 13. U-Wert\*: Gewichteter U-Wert unter Berücksichtigung der linearen Wärmeverluste Psi

Abschliessend erfolgt die Berechnung der Grenzkosten, wozu ein Referenzfall zu definieren ist. Da die Ausgangslage eine schadhafte Abdichtung ist und angenommen wird, dass sowohl die bestehende Abdichtung wie die Wärmedämmung abgebrochen wird, erfährt das Bauteil eine tiefgreifende Veränderung, weshalb der Grenzwert auf der Ebene U-Wert eingehalten werden muss ( $0.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Dies entspricht je nach Dämmstoff rund 10 cm, wobei der Grenzwert bei Dämmstoffen mit tiefem Lambda-Wert auch erreicht wird, wenn die Brüstung nicht gedämmt wird.



Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

Abbildung 4.3-57 Mehrkosten von Flachdacherneuerungen gegenüber dem Referenzfall in Funktion des gewichteten U-Wertes (Dach und Dachrand,  $0.4 \text{ m}^2$ )

Zur Berechnung der Investitionsmehrkosten und der Grenzkosten wird der Dämmstoff Schaumglas nicht berücksichtigt, denn die spezifische Funktionalität des Schaumglases wird im Normalfall nicht benötigt<sup>1</sup>.

Für die Mehrfamilienhäuser gelangen für die Ermittlung der Investitionsmehrkosten grundsätzlich die gleichen Kostenelemente zur Anwendung, wobei berücksichtigt wird, dass die spezifische Dachrandlänge beim MFH tiefer liegt, nämlich bei  $0.18 \text{ m}$  pro  $\text{m}^2$  Dachfläche, was einer Dachfläche von z.B.  $12 \text{ m}$  mal  $30 \text{ m}$  entspricht. Die auf die Fläche umgelegten Mehrinvestitionskosten steigen beim MFH in Funktion des sinkenden U-Wertes weniger stark an, weil der Einfluss des Dachrandes auf den umgelegten Flächenpreis weniger stark ist (siehe Tabelle 4.3-41).

Die Grenzkosten der zunehmenden Energieeffizienz von Flachdacherneuerungen sind im Vergleich zu anderen Bauelementen relativ tief. Die ersten  $0.1 \text{ W/m}^2\text{K}$  U-Wert-Verbesserung kosten sowohl beim EFH wie beim MFH nicht mehr als  $10 \text{ Rp/kWh}_{\text{NE}}$  brutto und das sehr tiefe U-Wert-Niveau von  $0.1 \text{ W/m}^2\text{K}$  kann mit Brutto-Grenzkosten (Durchschnittskostenansatz) zu rund  $20 \text{ Rp/kWh}_{\text{NE}}$  erreicht werden.

<sup>1</sup> In den Fällen, in denen Schaumglas aus bautechnischen oder anderen Gründen tatsächlich in der gesamten Dämmstärke benötigt würde, wären die Grenzkosten entsprechend höher.

Tabelle 4.3-41 Investitionskosten (CHF/m<sup>2</sup>) und Brutto-Grenzkosten (Durchschnittskostenansatz, CHF/kWh<sub>NE</sub>) der zunehmenden Energieeffizienz von Flachdach-erneuerungen (Ausgangslage schadhafte Abdichtung ist zu ersetzen)

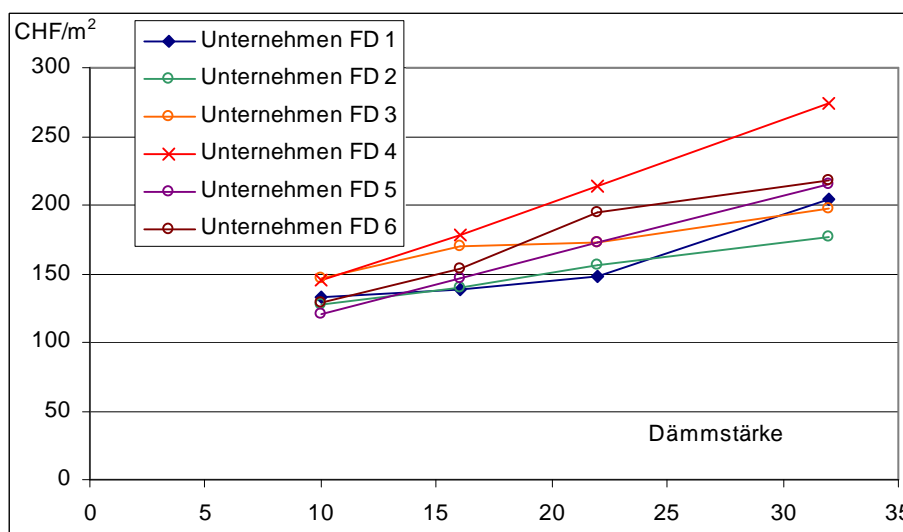
EFH			MFH			
U-Wert*	Investitionsmehr- kosten	Grenzkosten dr=0.035	U-Wert*	Investitionsmehr- kosten	Grenzkosten	
W/m <sup>2</sup> K	CHF/m <sup>2</sup> *	CHF/kWh <sub>NE</sub>	W/m <sup>2</sup> K	CHF/m <sup>2</sup> *	dr=0.035	dr=0.055
					CHF/kWh <sub>NE</sub>	CHF/kWh <sub>NE</sub>
0.40	0		0.35	0		
0.30	15	0.07	0.25	11	0.05	0.07
0.24	35	0.10	0.21	22	0.08	0.10
0.18	62	0.13	0.16	45	0.11	0.16
0.14	90	0.17	0.13	65	0.14	0.20
0.11	120	0.20	0.10	90	0.17	0.24

\*Energietische und kostenseitige Berücksichtigung des Dachrandes: EFH 0.4m/m<sup>2</sup>, MFH 0.18 m/m<sup>2</sup>

Quelle Erhebungen bei SVDW-Mitgliedfirmen und Berechnungen CEPE

**Fall 2: Plusdach**

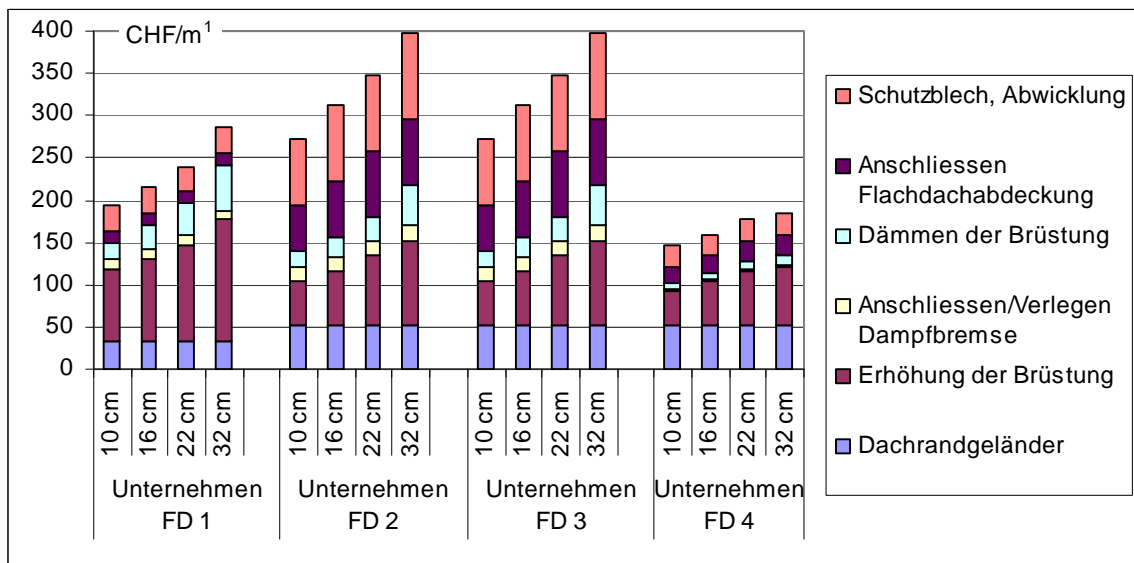
Wie im obigen Fall wird zwischen flächen- und längenbasierten Preisen bzw. Kosten unterschieden.



Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

Abbildung 4.3-58 Plusdach, nur Flächenpreise, ohne Dachranderneuerung, CHF/m<sup>2</sup>

Zu den Flächenpreisen gemäss Abbildung 4.3-58 die längenbasierten Preiselemente gemäss Abbildung 4.3-59 zu addieren, um die totalen, auf die Fläche umgelegten Kosten zu erhalten (Abbildung 4.3-60 am Beispiel der EFH für 0.4 m Dachrandlänge pro m<sup>2</sup> Dachfläche).



Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

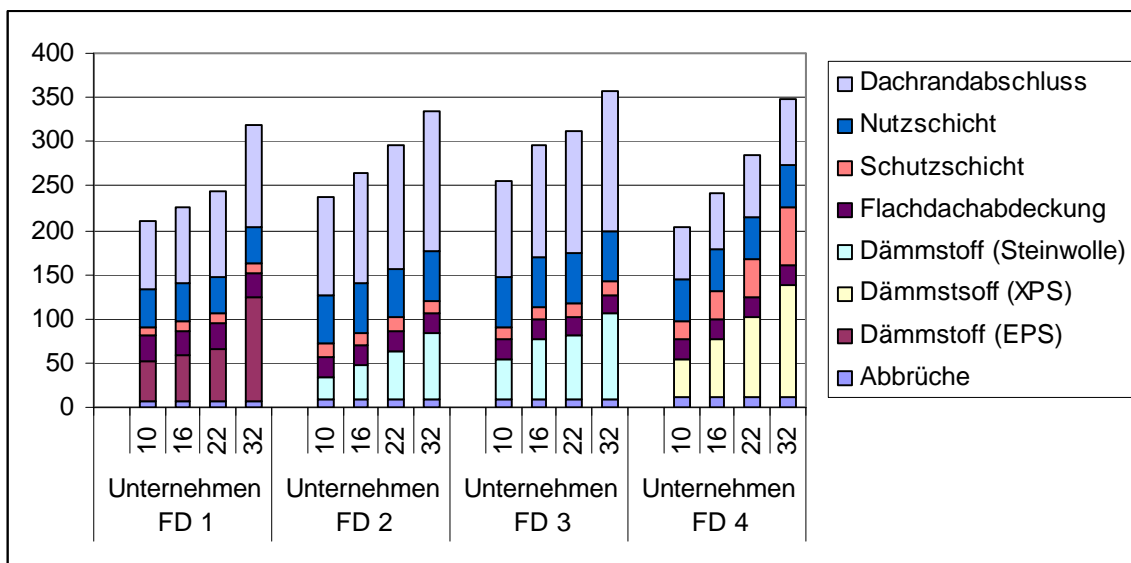
Abbildung 4.3-59 Kostenstruktur der Dachranderneuerung bei Plusdächern (längenbasierte Kosten), CHF/m

Die längenbasierten Kosten für den Dachrandabschluss und das Anschliessen an die Wand können sich erhöhen, falls die Bauabläufe nicht aufeinander abgestimmt sind, d.h. falls Wand und Flachdach nicht gleichzeitig gedämmt werden, und zwar um 80 CHF/m (bei 10 cm Dämmstärke), 90 CHF/m (16 cm), 100 CHF/m (22 cm) bzw. 110 CHF/m (32 cm).

Die gesamten Kosten pro m<sup>2</sup> erhöhen sich aufgrund der Kosten der Dachranderneuerung beträchtlich. Bei 0.4 m Dachrand pro m<sup>2</sup> Dachfläche (EFH) ergeben Kosten von 200 bis 300 CHF/m einen auf die Fläche umgelegten Zuschlag von 80 bis 120 CHF/m<sup>2</sup>.

Das Kostenniveau ist beim Plusdach vergleichbar wie bei der kompletten Erneuerungen, d.h. beim Abbrechen der bestehenden Abdichtung/WD, siehe dazu die Abbildung 4.3-53 weiter oben.

Wie bei den übrigen Bauteilen gibt die Kostenstruktur Aufschluss über die Ursachen der Mehr-Investitionskosten in Funktion der Dämmstärke. Die Kosten des Dämmmaterials und die Kosten des Dachrandes sind die bestimmenden Faktoren. Zur Beurteilung der auf die Energie bezogenen spezifischen Kosten sind wiederum die Ausgangslage bzw. die Massnahmen in Randbereich bzw. an der Fassade mitentscheidend. Bei der energetischen Wirkung ist beim Plusdach ausserdem die bestehende WD miteinzubeziehen, d.h. die gleiche Dämmstärke wird hier eine geringere energetische Wirkung entfalten.



Quelle Erhebung bei SVDW-Mitgliedunternehmen und Berechnungen CEPE

Abbildung 4.3-6o Kostenstruktur der Flächenpreise (inkl. längenbasierte Kosten für den Dachrand) bei Flachdacherneuerungen (Plusdach), CHF/m²

Bei den Flachdächern der Bauperioden, in denen bereits Wärmedämmungen üblich waren, sind Annahmen über deren Dämmstärken zu treffen (siehe Tabelle 4.3-42), wenn das Plusdachverfahren zu Anwendung kommt (d.h. wenn die neue Wärmedämmung auf die alte aufgedoppelt werden kann; in welchen Fällen dies möglich ist, muss in diesem Fall mehr als in allen bisher erwähnten eine Fachperson entscheiden).

Tabelle 4.3-42 Annahmen zu bestehenden Wärmedämmungen von Flachdächern als Ausgangslage (Referenz) bei Erneuerungen nach dem Plusdach-Verfahren

Bauperiode	Vor 1960	1961-1975	1976-1985	1986-2000
Dämmstärke	3 cm	5 cm	9 cm	12 cm
Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ (W/mK)	0.05	0.045	0.045	0.04

### 4.3.9 Kellerdecke, Bodenplatte

Die Dämmtechnik der Kellerdeckendämmung ist vergleichbar mit der einen Variante der Estrichbodendämmung: Unterkonstruktion, Dämmplatten oder Schüttdämmstoff plus Abdeckung (Spanplatten, Riemeboden bzw. Täfer oder Gipsplatte). Wie beim Anschluss des Estrichbodens an die Aussenwand können auch beim Anschluss der Kellerdecke an die Aussenwand (Sockel) Wärmebrücken auftreten. Diese sind unter Umständen schwieriger zu verhindern, insbesondere, wenn das Kellerdeckenniveau unter Terrain liegt und die Dämmung des Sockels mit Tiefbauarbeiten verbunden ist. Es ist damit zu rechnen, dass die Grenzkosten der Wärmedämmung aufgrund dieser Parallelen und Unterschiede ähnlich oder höher sind und dass dem erreichbaren energetischen Level (wegen der linearen Wärmeverluste im Sockelbereich) ebenfalls Grenzen gesetzt sind, auch wenn die Kellerdecke massiv gedämmt würde. Bei der Kellerdecke kommt ausserdem einschränkend dazu, dass markante Dämmstärken zunehmend die Nutzhöhe des Kellerraums einschränkt. Verglichen mit der Estrichbodendämmung ist damit zu rechnen, dass sich bei der Kellerdeckendämmung vermehrt vorhandenen Raumunterteilungen (Kellerwände) vertuernd und energetisch potentialmindernd auswirken.

### 4.3.10 Wärmebrücken

Der Einfluss der Wärmebrücken auf die Grenzkosten bzw. die Grenzkosten der Wärmebrückenerneuerung sind für die meisten Fälle in den einzelnen Kapiteln behandelt (Fensterleibung, Dachrand, durchlaufender Deckenanschluss, Sockel etc.). An dieser Stelle wird deshalb nur kurz auf die Wärmebrücken von Balkonen und anderer durchgehender Bauteile eingegangen (z.B. Vordächer über Türen).

Die Wärmebrücken aufgrund durchgehender Betonplatten kann zwar theoretisch mittels wärmetechnischer „Add-on“-Massnahmen verbessert werden (Anbringen einer Wärmedämmung unterhalb, oberhalb und an der Stirnseite der Balkonplatte). Dies ist jedoch mit unverhältnismässig hohen Grenzkosten verbunden, siehe auch Wärmebrückenkatalog 3 (SIA, 1993). Die darin aufgeführten Fallbeispiele sind von der Grössenordnung der Grenzkosten immer noch richtig, auch wenn die Daten aus dem Jahr 1993 stammen. Balkonwärmebrücken könnten ausserdem mittels konstruktivem Eingriff erneuert werden. Dieser ist aber mit so hohen Kosten verbunden, dass er nur realisiert wird, wenn er im Rahmen eines anderen Nutzens realisiert werden kann, insbesondere bei einem Ersatz des alten durch einen neuen, grösseren Balkon.

Beim Ersatz von Balkonen ist der energetisch Aspekt höchstens zweitrangig. Die Verminderung des Risikos von bauphysikalischen Schäden (kalte Stellen und damit verbundene Feuchtigkeitsschäden) und vor allem der Mehrnutzen für Mieterinnen und Gebäudebesitzer steht an erster Stelle der Motivation für Balkonabbrüche und den Ersatz durch solche (meist) grösserer Fläche.

Die Reduktion der energetischen Verluste ist dann als Co-Benefit anzusehen. Mittels der Methode der anrechenbaren Kosten kann ermittelt werden, welcher Teil der Investitionskosten eines neuen Balkons der energetischen Komponente zuzurechnen ist. Der restliche Teil, welcher den Mehrnutzen aufgrund der grösseren Balkonfläche oder durch verminderte Bauschadensrisiken gegenüber zu stellen ist, wird dadurch geringer und die Rentabilität der Massnahme entsprechend grösser, als wenn der Effekt in der Kosten-Nutzenrechnung vernachlässigt worden wäre. Der Effekt ist absolut gesehen allerdings eher klein, wie die Rechnung in Tabelle 4.3-43 zeigt.

$$\text{Nettokosten}_{\text{Balkon}} = \text{Gesamte Kosten}_{\text{Balkon}} - \text{anrechenbare Kosten}_{\text{Energiebedarfsreduktion}}$$



Die der Energie anrechenbaren Kosten sind die Kosten des vermiedenen Heizenergieverbrauchs und liegen in der folgenden Grössenordnung gemäss Tabelle 4.3-43. Bei z.B. 5 m bis 10 m Balkonlänge pro Wohnung ergibt das im besten Fall rund 30 CHF/a bis 60 CHF/a.

Tabelle 4.3-43 Anrechenbare Jahres- und Investitionskosten aufgrund vermiedenen Heizwärmebedarfskosten durch Balkonersätze.

	Psi Vorher W/mK	Heizwärme- bedarfs- reduktion MJ/m.a	Vermiedene Wärmekosten = anrechenbare Jahreskosten		Anrechenbare Investitions- kosten (mit Wärmekosten tief)	
			tief CHF/m.a	hoch CHF/m.a	Annuität mit Realzins 3.5% CHF/m	Annuität mit Realzins 5.5% CHF/m
Durchgehend betoniert mit Baustahlkorbeinlage	0.7	208	4.0	5.8	86	65
Mit gedämmter Baustahlkorbeinlage	0.5	144	2.8	4.0	60	45
Durchgehend betoniert mit Edelstahlkorbeinlage	0.5	144	2.8	4.0	60	45
Mit gedämmter Edel- stahlkorbeinlage (4cm)	0.3	80	1.6	2.2	33	25
Mit gedämmter Edel- stahlkorbeinlage (8 cm)	0.2	48	0.9	1.3	20	15
Annahme Wärmeverlust nach Balkonersatz (Verankerung) 0.05 W/mK						

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

Da anrechenbaren Investitionskosten sind mit den typischen Investitionskosten eines Balkonersatz zu vergleichen.

#### 4.3.11 Zusammenfassung der Grenzkosten für die verschiedenen Investitionsmassnahmen

Für verschiedenste Erneuerungsvarianten und Ausgangslagen (Gebäudebauperioden) sind in Abbildung 4.3-61 die Brutto-Grenzkosten (Durchschnittskostenansatz) in Funktion des Bruttounutzens auf Bauteilebene, also in Funktion der Brutto-Heizwärmebedarfsreduktion pro m<sup>2</sup> Bauteil zusammengestellt. Sichtbar wird dadurch folgendes:

- Die tiefsten Grenzkosten (im Durchschnittskostenansatz) und gleichzeitig die grösste erreichbare Heizwärmebedarfsreduktion pro m<sup>2</sup> Bauteil sind bei den Referenzfällen der Instandsetzung zu verzeichnen. Eine energetische Erneuerung, sei es im Wand-, Dach- oder Estrichbodenbereich statt einer blossen (nicht-energetischen) Instandsetzung (Fassadenanstrich, Unterdacherneuerung, nichts-tun beim Estrichboden) ist selbst bei moderat angesetzten Wärmepreisen als wirtschaftlich zu bezeichnen.
- Der Verlauf der Durchschnittskosten ist meistens sehr flach und das Kostenoptimum ist häufig bei Dämmstärken zwischen 14 cm und beinahe 20 cm.
- Für Bauteile mit tieferem Ausgangs-U-Wert, z.B. solche mit bereits bestehender Wärmedämmung aus der Bauperiode nach 1975, sind die Grenzkosten (Durchschnittskostenansatz) höher und die erreichbare Heizwärmebedarfsreduktion kleiner. Vorteilhaft ist, wenn die bestehende Wärmedämmung in die Erneuerungsmassnahme integriert werden kann, z.B. beim Plusdach oder bei der hinterlüfteten Fassade.

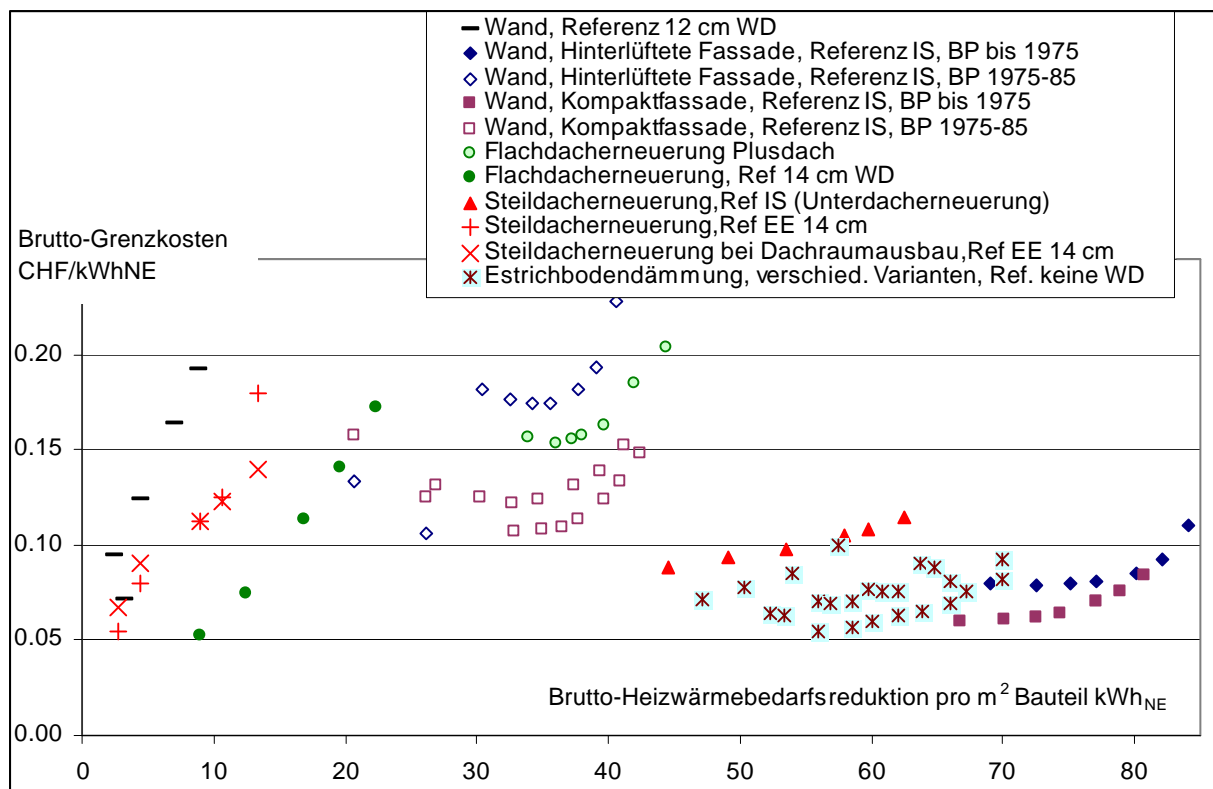


Abbildung 4.3-61 Zusammenfassende Darstellung der Grenzkosten (Durchschnittskostenansatz) für Erneuerungen (Referenzfall: heute übliche energetische Erneuerungen)

- Referenzfall energetische Erneuerung: Die Durchschnittskosten einer Dämmstärken-erhöhung sind zu Beginn (wenige cm mehr) leicht höher als beim Referenzfall der

Instandsetzung, beginnen dann aber stärker anzusteigen. Ausserdem ist die erreichbare Heizwärmebedarfsreduktion naturgemäss wesentlich kleiner, weil das Bauteil schon im Referenzfall einen relativ guten U-Wert aufweist.

(Anmerkung zur Interpretation der Abbildung: der „erste“ Datenpunkt stellt beim Referenzfall „Energetische Erneuerung“ die Grenzkosten (Durchschnittskosten) „gegen unten“ dar, also z.B. nur 10 cm statt 12 cm. Dies stellen gleichzeitig die Grenzkosten von 10 cm auf 12 cm dar und zeigen damit in diesem Bereich die Sensitivität gegenüber der Annahme zur Referenzdämmstärke auf).

#### 4.3.12 Lüftung, Luftdichtigkeit der Gebäudehülle

Hervorgerufen durch die Impulse und Bestrebungen des Minergie-Labels sind Lüftungssysteme auch im Wohnungsbau verstärkt zum Thema geworden. Dabei ist zwischen verschiedenen Systemen zu unterscheiden, welche jeweils ihre spezifischen Vor- und Nachteile haben und deshalb auch durch ihre geeigneten Anwendungsfelder definiert sind. Sie erfüllen gleichzeitig eine mehrdimensionale Funktionalität, die je nach System und Anwendungsgebiet (Neubau oder bestehende Gebäude) unterschiedlich vollständig erfüllt werden können. Im Bereich Wohngebäude erfüllten Lüftungssysteme folgende Funktionalitäten (siehe auch Themenblatt Minergie (Minergie, 2001a)):

- **Luftwechsel:** Per Definition ist die Gewährleistung des Luftwechsels die Basisfunktion einer Lüftungsanlage. Jeder Raum sollte mit der aus hygienischer Sicht optimalen Frischluftmenge versorgt. Diese richtet sich nicht zuletzt nach der Luftfeuchtigkeit, welche ausgeglichen sein sollte. Dieser Aspekt wird umso wichtiger, je dichter die Gebäude gebaut werden bzw. je dichter sie im Zuge einer Erneuerung werden. Dies ist insbesondere in Neubauten und in Gebäuden mit einer umfassenden Gebäudehüllenerneuerung und neuen Fenstern der Fall. Ohne Lüftungssysteme wären in diesen Fällen die Bewohner vor hohe Anforderungen an das Lüftungsverhalten gestellt. Für die Gebäudebesitzer vermindern entsprechend geregelte und unterhaltende Lüftungssysteme gleichzeitig das Risiko von Feuchtigkeitsschäden.
- **Luftqualität:** Die Aussenluft wird nach Möglichkeit gefiltert. Schadstoffe im Gebäude (Wohngifte, Tabakrauch, Radon) werden kontinuierlich abgeführt.
- **Thermischer Komfort:** Der gezielte Luftaustausch verhindert Zugerscheinungen und ein Auskühlen der Räume.
- **Schallschutz:** Das Lüftungssystem schützt vor Aussenlärm. Schalldämpfer sorgen dafür, dass die Ventilatoren nicht stören.
- **Energieverbrauch:** Die Wärmeverluste beim Lüften werden auf ein Minimum beschränkt. Einige Systeme gewinnen aus der Abluft Wärme zu Heizzwecken oder zur Wassererwärmung zurück.

Die ersten Punkte sind insbesondere auch für die Co-Benefits von Bedeutung, die im Kapitel 4.6 behandelt werden.

Es kann zwischen folgenden Systemen unterschieden werden:

- Komfortlüftung mit Wärmerückgewinnung
- Abluftanlage mit Aussenluftdurchlässen
- Einzelraum-Komfortlüftung
- Komfortlüftung mit Abluftwärmepumpe
- Abluftanlage mit Wärmepumpe
- Automatische Fensterlüftung

##### a) *Kosten von Lüftungsanlagen*

Für die Ermittlung der Kosten und der energetischen Nutzen der Lüftungsanlagen konnte die HTA Luzern für eine Projektmitarbeit gewonnen werden. Diese verfügt über eine breite Erfahrung im Bereich Haustechnik und insbesondere im Bereich Lüftungsanlagen, jeweils mit auch einem starken Bezug zur Praxis. Dies ermöglichte es, nicht nur die Kosten der Lüftungsanlagen für verschiedene typische Fälle praxisnah zu spezifizieren, sondern

gleichzeitig die jeweils beste Eignung der verschiedenen Lüftungsanlagentypen für die unterschiedlichen Ausgangssituationen im Gebäudebestand sowie das jeweilige Potential abzuschätzen.

Um gesamtschweizerisch gültige Aussagen machen zu können, wird zunächst eine Berechnung der durchschnittlichen EBF und der Zimmerzahl der Wohnungen notwendig. Die EBF können für die verschiedenen Wohnungsgrößen (Zimmerzahl) anhand der Wohnungszählung 1990 berechnet werden. Folgende Durchschnitts-EBF kommen in den folgenden Berechnungen zur Anwendung:

Tabelle 4.3-44 Durchschnittliche EBF pro Wohnung für die verschiedenen Wohnungsgrößenklassen des Gebäudebestandes 1990

Bis 2 1/2 Zimmer	3 u. 3 1/2 Zimmer	4 u. 4 1/2 Zimmer	Mehr als 5 Zimmer	Gewichtetes Mittel	EFH
64	90	115	132	97	170

Quelle BFS 1996

Tabelle 4.3-45 Investitionskosten CHF von Lüftungsanlagen mit WRG für bestehende MFH und EFH unter den baulichen Voraussetzung gemäss Tabelle 4.3-46

	Komfortlüftung zentral	Komfortlüftung pro Wohnung	Einzelraum- Komfortlüftung
<b>Grundkosten pro Wohnung, Total</b>	<b>7800</b>	<b>9700</b>	<b>2800</b>
Anteil Gerät	2000	4000	
Abluft Bad und Küche			2000
Anteil Steuerung	300	300	-
Schalldämpfer, 'Zentrale'	1000	800	-
Aussenluft, Fortluft	2000	1600	-
Projektierung, Administration	1500	1500 *	500 *
Bauseitig (Sanitär, Elektriker, Bau)	1000	1500	300
<b>Variabel pro Zimmer, Total</b>	<b>1500</b>	<b>900</b>	<b>2800</b>
Gerät			1500
Montage			400
Leitungen inkl. Verbindungsstücke	400	400	
Auslässe	100	100	
Projektierung, Administration	100	100	200
Bauseitig (Sanitär, Elektriker, Bau)		300	700
Verteilung über Decke	300		
Verteilung über Fassade	600		
* Zuschlag für EFH		2000	500

Quelle H. Huber, HTA Luzern

Die Investitionskosten werden vielmehr durch die Anzahl der zu belüftenden Zimmer, den Anlagentyp und den baulichen Voraussetzungen bestimmt. Die Investitionskosten sind relativ

wenig von der Gebäudedimension abhängig; der grösste Anteil der Kostenpunkte Aussenluft / Fortluft sowie Leitungen innerhalb der Wohnungen betrifft nicht die längenabhängigen Leitungen, sondern die Anzahl Verbindungsstücke, Abzweiger etc.

Für Neubauten sind die bauseitigen Kosten (Sanitär, Elektriker und Bau) rund 25% tiefer anzusetzen. Die Investitionskosten in Tabelle 4.3-45 gelten unter der Annahme, dass gewisse bauliche Voraussetzungen erfüllt sind, siehe Tabelle 4.3-46. Sind diese nicht erfüllt ist mit Mehrkosten zu rechnen, die in der gleichen Tabelle aufgeführt sind.

Tabelle 4.3-46 Bauliche Voraussetzungen für die Kosten gemäss Tabelle 4.3-45 und Mehrkosten, falls die baulichen Voraussetzungen nicht erfüllt sind

	Bauliche Voraussetzungen	Mehrkosten, falls nicht erfüllt
Komfortlüftung zentral	- Platz für Lüftungsgerät im Unter- oder Dachgeschoss, grosszügige Steigzonen mindestens im Bad. - Lichte Raumhöhe min. 2.3 m (vor Einbau der Lüftung). Gleichzeitige Sanierung von Bad und Küche beim Einbau der Lüftung	ca. CHF. 3000 pro Wohnung
Komfortlüftung pro Wohnung	- Platz für Lüftungsgerät in der Wohnung: z.B. Abstellraum, Schrank im Korridor - Lichte Raumhöhe min. 2.3 m (vor Einbau der Lüftung). - Gleichzeitige Sanierung von Bad und Küche beim Einbau der Lüftung.	ca. CHF. 3000 pro Wohnung ca. CHF. 4000 pro EFH
Einzelraum-Komfortlüftung	Gleichzeitige Sanierung von Bad und Küche beim Einbau der Lüftung	ca. CHF. 2000 pro Wohnung ca. CHF. 3000 pro EFH

Quelle H. Huber, HTA Luzern

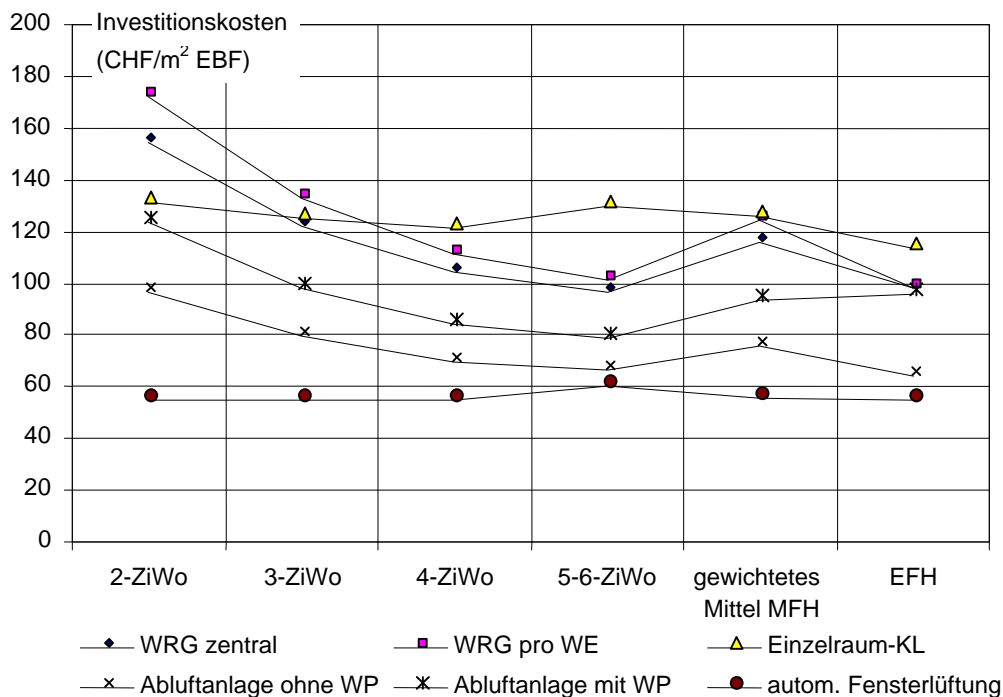
Erfolgt die Verteilung über die Fassade, muss gleichzeitig eine Aussenwärmtdämmung von mindestens 16 cm angebracht werden.

Tabelle 4.3-47 Investitionskosten pro EFH bzw. pro MFH-Wohnung (gewichtetes Mittel: 3.2 Zimmer pro Wohnung)

	Neubau		Erneuerung	
	EFH	MFH	EFH	MFH
Komfortlüftung zentral, mit WRG, Verteilung über Decke		10'200		10'700
Komfortlüftung zentral, mit WRG Verteilung über Fassade		10'900		11'600
Komfortlüftung pro Wg, mit WRG	15'900	12'000	16'700	12'600
Einzelraum-Komfortlüftung mit WRG	18'100	11'100	19'300	11'700

Quelle H. Huber, HTA Luzern, Berechnungen CEPE

Zum Vergleich: Im Neubau sind konventionelle WC- und Bad-Abluftanlagen heutiger Baustandard. Die Investitionskosten betragen rund CHF 1000.- bei MFH und CHF 1500.- für das EFH.



Quelle HTA Luzern, HBT

Abbildung 4.3-62 Spezifische Investitionskosten von Lüftungsanlagen für EFH und für MFH für verschiedene Wohnungsgrössen CHF/m<sup>2</sup><sub>EBF</sub>

Die Investitionskosten für EFH sind deshalb tiefer als in MFH, weil die Dimensionierung der Lüftungsanlagen proportional zur Anzahl Zimmer und zur Personenbelegung erfolgt und nicht anhand des Nettovolumens. Der Flächenbedarf pro Person ist in EFH höher als in MFH, woraus tiefere flächenspezifische Investitionskosten pro m<sup>2</sup> EBF resultieren.

Unter Berücksichtigung einer wirtschaftlichen Nutzungsdauer von 25 Jahren ergeben sich folgende Kapitalkosten gemäss Tabelle 4.3-48. Dabei wird sichtbar, dass die wesentlich höheren Investitionskosten der EFH durch den tieferen Realzinssatz auf der Ebene der Kapitalkosten beinahe kompensiert werden.

Die Kapitalkosten sind auch im Vergleich zu den in Neubau zum Standard gehörenden konventionellen WC- und Bad-Abluftanlagen zu sehen. Diese Kapitalkosten betragen rund 75 CHF/Jahr bei MFH und 91 CHF/Jahr für das EFH.

Nebst den Kapitalkosten fallen bei Lüftungsanlagen Unterhaltskosten an, dies im Unterschied zu den meisten bis dahin behandelten baulichen Energie-Effizienzinvestitionen. Die Unterhaltskosten umfassen das regelmässige Auswechseln der Luftfilter sowie, da es sich um Anlagen mit bewegten Teilen handelt, um Reparatur- und Wartungskosten.

Tabelle 4.3-48 Kapitalkosten pro EFH bzw. pro Durchschnittswohnung, CHF/a, gerundet

	Neubau		Erneuerung	
	EFH	MFH	EFH	MFH
Komfortlüftung zentral, mit WRG, Verteilung über Decke		760		800
Komfortlüftung zentral, mit WRG Verteilung über Fassade		810		860
Komfortlüftung pro Wg, mit WRG	960	890	1010	940
Einzelraum-Komfortlüftung mit WRG	1100	830	1170	870

Quelle Berechnungen CEPE aufgrund der obigen Tabellen

Tabelle 4.3-49 Unterhaltskosten, CHF/a und EFH bzw. Durchschnittswohnung

	Neubau		Erneuerung	
	EFH	MFH	EFH	MFH
Komfortlüftung zentral, mit WRG, Verteilung über Decke		130		130
Komfortlüftung zentral, mit WRG, Verteilung über Fassade		130		130
Komfortlüftung pro Wg, mit WRG	200	160	200	160
Einzelraum-Komfortlüftung mit WRG	370	220	370	220

Quelle H. Huber, HTA Luzern

Zum Vergleich: Die Unterhaltskosten der konventionellen WC- und Bad-Abluftanlagen liegen bei rund CHF 30.-/Jahr.

### b) *Energetische Grenzkosten der Lüftungsanlagen*

Wie einleitend angemerkt, weisen die Lüftungsanlagen mehr als nur energetische Nutzen auf. Oft ist es sogar so, dass die weiteren Nutzen als Hauptnutzen angesehen werden bzw. die Motivation für einen Investitionsentscheid in Lüftungsanlagen ausmachen. Der energetische Nutzen wäre dann als Nebennutzen zu betrachten. Die nicht-energetischen Nutzen sind jedoch sehr schwierig zu ökonomisch zu quantifizieren<sup>1</sup>. Einige Anhaltspunkte dazu sind im Kapitel 4.6 zu finden. Beispielhaft kann die Vermeidung von Bauschäden bzw. die Verminderung dessen Risikos als Motivation bzw. Nutzen angeführt werden. Geschätzte Grössenordnung: CHF 100.- pro Wohnung und Jahr.

Aufgrund der empirischen Lücken bzgl. der nicht-energetischen Nutzen muss als methodischem Behelf mit der Obergrenze der energetischen Grenzkosten Vorlieb genommen werden. Diese werden berechnet, indem für die nicht-energetischen Nutzen zunächst 0 CHF eingesetzt wird.

<sup>1</sup> Das Programm EWG des Bundesamts für Energie hat dazu ein weiteres Projekt ausgeschrieben, um die Gesamtnutzen des energie-effizienten Bauens und insbesondere auch der Lüftungsanlagen zu quantifizieren.



Unter Berücksichtigung der Unterhaltskosten gemäss Tabelle 4.3-49 und der Kapitalkosten gemäss Tabelle 4.3-48 sowie der in Abzug zu bringenden Kosten für die Referenzlüftung (WC- und Bad-Abluftanlage, nur beim Neubau) und der Reduktion der Heizwärmebedarf gemäss Tabelle 4.2-13 ergeben sich für die verschiedenen Situationen die Grenzkosten der Nutzenergie-Effizienzgewinne (=Heizwärmebedarfsreduktion) gemäss Tabelle 4.3-50 (Referenzfall tiefe Luftwechselraten) bzw. Tabelle 4.3-51 (Referenzfall hohe Luftwechselraten). Die beiden Fälle „Verteilung über die Decke“ bzw. „Verteilung über die Fassade“ liegen kostenmässig sehr nahe beieinander, weshalb sie gemittelt wurden.

Tabelle 4.3-50 Spezifische Grenzkosten der Nutzenergiereduktion CHF/kWh<sub>NE</sub> von Lüftungsanlagen, ohne Berücksichtigung der nicht-energetischen Nutzen, Referenzfall tiefe Luftwechselraten gemäss Tabelle 4.2-13.

Ausgangslage gleichzeitige Massnahme	Neubau		Bestehende EFH, alte Fenster neue Fenster		Bestehende EFH, neue Fenster (nach 1990)		Bestehende MFH, alte Fenster neue Fenster		Bestehende MFH, neue Fenster (nach 1990)	
	EFH	MFH	keine	neue Fenster	-	-	keine	neue Fenster	-	-
Komfortlüftung zentral, mit WRG		0.63					0.44	0.36		0.46
Komfortlüftung pro Wg, mit WRG	0.44	0.70	0.49	0.32	0.44		0.48	0.40		0.51
Einzelraum-Komfortlüftung	1.16	1.45	0.90	0.59	1.00		0.70	0.53		0.74

Quelle Berechnungen CEPE aufgrund der obigen Tabellen

Die Streubreite der spezifischen Bruttogrenzkosten, welche durch unterschiedliche Ausgangslagen und vor allem durch die Unsicherheit bei der Definition des Referenzfalls entsteht, ist markant, wie der Vergleich innerhalb und zwischen den Tabelle 4.3-50 und Tabelle 4.3-51 zeigt. Den Werten der Tabelle 4.3-50 liegt eine tiefe Luftwechselrate im Referenzfall zugrunde,

Ist der Volumenstrom, der nicht über die Anlage fliesst, grösser als im 4.2.6 angenommen oder werden die Anlagen in den Gebäuden mit hohem Referenzwert mit grösserem Volumenstrom „gefahren“, so ist Effizienzgewinn kleiner als in Tabelle 4.2-14 zugrunde gelegt und die Bruttogrenzkosten steigen gegenüber Tabelle 4.3-51 an. Weil der absolute Effizienzgewinn (gemessen im MJ/m<sup>2</sup>a) aber mit grosser Wahrscheinlichkeit mindestens so gross ausfallen wird wie im Referenzfall „tiefe Luftwechsel“, dürften die Grenzkosten nicht über die Werte gemäss Tabelle 4.3-50 steigen. Werden evtl. Mehrkosten für bauliche Massnahmen notwendig, um die Luftdichtheit des Gebäudes zu verbessern und damit den Anteil des Volumenstroms, der nicht über die Anlage läuft, in Grenzen zu halten, gelten ungefähr Grenzkosten gemäss Tabelle D.1-2, sofern die Mehrkosten in der selben Grössenordnung liegen wie diejenigen in Tabelle 4.3-45.

Am kleinsten ist die Streuung im Bereich der Neubauten, weil hier davon ausgegangen werden kann, dass der Referenzfall etwas präziser definiert werden kann. Bei den EFH sind Bruttogrenzkosten ab rund 35 Rp/kWh<sub>NE</sub> festzustellen und bei den MFH ab rund 42 Rp/kWh<sub>NE</sub>, dies jeweils für Gebäude- oder Wohnungskomfortanlagen. Weil die baulichen Voraussetzungen für diese beim Neubau gegeben sind bzw. bei der Planung geschaffen werden können, sind Einzelraumanlagen in Neubau kaum ein Thema (deshalb in kursiv

gesetzt). Die tabellierten Werte stellen wie oben erläutert eine Obergrenze dar, weil den Kosten mangels Datengrundlage keine weiteren Nutzen zugeordnet wurden.

Die spezifischen Bruttogrenzkosten liegen bei der Gebäudeerneuerung teilweise tiefer, nämlich zwischen rund 20 Rp/kWh<sub>NE</sub> (Ausgangslage von einem hoher Luftwechsel) und 40 Rp/kWh<sub>NE</sub>, wenn gleichzeitig die Fenster ersetzt. Wird der Fall des gleichzeitigen Fensterwechsel ausser Betracht gelassen, liegen die Kosten eher bei 30 Rp/kWh<sub>NE</sub>, bis 50 Rp/kWh<sub>NE</sub>. Diese Werte gelten, solange die baulichen Voraussetzungen für eine Gebäude- oder Wohnungskomfortanlage gemäss Tabelle 4.3-45 erfüllt sind. Ist dies nicht der Fall, so sind die spezifisch teureren Einzelraumanlagen oder die Mehrkosten gemäss der gleichen Tabelle zu berücksichtigen, siehe dazu Tabelle D.1-1 und Tabelle D.1-2 im Anhang, wodurch sich die spezifischen Grenzkosten um 6 Rp/kWh<sub>NE</sub> bis 10 Rp/kWh<sub>NE</sub> erhöhen.

Tabelle 4.3-51 Spezifische Grenzkosten der Nutzenergieerduktion CHF/kWh<sub>NE</sub> von Lüftungsanlagen, ohne Berücksichtigung der nicht-energetischen Nutzen, Referenzfall hohe Luftwechselraten gemäss Tabelle 4.2-14

Ausgangslage gleichzeitige Massnahme	Neubau EFH	Neubau MFH	Bestehende EFH, alte Fenster		Bestehende EFH, neue Fenster (nach 1990)	Bestehende MFH, alte Fenster		Bestehende MFH, neue Fenster (nach 1990)
			keine	neue Fenster		keine	neue Fenster	
Komfortlüftung zentral, mit WRG		0.42				0.24	0.19	0.32
Komfortlüftung pro Wg, mit WRG	0.35	0.48	0.27	0.18	0.28	0.27	0.22	0.36
Einzelraum-Komfortlüftung	0.77	0.74	0.41	0.28	0.50	0.33	0.25	0.46

Quelle Berechnungen CEPE aufgrund der obigen Tabellen

Die Grenzkosten sind bei Neubauten höher, weil der Luftwechsel verglichen mit den bestehenden Gebäuden im Referenzfall tiefer liegt und demzufolge der Energieeffizienzgewinn ebenfalls tiefer liegt (siehe dazu Tabelle 4.2-13) im Kapitel 4.2.6, der gegenläufige Effekt der Mehrkosten der Gebäudeerneuerung gegenüber dem Neubau aber weit geringer ist. Rechnerisch am höchsten liegen die Grenzkosten der Einzelraum-Anlagen. Diese bleiben dennoch eine attraktive Möglichkeit für die Fälle, bei denen die baulichen Voraussetzungen für eine Gebäude- oder Wohnungs-Komfortlüftung nicht gegeben sind oder falls nur die wichtigsten Räume mit einer Lüftungsanlage ausgestattet werden soll (z.B. lärmexponierte und/oder solche mit hoher Aufenthaltswahrscheinlichkeit, Schlafräume etc.). Rechnerisch am tiefsten liegen die Grenzkosten, wenn gleichzeitig mit dem Einbau der Lüftungsanlage die (undichten) Fenster ersetzt und evtl. weitere Dichtungsmassnahmen ergriffen werden. Ein Teil des energetischen Nutzen müsste dann allerdings dem Fensterwechsel zugeordnet werden wenn ein solcher nicht ohnehin fällig ist und die spezifischen Grenzkosten lägen dann gleich wie in der entsprechend linken Spalte in der Tabelle 4.3-50.

Die Unterschied der Grenzkosten zwischen MFH und EFH entsteht durch verschiedene, zum Teil gegenläufige Einflussfaktoren. Anzuführen sind einerseits die tieferen flächenspezifischen Investitionskosten der EFH (die Anlagekosten richten sich nach Zimmer- bzw. Personenanzahl und der Flächenverbrauch pro Person ist bei den EFH höher), die geringeren Kapitalkosten bei den EFH aufgrund des tieferen Realzinssatzes und andererseits durch die höheren Luftwechsel

im Referenzfall, wodurch eine, gemessen in MJ/m<sup>2</sup>a, höhere Reduktion des Heizwärmebedarfs erzielt werden kann.

#### 4.3.13 Heizanlagen und Luftheizungen in Funktion der energetischen Qualität der Gebäudehülle

Im Hinblick auf eine integrierte und ganzheitliche Betrachtung ist es notwendig, die Grenzkosten der Heizwärmebedarfsreduktion mit den Grenzkosten der Wärmeerzeugung gegenüber zu stellen bzw. die Totalkosten (Wärmeerzeugung und –verteilung sowie die Heizwärmebedarfsreduktionen) zu betrachten. Aus diesem Grund werden nachfolgend die spezifischen Kosten der Wärmeerzeugung und –verteilung für die verschiedenen Heizanlage-typen und für typische Wärmeverteilungen dargestellt. Zu beachten ist dabei, dass es hier vor allem um die systematische Abhängigkeit der Kosten vom Heizwärmebedarf bzw. vom Wärmeleistungsbedarf geht.

Die Jahreskosten der Wärmeerzeugung sind vom Nutzungsgrad abhängig und dieser wiederum – insbesondere bei WP - von der Wärmeverteilung. Bei kombinierter Wärmeerzeugung ist nebst dem Heizsystem das Warmwassersystem mitzubedenken.

##### a) Wärmeerzeugung Neubau

Die Investitionskosten der Heizanlage hängen vom spezifischen Wärmeleistungsbedarf (gemessen in kW/m<sup>2</sup>) und nicht vom Jahresheizwärmebedarf (kWh/m<sup>2</sup> oder MJ/m<sup>2</sup>) ab. Tendenziell besteht zwischen diesen beiden Grössen zwar eine Abhängigkeit, aber im Detail hängt der Wärmeleistungsbedarf davon ab, durch welche Massnahmen ein bestimmtes Q<sub>h</sub> erreicht wird. Wird das Gebäude vor allem mit der Strategie „Reduktion des Transmissions- und Lüftungsverlustes“ auf ein tiefes Q<sub>h</sub> getrimmt, reduziert sich damit der Wärmeleistungsbedarf stärker, als wenn mit grossen Fensterflächen auf hohe solare Gewinne gesetzt wird. Dies liegt darin begründet, dass im Auslegungsfall (kältester Tag, keine Sonneneinstrahlung) das Heizsystem allein den Wärmebedarf decken muss. Der Wärmeleistungsbedarf wird deshalb gemäss (Binz, 2001) berechnet, siehe dazu das Kapitel 4.2.10. Bei der Wärmeerzeugung ist im folgenden zwischen EFH und MFH zu unterscheiden.

Tabelle 4.3-52 Investitionskosten (Tsd. CHF, gerundet) von Wärmeerzeugungsanlagen (inkl. Warmwasser) für Ein- und Mehrfamilienhäuser (250 m<sup>2</sup> bzw. 720 m<sup>2</sup> EBF) in Funktion der Energieeffizienzstufen bzw. dem entsprechenden Wärmeleistungsbedarf für Raumwärme (in kW) (gemäss Tabelle 4.2-26)

kW		Oel		Gas		WP Erdsonde		WP Luft		Holzheizung	
MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH
22	8	27	20	24	16	54	28	36	20	25	19
21	7	26	20	23	16	52	26	35	19	24	19
18	6	25	20	22	16	48	24	32	18	23	19
12	4	22	20	19	15	38	19	26	15	21	19
10	3	21	19	18	15	32	16	23	13	20	18

Quelle Afjei et al. 1999, Gantner/Jakob et al (1999), Aktualisierungen CEPE

Die Reduktionen der Investitionskosten der Wärmeerzeugungsanlagen, welche aufgrund der Energieeffizienzinvestitionen in Gebäudehülle und Lüftungsanlagen erreicht werden können,

sind also von Anlagentyp zu Anlagentyp sehr unterschiedlich. Währenddem bei den Anlagentypen Öl, Gas und Holz unterhalb einer spezifischen Leistungsschwelle nur mehr sehr kleine Kosteneinsparungen möglich sind, gehen die Kosten der WP-Systeme besonders bei kleinen Leistungen weit stärker zurück, weil diese Systeme viel besser hin zu kleinen Leistungen skalierbar sind. Im Gegensatz dazu verhindern bei den erstgenannten Anlagentypen fixkostenähnliche Kostenkomponenten (Kamin/Abgasrohr, Gasanschluss, Tank) eine weitere Kostenreduktion. Zu klären bleibt die Frage, ob bei Luft-WP ein Synergieeffekt erzielt werden kann, wenn dieser Anlagentyp mit einer Komfortlüftung kombiniert werden kann.

### b) *Wärmeverteilung Neubau und bestehende Gebäude*

Bei heutigen Wohnneubauten kommen im energetischen Referenzfall (SIA 380/1-Grenzwert oder Musterverordnung der Kantone) sowohl Radiatoren- wie auch Bodenheizungen zum Einsatz. Bei den EFH sind vor allem bei WP-Heizanlagen die Bodenheizungen überwiegend.

Tabelle 4.3-53 Investitionskosten Wärmeverteilung für Neubauten in Funktion der fünf Effizienzstufen

MFH		EFH	
W/m <sup>2</sup>	CHF/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	CHF/m <sup>2</sup>
31	44	32	41
29	43	28	40
25	39	25	36
17	38	17	35
13	37	13	34

Quelle

GebäudeTechnik 02/1, Gespräche mit Planern, Annahmen CEPE

Bei bestehenden Gebäuden wird angenommen, dass bei der Wärmeerzeugung keine Kostenreduktionen aufgrund der Gebäudehüllenerneuerung realisiert werden können.

### c) *Nutzungsgrade*

Die Nutzungsgrade sind bei einigen Anlagentypen ebenfalls von der Energieeffizienz des Gebäudes abhängig, insbesondere diejenigen der Wärmepumpen, denn eine energie-effiziente Gebäudehülle senkt die Vorlauftemperaturen und damit die Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Wärmeverteilung, siehe dazu (Gantner, Jakob et al., 1999). Aus physikalischen Gründen (Thermodynamik) steigt dann der theoretisch mögliche und auch der in der Praxis realisierbare Nutzungsgrad der Wärmepumpen. Werden also Wärmepumpen eingesetzt, ist es für den Stromverbrauch sehr entscheidend, dass eine Wärmeverteilung realisiert wird, welche tiefe Vorlauftemperaturen ermöglicht. Dies ist insbesondere dann möglich, wenn das Gebäude eine hohe Energieeffizienz aufweist, d.h. wenn die Gebäudehülle und die Lüftungsverluste einen tiefen Wärmeleistungsbedarf haben. Bei sehr effizienten Gebäuden kommen tendenziell eher sogenannte selbstregulierende Wärmeverteilungen zum Einsatz. Diese Systeme werden selbstregulierend genannt, weil die Vorlauftemperatur bzw. die Temperatur der Wärmeabgabe ist dann so tief (z.B. 25°C bis 30°C), dass bei Sonneneinstrahlung der Fussboden so weit erwärmt wird, dass aus physikalischen Gründen keine unnötige Wärmeabgabe seitens der Wärmeverteilung mehr möglich ist. Dies reduziert das Überhitzungsrisiko in der Übergansperiode und damit verbundene zusätzliche Lüftungsverluste weil die Fenster geöffnet werden. Der Ausnutzungsgrad der freien Wärme wird erhöht. Und –last but not least– können bei diesen tiefen VL-Temperaturen sehr hohe Wärme-

pumpennutzungsgrade erreicht werden. Zwischen der Erhöhung der Gebäudeenergieeffizienz bei Gebäudehülle und Lüftung und den Wärmeerzeugung besteht also eine positive Synergie.

Tabelle 4.3-54 Jahresnutzungsgrade von Luft- und Sole-WP für die Raumwärme allein (ohne Warmwasser) bzw. für Raumwärme und Warmwasser (WW) kombiniert, je in Funktion der Energieeffizienzstufen des Gebäudes (Definition gem. Kap. 4.4)

	VL-Temp	Luft			Sole		
		Raumwärme allein		Raumwärme inkl. WW	Raumwärme allein		Raumwärme inkl. WW
		2000	2020	2000	2000	2020	2000
	°C						
a) Referenzfall	40	2.7	3.2	2.5	3.5	4.6	3.4
b)	38	2.9		2.6	3.7		3.5
c)	35	3.1		2.7	4.0		3.7
d)	33	3.3		2.7	4.2		3.6
e) mit NT-Bodenheizung	30	3.6	4.2	2.6	4.5	5.9	3.6
e) mit Luftheizung	60	2.0	2.6	2.0	2.7	3.5	2.9

Quelle Ganter/Jakob 1999, Anpassungen CEPE

Die Annahmen der WP-Nutzungsgrade für den Referenzfall in Tabelle 4.3-54 sind kompatibel zu den Messungen des WP-Testzentrums Töss und zu den im Projekt FAWA durchgeführten Feldmessungen an 120 Anlagen, siehe Erb et al. 2000. Experten beurteilen, dass die dabei im Lauf der letzten vier Jahre festgestellte Nutzungsgradverbesserung nicht durch die Verbesserung des Gütegrades der WP selbst, sondern vielmehr durch den Lernprozess, die WP richtig hydraulisch einzubinden und vor allem die Vorlauftemperaturen der Heizungsverteilung zu senken, zustande gekommen ist. Diese Tatsache stützt auch das Vorgehen, die Jahresnutzungsgradverbesserung bei tieferen Vorlauftemperaturen aufgrund der thermodynamisch theoretischen COP multipliziert mit dem Gütegrad (konstant belassen) zu berechnen:  $COP_{\text{theoretisch}}(T_{VL}, T_{WQ}) = T_{VL} / (T_{VL} - T_{WQ})$ , wobei  $T_{VL}$ =Vorlauftemperatur in K und  $T_{WQ}$ =Temperatur der Wärmequelle der Wärmepumpe (Sole: 0°C, Luft: 2°C). Für den Jahresnutzungsgrad ist die für das Jahr (bzw. die Heizperiode) repräsentative Vorlauftemperatur einzusetzen. Bei der Verbesserung bis 2020 gehen die Autoren von einer Kombination der Einflussfaktoren Gütegradverbesserung und Wärmequellentemperaturabsenkung aus.

Der Nutzungsgrad der Wärmepumpen ist für die Luftheizungen relativ tief, weil bei der Luftheizung aufgrund der tiefen spezifischen Wärmekapazität des Wärmeträgermediums Luft und einem beschränkten Volumenstrom (tiefe Geschwindigkeit, um Schallprobleme zu begegnen, nicht zu grosse Querschnitte wegen des Platzbedarfs der Luftkanäle) wiederum relativ hohe Vorlauftemperaturen erforderlich sind (50°C bis 70°C), wobei angenommen wird, dass dieses System nur für Gebäude mit Passivhaus oder Minergie-P Qualität eingesetzt würde (siehe auch GebäudeTechnik 02/1).

Wird die Wärmepumpe auch die für die Warmwassererzeugung eingesetzt, reduziert sich der mittlere Nutzungsgrad der Wärmepumpe und zwar **anteilig** zu den Energiemengen für Raumwärme und Warmwasser. Bzgl. Jahresnutzungsgrad der Wärmepumpen für Warmwassererzeugung werden die Annahmen gemäss Tabelle 4.3-55. Die Auswirkung der kombinierten

Raumwärme- und Wärmewassererzeugung ist in Tabelle 4.3-54 in den jeweils rechten Spalten zu sehen.

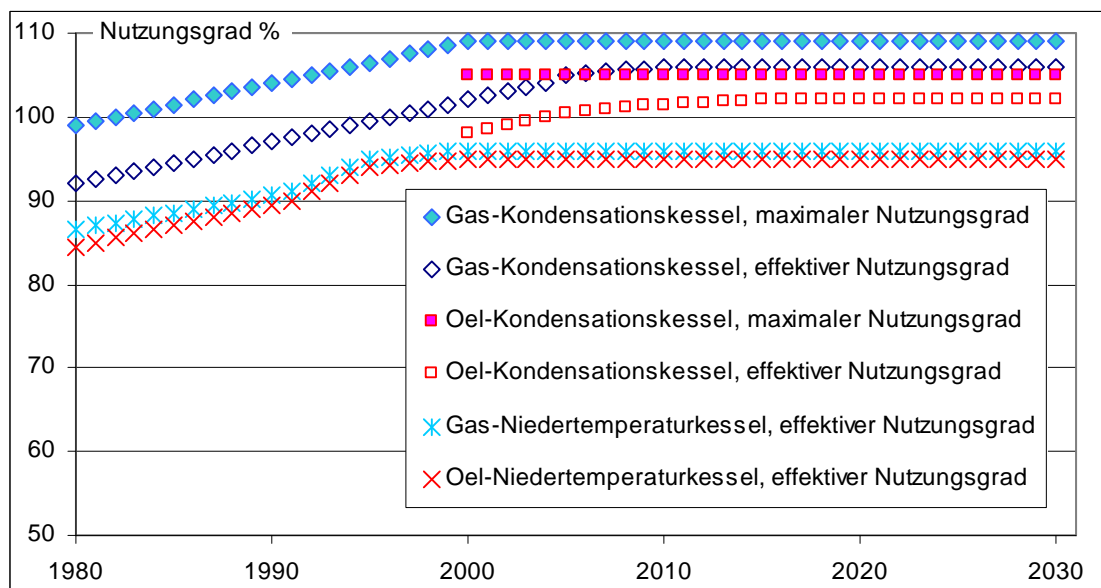
Tabelle 4.3-55 Nutzungsgrade von Wärmepumpen zur Warmwassererzeugung (to be checked)

Sole-WP 2000	Luft-WP 2000	Abluft-WP 2000
3.0	2.0	1.7 (WP allein) 3.3 (inkl. WRG)
3.0	2.0	1.7 (WP allein) 3.3 (inkl. WRG)

Quelle Ganter/Jakob 1999, Annahmen CEPE, Huber Energietechnik

Bei der Abluft-WP wird angenommen, dass der Energiegehalt der Abluft in etwa ausreicht, um den Bedarf für Warmwasser zu decken. Der Raumwärmebedarf wird dann durch eine Luft-WP mit Wärmequelle Aussenluft, allenfalls vorgewärmt durch ein Erdregister, gedeckt. Dabei ist zu beachten, dass auch der Wärmebedarf des Luftwechsels gedeckt werden muss, denn bei der Abluft-WP wird gemäss Definition keine WRG eingesetzt (die Lüftungen mit WRG werden Komfortlüftungen genannt und reduzieren mittels WRG den Raumwärmebedarf; evtl. kann die Fortluft nach der WRG zusätzlich der Wärmepumpe in den Zuluftkanal gemischt werden, so dass sich der Nutzungsgrad gegenüber Tabelle 4.3-54 noch etwas erhöht).

Bei Öl-, Gas- und Holzheizungen ist die Abhängigkeit des Nutzungsgrades in Funktion der Gebäudehüllenqualität und der Lüftungsverluste gering. Hingegen wird ebenfalls eine zeitliche Entwicklung angenommen, siehe Abbildung 4.3-63.



Quelle CEPE 2002, Arbeitsgruppe Nutzungsgrade Prognos, VSG, EV, BFE, PSI, CEPE

Abbildung 4.3-63 Vergangene und künftige zeitliche Entwicklung der maximalen und effektiven Nutzungsgrade von Heizöl EL- und Erdgas-Neuanlagen, jeweils exklusive Verteilverluste der Wärmeverteilung

Tabelle 4.3-56 Nutzungsgrad inkl. Verteilverluste Heizöl EL (Annahmen zu Kondensationsanteilen gemäss Arbeitsgruppe Nutzungsgrade und Erdgas (Annahme: kondensierend)

	2000	2010	2020
Erdgas	96%	101%	102%
Heizöl EL	89%	93%	96%

Quelle CEPE 2002, Arbeitsgruppe Nutzungsgrade Prognos, VSG, EV, BFE, PSI, CEPE

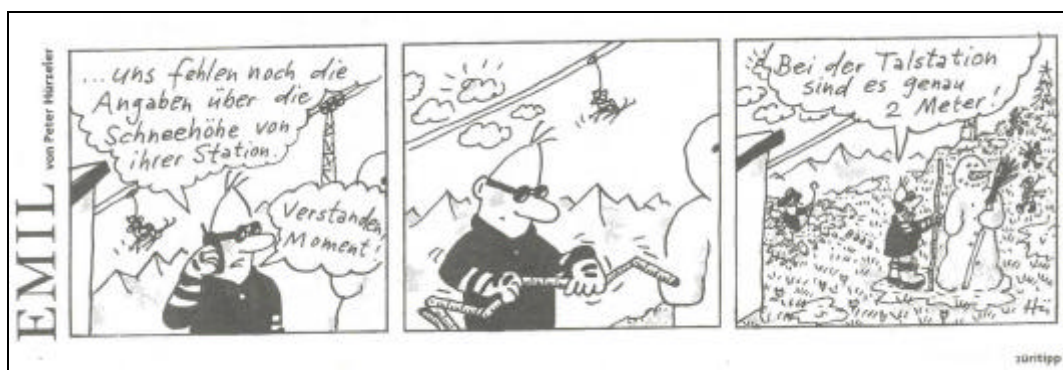
Ausserdem können in Neubauten die Verteilverluste weiter reduziert werden, wenn sich die Wärmeerzeugungsanlage innerhalb des Dämmperimeters befindet und dieser konsequent geschlossen ist, dieser also beispielsweise unterhalb der Kellerbodenplatte durchführt. Anbetracht der bereits sehr hohen Nutzungsgrade und tiefen Verteilverluste und der im übrigen Berichtsteil sehr hohen Unterschiede der Energieeffizienz kann jedoch dieser Effekt rechnerisch eher vernachlässigt werden.

#### d) Verteilverluste

Bei bestehenden Gebäuden können die Verluste der Raumwärme- und insbesondere der Warmwasserverteilung beträchtliche Ausmasse annehmen. Diese können durch Nachisolierung der Verteilleitungen reduziert werden. Die dafür notwendigen Kosten (CHF/m) sowie der Anteil der Leitungen, der realistischerweise aus Gründen der Zugänglichkeit nachträglich gedämmt werden kann, konnte in diesem Projekt nicht mehr erarbeitet werden. Der Effizienzgewinn, das heisst die Reduktion der Verteilverluste beträgt schätzungsweise einige bis zu einige wenige zehn MJ/m<sup>2</sup>.a. Vermutlich liegen die Grenzkosten dieser Massnahmen mindestens teilweise auf relativ tiefem Niveau.

#### 4.3.14 Fazit des empirischen Kapitels

Möglich, dass uns ebenfalls noch einige Daten fehlen. Bleibt zu hoffen, dass es nicht solche sind, welche so entscheidend sind für die Schlussfolgerungen wie diejenigen in Abbildung 4.3-64....



Quelle züritipp, 1. bis 7.2.2002

Abbildung 4.3-64 Datenanfragen und ihre Interpretation am Beispiel der Schneehöhenmessung an der Talstation durch Emil.





#### 4.4 Zusatzkosten und –nutzen energieeffizienter Wohnneubauten mit Kostenstand 2000

Während bei der Erneuerung von Wohngebäuden manche Parameter wie z.B. Gebäudeorientierung, das Verhältnis Aussenfläche zu Volumen oder die Fensterverteilung festgelegt sind, hat der Architekt beim Neubau weitgehende Gestaltungsmöglichkeiten, zusätzliche Energieeffizienzgewinne durch minimale Grenzkosten zu realisieren (allerdings nur bis zu einem gewissen Grad). Grundsätzlich bildet das Gesamtsystem der Wohnneubauten, also das Zusammenspiel von konstruktiven, haustechnischen und architektonischen Konzepten, die Ausgangsbasis. Aus analytischen Gründen und zwecks Kompatibilität zu anderen Studien (z.B. Energieperspektiven von Prognos, Akzeptanz der kontrollierten Lüftung) werden die hier ausgewerteten bzw. simulierten Objekte jedoch auf der Ebene des Nutzenergiebedarfs kategorisiert und analysiert.

Die Beispielobjekte werden entsprechend dem Wärmebedarf für Raumwärme (Nutzenergiebedarf nach bisheriger, Heizwärmebedarf nach neuer Bezeichnung) gruppiert und für diese Gruppen entsprechende konzeptionelle, bauliche und haustechnische Lösungsansätze herausgearbeitet. Folgende Nutzenergiebedarfskategorien wurden gewählt (SIA 380/1 Berechnungsmethode 1988):

Tabelle 4.4-1 Definition der Nutzenergiebedarfs- bzw. Heizwärmebedarfskategorien für EFH und MFH für den Bottom-Up Ansatz

Heizwärmebedarf (Q <sub>h</sub> )	Beschreibung, Bezeichnung
a) 270 bzw. 300 MJ/m <sup>2</sup> a bzw. ca. 225 bis ca. 260 MJ/m <sup>2</sup> a	Referenz für den Grenzkostenansatz: Erfüllung der heutigen Norm bzw. Grenzwert nach SIA 380/1 (alte bzw. neue Berechnungsnorm, je nach A/EBF)
b) ca. 180 bis ca. 210 MJ/m <sup>2</sup> a	Minergie-Primäranforderung Gebäudehülle, Einführung geplant Sept. 2002, 80% des Grenzwertes nach neuer Berechnungsnorm, in diesem Bericht als Minergie-Primäranforderung bezeichnet
c) ca. 145 MJ/m <sup>2</sup> bis ca. 170a	Zielwert, entspricht 60% des Grenzwertes
d) bis ca. 65 MJ/m <sup>2</sup> a (MFH) bzw. bis ca. 90 MJ/m <sup>2</sup> a (EFH)	Minergie-Gebäudehülle-allein: Minergie wird mit allein mit Massnahmen an der Gebäudehülle erreicht und es kommen fossile Energieträger zum Einsatz: im Bericht als Minergie-GHa <sup>1</sup> bezeichnet
e) 45 bis 55 MJ/m <sup>2</sup> a:	Minergie-P (Arbeitstitel, bei Minergie in Pilotphase, entspricht ungefähr dem Passivhausstandard)

Quelle Darstellung HBT/CEPE

(\*) Die Bezeichnungen implizieren nicht in allen Details die Berechnungsarten der z.T. geschützten Marken. So ist Minergie ein Label, das Anforderungen auf der Ebene der Endenergie stellt, während sich die obigen Kategorien auf die Nutzenergie beziehen. Die Annahme von 65 MJ/m<sup>2</sup>a (MFH) bzw. 90 MJ/m<sup>2</sup>a (EFH) ergibt sich aus der Endenergie für Heizung und Warmwasser minus der Energiekennzahl Warmwasser (50 MJ/m<sup>2</sup>a für das EFH bzw. 80 MJ/m<sup>2</sup>a für das MFH) und der Annahme, dass die Minergie-Anforderung in diesem Fall mit einer fossilen Anlage erreicht wird.

<sup>1</sup> Die Begriffe Minergie-Primär und Minergie-Gebäudehülle-allein sind keine offiziellen Begriffe des Minergie-Labels oder des Minergievereins, sondern dienen der Veranschaulichung der untersuchten Nutzenergie bzw. Heizwärmebedarfskategorien, siehe nachfolgenden Exkurs.

Diese Einteilung entspricht den fünf im Kap. 4.4.3 beschriebenen Typen, für welche nach dem Bottom-up Ansatz die Gebäude- und die Grenzkosten berechnet werden.

#### **Exkurs zur Begriffsdefinition**

Minergie ist ein Gebäude-Label, welches bis Mitte 2002 ausschliesslich Anforderungen auf Ebene Endenergie gestellt hat (seit Mitte 2002 wird zusätzlich eine Anforderung an die Gebäudehülle gestellt: max. 80% des Grenzwertes). Diese Anforderungen konnten bis anhin entweder mit Bedarfsreduktionsmassnahmen (insbesondere Gebäudehülle) oder auf Seite der Wärmebereitstellung erfüllt werden (insbesondere Wärmepumpen sowie weitere Anlagen mit Nutzung von erneuerbaren Energien wie Holz, Solar, Biogas etc.). Je nach Energieträger fliessen diese mit Gewichtungsfaktoren in das Berechnungsverfahren ein. Der Heizwärmebedarf verschiedener Minergie-Gebäude kann deshalb sehr unterschiedlich sein, was eine Charakterisierung von Minergie auf dieser Ebene schwierig macht. Der Durchschnitt der  $Q_h$  der heute erstellten Minergie-Gebäude beträgt ca. 150 MJ/m<sup>2</sup>a. Dieser Durchschnittswert beinhaltet einen grossen Teil der Gebäude, welche Massnahmen an der Gebäudehülle mit solchen im Bereich der erneuerbaren Energien einschliesslich der Wärmepumpen kombinieren. Um der Anschaulichkeit halber dennoch einen Bezug zu Minergie herzustellen, werden in diesem Bericht folgende Begriffe eingeführt:

- Minergie-Primär: Minergie-Primäranforderung an die Gebäudehülle, Einführung geplant Sept. 2002, 80% des Grenzwertes nach neuer Berechnungsnorm.
- Minergie-Gebäudehülle (Minergie-GH): Die Minergie-Anforderung (45 kWh/m<sup>2</sup>a bzw. 42 kWh/m<sup>2</sup>a auf Ebene Endenergie inkl. Warmwasserverbrauch) wird vorwiegend mit Massnahmen an der Gebäudehülle erreicht und der restliche Energiebedarf für Heizung und Warmwasser wird fossil gedeckt. Das damit noch mögliche  $Q_h$  ist relativ nahe dem Passivhaus-Standard, wenn auch nicht ganz so tief.

Quelle Darstellung CEPE

#### 4.4.1 Methodisches Vorgehen

Für Neubauten werden die Gebäudekosten und Effizienzgewinne auf der Basis der Einzelinvestitionen ermittelt. Dabei werden die wesentlichen Neubaukonzeptionen berücksichtigt, welche zu guten energetischen Lösungen führen. In diesem Teil der Untersuchung geht es vor allem um den Zusammenhang zwischen Energiebedarf und Gebäudekosten. Hierbei wurden zwei unterschiedliche Analysewege beschrrieben.

In einem **top-down-Ansatz** wurde eine Relation zwischen dem Flächenpreis (Gebäudekosten BKP<sub>2</sub> pro m<sup>2</sup> EBF) und dem spezifischen Energiebedarf geprüft, und zwar in der Art eines Benchmarks in Abhängigkeit des wärmetechnischen Konzeptes. Hierbei muss damit gerechnet werden, dass die Streuung der Kosten aufgrund unterschiedlicher Ausbaustandards (z.B. mehr oder weniger teure Fussbodenbeläge oder konstruktive Besonderheiten) sehr gross ist. Als Kontrollgrösse - beispielsweise auch für die zweite unten beschriebene Methode - ist aber ein empirisch festgestellter Zusammenhang zwischen Energieverbrauch und Gebäudekosten doch sehr interessant, zumal wenn es gelingt einige Abweichungen der Baukosten durch einige Merkmale statistisch zu erklären.

Als Grundlage für die statistischen Auswertungen dienten die Daten von Energie 2000/Diane-Öko-Bau, der Minergie-Labelstelle, der Dienststelle für Energie des Kantons Wallis und Auswertungen von Baugesuchen in den Kantonen AG, ZH und BE. Die Daten hatten allerdings nur sehr wenige Merkmale (die allen Datensätzen gemeinsam sind), um Kostenabweichungen statistisch erklären zu können.

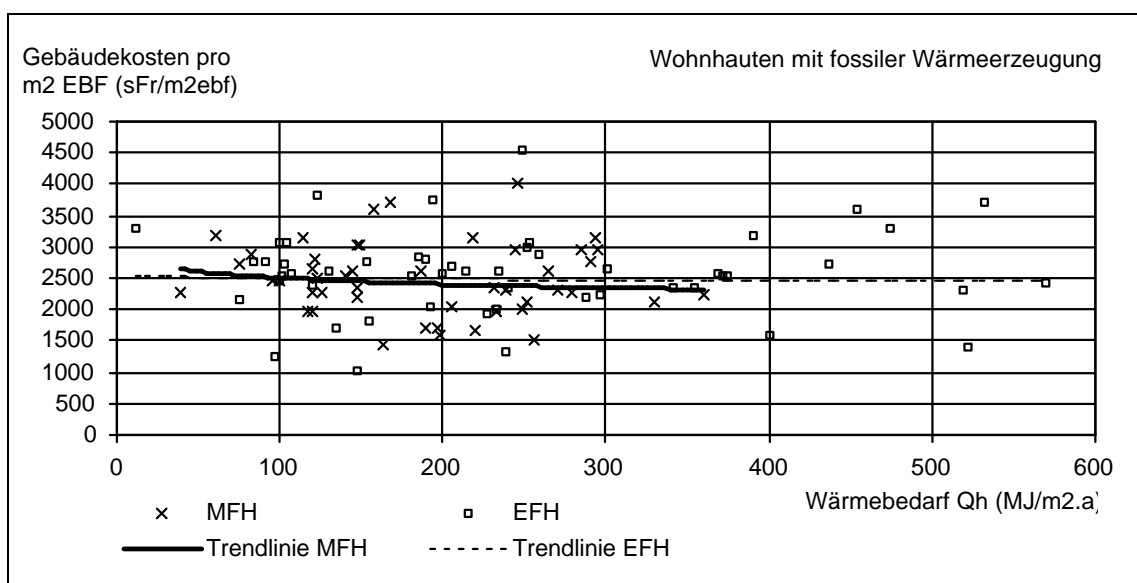
Mittels der zweiten Methode, dem **bottom-up-Ansatz**, wird exemplarisch ein real existierendes und in den technischen Details wohlbekanntes Wohngebäude (Fallbeispiel) hinsichtlich unterschiedlicher Ausführung der Gebäudehülle und des Heizsystems untersucht, und die Zusatzkosten und Energiegewinne werden einander gegenüber gestellt. Mit Hilfe eines einfachen Energie-Nachweis-Programms wird der unterschiedliche Energiebedarf der einzelnen Bauoptionen ermittelt. Die möglichen Zusatzmassnahmen zur Steigerung von Energieeffizienz sind fallweise inkl. Kosten- und Ertragsfolge dargestellt. In einem ersten Schritt wird das Gesamtsystem von Gebäudehülle und Haustechnik belassen und mit Zusatzmassnahmen angereichert. In einem zweiten Schritt wird der Wechsel von Systemlösungen untersucht, der in der Regel zu Kostenreduktionen führen kann. Die bauteilorientierten Kostenelemente (unter Weglassung der Besonderheiten bei Erneuerungen), welche im bauteilorientierten Ansatz (Kap. 4.3) erhoben wurden, konnten hier mitverwendet werden.

Bemerkung: Das energiebewusste Projektieren eines Wohngebäudes setzt ein konzeptionelles Denken voraus, d.h., bereits in der Raumdisposition und -Ausrichtung, in der Modellierung des Baukubus greifen Überlegungen ein, welche energierelevant sein können. Der hier aufgezeigte bottom-up-Ansatz, bei dem ein energetischer „Normalfall“ (Erfüllung der Energievorschriften) zu einem Passivhaus verändert wird, entspricht aus architektonischer Sicht nicht dem optimalen Vorgehen, wenn dieses keine Änderung der ursprünglichen architektonischen Idee bewirkt. Trotz dieser Vorbehalte wurden aufgrund des bottom-up-Ansatzes das genau bekannte Referenzobjekt, ein Vier-Familienhaus, und ein daraus abgeleitetes Einfamilienhaus-Modell auf die o.g. fünf Nutzenergiebedarfskategorien mit den entsprechenden Massnahmen jeweils modellhaft umgebaut und nach den Kosten- und Energieaspekten hin analysiert.

#### 4.4.2 Top-down-Ansatz – Ergebnisse statistischer Auswertungen von Neubauten

Die Datenerhebung umfasst 219 Wohngebäude (85 MFH und 134 EFH); die Daten stammen aus sechs verschiedenen Quellen (E2000/Diane-Oekobau, "Wohnbauten im Vergleich" ETHZ, Minergie VS, MINERGIE Agentur Bau / MINERGIE Labelstelle Bern, Auswertung von Baugesuchen in den Kantonen AG; BE und ZH seitens des CEPE der ETH Zürich und der Kantonalbank LU. Wie zu erwarten war, sind die zur Verfügung stehenden Datenpunkte wegen der unterschiedlichen Bauweisen und den damit induzierten Kostenunterschieden derart heterogen, dass eine Regressionsanalyse mit Berücksichtigung verschiedener Merkmale nur in sehr beschränktem Umfang möglich war.

Die nachstehende Auswertung erfolgte nach den Parametern Wärmebedarf  $Q_h$  und Gebäudekosten pro  $m^2$  EBF. Die Kosten wurden mittels Zürcher Baukostenindex auf den Indexstand vom 1.4.2001 hochgerechnet. Die Objekte wurden differenziert nach den Heizenergiesystemen fossile Wärmeerzeugung, Wärmepumpenanlagen und solarer Wärmeerzeugung (vgl. Abbildung 4.4-1 und 4.4-2).

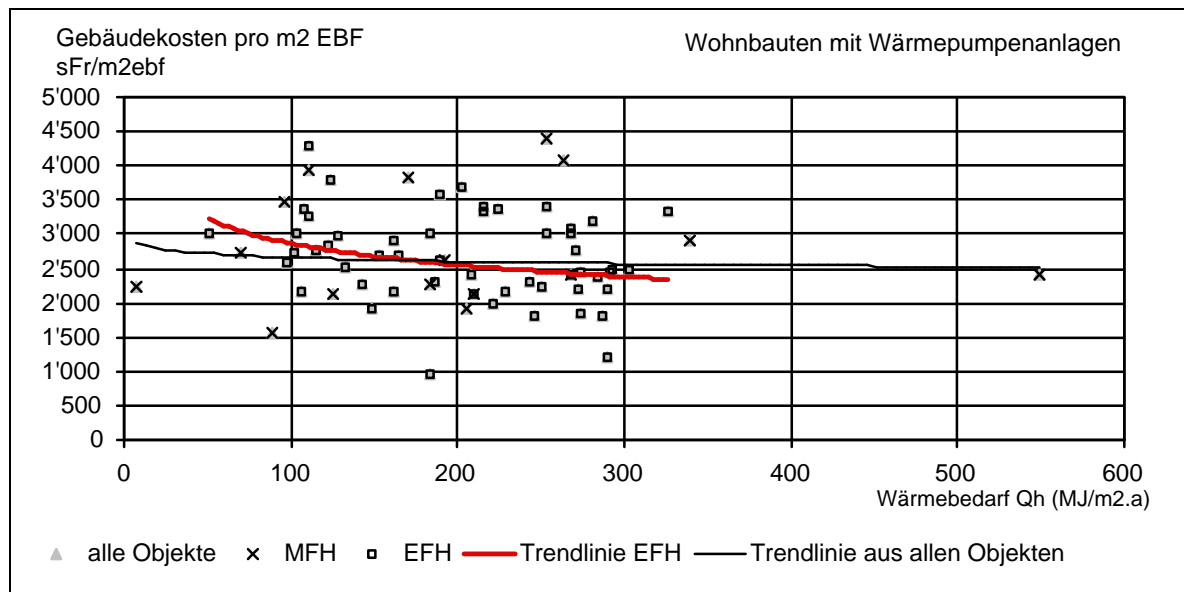


Quelle Minergie-Agentur Bau, Erhebungen CEPE, HBT, diverse, Darstellung HBT

Abbildung 4.4-1: Wärmebedarf  $Q_h$  und Gebäudekosten pro EBF bei ausgewählten Wohnbauten mit fossiler Wärmeerzeugung (n = 47 MFH und 52 EFH)

Der durchschnittliche Wärmebedarf beträgt für diese Stichprobe *fossil beheizter Wohngebäude* 217.1 MJ/m<sup>2</sup> a bei einer Standardabweichung von 115.5 MJ/m<sup>2</sup> a, die durchschnittlichen Gebäudekosten belaufen sich auf 2'537 CHF/m<sup>2</sup> EBF (Standardabweichung = 622 CHF/m<sup>2</sup> EBF). Die durchschnittlichen spezifischen Gebäudekosten für Einfamilienhäuser dieses Samples liegen mit 3,3% nur unwesentlich unter jenen für Mehrfamilienhäuser (vgl. Abbildung 4.4-1). Die durchschnittlichen Gebäudekosten pro  $m^2$  EBF dieses Samples liegen somit ca. 10% über dem Benchmark des Baukosten-Kennzahlensystems<sup>1</sup> der ETHZ (1999).

<sup>1</sup> Meyer Paul, Christen Kurt et al, Baukosten-Kennzahlensystem (BKKS)©, 1999, Professur für Architektur und Baurealisation ETHZ und VZ VermögensZentrum Zürich



Quelle Minergie-Agentur Bau, Erhebungen CEPE, HBT, diverse, Darstellung HBT

Abbildung 4.4-2 Wärmebedarf  $Q_h$  und Gebäudekosten pro EBF bei ausgewählten Wohnbauten mit Wärmepumpenanlagen (n = 14 MFH und 53 EFH)

Der durchschnittliche Wärmebedarf der ausgewerteten *Objekte mit Wärmepumpenanlagen* beträgt für diese Stichprobe  $198 \text{ MJ/m}^2 \text{ a}$  bei einer Standardabweichung von  $86 \text{ MJ/m}^2 \text{ a}$ , d.h. ein um knapp 10 % reduzierter Wärmebedarf (mit etwas geringerer Streuung der Werte) gegenüber den fossil beheizten Wohnbauten. Die durchschnittlichen Gebäudekosten belaufen sich erwartungsgemäss auf einen leicht höheren Wert von  $2'676 \text{ CHF/m}^2 \text{ EBF}$  mit erhöhten Streuwerten (Standardabweichung =  $686 \text{ CHF/m}^2 \text{ EBF}$ ). Die durchschnittlichen spezifischen Gebäudekosten für Einfamilienhäuser liegen wiederum mit 2,8% geringfügig unter jenen für Mehrfamilienhäuser. Vergleicht man die durchschnittlichen Mehrkosten der mit Wärmepumpen betriebenen Wohngebäude und den fossil beheizten Wohngebäuden, so ergeben sich ein durchschnittliche Mehrinvestitionen von 7,30 CHF je eingesparte MJ Wärmebedarf.

Die Stichprobe von *Objekten mit solarer Wärmeerzeugung* (8 EFH) ist zu klein, um eine repräsentative, fundierte Aussage machen zu können. Die durchschnittlichen Gebäudekosten belaufen sich auf  $2'769 \text{ CHF/m}^2 \text{ EBF}$  (Standardabweichung =  $885 \text{ CHF/m}^2 \text{ EBF}$ ) und liegen damit um knapp 10% über den Werten für fossil beheizte Wohngebäude, was allerdings nicht unbedingt allein auf die Solaranlage zurückgeführt werden kann, sondern auch auf andere bauliche Merkmale ohne Energierelevanz.

Die durchschnittlichen, spezifischen Gebäudekosten steigen nach diesen Auswertungen in Abhängigkeit der Wärmeerzeugungssysteme sowie mit abnehmenden Wärmebedarf erwartungsgemäss an (vgl. Tab. 4.4-1 und Abbildung 4.4-3).

Der Verlauf der spezifischen Gebäudekosten sowie der Grenzkostenkurve bei den fossil beheizten Gebäuden legen den Schluss nahe, dass die Mehrkosten des energieeffizienten Bauen, welche auf einzelne Optimierungsmassnahmen zurückzuführen sind, durch eine intelligenten Konzeption von Raum-Layout, Materialwahl und Konstruktion kompensieren lassen. In der Tat sind viele andere Einflussfaktoren, welche die Baukosten beeinflussen

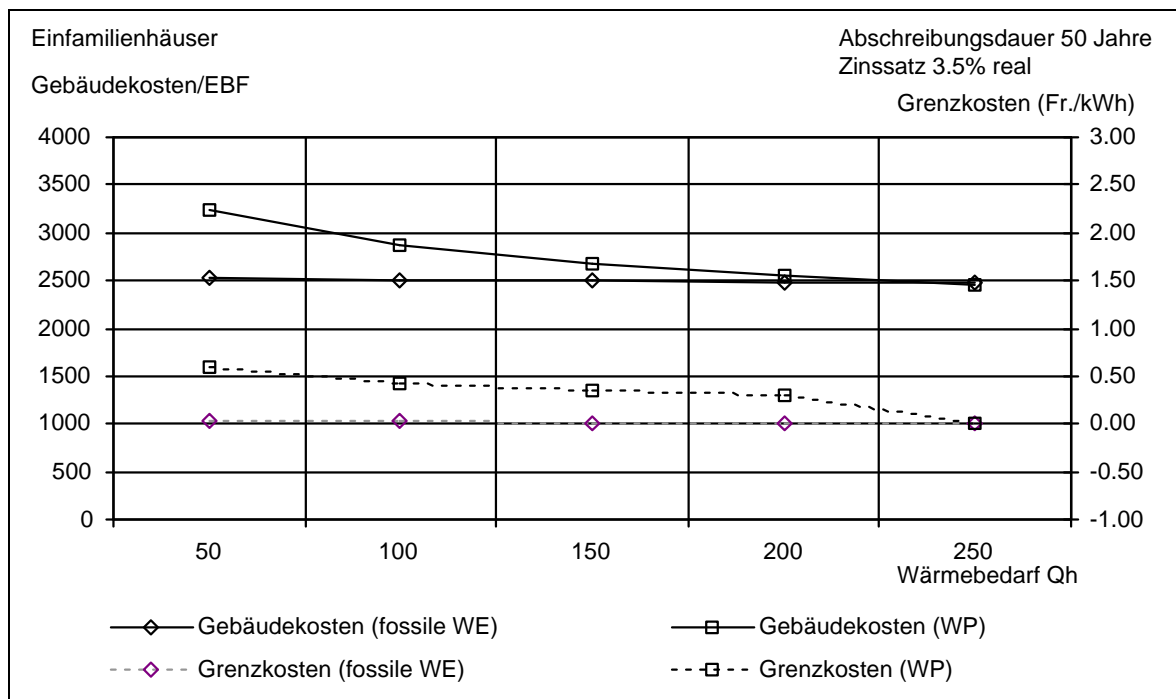
(Ausstattung, Materialwahl, Raumaufteilung, Bauträgerschaftstyp, Architekt/Planer etc.), in dem verwendeten Datensample nicht enthalten sind.

Die Steigung zwischen fossil betriebenen Gebäuden und den Wärmepumpengebäuden ist zwar augenfällig, könnte jedoch mit statistischen Methoden nicht als signifikant erhärtet werden. Es ist denn auch nicht unmittelbar plausibel, dass die Grenzkosten wärmepumpenbetriebener Wohngebäude so deutlich von denen fossilbetriebener Wohngebäude abweichen und die Grenzkosten fossilbetriebener Wohngebäude über den betrachteten Wärmebereich fast Null sind. Zu erwarten wäre vielmehr, dass die WP-Gebäude zwar ein höheres Kostenniveau bei Standardenergiebedarf aufweisen (wegen der teureren Wärmepumpe), dass dann aber die Steigung in Funktion zunehmender Energieeffizienz der Gebäudehülle (hin zu abnehmenden  $Q_h$ ) nicht steiler verläuft (eher weniger steil, da bei den WP mehr Kosten eingespart werden können als bei den fossilen Anlagen).

Tabelle 4.4-2 Durchschnittliche Gebäudekosten und Streuung (Standardabweichung) des Datensamples für den top down Ansatz.

	Durchschnittliche Gebäudekosten in CHF / m <sup>2</sup> EBF	Standardabweichung
Wohnbauten mit fossiler Wärmeerzeugung	2.537	622
Wohnbauten mit Wärmepumpenanlagen	2.676	686
Wohnbauten mit solarer Wärmeerzeugung	2.769	885

Quelle Berechnungen HBT



Quelle Berechnungen HBT

Abbildung 4.4-3 Gebäudekosten pro EBF und Grenzkosten (Durchschnittskostenbetrachtung) bei Einfamilienhäusern mit unterschiedlichen Wärmeerzeugungssystemen

Als Fazit lässt sich festhalten, dass mit der vorliegenden beschränkten Menge von beschreibenden Variablen (d.h. von kostenbeeinflussenden Faktoren), die Mehrkosten der Energie-Effizienz nicht isoliert werden können, da sie von den übrigen Faktoren kompensiert werden. Es kann jedoch gefolgert werden, dass die Mehrkosten des energieeffizienten Bauens offensichtlich durch solche anderen Faktoren (weitgehend) kompensiert werden können. Dies ist in dem Sinn plausibel, als dass die Mehrkosten z.B. bei Minergie 10% kaum je überschreiten (was auch der nachfolgenden Bottom-up-Ansatz aufzeigt) und eine Variation der Kosten in dieser Grösse relativ problemlos durch geschicktes Planen, kosteneffizientes Bauen, kostenbewusste Materialwahl und Ausstattung aufgefangen werden können. Dies stützt auch die These von Belz (2000), dass die Pioniere des energie-effizienten Bauens teilweise auch die Pioniere des kosteneffizienten Bauens sind. Denn gerade wegen der auftretenden Mehrkosten der Energieeffizienz entsteht ein Druck, möglichst kosteneffizient zu bauen.

Viele Bauträger, v.a. auch private EFH-Bauende, verfügen gerade während der Lebensphase eines Hausbaus nur über beschränkte Budgets (berufliche Karriere noch nicht voll entwickelt, Kinder) und müssen deshalb gezwungenermassen Prioritäten setzen, sei dies bzgl. energetischen Aspekten, den erwähnten übrigen Faktoren oder bzgl. der Landkosten.

#### 4.4.3 Bottom-up Ansatz (Einfamilienhäuser und Mehrfamilienhäuser)

Am Ausgangsobjekt des Fallbeispiels (nicht zu verwechseln mit dem in diesem Bericht verwendeten Konzept der Referenzbauweise, denn das gewählte Fallbeispiel weist eine bessere Energieeffizienz auf als gesetzlich erforderlich und als die Referenzneubauweise), einem Vierfamilien-Wohngebäude, werden die Einflüsse unterschiedlicher Wärmedämmstärken an der Fassade und am Dach, unterschiedlicher Fensterqualitäten etc. zunächst einzeln und dann in Kombinationen untersucht. Die Einzelbauteiluntersuchungen betreffen das Fallbeispiel (MFH). Anschliessend sind zu den Nutzenergiebedarfskategorien je ein möglicher Lösungsansatz für das MFH und das EFH skizziert.

##### Gebäudedaten:

Als Ausgangsobjekt für die Betrachtungen wurde ein real gebautes 4-geschossiges Mehrfamilienhaus (**MFH**) mit 4 Maisonetten, am Bodensee gelegen, ausgewählt. Baujahr 1998/99, Laubengang-Erschliessung. Davon werden gegen „oben“ bzw. „unten“ die Referenzneubauweise (Grenzwert) sowie die vier definierten Effizienzstufen abgeleitet.

Aussenwände	Kompaktfassade, 12 cm Polystyrol (PS) Wärmedämmung
Holzfenster	IV-Gläser mit U-Wert 1,3
Dach	Warmdach mit 16 cm Mineralwolle zwischen den Sparren
Kellerdecke	Deckenisolierung 8 cm PS und 4 cm PS unter Unterlagsboden
Wärmeerzeugung	Gas-Wandtherme
Wärmeverteilung	Bodenheizung
Lüftung	Komfortlüftung pro Wohnung

##### Kenndaten:

Q <sub>h</sub>	138 MJ/m <sup>2</sup> a
EBF	719 m <sup>2</sup>
beheiztes Volumen	1'660 m <sup>3</sup>
beheizte Gebäudehülle A*	1'179 m <sup>2</sup> (ohne Berücksichtigung der Reduktionsfaktoren b)
Gebäudehüllenziffer	1,3 (A/EBF)
Fassadenflächenanteile	18% Fensterfläche (S=45%, N=29%, O/W je 13%) 82% Wandfläche
Gebäudevolumen SIA 116	2'597 m <sup>3</sup> SIA
Gebäudekosten pro EBF	2'230 CHF/ m <sup>2</sup> EBF
Gebäudekosten/m <sup>3</sup> SIA	618 CHF/m <sup>3</sup> SIA

Das **Einfamilienhaus**-Modell wurde vom obigen MFH abgeleitet mit folgenden Kenndaten:

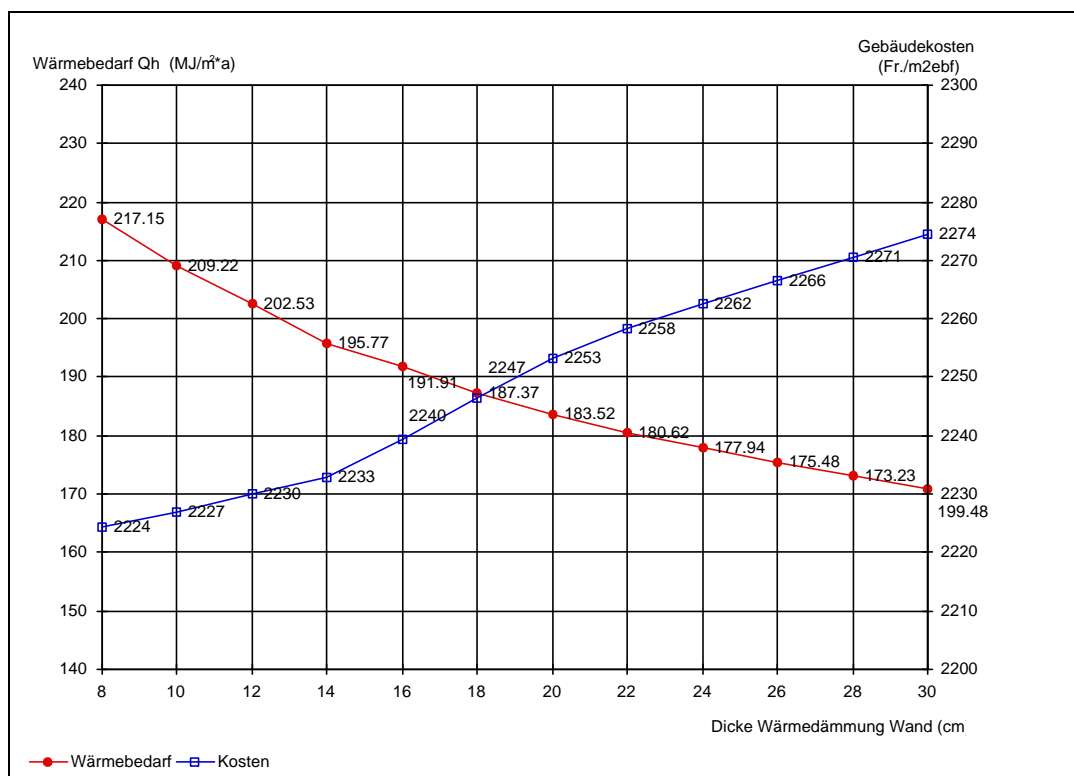
Q <sub>h</sub>	150 MJ/ m <sup>2</sup> a
EBF	250 m <sup>2</sup> (EG,OG,DG)
beheiztes Volumen	548 m <sup>3</sup>
beheizte Gebäudehülle A*	490 m <sup>2</sup> (ohne Berücksichtigung der Reduktionsfaktoren b)
Gebäudehüllenziffer	1,75 (A/EBF)
Fassadenflächenanteile	11% Fensterfläche (S=35%, N=23%, O/W je 21%) 89% Wandfläche
Gebäudevolumen SIA 116	954 m <sup>3</sup> SIA
Gebäudekosten pro EBF	2'500 CHF/ m <sup>2</sup> EBF
Gebäudekosten/m <sup>3</sup> SIA	654 CHF/m <sup>3</sup> SIA



Das MFH-Modell entspricht einer mittleren Gebäudehüllenzahl der Stichprobe gemäss Kap. 3.1.1. Das vom Fallbeispiel (4-Fam.-Maisonetten-Haus) abgeleitete EFH ist bezüglich EBF und Gebäudevolumen (beheizt bzw. nach SIA 116) eher im oberen Segment anzusiedeln.

### a) Wand / Fassade

Untersucht wird der Einfluss unterschiedlicher Wärmedämmstärken von 8 cm bis 30 cm unter gleichbleibender Konstruktion der übrigen Bauteile. Berechnungsbasis der Kosten bilden direkte Erhebungen bei einer renommierten Fassadenbaufirma im Raum Zürich, d.h. die hier verwendeten Kosten liegen 5–15% unter dem Mittelwert aus Kapitel 4.3.3 und entsprechen somit dem günstigsten und zweitgünstigsten Unternehmen gem. Abbildung 4.3-1. Die Aussagen beschränken auf die Kompaktfassaden. Der Grenzkostenberechnung liegt eine Abschreibungsdauer von 40 Jahren und ein Zinssatz von 5,5% real für Mehrfamilienhäuser zugrunde.

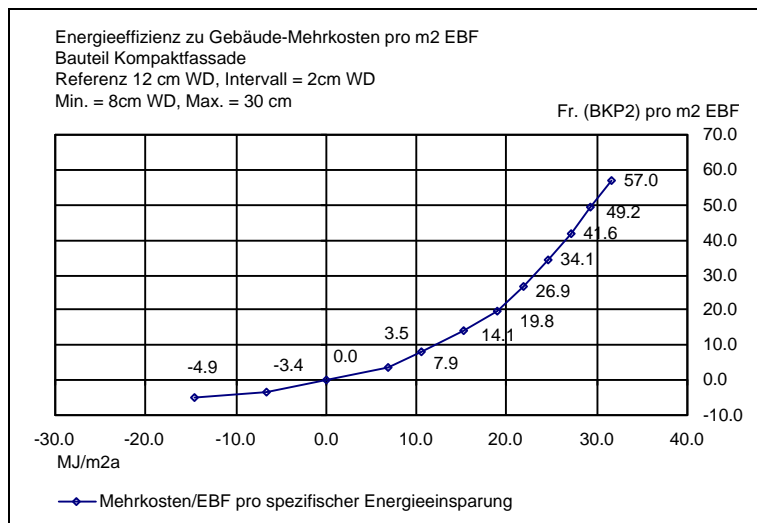


Quelle Berechnungen HBT

Abbildung 4.4-4: Wärmebedarf  $Q_h$  und Gebäudekosten pro EBF bei unterschiedlicher Dicke der Wärmedämmung bei Neubau an den Fassadenwänden.

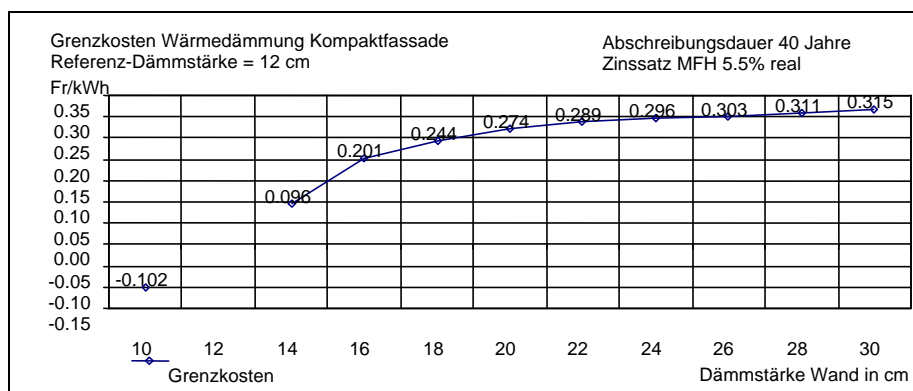
Die Steigung der Gebäudekosten mit zunehmender Dämmstärke an den Fassaden etwa linear verläuft (vgl. Abbildung 4.4-4). Dies gilt auch für die Grenzkosten (im Durchschnittskostenansatz) der Baukosten als Funktion der Dämmstärke bis zu einer Dämmstärke von ca. 18 cm, worauf der Anstieg der Durchschnittskosten deutlich abzuflachen beginnt (vgl. Abbildung 4.4-6). Demgegenüber sind die Gebäude-Mehrkosten als Funktion der eingesparten Wärmeenergie stark progressiv (vgl. Abbildung 4.4-5): so kosten die ersten zusätzlich gegenüber der Referenz eingesparten 12 MJ/m² EBF etwa zusätzlich rd. 10,- CHF/m² EBF, und die nächsten zusätzlich eingesparten 8 MJ/m² EBF kosten weitere 10,- CHF/m² EBF. Allerdings sei

angemerkt, dass die Mehrkosten für Kompaktfassaden bei Dämmstärken über 22 cm bei den angefragten Unternehmern erheblich differieren, da noch sehr wenig Ausführungserfahrung und Pionierpreise in die Preisbildung einfließen.



Quelle Berechnungen HBT

Abbildung 4.4-5 Energieeffizienz der Wärmedämmung an Fassadenwänden bei Neubau (Gebäude-Mehrkosten pro EBF als Funktion der Energieeinsparung)



Quelle Berechnungen HBT

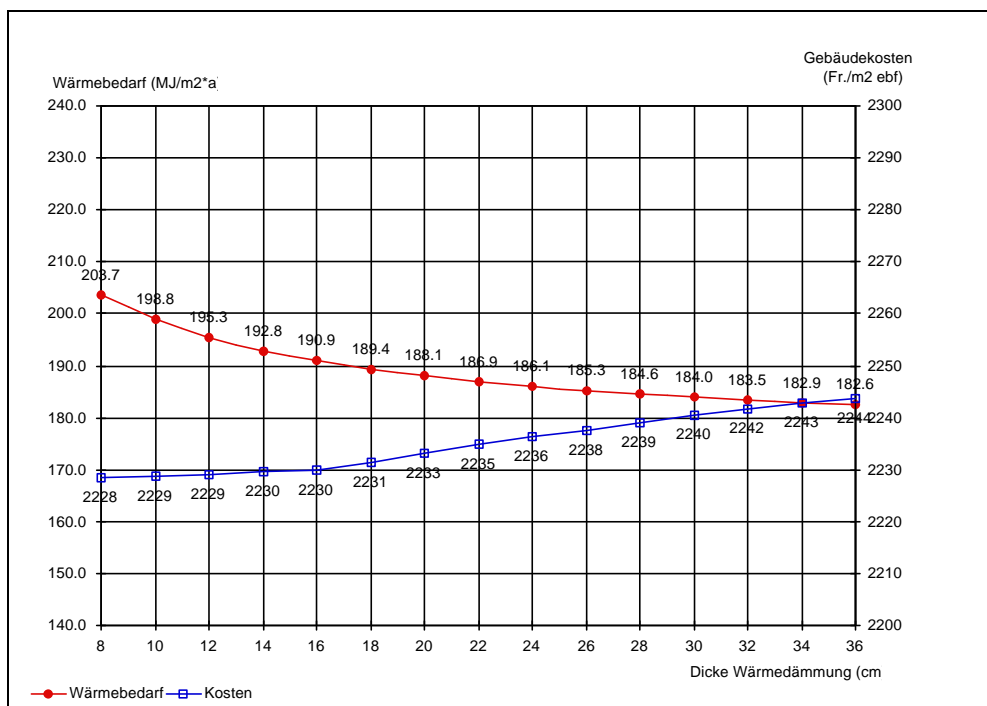
Abbildung 4.4-6 Grenzkosten (Durchschnittskostenbetrachtung) der Wärmedämmung an Fassadenwänden bei Neubau (Kompaktfassade)

### b) Dach (Steildach)

Untersucht wird der Einfluss unterschiedlicher Wärmedämmstärken von 8 cm bis 36 cm zwischen und unter den Sparren, unter gleichbleibender Konstruktion der übrigen Bauteile.

Berechnungsgrundlage bilden die Kostenangaben aus 4.3.8 ohne die erneuerungsspezifischen Kostenanteile. Der Grenzkostenberechnung liegt eine Abschreibungsdauer von 50 Jahren und ein Zinssatz von 5,5% real für Mehrfamilienhäuser zu Grunde.

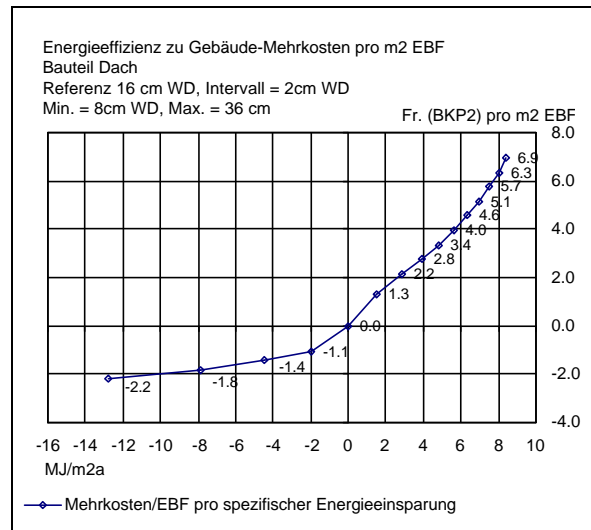
Auch in diesem Fall der Dämmung von Steildächern zeigt sich ein ähnlicher Zusammenhang zwischen den Baukosten (bzw. den Grenzkosten) und zunehmender Dämmstärke (vgl. Abbildung 4.4-7 und 4.4-9); er ist relativ linear. Da aber mit zunehmender Dämmstärke die eingesparten Wärmemengen nicht linear abnehmen, ergibt sich für die Zusatzinvestitionen wiederum ein progressiver Verlauf, so dass die ersten gegenüber der Referenz-Wärmedämmung eingesparten  $4 \text{ MJ/m}^2_{\text{EBF}}$  etwa  $2,8 \text{ CHF/m}^2$  zusätzlich kosten, während weitere  $4 \text{ MJ/m}^2_{\text{EBF}}$  bereits Mehrkosten von etwa  $3,5 \text{ CHF/m}^2_{\text{EBF}}$  verursachen würden. Diese Kostensteigerung erklärt sich nicht zuletzt daraus, dass bei einer Dämmstärke von  $14 \text{ cm}$  die Wärmedämmung noch zwischen den Sparren liegt, während bei dickeren Wärmedämmungen zweilagig verlegt werden muss, d.h. zwischen und unter den Sparren, wodurch Mehrkosten für die Befestigung etc. entstehen.



Quelle Berechnungen HBT

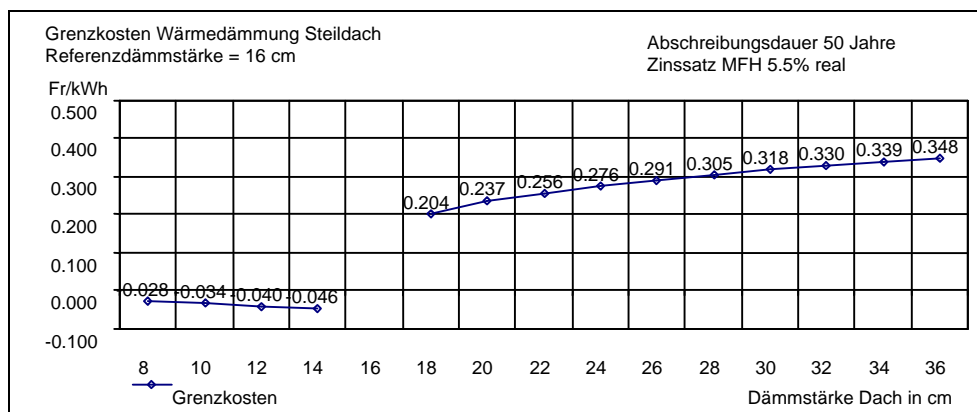
Abbildung 4.4-7 Wärmebedarf  $Q_h$  und Gebäudekosten pro EBF bei unterschiedlicher Dicke der Wärmedämmung am Dach eines Neubaus.

Dargestellt sind in Abbildung 4.4-9 auch die Grenzkosten (Durchschnittskostenansatz) einer verminderten Dämmstärke (auf der negativen y-Achse aufgetragen). Die Grenzkosten von  $14 \text{ cm}$  auf  $16 \text{ cm}$  betragen  $4.6 \text{ Rp/kWh}_{\text{NE}}$ , diejenigen von  $16 \text{ cm}$  auf  $18 \text{ cm}$  hingegen rund  $20 \text{ Rp/kWh}_{\text{NE}}$ , was mit dem oben erwähnten Kostensprung zu tun hat. Auch hier zeigt sich, dass das Grenzkostenkonzept sehr sensitiv ist hinsichtlich einer relativ moderaten Variation von Kosten, denn als Kostendifferenz entstehen dabei wesentlich grössere Variationen.



Quelle Berechnungen HBT

Abbildung 4.4-8 Energieeffizienz der Wärmedämmung an Steildächern beim Neubau (Gebäude-Mehrkosten pro EBF als Funktion der Energieeinsparung)



Quelle Berechnungen HBT

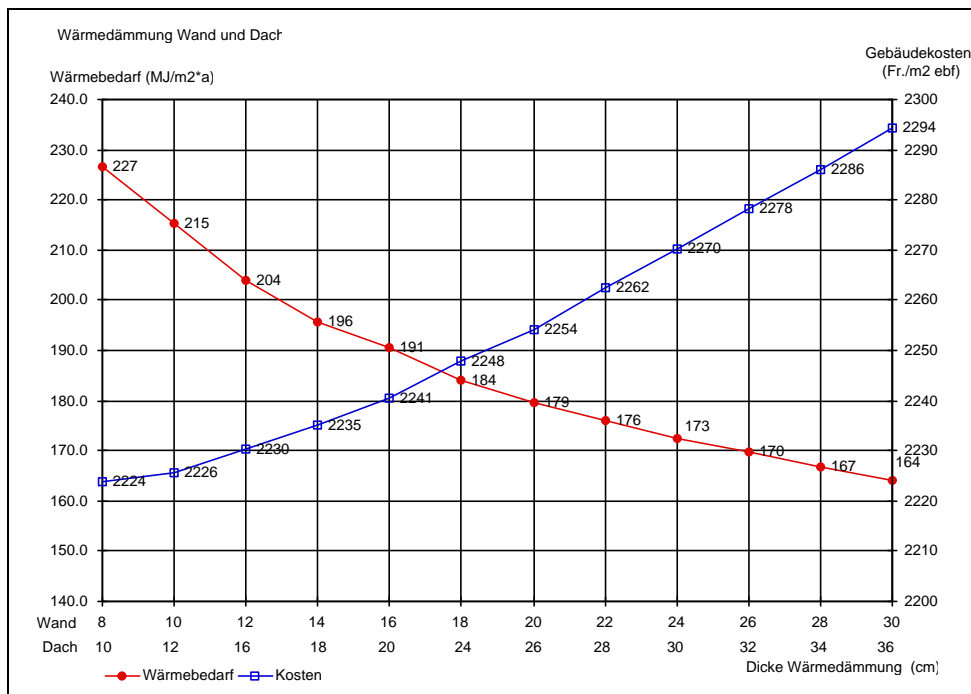
Abbildung 4.4-9 Grenzkosten (Durchschnittskostenbetrachtung) der Wärmedämmung an Steildächern beim Neubau

### c) Wand und Dach (Steildach)

Untersucht wird der Einfluss unterschiedlicher Wärmedämmstärken von 8 cm bis 30 cm an Fassadenwänden und 10 cm bis 36 cm beim Dach, unter gleichbleibender Konstruktion der übrigen Bauteile, d.h. hier werden zwei der oben getrennt berechneten Massnahmen zusammen betrachtet, wobei eine typische Konstellation der beiden Wärmedämmstärken unterstellt wurde (vgl. Abbildung 4.4-10). Die Dämmstärke am Dach beträgt bei den schwachen Wanddämmungen +2 cm, im mittleren Bereich (12–16 cm) +4 cm und bei den grösseren Wanddämmungen +6 cm als bei der Fassade.

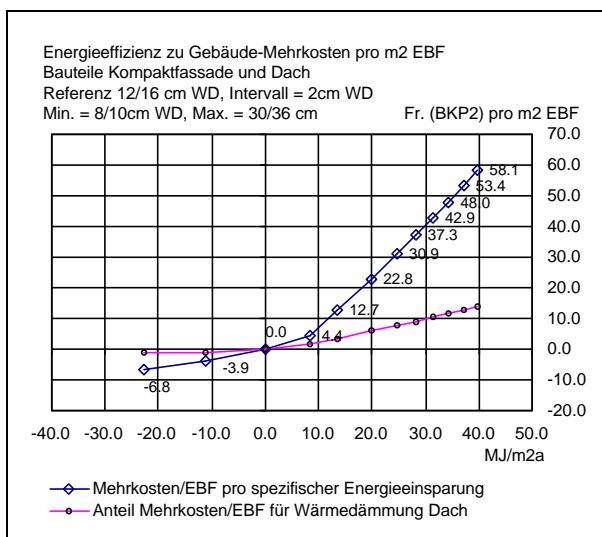
Wie nicht anders zu erwarten, vermindern sich die zusätzlichen Investitionen pro m<sup>2</sup> EBF als Funktion des eingesparten Wärmebedarfs gegenüber der einen Fassadenanalyse (s.o): Die Gebäude-Mehrkosten für die ersten eingesparten 10 MJ/m<sup>2</sup> betragen etwa 5 CHF/m<sup>2</sup>, während

die nächsten 10 eingesparten MJ zusätzlich etwa 17 CHF/m<sup>2</sup> EBF erforderlich machen (vgl. Abbildung 4.4-11). Der Grenzkostenberechnung liegt eine durchschnittliche Abschreibungsdauer von 40 Jahren für die Fassadenwände bzw. 50 Jahre fürs Steildach und ein Zinssatz von 5,5% real für Mehrfamilienhäuser zu Grunde.



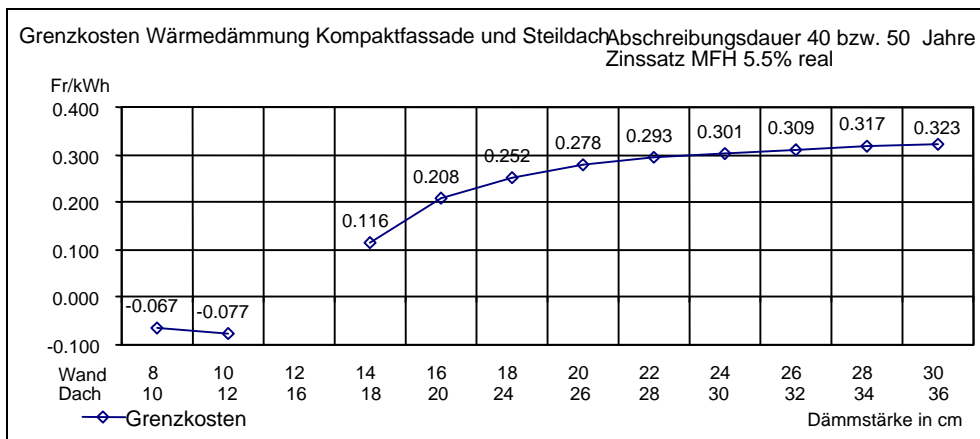
Quelle Berechnungen HBT

Abbildung 4.4-10 Wärmebedarf Q<sub>h</sub> und Gebäudekosten pro EBF bei unterschiedlicher Dicke der Wärmedämmung an den Fassadenwänden und am Steildach beim Neubau



Quelle Berechnungen HBT

Abbildung 4.4-11 Gebäude-Mehrkosten pro m<sup>2</sup> EBF als Funktion der Energieeinsparung bei Wärmedämmungen an Fassadenwänden und Steildächern beim Neubau

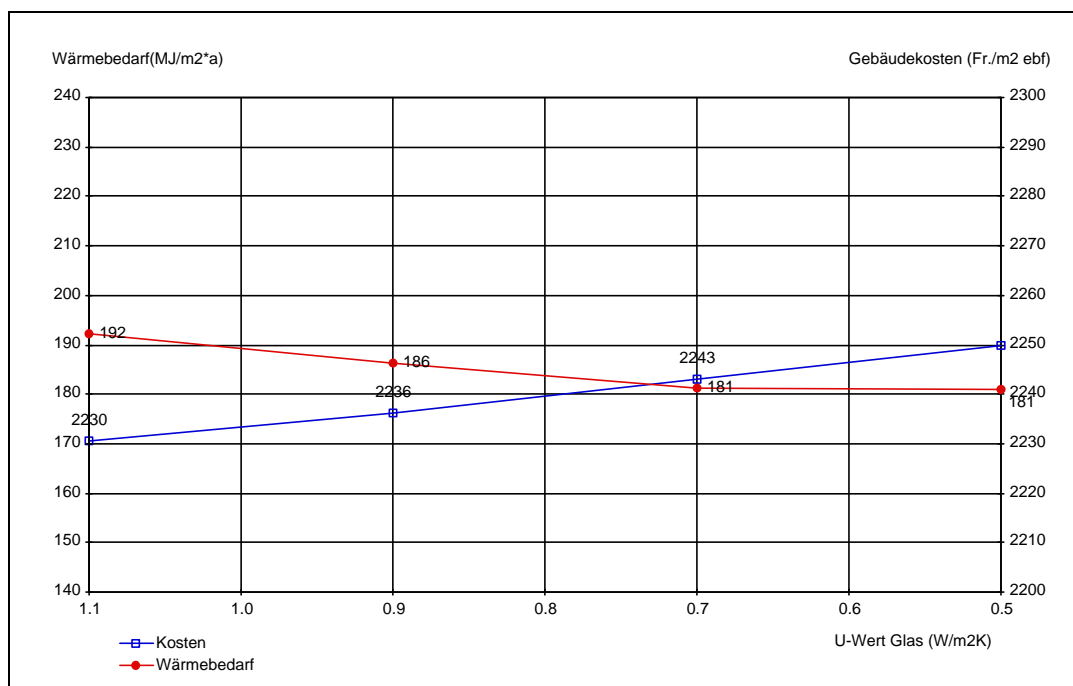


Quelle Berechnungen HBT

Abbildung 4.4-12 Grenzkosten(Durchschnittskostenbetrachtung) der Wärmedämmung an Fassadenwänden und Steildächern beim Neubau

**d) Fenster mit gleichbleibendem Fensterflächeanteil**

Untersucht wird der Einfluss unterschiedlicher Glas-U-Werte bei konstanter Flügel- und Fensterrahmenkonstruktion (Rahmen-U-Wert = 1,5), unter gleichbleibender Konstruktion der übrigen Bauteile. Die Kostenbasis entspricht den Untersuchungen im Kap. 4.3.7.

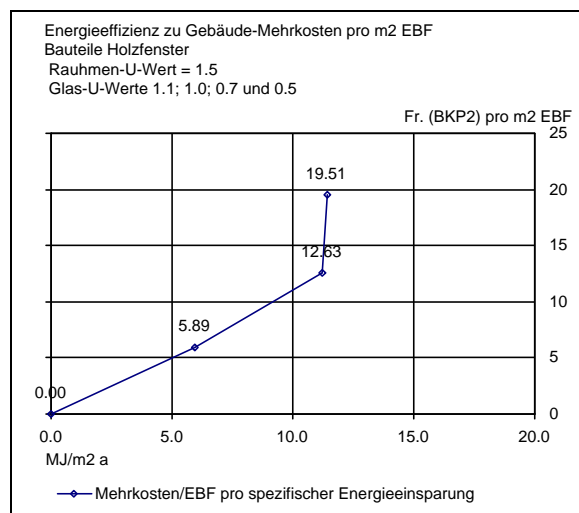


Quelle Berechnungen HBT

Abbildung 4.4-13 Wärmebedarf  $Q_h$  und Gebäudekosten pro EBF bei unterschiedlichen Glas-U-Werten beim Neubau.

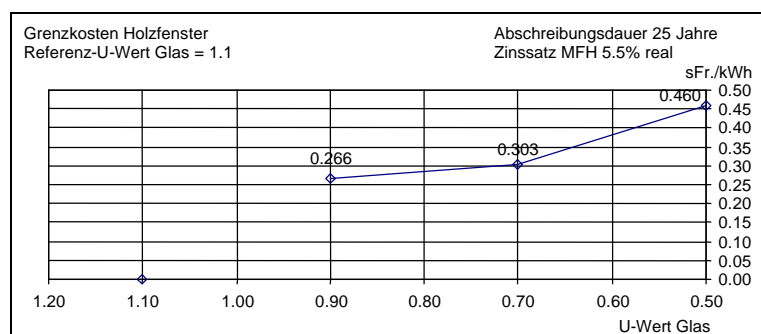
Allerdings beinhalten die folgenden Berechnungen aus Gründen des Projektablaufs lediglich die Kosten der Standardfenstergrösse (1.7m<sup>2</sup>). Das architektonische Gestaltungsmittel, grösserflächige statt kleine Fenster einzusetzen, ist hier nicht enthalten. Ausserdem dürfte die durchschnittliche Fensterfläche im Neubau grösser sein als 1.7 m<sup>2</sup>. Und zudem sind nur Fenster mit heute sehr gebräuchlichen Kennwerten in die Betrachtung miteinbezogen. Fenster mit höherem g-Wert zum Beispiel fehlen.

Während die Steigung der Gebäudekosten mit dem besseren (abnehmenden) U-Wert bis 0,7 der Verglasung linear verläuft, ist gegenüber einer Verglasung mit einem U-Wert unter 0,7 noch ein unbedeutender Energiegewinn zu verzeichnen (vgl. Abbildung 4.4-13 und 4.4-14). D.h. bei einem tieferen U-Wert als 0,7 wird der erhöhte Wärmeschutz durch den sinkenden g-Wert (Nutzen der Globalstrahlung) kompensiert. Im linearen Bereich der Energieeffizienz (vgl. Abbildung 4.4-14) betragen die zusätzlichen Investitionskosten für verbesserte Verglasung ca. 1 CHF pro MJ/m<sup>2</sup> a Energiegewinn. Grundlagen für die Grenzkostenberechnung: durchschnittliche Abschreibungsdauer von 25 Jahren für die Holzfenster, 5,5% Realzinssatz.



Quelle Berechnungen HBT

Abbildung 4.4-14 Energieeffizienz der Glas-U-Werte (Gebäude-Mehrkosten pro EBF als Funktion der Energieeinsparung) beim Neubau



Quelle Berechnungen HBT

Abbildung 4.4-15 Grenzkosten (Durchschnittskostenbetrachtung) von Fenstern mit unterschiedlichen Glas-U-Werten beim Neubau (Referenz-U-Wert Glas=1.1 W/m<sup>2</sup>K)

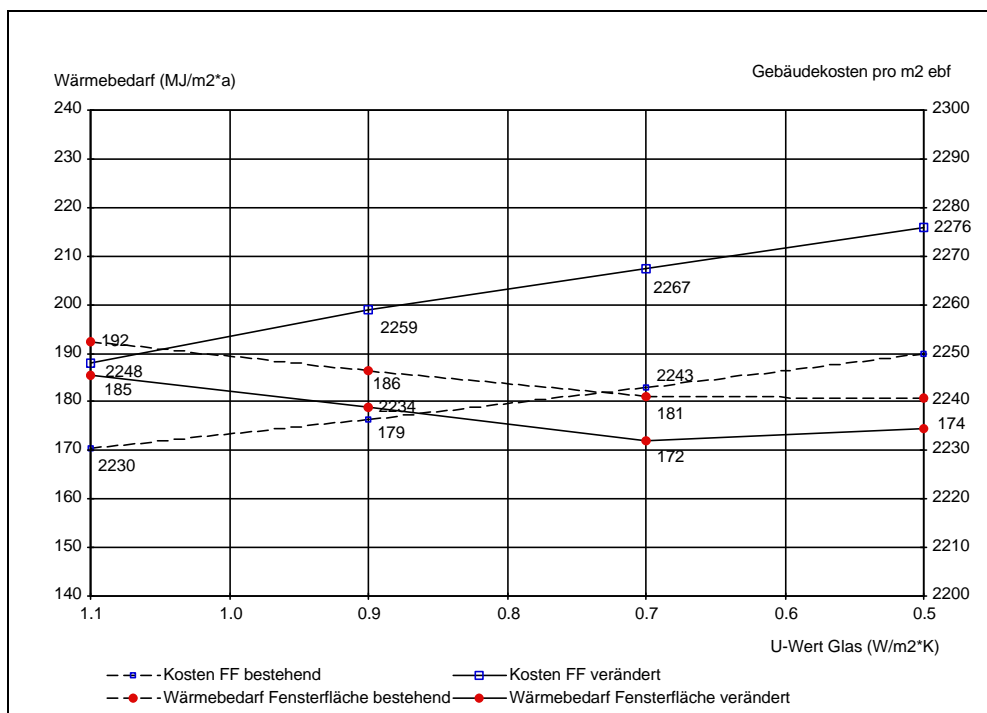
### e) Grenzkosten der Energieeffizienz durch Vergrößerung der Fensterflächenanteile

Untersucht wird der Einfluss veränderter Fensterflächen bei verschiedenen Glas-U-Werten, unter gleichbleibender Konstruktion der übrigen Bauteile, wobei der Rahmen-U-Wert vorerst konstant bei 1,5 belassen wird.

Die Fensterfläche nach Süden wird verdoppelt, während die nach den übrigen Himmelsrichtungen auf die gesetzlich notwendige Fensterfläche reduziert wird, d.h. auf 70% der Referenzfläche. Insgesamt steigt der Fensterflächenanteil von 18% auf 21%. In der Kostenkalkulation sind Minder- und Mehrkosten aus Wandkonstruktion samt Kompaktfassade und Sonnenschutz berücksichtigt (gilt auch für die nachfolgenden Varianten).

In einem ersten Schritt wird der Rahmen-U-Wert konstant bei 1,5 belassen und an allen Fassadenorientierungen jeweils dieselben Verglasungen eingesetzt.

Aus Gründen des Projektablaufs beinhalten die folgenden Berechnungen die Kosten der Standardfenstergrösse (1.7m<sup>2</sup>). Das architektonische Gestaltungsmittel, grösserflächige statt kleine Fenster einzusetzen, ist hier nicht enthalten. Ausserdem dürfte die durchschnittliche Fensterfläche im Neubau grösser sein als 1.7 m<sup>2</sup>. Ausserdem sind nur Fenster mit heute sehr gebräuchlichen Kennwerten in die Betrachtung miteinbezogen. Fenster mit höherem g-Wert zum Beispiel fehlen.



Quelle Berechnungen HBT

Abbildung 4.4-16 Wärmebedarf  $Q_h$  und Gebäudekosten pro EBF bei veränderter Fensterfläche und unterschiedlichen Glas-U-Werten.

Der geringe Energieeffizienzgewinn nur durch die Veränderung der Fensterflächenanteile mag auf den ersten Blick erstaunen. Das nachstehende Zitat vermag den Sachverhalt zu erklären:



Beim energetisch schlechten Haus (mit schlechten Fenstern) ist die Vergrößerung der Südfenster energetisch negativ. Beim energetisch guten Haus wirkt sich die Vergrößerung positiv aus. Beim hochgedämmten Niedrigenergiehaus mit kurzer Heizperiode ist die Vergrößerung negativ. Quelle: Humm, Othmar; *NiedrigEnergieHäuser, Innovative Bauweisen und neue Standards*, Seite 48 ff.

Durch den geringen Effizienzgewinn dieser hier durchgerechneten Varianten ergeben sich folglich entsprechend hohe spezifische Grenzkosten, siehe Tabelle 4.4-3. Wird die Fensterqualität jedoch spezifisch pro Orientierung ausgewählt und werden insbesondere die Preisreduktionen berücksichtigt, die beim Einsatz von grossflächigen Fenstern möglich sind, resultieren sehr viel tiefere Grenzkosten, teilweise die tiefere als solche von Wärmedämmungen, siehe dazu Kap. 4.3.7, dessen Erkenntnisse aus Gründen des Projektablaufs in diesem Kapitel 4.4 nicht mehr Eingang finden konnten.

Tabelle 4.4-3 Grenzkosten architektonischen Massnahme „Fensterflächenvergrößerung“

Ug W/m <sup>2</sup> K	Fensterfläche vorher		Fensterfläche nachher		Differenz		Grenzkosten CHF/kWh <sub>NE</sub>
	Gebäude- kosten CHF/m <sup>2</sup> <sub>EBF</sub>	Qh MJ/m <sup>2</sup> a	Gebäude- kosten CHF/m <sup>2</sup> <sub>EBF</sub>	Qh MJ/m <sup>2</sup> a	Gebäude- mehrkosten CHF/m <sup>2</sup> <sub>EBF</sub>	Energie- Effizienz MJ/m <sup>2</sup> a	
1.1	2230	192	2248	185	18	7	0.64
0.9	2234	186	2259	179	25	7	0.88
0.7	2243	181	2267	172	24	9	0.66
0.5	2250	180	2276	174	26	6	1.07

#### f) Grenzkosten energie-effizienter Fenster beim Gebäude mit veränderten Fensterflächenanteilen<sup>1</sup>

Beim Gebäude mit nunmehr veränderten Fensterflächen werden die Grenzkosten zunehmend energie-effizienterer Fenster untersucht. Es geht also um die Frage, ob die Energieeffizienz energetischen Verbesserung der Fenster beim Gebäude mit veränderten Fenstergrössen und -anordnung kosteneffizienter oder weniger kosteneffizient ist als im ursprünglichen Zustand.

Erwartungsgemäss verläuft die Steigung der Gebäudekosten mit dem besseren (abnehmenden) U-Wert der Verglasung bis zum Glas-U-Wert 0,7 positiv-linear und schlägt anschliessend negativ um (vgl. Abbildung 4.4-16 und 4.4-17). Unter einem U-Wert von 0,7 wird der Wärmegewinn aus erhöhtem Wärmeschutz durch den sinkenden G-Wert (Nutzen der Globalstrahlung) im Standardfall negativ (g-Wert=52% bei Glas-U-Wert von 0.7 W/m<sup>2</sup>K und g-Wert=42% bei Glas-U-Wert von 0.5 W/m<sup>2</sup>K). Höhere g-Werte bei diesen Glas-U-Werten sind zwar auf dem Markt erhältlich, müssen aber explizit verlangt werden und sind mit Mehrkosten verbunden, siehe dazu das Unterkapitel 4.3.6 zu den Verglasungen. Der Grenzkosten-

<sup>1</sup> [Aus Gründen des Projektablaufs beinhalten die folgenden Berechnungen die Kosten der Standardfenstergrösse (1.7m<sup>2</sup>). Das architektonische Gestaltungsmittel, grösserflächige statt kleine Fenster einzusetzen, ist hier nicht enthalten. Ausserdem dürfte die durchschnittliche Fensterfläche im Neubau grösser sein als 1.7 m<sup>2</sup>. Ausserdem sind nur Fenster mit heute sehr gebräuchlichen Kennwerten in die Betrachtung miteinbezogen. Fenster mit höherem g-Wert zum Beispiel fehlen.]

berechnung liegt eine durchschnittliche Abschreibungsdauer von 25 Jahren für die Holzfenster und ein Zinssatz von 5,5% real für Mehrfamilienhäuser zu Grunde.

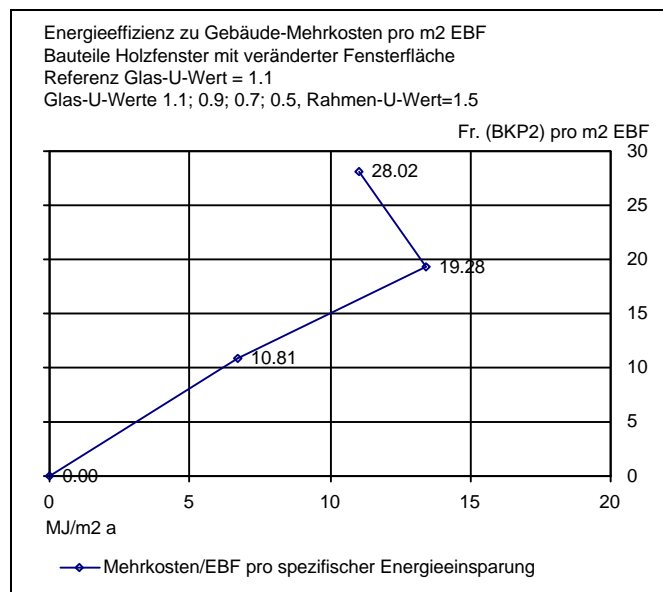
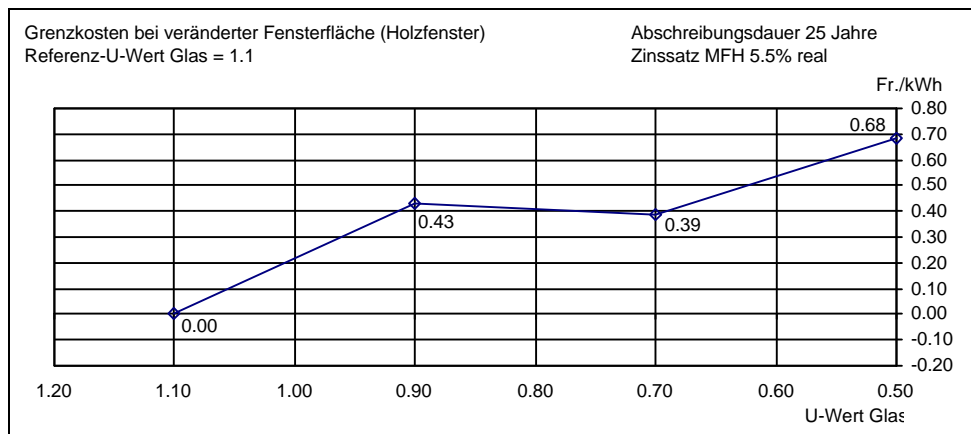


Abbildung 4.4-17 Energieeffizienz bei veränderter Fensterfläche und unterschiedlichen Glas-U-Werten beim Neubau, Rahmen-U-Wert konstant 1,5 (Gebäude-Mehrkosten pro EBF als Funktion der Energieeinsparung)



Quelle Berechnungen HBT

Abbildung 4.4-18 Grenzkosten (Durchschnittskostenbetrachtung) von Fenstern mit unterschiedlichen Glas-U-Werten bei veränderter Fensterfläche.

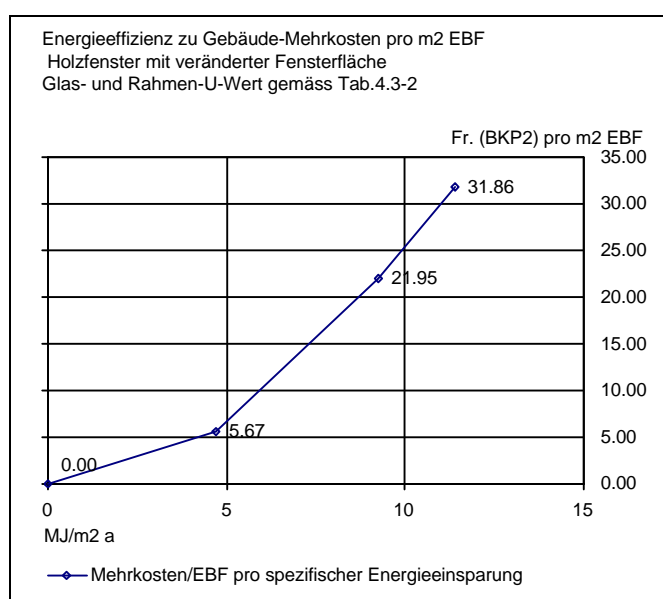
Im zweiten Schritt werden Glas- und Rahmen-U-Werte variiert und zwischen Süd- und den übrigen Orientierungen unterschieden, um der negativen Energieeffizienz aus der Südexposition zu begegnen. Eine Optimierung der Fensterflächen gepaart mit einer Verbesserung des Glas-U-Wertes von 1.1 auf 0,7 bzw. 0,5 der nicht nach Süden exponierten Fenster (Rahmen-U-Wert 1, 5 bzw. 1.1 resp. 0,8) weist eine progressive Energieeffizienz auf: für die ersten eingesparten 5 MJ/m<sup>2</sup> a müssen zusätzlich rd. 7,- CHF/m<sup>2</sup> EBF aufgewandt werden, während

für weitere zusätzlich eingesparte 5 MJ/ m<sup>2</sup> a zusätzlich 18,- CHF/ m<sup>2</sup> EBF investiert werden müssen.

Tabelle 4.4-4 Grenzkostenberechnung (Durchschnittskostenansatz) für energieeffiziente Fenster bei unterschiedlichen Glas- und Rahmen U-Werten, 25 Jahre, 5,5% real, Referenz-U-Werte: 1.1 / 1.5

	Eposition	Glas-U-Wert	Rahmen-U-Wert	Wärmebedarf Qh MJ/m <sup>2</sup> a	Energieeffizienz MJ/ m <sup>2</sup> a	Mehrinvestitionen CHF/m <sup>2</sup> EBF	Grenzkosten CHF/kWh
Referenz	Süd	1,1	1,5	185	-	-	-
	Nord/Ost/West	1,1	1,5				
Var 1	Süd	1,1	1,5	181	6	5,65	0,324
	Nord/Ost/West	0,7	1,5				
Var 2	Süd	1,1	1,1	176	9	21,95	0.638
	Nord/Ost/West	0,7	1,1				
Var 3	Süd	1,1	1,1	174	11	31,85	0,751
	Nord/Ost/West	0,5	0,8				

Quelle Berechnungen HBT



Quelle Berechnungen HBT

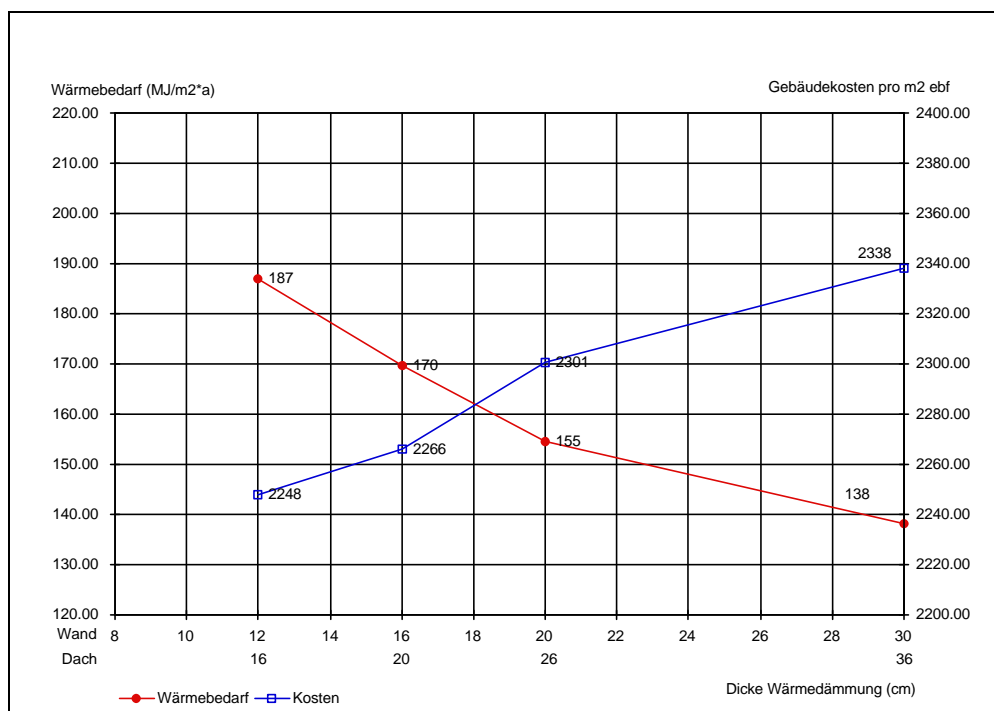
Abbildung 4.4-19 Energieeffizienz bei veränderter Fensterfläche und unterschiedlichen Glas- und Rahmen-U-Werten beim Neubau (Gebäude-Mehrkosten pro EBF als Funktion der Energieeinsparung)

Fazit: Als Einzelmassnahme ist eine Veränderung der Fensterflächen (nach Süden mehr, und bei den übrigen Orientierung nur das gesetzliche Minimum) bezogen auf das ganze Gebäude weniger kosteneffizient, auch wenn bessere Gläser verwendet werden, weil die Grenzkosten dieser Massnahme gegenüber den oben genannten relativ teurer sind. Das liegt einerseits darin begründet, dass der Gewinnfaktor der freien Wärme etwas zurück geht (weil das

Gewinn-/Verlustverhältnis zunimmt) und andererseits weil die Kosten der Fenster in Funktion zunehmender Energieeffizienz stärker ansteigen als bei der Wand. Hieran zeigt sich sehr deutlich, dass ein energieeffizientes Haus als gesamtes System konzipiert und umgesetzt werden muss, um kosteneffiziente Lösungen zu realisieren (siehe dazu weitere ausführliche Berechnungen von Kosten und Nutzen verschiedener Gestaltungsvarianten und Fensterqualitäten im Neubau, Kapitel 4.3.7).

### g) Variable Dach- und Fassadenwand-Dämmung bei veränderte Fensterflächen<sup>1</sup>

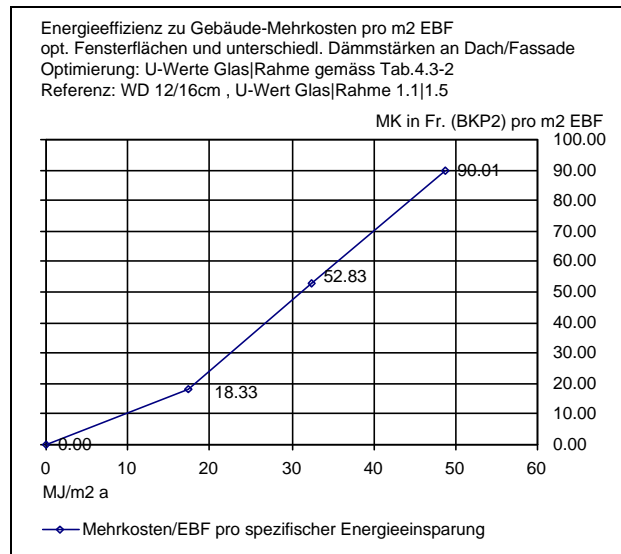
Aufgrund der oben dargelegte Ergebnisse wird nunmehr der Einfluss veränderter Dach- und Fassadenwand-Dämmstärken bei veränderten Fensterflächen sowie Glas- und Rahmen-U-Werten gemäss Tab.4.4-2 untersucht. Die Fensterfläche nach Süden wird verdoppelt, während die nach den übrigen Himmelsrichtungen auf die gesetzlich notwendige Fensterfläche reduziert wird, d.h. auf 70% der Referenzfläche. Als Variablen gelten die Dämmstärken von 12 cm Wand und 16 cm Dach bzw. 16 cm/20 cm, 20 cm/26 cm, 30 cm/36 cm. Der Grenzkostenberechnung liegt eine durchschnittliche Abschreibungsdauer von 25 Jahren für die Holzfenster bzw. von 45 Jahren für die Dach- und Fassaden-Wärmedämmungen und ein Zinssatz von 5,5% real für Mehrfamilienhäuser zu Grunde.



Quelle Berechnungen HBT

Abbildung 4.4-20 Wärmebedarf  $Q_h$  und Gebäudekosten pro EBF bei veränderter Fensterfläche und unterschiedlichen Dach- und Fassadendämmungen beim Neubau.

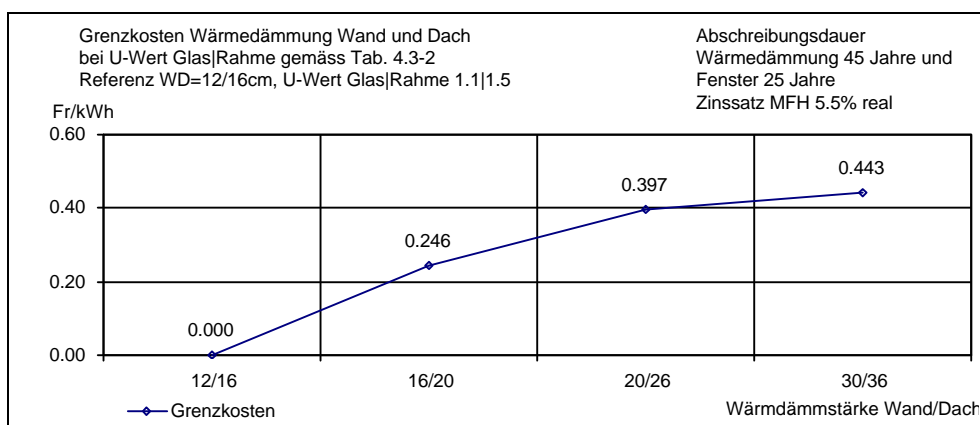
<sup>1</sup> [Aus Gründen des Projektablaufs beinhalten die folgenden Berechnungen die Kosten der Standardfenstergrösse (1,7m<sup>2</sup>). Das architektonische Gestaltungsmittel, grösserflächige statt kleine Fenster einzusetzen, ist hier nicht enthalten. Ausserdem dürfte die durchschnittliche Fensterfläche im Neubau grösser sein als 1,7 m<sup>2</sup>. Ausserdem sind nur Fenster mit heute sehr gebräuchlichen Kennwerten in die Betrachtung miteinbezogen. Fenster mit höherem g-Wert zum Beispiel fehlen.]



Quelle Berechnungen HBT

Abbildung 4.4-21 Energieeffizienz bei veränderter Fensterfläche und unterschiedlichen Dach- und Fassadendämmungen von Neubauten (Gebäude-Mehrkosten pro EBF als Funktion der Energieeinsparung)

Während die Steigung der Gebäudekosten mit zunehmender Dämmstärke etwa linear verläuft (vgl. Abbildung 4.4-20) und dies auch für die Grenzkosten der Baukosten als Funktion der Dämmstärke gilt (vgl. Abbildung 4.4-22), sind die Mehrinvestitionen als Funktion der eingesparten Wärmeenergie leicht progressiv (vgl. Abbildung 4.4-21): so kosten die ersten zusätzlich gegenüber der Referenz eingesparten 20 MJ/ m² a etwa zusätzlich 23 CHF/ m² EBF, und die nächsten zusätzlich eingesparten 10 MJ/ m² a kosten weitere 25 CHF/ m² EBF.



Quelle Berechnungen HBT

Abbildung 4.4-22 Grenzkosten (Durchschnittskostenbetrachtung) bei veränderter Fensterfläche und unterschiedlichen Dach- und Fassadendämmungen bei Neubauten

### **h) Zusammenfassung der Einzelmassnahmen zu den fünf Nutzenergiebedarfskategorien für das Mehrfamilienhaus und das Modell-EFH (Fallbeispiel Gasheizung)**

Auf der Grundlage der obigen Einzelbauteiluntersuchungen werden fünf Massnahmenpakete definiert, die in ihrem Wärmebedarf ( $Q_h$ ) den eingangs vorgegebenen Nutzenergiebedarfskategorien entsprechen. Mit den daraus resultierenden Gebäude-Mehrkosten werden die Grenzkosten der Abschreibungsdauer (bauteilspezifisch) und einer Verzinsung von 5,5% bei MFH und 3,5% bei EFH dargestellt. Mit eingerechnet sind Minderkosten aufgrund der kleiner dimensionierten Heizungsanlage und -verteilung in Funktion der Nutzenergiebedarfskategorien.

- a) **Referenzneubauweise:** Grenzwert gemäss SIA 380/1 (1988) und Absenkepfad SIA 1996. Heutige Bauweise (Normalfall), entspricht dem Fallbeispiel ohne Komfortlüftung, einer reduzierten Wärmedämmung von 10 cm an Fassade und 12 cm am Dach und Fenstern mit Glas- bzw. Rahmen-U-Werten von 1,1 bzw. 1,5.
- b) **Minergie-Primär:** Minergie-Primäranforderung an die Gebäudehülle (Einführung geplant). Entspricht dem Fallbeispiel ohne Komfortlüftung und einer leicht verbesserten Wärmedämmung von 16 cm an Fassade, 20 cm am Dach und 5 cm zusätzliche Wärmedämmung an der Kellerdecke sowie Fenstern mit Glas- bzw. Rahmen-U-Werten von 1,1 bzw. 1,5.
- c) **Zielwert** entspricht dem Fallbeispiel ohne Komfortlüftung, mit einer verbesserten Wärmedämmung von 20 cm an Fassade, 26 cm am Dach und 5 cm zusätzliche Wärmedämmung an der Kellerdecke, einer optimierten Fensterfläche und einem verbesserten Glas-U-Wert (nach Süden 1,1 bzw. Nord, Ost und West 0,7), Rahmen-U-Wert = 1,5.
- d) **Minergie-Gebäudehülle-allein (Minergie-GHa)** entspricht dem Fallbeispiel (mit Komfortlüftung) mit einer verbesserten Wärmedämmung von 24 cm an Fassade, 30 cm am Dach und 10 cm Wärmedämmung an der Kellerdecke, einer optimierten Fensterfläche und einem verbesserten Glas-U-Wert (1,1 nach Süden bzw. 0,7 nach den anderen drei Himmelsrichtungen, Rahmen-U-Wert = 1,1).
- e) **Minergie-P / Passivhaus** entspricht dem Fallbeispiel (Komfortlüftung) mit einer verbesserten Wärmedämmung von 30 cm an Fassade, 36 cm am Dach und 20 cm Wärmedämmung an der Kellerdecke, einer weiter optimierten Fensterfläche und einem verbesserten Glas- bzw. Rahmen-U-Wert (1,1 / 1,1 nach Süden und 0,5 / 0,8 nach Nord, Ost, West). Zusätzlich sind bei tiefem Wärmededarf Massnahmen zur erhöhten Dampf-/Luftdichtigkeit (10 CHF/m<sup>2</sup> Wand- und Dachfläche) notwendig.

Bei den Grenzkosten der Tabelle 4.4-5 sind die investitionsseitigen Reduktionsmöglichkeiten bei der Wärmeerzeugung und -verteilung bereits berücksichtigt<sup>1</sup>. Zugrunde liegen der obigen Tabelle 4.4-5 die Annahmen zu Wärmeerzeugung und Wärmeverteilung gemäss der untenstehenden Tabelle 4.4-6. Wie der Vergleich der beiden Tabellen zeigt, sind die Reduktionen von Wärmeerzeugung und -verteilung klein im Vergleich zu den Mehr-Investitionskosten von Gebäudehülle und Lüftungsanlage.

---

<sup>1</sup> [Nicht berücksichtigt ist aus Gründen des Projektablaufs das architektonische Gestaltungsmittel, grösserflächige statt kleine Fenster einzusetzen. Ausserdem dürften die durchschnittliche Fensterfläche im Neubau grösser sein als 1.7 m<sup>2</sup> und die Grenzkosten entsprechend kleiner. Ausserdem sind nur Fenster mit heute sehr gebräuchlichen Kennwerten in die Betrachtung miteinbezogen. Fenster mit höherem g-Wert z.B. fehlen.]

Tabelle 4.4-5 Gebäudekosten pro m<sup>2</sup> EBF, Wärmebedarf Q<sub>h</sub>, Energieeffizienz, Zusatzkosten und Netto-Grenzkosten für die 5 Nutzenergiebedarfskategorien (MFH / EFH)

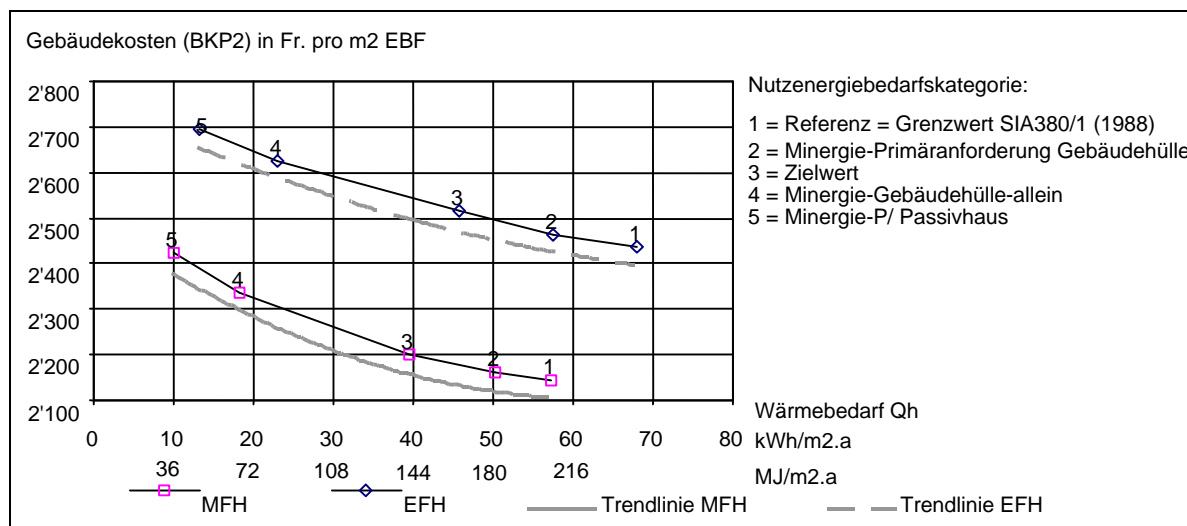
Nutz-energie-kategorie	Gebäudekosten CHF/m <sup>2</sup> EBF		Wärmebedarf Q <sub>h</sub> MJ/ m <sup>2</sup> a		Energieeffizienz MJ/ m <sup>2</sup> a		Mehrinvestitionen CHF/ m <sup>2</sup> EBF		Grenzkosten CHF/kWh <sub>NE</sub>	
	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH
a)	2'145	2'438	206	245	Ausgangsbasis		Ausgangsbasis		Ausgangsbasis	
b)	2'161	2'464	181	207	25	38	16	26	0,145	0,113
c)	2'201	2'515	142	165	64	80	57	77	0,211	0,170
d)	2'334	2'626	66	83	140	163	189	188	0,344	0,224
e)	2'408	2'681	36	48	155	182	263	243	0,389	0,252

Quelle Berechnungen HBT

Tabelle 4.4-6 Spezifische Investitionskosten (CHF/m<sup>2</sup>) von Wärmeerzeugung (WE) und Wärmeverteilung (WV) für die verschiedenen Nutzenergiebedarfskategorien, ausgehend vom Fallbeispiel

Nutz-energie-kategorie	kW		Wärmeerzeugung		Raumwärmeverteilung		Total WE+WV	
	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH
a)	22	8	24	34	44	41	68	75
b)	21	7	23	33	43	40	66	73
c)	18	6	21	31	39	36	60	67
d)	12	4	20	30	38	35	58	65
e)	10	3	19	29	37	34	56	63

Quelle Kosten HBT, Wärmeleistungsbedarf gemäss Tabelle 4.2-26

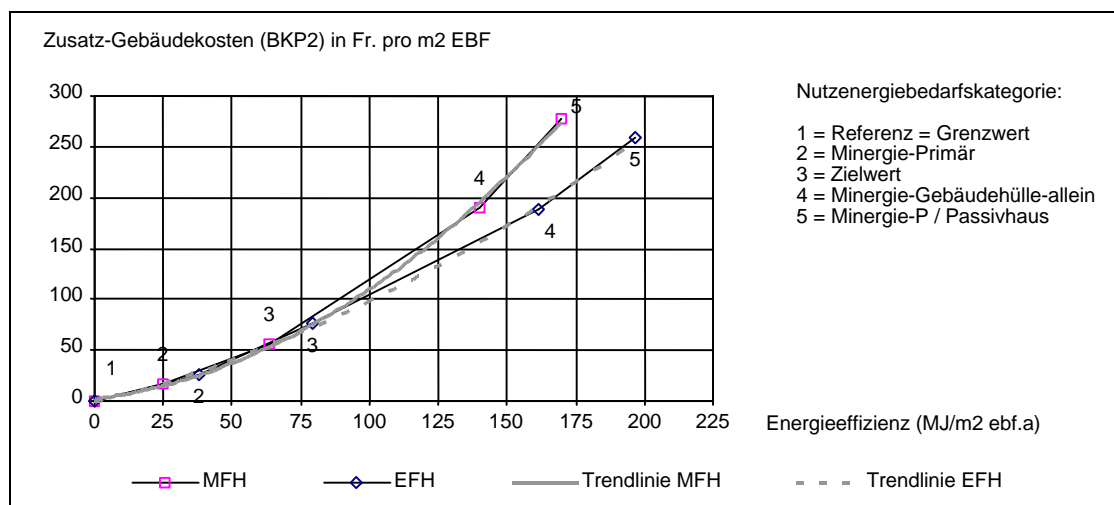


Quelle Berechnungen HBT

Abbildung 4.4-23 Gebäudekosten pro EBF in Funktion des Wärmebedarfs Q<sub>h</sub> bei den fünf Nutzenergiebedarfskategorien für **MFH** und **EFH**.

Die Gebäudekosten pro m<sup>2</sup> EBF nehmen für die beiden Gebäudearten MFH und EFH in Funktion des sinkenden Wärmebedarfs praktisch linear und parallel zu (vgl. Abbildung 4.4-23). Das Kostenniveau liegt für das EFH rd. 300 CHF pro m<sup>2</sup> EBF höher, während die Resultate aus dem Top-down-Ansatz für das EFH eine grössere Steigung als beim MFH aufweist (vgl. Abbildung 4.4-26). Zudem liegen im Vergleich mit den erhobenen Gebäudekosten des top down-Ansatzes die obigen Ergebnisse bei den MFH rd. 6–8% bzw. bei den EFH bis 15% unter dem Durchschnitt.

Durch die Transformation des MFH-Fallbeispiels zum Modell-EFH erhöht sich der Wärmebedarf für die Kategorie "Grenzwert" trotz gleicher Bauweise von 206 MJ/m<sup>2</sup> a (MFH) auf 245 MJ/m<sup>2</sup> a, dies weil das Verhältnis A/EBF beim EFH grösser ist als beim MFH. Der Wert dürfte nach Norm eigentlich rund 270 MJ/m<sup>2</sup>a betragen, der Referenzfall ist also etwas zu tief definiert; die Grenzkosten werden damit etwas überschätzt. Die Zusatzinvestitionen pro eingespartem Wärmebedarf (MJ/m<sup>2</sup> a) steigen beim MFH stärker an als beim EFH.



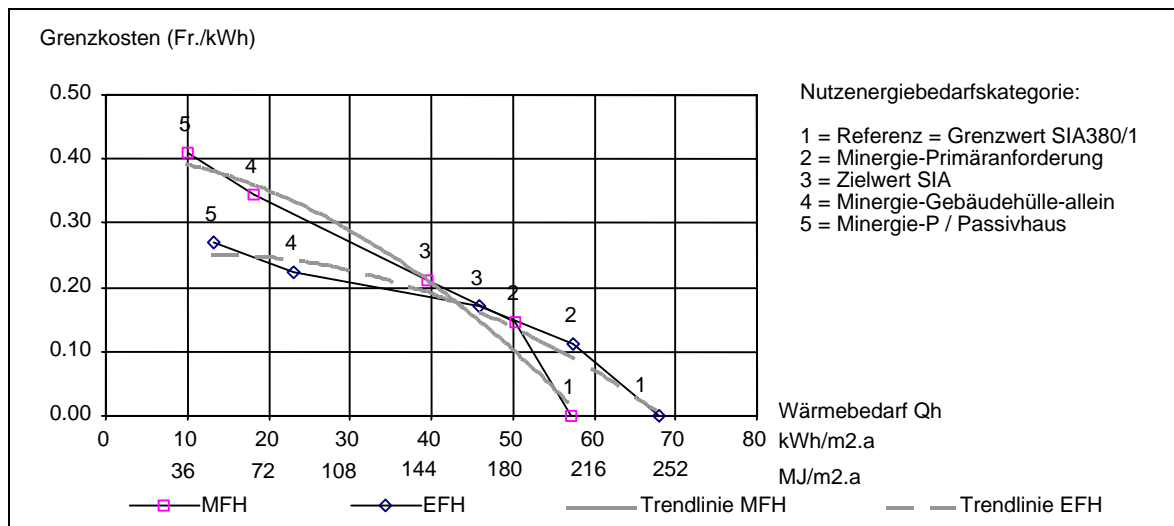
Quelle Berechnungen HBT

Abbildung 4.4-24 Energieeffizienz bei den fünf Nutzenergiebedarfskategorien für **MFH** und **EFH**

Die Mehrinvestitionskosten von Minergie-Gebäudehülle-allein<sup>1</sup> betragen zwischen 8% und 10% gegenüber der Referenzbauweise, diejenige von Minergie-P / Passivhaus zwischen 10% und 13%. Die obigen Resultate des Botton-up-Ansatzes zeigen, dass die Grenzkosten zwischen Minergie-Gebäudehülle-allein und Minergie-P / Passivhaus nicht sehr unterschiedlich sind. Beachtet man aber, dass gegenüber der Kategorie Zielwert die vermietbare Wohnfläche beim MFH um 3% bzw. 8% sinkt, sind jährliche Mietzinsverluste von 5–15 CHF/m<sup>2</sup> EBF in Kauf zu nehmen, was auf der Ebene der Investitionskosten 60 CHF/m<sup>2</sup> bis 180 CHF/m<sup>2</sup> entspricht. Der Aspekt der reduzierten vermiet- bzw. nutzbaren Wohnfläche ist vor allem dann einzubeziehen, wenn im Referenzfall die Ausnützung schon voll ausgeschöpft ist oder die minimalen Grenzabstände schon erreicht sind und sich die entsprechenden massgebenden Bauvorschriften auf das Aussenmass der Gebäude beziehen. Die diesbezüglichen Regelungen sind von Kanton zu Kanton und von Gemeinde zu Gemeinde verschieden.

<sup>1</sup> Bemerkung: Damit die Anforderung Minergie auch wirklich erfüllt werden kann, muss bei Minergie-Primär auch tatsächlich eine entsprechende Haustechnik (z.B. WP) oder ein erneuerbarer Energieträger eingesetzt werden; solche Kosten sind hier noch nicht eingerechnet, siehe dazu Betrachtungen im Unterkapitel 4.4.3k)





Quelle Berechnungen HBT

Abbildung 4.4-25 Grenzkosten der fünf Nutzenergiebedarfskategorien für **MFH** und **EFH** im Bezug auf den Wärmebedarf  $Q_h$  beim Neubau

Die Investitionskosten für die Komfortlüftung betragen gemäss HTA Luzern beim MFH zwischen 80 und 120 CHF/m<sup>2</sup><sub>EBF</sub> (Basisobjekt des Fallbeispiels: 95.2 CHF/m<sup>2</sup><sub>EBF</sub>) bzw. zwischen 60 und 90 CHF/m<sup>2</sup><sub>EBF</sub> beim EFH (Referenzobjekt = 69 CHF/m<sup>2</sup><sub>EBF</sub>). Die sich daraus ergebenden Gebäudekosten und die Grenzkosten sind in Tabelle 4.4-7 aufgeführt. Daraus kann letztlich die Sensitivität gegenüber den unterschiedlichen Investitionskosten der Lüftungsanlage abgeleitet werden. Da bei der Energie-Effizienzmassnahme Lüftung die absoluten Kosten und nicht Differenzkosten (wie bei der Wärmedämmung gegenüber einer Referenzdämmstärke) in die Berechnung einfließen und die Grenzkosten ausserdem nicht zu 100% auf den Kapitalkosten beruhen, ist die Sensitivität gegenüber den Investitionskosten geringer als bei verstärkten Wärmedämmungen. Hingegen ist die Sensitivität bzgl. des angenommenen Realzinssatzes relativ stark, dies, weil die Abschreibedauer wesentlich kürzer ist als bei Wärmedämminvestitionen. Auch hier gilt es also, den jeweils angenommenen Zinssatz im Auge zu behalten und diesen jeweils auf den Anwendungsfall zutreffend zu wählen.

Tabelle 4.4-7 Gebäudekosten pro m<sup>2</sup> EBF und Grenzkosten unter Berücksichtigung der Gabelung bei Komfortlüftungspreisen

Nutzenergiekategorie	Gebäudekosten MFH CHF/m <sup>2</sup> EBF		Gebäudekosten EFH CHF/m <sup>2</sup> EBF		Grenzkosten MFH mit dr=5.5% CHF/kWh		Grenzkosten EFH mit dr=3.5% CHF/kWh	
	80 <sup>1)</sup>	120 <sup>2)</sup>	60 <sup>3)</sup>	90 <sup>4)</sup>	80 <sup>1)</sup>	120 <sup>2)</sup>	60 <sup>3)</sup>	90 <sup>4)</sup>
d)	2'319	2'359	2'617	2'647	0.315	0.392	0.213	0.253
e)	2'393	2'433	2'672	2'702	0.367	0.426	0.245	0.276
<sup>1)</sup> Minimalpreis KL im MFH					<sup>3)</sup> Minimalpreis KL im EFH			
<sup>2)</sup> Maximalpreis KL im MFH					<sup>4)</sup> Maximalpreis KL im EFH			

Quelle Berechnungen HBT

Das Passivhaus kann statt mit einer konventionellen Wärmeerzeugung- und -verteilung auch mit einer Luftheizung ausgerüstet werden. Im Moment herrscht in Fachkreisen ein Diskurs über die Vor- und Nachteile von Luftheizungen im allgemeinen und darüber, ob die Kosten einer konventionellen Heizungsverteilung plus Komfortlüftung höher oder tiefer seien als diejenigen einer Luftheizung. Wir gehen deshalb von der vereinfachenden Annahme aus, dass die Investitionskosten beider Lösungen gleich sind. Die Luftheizung hat jedoch Konsequenzen für die Betrachtung auf Endenergieebene, siehe dazu das entsprechende Unterkapitel k).

### i) Gebäudekosten für weitere Anlagentypen

Die in den vorgängigen Kapiteln erarbeiteten Gebäudeinvestitionskosten lassen sich auch mit weiteren Wärmeanlagentypen kombinieren. Basis dazu bildet die Tabelle 4.4-5, wovon die Kosten für die Gasheizung (Tabelle 4.4-6) subtrahiert werden, um dann die spezifischen Investitionskosten der Wärmeerzeugungsanlagen und der Wärmeverteilung (gemäss Tabelle 4.4-8 zu addieren.

Tabelle 4.4-8 Investitionskosten (CHF/m<sup>2</sup>EBF) von Wärmeerzeugungsanlagen (inkl. Warmwasser) für Ein- und Mehrfamilienhäuser (250 m<sup>2</sup> bzw. 720 m<sup>2</sup> EBF) in Funktion der Energieeffizienzstufen bzw. dem entsprechenden Wärmeleistungsbedarf (in kW)

kW		Oel		Gas		WP Erdsonde		WP Luft		Holzheizung	
MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH
22	8	36	79	34	69	76	113	51	81	35	77
21	7	35	79	33	68	72	106	49	77	34	77
18	6	33	78	32	67	66	96	45	71	32	76
12	4	30	77	28	66	52	77	36	58	29	75
10	3	29	75	26	64	44	66	32	50	28	74

Quelle Afjei et al. 1999, Gantner/Jakob et al (1999), Aktualisierungen CEPE, Investitionskosten gemäss Tabelle 4.3-52, Wärmeleistungsbedarf gemäss Tabelle 4.2-26.

In der obigen Tabelle 4.4-8 sind 6000 CHF (EFH) und 6500 CHF (MFH) für den Gasanschluss (Anschlussgebühr oder Kostenbeitrag an Tiefbau) miteingerechnet (Annahme: Cost sharing mit Wasser, Elektrizität, Abwasser, Kabel etc. beim Erschliessen der Neubauten). Es stellt sich hier jedoch die Frage, ob die Erdgasunternehmen bei sehr tiefen Gasbezügen, wie sie bei Minergie oder Passivhaus gegeben sind, die Anschlussgebühren erhöhen, anderweitige Fixkosten erheben oder den Gaspreis anheben würden, um die Infrastruktur- und Administrativkosten refinanzieren zu können. Beim Passivhaus-EFH können die Verteilkosten rasch auf 10 bis 15 Rp/kWh ansteigen (Durchschnitt Heizung und Warmwasser) oder bis 20 Rp/kWh (wenn der durch die geringere Energiedichte verursachte Minderertrag verursachergerecht nur auf die Raumwärme umgelegt wird<sup>1</sup>), weil die spezifische Energiedichte der Erdgasverteilung entsprechend abnimmt.

<sup>1</sup> Berechnungsbasis: Dem Preis für EFH: 5,5 Rp/kWh stehen den Gasversorgungsunternehmen Kosten von 2 bis 2,5 Rp/kWh für Gaseinkauf/Transport sowie 3 bis 3,5 Rp/kWh für Feinverteilung an EFH. Die Kosten der Feinverteilung erhöhen sich proportional zur abnehmenden Energiedichte (vom heutigen Baustandard zum Minergie-P / Passivhaus: Faktor 5 bis 6 für Raumwärme allein bzw. Faktor 3 bis 4 für Raumwärme + WW.

Erwartungsgemäss ist das Niveau der spezifischen Investitionskosten bei den EFH höher als bei den MFH. Ebenfalls wie zu erwarten sind die Investitionskosten der WP-Systeme insbesondere bei den MFH bei der energetischen Referenzbau investitionsintensiver als die Öl- und Gasheizungen. Weil sich die WP jedoch besser skalieren lassen, sind die Kosten der Anlagen beim Passivhaus ähnlichen Gebäude beinahe vergleichbar mit denjenigen der Ölheizungen.

Tabelle 4.4-9 Investitionskosten (CHF/m<sup>2</sup>EBF) von Gebäuden mit verschiedenen Wärmeerzeugungsanlagen (inkl. Warmwasser) für Ein- und Mehrfamilienhäuser (250 m<sup>2</sup> bzw. 720 m<sup>2</sup> EBF) in Funktion der Energieeffizienzstufen <sup>1</sup>

kW MFH	kW EFH	Oel		Gas		WP Erdsonde		WP Luft		Holzheizung	
		MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH
22	8	2'157	2'483	2'155	2'473	2'197	2'517	2'172	2'485	2'156	2'481
21	7	2'173	2'510	2'171	2'499	2'210	2'537	2'187	2'508	2'172	2'508
18	6	2'213	2'562	2'212	2'551	2'246	2'580	2'225	2'555	2'212	2'560
12	4	2'344	2'673	2'342	2'662	2'366	2'673	2'350	2'654	2'343	2'671
10	3	2'418	2'727	2'415	2'716	2'433	2'718	2'421	2'702	2'417	2'726

Quelle HBT (Investitionskosten Gebäudehülle und Lüftungsanlagen), Investitionskosten Wärmeerzeugung und -verteilung gemäss Tabelle 4.4-8

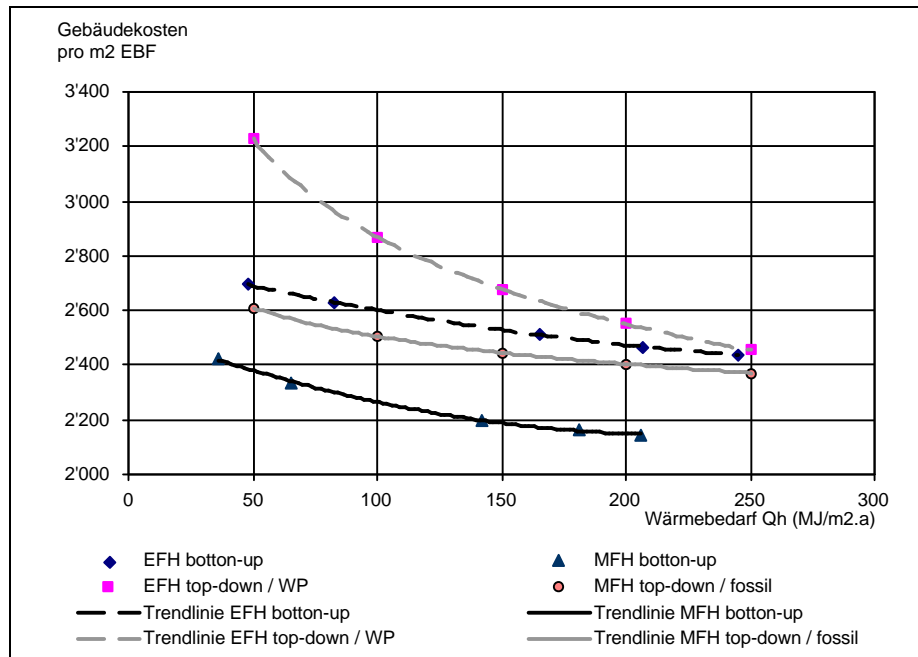
#### j) Vergleich der Investitionskosten zwischen top down und bottom-up Ansatz

Nach der Berechnung der Investitionskosten für Gebäude unterschiedlicher Wärmeerzeugungsanlagen lassen sich diese mit den Ergebnissen des top down Ansatzes vergleichen (Abbildung 4.4-26). Dabei ist bezüglich der Mehrinvestitionskosten der MFH mit fossiler Wärmeerzeugung eine relativ gute Übereinstimmung festzustellen. Bei den EFH jedoch ergibt der top down Ansatz eine wesentlich markantere Kostensteigerung für die Gebäude mit WP. Eigentlich wäre eher das Gegenteil zu erwarten, denn die Anlagekosten lassen sich bei den WP wesentlich flexibler und kostenwirksamer hin zu kleinen Leistungen hin skalieren als die fossilen Anlagen. Es ist zu vermuten, dass beim top down Ansatz aufgrund einer zu geringen Datenmenge die Unsicherheit bei den EFH-WP sehr gross ist. Deshalb wird im folgenden weiterhin voll auf den bottom-up Ansatz abgestützt.

---

Trotz dieser scheinbar hohen Energiepreissteigerungen wirken sich diese nur relativ geringfügig auf die Grenzkosten aus, denn entsprechend mit der Energiepreissteigerung geht auch der Energieverbrauch zurück.

<sup>1</sup> [Nicht berücksichtigt ist aus Gründen des Projektablaufs das architektonische Gestaltungsmittel, grösserflächige statt kleine Fenster einzusetzen. Ausserdem dürften die durchschnittliche Fensterfläche im Neubau grösser sein als 1.7 m<sup>2</sup> und die Grenzkosten entsprechend kleiner. Ausserdem sind nur Fenster mit heute sehr gebräuchlichen Kennwerten in die Betrachtung miteinbezogen. Fenster mit höherem g-Wert zum Beispiel fehlen.]



Quelle Berechnungen HBT

Abbildung 4.4-26 Grenzkosten der fünf Nutzenergiebedarfskategorien für MFH und EFH im Bezug auf den Wärmebedarf  $Q_h$  beim Neubau.

### k) Betrachtung auf Ebene Endenergie für weitere Anlagentypen

Anhand der Investitionskosten (Tabelle 4.4-9) lassen sich Mehrinvestitionskosten gegenüber dem energetischen Referenzgebäude, der Nutzenergiebedarfsstufe a), berechnen, siehe Tabelle 4.4-10. Es sind dies die Mehrkosten jeweils innerhalb eines gleichen Wärmeerzeugungstyps. Die Mehrkosten auf der Ebene der Investitionskosten betragen rund 6% bis 9% beim Gebäudetyp „Minergie-Gebäudehülle-alone“ und 8% bis 11% beim Passivhaus oder Minergie-P Gebäude.

Tabelle 4.4-10 Mehrinvestitionskosten (CHF/m<sup>2</sup>) von Neubauten gegenüber der Referenzneubauweise für EFH und MFH mit verschiedenen Wärmeerzeugungsanlagentypen für die vier Effizienzlevels b) bis e)

	Oel		Gas		WP Erdsonde		WP Luft		Holzheizung	
	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH
b)	16	27	16	26	14	20	15	22	16	27
c)	56	79	57	79	50	64	53	70	56	79
d)	187	190	187	189	170	157	179	169	187	190
e)	260	244	260	243	237	201	249	217	261	244

Quelle Berechnungen CEPE aufgrund Tabelle 4.4-8 und Tabelle 4.4-9

Mittels der Kostenanteile und der spezifischen Lebensdauer der einzelnen Investitionskomponenten lassen sich die jährlichen Mehrkosten, die sogenannten Kapitalkosten berechnen (Tabelle 4.4-10).

Tabelle 4.4-11 Mehrkapitalkosten (CHF/m<sup>2</sup>a) von Neubauten gegenüber der Referenzneubauweise für EFH und MFH mit verschiedenen Wärmeerzeugungsanlagentypen für die vier Effizienzlevels b) bis e)

	Oel		Gas		WP Erdsonde		WP Luft		Holzheizung	
	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH
b)	1.0	1.3	1.0	1.3	0.84	0.9	0.91	1.0	1.0	1.3
c)	3.7	4.1	3.8	4.1	3.3	3.2	3.5	3.4	3.7	4.1
d)	13	10	13	10	12	8	12	9	13	10
e)	16	13	16	13	15	10	15	11	17	13

Quelle Berechnungen CEPE

Anhand der Nutzenergiebedarf der fünf Effizienzstufen gemäss Tabelle 4.4-5 und anhand der Nutzungsgrade in Funktion der Gebäudeenergieeffizienz gemäss Tabelle 4.3-56 lassen sich Endenergieverbräuche für die verschiedenen Gebäudeeffizienzstufen und Wärmeerzeugungsarten berechnen (Tabelle 4.4-12). Kommt eine Luftheizung mit hohen VL-Temperaturen zum Einsatz, erhöht sich der Stromverbrauch des Levels e), Minergie-P / Passivhaus, aufgrund der schlechteren WP-Nutzungsgrade wieder, beinahe auf das Effizienzlevel d).

Tabelle 4.4-12 Endenergieverbrauch für Raumwärme (MJ/m<sup>2</sup>a)<sup>1</sup> für EFH und MFH mit verschiedenen Wärmeerzeugungsanlagentypen für die fünf Effizienzlevels a) bis e)

	Oel		Gas		WP Erdsonde		WP Luft		Holzheizung	
	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH
a)	231	275	215	250	59	70	76	90	282	336
b)	203	233	189	211	49	56	63	73	248	284
c)	160	185	148	168	36	42	46	54	195	226
d)	74	93	69	85	16	20	20	25	90	114
e1)	40	54	38	49	8	11	10	13	49	66
e2)*	Wie e1)				13	18	18	24	Wie e1)	

\*) Passivhaus mit Luftheizung und höherer Vorlauftemperatur, JNG gem. Tabelle 4.3-54

Quelle Berechnungen CEPE

Werden die Kapitalmehrkosten durch die Effizienzgewinne (Differenz gegenüber dem Referenzfall a)) dividiert, ergeben sich dann die Brutto-Grenzkosten im Durchschnittskostenansatz, siehe Tabelle 4.4-13. In diesen Werten bereits berücksichtigt sind die Minderinvestitions-

<sup>1</sup> Die relative Endenergieeinsparung (z.B. der Unterschied zwischen a) und e) ausgedrückt in %) ist natürlich weniger beeindruckend, wenn man sich zu den Werten der Tabelle 4.4-12 den Energieverbrauch für die Warmwasseraufbereitung dazudenkt (60 bis 90 MJ/m<sup>2</sup>a dividiert durch den Jahresnutzungsgrad). In absoluten Grössen (MJ/m<sup>2</sup>a oder kWh) werden die Unterschiede jedoch gleich bleiben (vorausgesetzt, die hydraulische Einbindung wird tatsächlich so gelöst, dass die VL-Temperatur und damit die Verdampfer-Temperatur der Raumwärmeverteilung auch bei kombinierten Systemen tief bleibt, wie hier angenommen), so dass die Grenzkostenresultate bzgl. der Raumwärme gültig bleiben.

kosten bei Wärmeerzeugung und –verteilung, nicht jedoch die geringeren Unterhalts- und Reparatur- und andere Betriebskosten. Ein Teil der Betriebs- und Unterhaltskosten weist Fixkostencharakter auf und ist für alle Effizienzlevels konstant, ein Teil jedoch ist variabel, geht tendenziell also zurück, je besser das Effizienzlevel des Gebäudes ist und je kleinere Anlagen im Einsatz stehen. Allerdings hat dieser Aspekt einen relativ geringen Einfluss auf die Grenzkosten (1 bis 2 Rp/kWh). Danach können die Werte aus Tabelle 4.4-13 mit dem Langfristenergiepreis verglichen werden (unter dem Vorbehalt, dass die hier dargestellten Konzepte noch nicht das Kostenoptimum darstellen, siehe dazu die später folgende Darstellung der Jahreskosten).

Tabelle 4.4-13 Brutto-Grenzkosten<sup>1</sup> der Endenergieeffizienz (CHF/kWh<sub>EE</sub>) für EFH und MFH mit verschiedenen Wärmeerzeugungsanlagentypen für die vier Effizienzlevels b) bis e)

	Oel		Gas		WP Erdsonde		WP Aussenluft		Holzheizung	
	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH
b)	0.13	0.11	0.14	0.12	0.32	0.24	0.27	0.20	0.10	0.09
c)	0.19	0.16	0.20	0.18	0.52	0.41	0.42	0.33	0.15	0.14
d)	0.30	0.21	0.32	0.23	1.00	0.61	0.80	0.49	0.25	0.17
e1)	0.31	0.21	0.33	0.23	1.05	0.64	0.85	0.52	0.26	0.18
e2)	Wie e1)		Wie e1)		1.18	0.73	0.96	0.60	Wie e1)	
e3)	0.26	0.18	0.28	0.20	0.97	0.62	0.80	0.51	0.21	0.15
e1)	Minergie-P / Passivhaus mit NT-Wärmeverteilung									
e2)	Passivhaus mit Luftheizung und höherer Vorlauftemperatur, JNG gem. Tabelle 4.3-54. <b>keine</b> Kosteneinsparung der Luftheizung gegenüber konv. Wärmeverteilung plus Lüftung									
e3)	wie e2), aber <b>inkl.</b> Kosteneinsparung der Luftheizung gegenüber konv. Wärmeverteilung plus Lüftung (ca. 30% der Kostensteigerung von c) auf d)									

Quelle Berechnungen CEPE basierend auf Tabelle 4.4-9 (HBT)

Auffallend sind die eher hohen Grenzkosten bei den WP-Gebäuden. Dazu sind zwei Punkte anzumerken:

- Die Investitionsentscheide auf der Ebene der Gebäudehülle sollten nicht allzusehr die Wärmeerzeugungsanlagen ausgerichtet werden, sondern eher umgekehrt, denn die Lebensdauer der Gebäude ist wesentlich länger als die der Anlagen. Spätere Korrekturen beim Gebäude sind mit hohen Kosten verbunden, währenddem die Anlagen (gerade die WP, wie zu hoffen ist) einen weiteren technischen Fortschritt erfahren werden.
- Die Grenzkosten auf Endenergieebene reagieren bei den WP sehr sensitiv auf die Annahme des Jahresnutzungsgrades, damit letztlich auf die Qualität der WP sowie auf die Ausführung und Einbindung der WP in die Wärmeverteilung. Beträgt die Vorlauftemperatur z.B. 50°C statt 40°C, sinken die Grenzkosten von 24 Rp/kWh<sub>EE</sub> auf

<sup>1</sup> [Nicht berücksichtigt ist aus Gründen des Projektablaufs das architektonische Gestaltungsmittel, grösserflächige statt kleine Fenster einzusetzen. Ausserdem dürften die durchschnittliche Fensterfläche im Neubau grösser sein als 1.7 m<sup>2</sup> und die Grenzkosten entsprechend kleiner. Ausserdem sind nur Fenster mit heute sehr gebräuchlichen Kennwerten in die Betrachtung miteinbezogen. Fenster mit höherem g-Wert zum Beispiel fehlen.]

11 Rp/kWh<sub>EE</sub> (Sole) bzw. von 20 Rp/kWh<sub>EE</sub> auf 9 Rp/kWh<sub>EE</sub>, wie Tabelle 4.4-14 aufzeigt (denn der einsparbare Stromverbrauch wird bei schlechteren JNG grösser).

Tabelle 4.4-14 Sensitivität der Grenzkosten (CHF/kWh<sub>EE</sub>) auf den Jahresnutzungsgrad der Wärmepumpen.

VL-Temp	JNG		Grenzkosten (dr=3.5%)	
	Sole	Luft	Sole	Luft
50	2.9	2.2	0.11	0.09
45	3.2	2.4	0.15	0.12
40	3.5	2.7	0.24	0.20

Quelle Berechnungen CEPE

In Tabelle 4.4-13 sind die Brutto-Grenzkosten auf Ebene Endenergie innerhalb eines jeweils gleichen Energieträgers berechnet (also die Effizienzstufen b) bis e) der Ölanlagen gegenüber der Referenz mit Öl, Gas mit Gas, etc.), dies wegen der unterschiedlichen umwelt- und klimaspezifischen Eigenschaften dieser Energieträger. Bei den Wärmepumpen kommt jedoch beides Mal der Energieträger Strom zum Einsatz, weshalb hier die Grenzkosten des einen WP-Typs gegenüber dem anderen berechnet werden können, siehe Tabelle 4.4-15.

Tabelle 4.4-15 Brutto-Grenzkosten (CHF/kWh<sub>EE</sub>) der Sole-WP für Gebäudeeffizienzstufen b) bis e) gegenüber der Luft-WP und der Referenzstufe a)

	WP-Sole	
	MFH	EFH
b)	0.27	0.16
c)	0.40	0.29
d)	0.78	0.47
e)	0.85	0.51

Folgende Fazits lassen sich anhand der Grenzkostenbetrachtung ziehen:

- Die Grenzkosten sind umso höher, je tiefer der Energieverbrauch im Referenzszenario ist, denn der Energieeffizienzgewinn ist relativ gesprochen bei allen Anlagentypen mehr oder weniger gleich. Dies führt zu höheren Effizienzgewinnen gemessen in absoluten MJ/m<sup>2</sup>a, wenn der Endenergieverbrauch im Referenzfall höher war. Die rechnerischen Grenzkosten sind deshalb bei der Holzenergie am tiefsten (angenommener Nutzungsgrad 75%), bei der schon im Referenzfall am wenigsten verbrauchenden Sole-WP am höchsten.
- Der Unterschied bei den Grenzkosten (im Durchschnittskostenansatz) zwischen Minergie-Gebäudehülle-allein und Minergie-P/Passivhaus ist relativ gering. Bei den Luftheizungen kombiniert mit WP können sich die Grenzkosten aufgrund der sich verschlechternden Nutzungsgrade nochmals erhöhen. Wenn bei Luftheizungen die Investitionskosten wesentlich tiefer gehalten werden können als diejenigen von konventioneller NT-Wärmeverteilung plus Lüftung zusammen, können die Grenzkosten wieder auf ca. das vorangehende Energieeffizienzlevel zurück geführt werden.

- Aufgrund des höheren Zinssatzes und der damit verbundenen höheren Kapitalkosten sind die Grenzkosten bei den MFH erwartungsgemäss höher als bei den EFH.

Mit den oben zugrunde liegenden Kosten- und Energieinformationen lassen sich statt der Grenzkosten auch die Jahreskosten für die verschiedenen Fälle berechnen. Dazu werden exemplarisch die Energiepreise gemäss Tabelle 4.4-16 angenommen. Zur Erinnerung: Diese könnten über die lange Lebensdauer der Gebäudeeffizienzinvestitionen wesentlich steigen und wären dann wesentlich höher anzusetzen. Eine CO<sub>2</sub>-Abgabe von z.B. 210 CHF/tCO<sub>2</sub> (Höchstsatz gemäss CO<sub>2</sub>-Gesetz) bewirkt beim Erdgas einen Zuschlag von 4.2 Rp/kWh und beim Heizöl von 5.6 Rp/kWh.

Tabelle 4.4-16 Annahmen zu Energiepreisen (CHF/kWh<sub>EE</sub>) für die verschiedenen Wärme-erzeugungssysteme

	Oel	Gas	WP Sole	WP Luft	Holz
MFH	0.055	0.050	0.160	0.160	0.070
EFH	0.060	0.055	0.160	0.160	0.070

Quelle Annahmen CEPE

Der Nullpunkt kann für die Kostendarstellung beliebig gewählt werden, denn es geht primär um eine vergleichende Betrachtung. Dargestellt werden könnten z.B. die gesamten Kapitalkosten für das Gebäude. Für die Abbildungen 4.4-27 und 4.4-28 ist das Gebäude ohne Wärme-erzeugung und die Gebäudehülle mit der energetischen Referenz als Nullpunkt gewählt.

Pro Einfamilienhaus bzw. pro Wohnung betragen die Mehrkosten bei den angenommenen Energiepreisen für die ersten Wärmeschutz-Effizienzlevels einige wenige hundert Franken pro Jahr, selbst bei „suboptimaler“ Kostenoptimierung<sup>1</sup>, ohne Einbezug der Co-Benefits und der externen Kosten. Der Kostenanstieg bei zunehmender Energieeffizienz wird wesentlich flacher, wenn z.B. eine CO<sub>2</sub>-Abgabe oder Energiepreisteigerungen aufgrund internationaler Entwicklungen (siehe Kap. 4.1.1) in Rechnung gestellt werden; unter Umständen verschiebt sich dann sogar das Kostenminimum hin zu energie-effizienteren Lösungen.

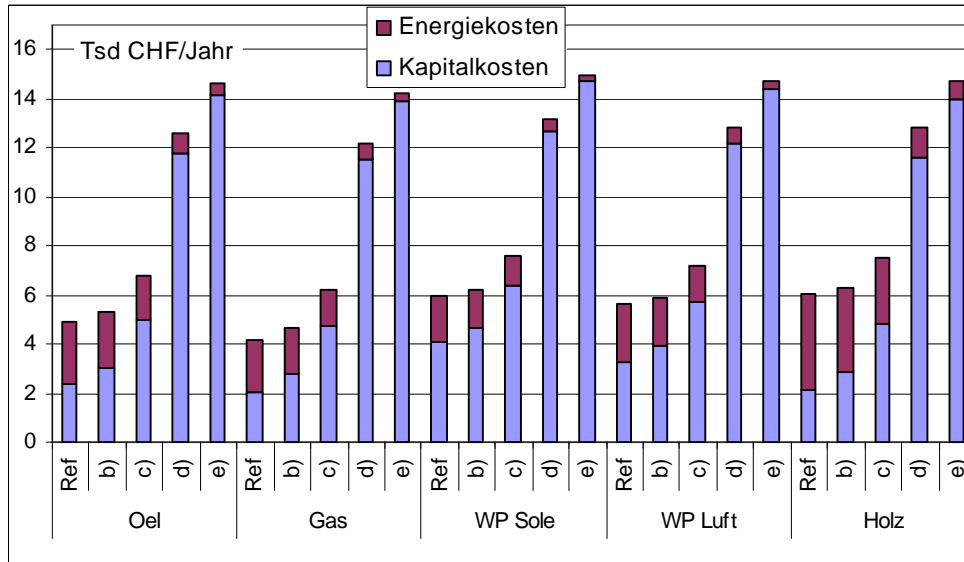
In den Abbildungen 4.4-27 und 4.4-28 wird der durch die Lüftungsanlagen verursachte Kosten-sprung von c) auf d) bzw. e) deutlich sichtbar. Da der ökonomische Nutzen der Co-Benefits zur Zeit unbekannt ist, kann die Frage auch umgekehrt gestellt werden im Sinn von „Wieviel müsste der ökonomische Nutzen der Co-Benefits betragen, damit die der Energie zuzuordnenden Kosten nicht zu stark ansteigen“. Grob geschätzt ist dies bei den oben angenommenen Energiepreisen etwa 2000 CHF pro Jahr und pro Wohnung bzw. pro EFH.

Im nächsten Unterkapitel (siehe Kap. 4.4.4) sowie im Kapitel 6 zu den gesamtschweizerischen Grenzkostenkurven sind die Jahreskosten von weiteren architektonischen Neubauvarianten dargestellt.

<sup>1</sup> [Nicht berücksichtigt ist aus Gründen des Projektablaufs das architektonische Gestaltungsmittel, grösser-flächige statt kleine Fenster einzusetzen. Ausserdem dürften die durchschnittliche Fensterfläche im Neubau grösser sein als 1.7 m<sup>2</sup> und die Grenzkosten entsprechend kleiner. Ausserdem sind nur Fenster mit heute sehr gebräuchlichen Kennwerten in die Betrachtung miteinbezogen. Fenster mit höherem g-Wert zum Beispiel fehlen.]

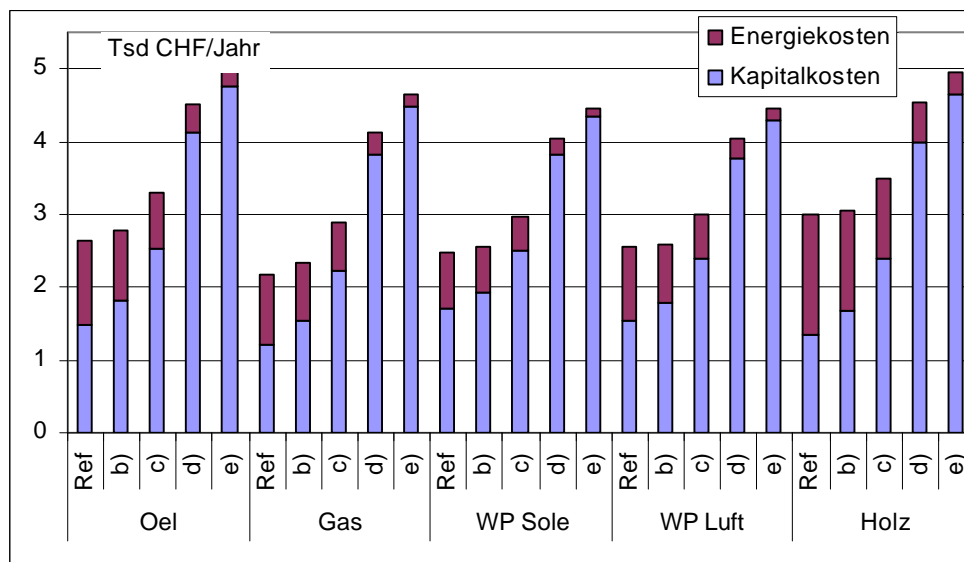


Weitere Endenergiebedarfsreduktionen können in allen Fällen auch durch den Einsatz von Solarenergie für die Raumheizung und Warmwassererwärmung erzielt werden. Die Grenzkosten dieser Zusatzinvestitionen betragen ca. 0.15 bis 0.3 CHF/kWh<sub>EE</sub>.



Quelle Berechnungen CEPE

Abbildung 4.4-27 Jahreskosten (Tsd. CHF/Jahr) für den Endenergieverbrauch und die Kapitalmehrkosten für Gebäudehülle, Wärmeerzeugung und Lüftungsanlage bei **MFH, 720 m<sup>2</sup>, 4 Maisonette-Wohnungen**, Energiepreise gem. Tabelle 4.4-16.



Quelle Berechnungen CEPE

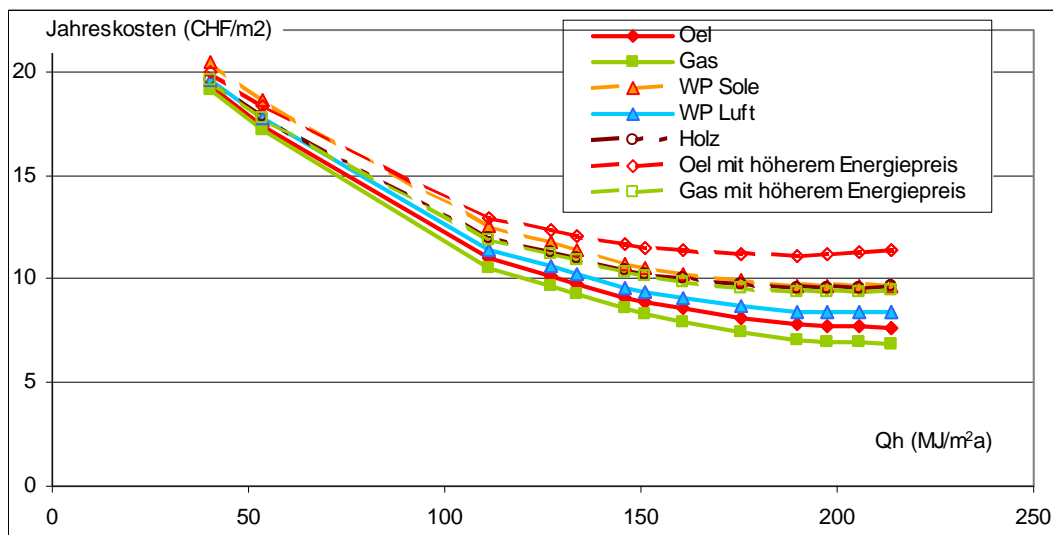
Abbildung 4.4-28 Jahreskosten (Tsd. CHF/Jahr) für den Endenergieverbrauch und die Kapitalmehrkosten für Gebäudehülle, Wärmeerzeugung und Lüftungsanlage bei **EFH, 250 m<sup>2</sup> EBF**, Energiepreise gem. Tabelle 4.4-16.

#### 4.4.4 Jahreskosten von weiteren Neubaukonzepten

Im Hinblick auf die gesamtschweizerische Hochrechnung der im Kapitel 4.3 erarbeiteten Kostenelemente und der architektonisch-energetischen Zusammenhänge im Kapitel 4.2, insbesondere hinsichtlich Fenstern (Anteile, Fenstergrösse, energetische Qualität), wurden für weitere Neubaukonzepte Kostenkurven erarbeitet, siehe dazu auch das Kapitel 6.1.1. Den Abbildungen 4.4-28 und 4.4-29 liegen dabei die Energiepreise Tabelle 4.4-16 zugrunde, wobei der erhöhte Energiepreis einer  $\text{CO}_2$ -Abgabe von 210 CHF/t $\text{CO}_2$  entspricht.

In der folgenden Abbildung 4.4-28 ist von einem mittelgrossen MFH der Verlauf der Jahreskosten in Funktion eines sukzessive tieferen Heizwärmebedarfs dargestellt (A/EBF=1.4). Weitere Angaben zu den Annahmen zum Gebäude sind im Kapitel 6.1.1 beschrieben.

In der selben Art ist in Abbildung 4.4-29 ein Beispiel eines Einfamilienhauses dargestellt (A/EBF=1.8). Das EFH wird von konventioneller Bauweise mit üblichem Fensterflächenanteil zu einem Gebäude kombinierter Solargewinn- und Verlustverkleinerungsstrategie umgebaut. Der Fensterflächenanteil wird dabei jedoch nur auf noch realistischen 30% (AF<sub>e</sub>/EBF) erhöht und gegen Süden beträgt die Fensterfläche 35m<sup>2</sup> bei einer opaken Fläche gegen Süden von 40m<sup>2</sup>.



Quelle Berechnungen CEPE

Abbildung 4.4-28 Jahreskosten (CHF/m<sup>2</sup>EBF) in Funktion des sukzessive tieferem Heizwärmebedarfs bei MFH (1100 m<sup>2</sup>, A/EBF=1.4, Realzinssatz 3%)

Die ermittelten Gesamtjahreskosten (netto) weisen - ohne Berücksichtigung begleitender Nutzen - einen zunächst sehr flachen Verlauf im Bereich der heutigen Bauweise und darunter (z.B. zwischen 250 und 200 MJ/m<sup>2</sup>a) auf. Im dargestellten Beispiel kann ohne wesentliche Mehrkosten eine Verbesserung des spezifischen Heizwärmebedarfs  $Q_h$  um 40 MJ/m<sup>2</sup>a bis 60 MJ/m<sup>2</sup>a bzw. um einen Viertel erreicht werden, dies selbst mit der unwahrscheinlichen Annahme, dass der Energiepreis im Durchschnitt über die gesamte Lebensdauer nur rund 5,5 Rp/kWh beträgt (ca. 55 CHF/100 l). Um insgesamt über 100 MJ/m<sup>2</sup>a lässt sich der Heizwärmebedarf zu Nettokosten von 2 CHF/m<sup>2</sup> bis 3 CHF/m<sup>2</sup> vermindern, was 20 bis 30 CHF/Monat Mehrkosten für eine Wohnung von 120 m<sup>2</sup> bedeutet. Wird eine Energiepreiserhöhung im Bereich einer  $\text{CO}_2$ -Steuer von 210 CHF/t  $\text{CO}_2$  veranschlagt, verflacht sich der

Kostenverlauf weiter, und das wirtschaftliche Optimum verschiebt sich weiter nach links hin zu einem tieferen spezifischen Energiebedarf.

Den Werten in Abbildung 4.4-28 und in Abbildung 4.4-29 wurden nicht die best practice Kosten zugrunde gelegt (siehe dazu auch die Variation der Mehrkosten im Kapitel 4.3; in Zukunft könnte mit wachsenden Lern- und Skaleneffekten die Kostensteigerung durchaus auch moderater verlaufen, als hier dargestellt (siehe Kap. 4.5). Ebenfalls nicht berücksichtigt sind hier die nicht-energetischen Nutzen, die bei weitergehenden Energie-Effizienzmassnahmen häufig beobachtet werden (siehe Kapitel 4.6). Insofern sind die oben beschriebenen einzelwirtschaftlichen Netto-Kosten unvollständig und können zu Fehlentscheidungen bei Wärmeschutz- und Energieeffizienz-Investitionen führen.

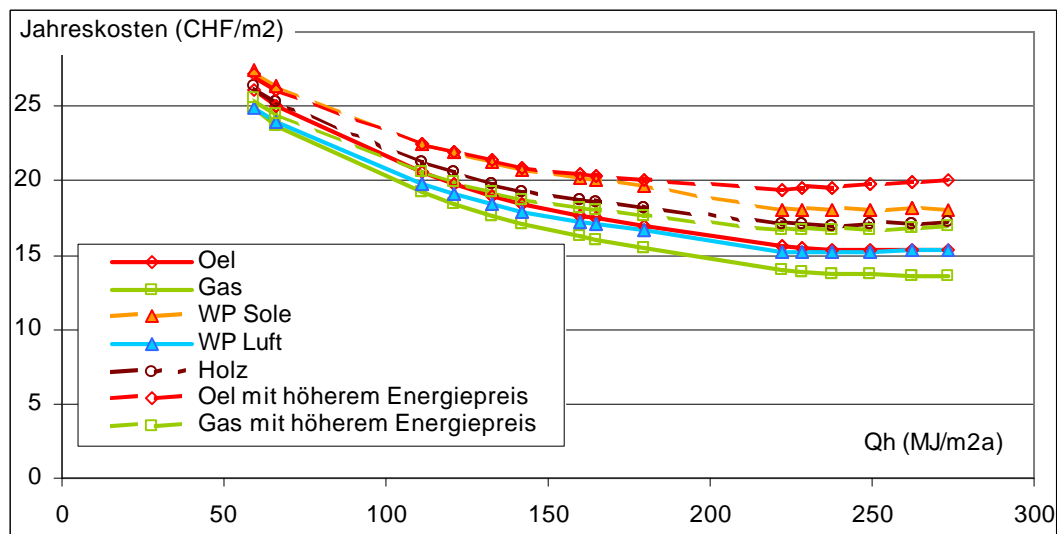


Abbildung 4.4-29 Jahreskosten (CHF/m²EBF) in Funktion des sukzessive tieferem Heizwärmebedarfs bei EFH (200 m², A/EBF=1.8, Realzinssatz 3%)

#### 4.5 Dynamisierung der Kosten und energetischen Nutzen von Wärmeschutzinvestitionen bis 2030

Die kostenseitige Veränderung von Wärmeschutzinvestitionen über der Zeit bleibt in den meisten Analysen bis heute unbeachtet, da die Datenbeschaffung hierfür ausgesprochen aufwändig ist, auch wenn die Methodik zur Abschätzung der Kostenentwicklung soweit entwickelt und empirisch überprüft ist, dass sich die Dynamisierung der Kosten für energiewirtschaftliche Analysen anbietet. Zukünftig zu erwartende technische Verbesserungen werden dagegen häufiger in derartigen Analysen oder in ex ante-Politik-Evaluationen berücksichtigt, nicht aber die veränderten Kosten infolge

- denkbarer Lern- und Mengendegressions-Effekte oder
- neuer Technologien, wobei letztere häufig zunächst spezifisch teurer sind als die traditionellen Technologien.

Derartige Dynamisierungen sollten möglichst sowohl kosten- als auch nutzenseitig mitbetrachtet werden, da die Dynamisierung im Ergebnis häufig zugunsten der neuen technischen Lösungen der rationellen Energienutzung ausfällt und ohne diese Berücksichtigung Unterschätzungen forciert Wärmeschutzinvestitionen infolge "zu teurer Lösungen" gerade für Gebäude als sehr langlebige Investitionsgüter nicht zu vermeiden wären.

Im folgenden wurde daher versucht, anhand der Ergebnisse von schriftlichen und mündlichen Umfragen sowohl über die technische Entwicklung als auch über die Mengen- und Preisentwicklung in der Vergangenheit Aussagen über die zeitliche Entwicklung der Investitionskosten für die kommenden zwei bis drei Jahrzehnten zu machen. Das methodische Vorgehen wird in Kap. 4.5.1 kurz beschrieben.

##### 4.5.1 Methodische Hinweise zu Lerneffekten und Skaleneffekten – Erfahrungskurven

Insbesondere bei neuen Technologien, aber auch bei herkömmlichen Investitionen oder neuen organisatorischen Massnahmen, ist für Zukunftsbetrachtungen in der Regel mit Kostendegressionen (in realen Werten) zu rechnen. Zumindest ist diese Frage jeweils zu prüfen. Theoretisch lassen sich die drei Einflüsse der Kostenreduktion durch

- **Lerneffekte** (Verringerung der Durchschnittskosten bei gleicher Ausbringungsmenge pro Zeit infolge Verbesserungen am Produkt oder Produktivitätsgewinnen bei der Herstellung),
- **economies of scale** (Stückzahl- bzw. Anlagengrößen-Kostendegression) und
- **economies of scope** (Verbundvorteile bei der simultanen Produktion mehrerer verschiedener Güter)

unterscheiden (vgl. Abbildung. 4.5-1). In der Praxis und bei der empirischen Erhebung der Daten für Kosten und Produktionsmengen verwischen sich allerdings die Einflüsse von Lern- und Skaleneffekten, und beobachtete Kostensenkungen lassen sich nur schwer diesen einzelnen Einflüssen zuordnen (Stein, 1988, S. 402 ff.). Darüber hinaus werden in der betrieblichen Praxis Kostensenkungspotenziale identifiziert (z.B. verbesserte Produktionsmittel und -verfahren, bedingt durch technischen Fortschritt, Verkürzung der Durchlaufzeiten), die durch *spezielle Aktionen im Herstellungsprozess* zu einem jeweiligen Zeitpunkt ausgeschöpft werden können. Spezielle Aktionen waren in den 90er Jahren z.B. eine gezielte Prüfung der Möglichkeiten zur Verkürzung der Durchlaufzeiten in vielen Produktionsbetrieben, die komplexe und kapitalintensive Produkte herstellten (z.B. Grosskraftwerke).

Alle drei o.g. Einflüsse der Kostenreduktion lassen sich i.a. wegen des hohen Analyseaufwandes nicht getrennt in einem deterministischen Erklärungsmodell quantitativ beschreiben. Vielmehr

werden sie heute anhand empirischer Daten und sehr einfacher Funktionen beschrieben; die auf diese Weise gewonnenen Koeffizienten werden dann für spezifizierete technische Systeme jeweils an die konkrete Anwendung durch Schätzungen angepasst. Auch in diesem Projekt wird ebenfalls so verfahren.

Merkmale	Kostensenkungseinflüsse		
	Lerneffekte (einschl. Aktionen)	Stückzahl-Kostendegression	Anlagengrössen-Kostendegression
Gemeinsamkeit	Rückgang der spezifischen Kosten bei kumulierter Produktion		
Ursachen	Zunehmende Übung und Erfahrung beim Ausführen einzelner Arbeitsschritte; Nutzung besserer Produktionsmethoden und -mittel bei gleicher Ausbringungsmenge pro Zeiteinheit;	Steigende Stückzahlen bei häufig gleichbleibenden Fixkosten für die Produktion; Übergang zum Mehrschichtenbetrieb, schnellere Taktzahl; höherer Grad der Automation;	zunehmende Anlagengrösse bei Stoff- und Energieumwandlung in kontinuierlichen Prozessen; Volumen von Apparaten und Maschinen steigt mit dritter Potenz, die Fläche quadratisch;
Wirkung	Insbesondere Reduktion der variablen Kosten,	Reduzierung der stückbezogenen Fixkosten	Reduzierung der mengenbezogenen Fixkosten
Empirische Beobachtungen	die Stückkosten sinken über der kumulierten Ausbringungsmenge (z. B. bei Verdopplung sinken Kosten um 15 - 20 %) bzw. im Produktzyklus (über der Zeit z.B. 1 bis 2 %/a), bei Aktionen einmalig um z.B. 10 bis 20 %.	Die Stückkosten sinken (mit abnehmender Degression) über der Ausbringungsmenge (meist zu Beginn des Produktzyklus in besonderem Ausmass);	Die Produktionskosten sinken (mit abnehmender Degression) über der Produktionsmenge; Degressionskoeffizient, bezogen auf die Kapazitätsänderung: 0,5 bis 0,9;
Beispiele im Energiebereich	Wärmeschutzfenster, Passivhäuser, PKW; Kraftwerksbau Mitte der 90er Jahre (Aktionseffekt);	Vakuum-Isolation, PV-Module, hocheffiziente Elektro-Motoren gleicher Leistung, Brennstoffzellen, Klein-BHKW	Einsatz grösserer Fenster gegenüber kleineren, Vakuum-Isolationselemente, BHKW grösserer Leistung

Quellen: Jochem, Diekmann, 2001, CEPE eigene Anpassungen

Abbildung 4.5-1 Merkmale und Beispiele für verschiedene Kostensenkungseinflüsse

### a) Lerneffekte

Die Kostendegression durch Lernen wird häufig in Form einer Potenzfunktion dargestellt:

$$y = a \cdot x^{-b} \quad \text{oder} \quad \log y = \log a - b \cdot \log x$$

y: Kosten für die zuletzt produzierte Einheit

a: Kosten für die im Rahmen der kumulierten Produktionsmenge zuerst produzierte Einheit

x: kumulierte Produktionsmenge zwischen zuerst und zuletzt produzierter Einheit)

b: Steigungsparameter der Lernkurve (bei doppellogarithmischer Darstellung)

Die Fortschrittsrate  $f = 2^{-b}$

gibt an, auf welches relative Niveau sich die spezifischen Kosten vermindern, wenn sich die kumulierte Produktion verdoppelt. Die komplementäre Grösse

$$L = 1 - f$$

wird auch als *Lernrate* bezeichnet. Eine Fortschrittsrate von 85 % bzw. eine Lernrate von 15 % bedeutet, dass mit jeder Verdopplung des gesamten Outputs die Produktionskosten der zuletzt produzierten Einheit nur noch 85 % des vorhergehenden Wertes betragen. Die produzierte Menge kann entweder auf einen Betrieb, ein Land oder die Weltproduktion bezogen werden.

### b) Stückzahl-Kostendegression (economy of scale)

Bei diesem Effekt handelt es sich um Veränderungen der Stückkosten bei unterschiedlichen Produktionsmengen, die sich als sinkende Durchschnittskosten mit zunehmender Produktionsmenge je Zeiteinheit darstellen, weil die variablen Kosten durch verstärkte Automation, Rabatte bei den in grösseren Mengen gelieferten Vorleistungen oder andere Skalenerträge sinken und weil die anteiligen fixen Kosten pro Stück mit steigender Anlagenauslastung und Ausbringungsmenge kleiner werden. Dieser Sachverhalt kann nicht nur für die industrielle Massenfertigung mit (starr) Produktionssystemen bei sehr hohem Automatisierungsgrad gelten, sondern auch für flexibel automatisierte Produktionssysteme (Hieber, 1991, S. 192 ff) oder selbst handwerkliche Fertigung.

Solche Effekte dürften vor allem bei jenen neuen Energiewandlern und Energienutzungstechniken zu beachten sein, die in Grossserien hergestellt werden (z.B. Elektrogeräte, Elektromotoren, Lüftungssysteme, aber auch neue Fenstersysteme, z.B. bei der Beschichtung der Gläser vom Batch- auf den Continue-Betrieb) oder Hochleistungskern- und Vakuum-Isolationselemente).

### c) Anlagengrössen-Kostendegression

Während die stückzahlenabhängige Kostendegression sich eher auf modulare Systeme mit ihrem Potenzial zur Massenproduktion bezieht, geht die Anlagengrössen-Kostendegression von Kostenreduktionspotenzialen durch die Wahl zu grösseren Anlagen aus. Diese Degression zielt insbesondere auf die Investitionskosten  $I$  einer Anlage 1 im Vergleich zu den Kosten einer anderen Produktionskapazität 2 ab:

$$\frac{I_1}{I_2} = \left[ \frac{\text{Kap}_1}{\text{Kap}_2} \right]^m \quad \text{oder} \quad \log(I_1/I_2) = m \cdot \log(\text{Kap}_1/\text{Kap}_2)$$

wobei  $I$  = jeweilige Investitionsausgabe  
 $\text{Kap.}$  = jeweilige Nennkapazität der Produktionsanlage  
 $m$  = Degressionsexponent, der empirisch ermittelt wird und von vielen Einflüssen abhängt.

Für die spezifische (kapazitätsbezogene) Investition ergibt sich daraus die Beziehung

$$I/\text{Kap} = c \cdot \text{Kap}^{m-1}$$

Degression liegt hier vor, wenn die Bedingung  $m < 1$  erfüllt ist.

Diese Methode der Investitionskostenschätzung für das upscaling von Anlagen wurde Ende der 40er Jahre entwickelt (Williams, 1947) und in den letzten Jahrzehnten von vielen Autoren spezifiziert und für verfahrenstechnische Produktionsanlagen weiter verfeinert (z.B. Kölbl/Schulze, 1982; Humphreys/Katell, 1981; Garrett, 1989). Diese Kostendegression wird nicht nur bei Anlagen, sondern auch bei Maschinen beobachtet, wo beispielsweise der Degressions-exponent für Synchrongeneratoren bei einer Nennleistung zwischen 3 und 300 kW bei etwa 0.4 ermittelt wurde. Dieser Wert nimmt bei grösseren Leistungen zu (z.B. auf 0.55 bei der Leistungsklasse 200 bis 2000 kW), d.h., der Degressionseffekt nimmt mit zunehmender Anlagengrösse mehr und mehr ab.

#### d) **Einzeleffekte und Erfahrungskurven**

Der Vorteil dieser Unterscheidung zur Abschätzung von Kostendegressionseffekten durch Lernen und Skaleneffekte ist die schnelle und einfache Durchführbarkeit. Der Nachteil liegt in der Einfachheit der Methoden bei *neuen Anlagen und Maschinen*, deren Lernraten und Degressionskoeffizienten zunächst empirisch nicht feststellbar sind und deshalb mittels Annahmen über die Ähnlichkeit zu bekannten Technologien geschätzt werden müssen. Da diese Koeffizienten aber erheblich voneinander abweichen können, ist die Genauigkeit dieser Methoden mit erheblichen Schätzunsicherheiten belastet (Schembra/Schulze, 1993). Andererseits sind diese Kostendegressionsschätzungen in vielen Fällen realistischer, als eine Konstanz der heutigen Kosten für die nächsten 10 oder 20 Jahre anzunehmen.

Diese Erkenntnis legt es nahe, mit Sensitivitätsanalysen bzgl. der Annahmen zu den Degressionskoeffizienten die Stabilität der Ergebnisse bzgl. der Wirtschaftlichkeit zu überprüfen.

Oftmals können die in der Abbildung 4.5-1 aufgeführten Einzeleffekte empirisch nicht getrennt von einander, sondern nur als Gesamteffekt beschrieben werden. Hierzu werden meist *Erfahrungskurven* über der kumulierten Produktion, Anlagenzahl oder Kapazität ermittelt. Formal entsprechen sie den oben dargestellten Lernkurven, wobei allerdings neben den reinen Lerneffekten auch die anderen Kostendegressionseinflüsse (implizit) mit erfasst werden.

Bei der *praktischen Arbeit mit Erfahrungskurven* sollten folgende Punkte beachtet werden (vgl. auch Seebregts 1999, IEA 2000, McDonald/Schrattenholzer 2001, Jochem/Diekmann 2001):

- Die empirischen Zahlenreihen der (spezifischen) Kosten müssen *inflationbereinigt* werden.
- Für Erfolgs- bzw. Lernraten kann nicht generell eine Konstanz der Degressionskoeffizienten über eine Dekade oder mehrere Verdopplungsmengen angenommen werden. Meist nehmen die *Degressionskoeffizienten mit der Reifung und Diffusion einer neuen Technologie ab*. Dies ist anhand der Zeitreihen nach Möglichkeit zunächst empirisch zu prüfen und könnte mit Marktanteilen korreliert werden.
- Kostenentwicklungen können nicht einfach mit Hilfe empirischer Erfolgs- bzw. Lernraten fortgeschrieben werden. Bei der Interpretation und Anwendung von Erfahrungskurven sollte der technische und ökonomische Hintergrund der Kosteneinflussgrößen beachtet werden.
- Unterschiedliche Erfahrungskurven können sich abhängig davon ergeben, ob *Herstellungskosten oder Marktpreise* zugrundegelegt werden. Preisdaten sind häufig leichter verfügbar; für Langfristszenarien sollten aber nach Möglichkeiten Kostendaten verwendet werden, um kurzfristige Preisstrategieeffekte der Hersteller oder des Handels (z.B. hohe Preise für den Pioniermarkt, Angstzuschläge) auszublenden.

Neben dem zeitlichen ist auch der räumliche Bezug der Schätzungen zu beachten. Wird z.B. die weltweite kumulierte Produktion betrachtet, dann besteht eventuell kein unmittelbarer Zusammenhang zum Technikeinsatz im nationalen Kontext (z.B. sind die Herstellkosten und Preise für Wärmeschutzfenster in Nord- und Westeuropa infolge der unterschiedlichen Gesetzgebung und Klimaverhältnisse sehr unterschiedlich).

Tabelle 4.5-1 Beispiele der Kostensenkungseinflüsse für Wärmedämm-Investitionen und Energiewandler sowie ihre Bedeutung für die zukünftigen Kosten mit Zeithorizont bis 2020

Technikbereich Und Beispiele	Lerneffekte (inkl. Aktionen)	Stückzahl- Kostendegression	Anlagengrößen- Kostendegression
	(economies of scale)		
<b>Traditionelle Techniken</b>			
•Energiewandler, z. B.			
- Kessel, Brenner	++	+	+
- Kompressoren, Pumpen	++	+	+
- Lüftungsanlagen	++	++	+
•Wärmedämmung			
- Mineralfaserbasis	++	+	o
- PS- und PU-Schäume	++	+	+
- Wärmeschutzfenster			
<b>Neue Techniken</b>			
•Energiewandler, z. B.			
- BHKW	++	++	+
- Wärmepumpen	++	+++	+
•Wärmedämmung z. B.			
- Passivhäuser	+++	+++	+
- Vakuumisolation	+++	++	+

Quelle: CEPE

Zu beachten ist nicht zuletzt auch die sachliche Abgrenzung bzw. Aggregation von Techniken (z.B. dürften bei mittelgrossen Kesselanlagen empirisch grössere Degressionseffekte zu beobachten sein als bei Kesselanlagen insgesamt, einschl. Kleinanlagen, weil sich der Anlagengrößen-Effekt bemerkbar macht). Zusammenfassend ist festzustellen, dass *Erfahrungskurven* stets nur im Rahmen ihrer sachlichen, zeitlichen und räumlichen Abgrenzung zu interpretieren sind. Generell sollten sie nicht "mechanisch", sondern nur vor dem Hintergrund der technischen sowie ökonomischen Kosteneinflussgrößen verwendet werden. Alles in allem eignen sich Erfahrungskurven unter diesen Bedingungen für eine approximative Beschreibung kontinuierlicher Degressionseffekte. Es ist aber zu betonen, dass damit nicht alle



technologischen Entwicklungen erfasst werden, insbesondere keine radikal innovativen Technologiesprünge, spezielle Aktionen der Hersteller oder veränderte staatliche technische Standards.

### e) *Behandlung von Degressionseffekten in energiewirtschaftlichen Modellrechnungen*

Technologischer Fortschritt mit entsprechenden Kostendegressionen kann in Energieanalysen entweder endogen oder exogen abgebildet werden. Eine Endogenisierung der technischen Entwicklung hätte grundsätzlich den Vorteil, dass schnell Alternativ-Kostenrechnungen gemacht werden können. Allerdings vermindert dies die Transparenz der Annahmen im Vergleich zu einer lediglich exogenen Behandlung dieses Einflusses. Im vorliegenden Bericht werden jeweils die Annahmen zu den Koeffizienten der unterstellten Erfahrungskurven offengelegt.

In den vergangenen Jahren hat es zahlreiche Bemühungen gegeben, technischen Fortschritt und seine Auswirkungen auf die Kostendegression in Energiemodellen zu endogenisieren (vgl. etwa Kypreos 1998, Mattson 1998, Messner 1998, ETSAP news 5/1998, 7/1998, 3/2000, Barreto, 2001). Hierbei sind insbesondere die Aktivitäten im Rahmen des EU-TEEM-Projektes zu nennen; Erfahrungen mit den Modellen ERIS, MARKAL und MESSAGE sind in Seebregts et al. (1999) zusammengefasst (vgl. Tab. 4.5-2). Die verwendeten Fortschrittsraten  $f$  sind für eine Reihe neuer Technologien der Energiewandlung angegeben, wobei sie zum Teil für die lange Periode gemittelt sind. Leider fehlen bisher Analysen zur Kostendegression im Bereich der rationellen Energienutzung völlig.

Tabelle 4.5-2 Fortschrittsraten für ausgewählte neue Technologien der Energiewandlung in unterschiedlichen Modellen für die Periode 1990-2050

	MARKAL Europe	MARKAL global	Reduced MARKAL global	ERIS global
Advanced coal		0,94	0,93	0,95
Gas combined cycle		0,89	0,85	0,88
New nuclear		0,96	0,93	
Fuel cell	0,82	0,87		0,82
Wind power	0,90	0,89	0,85	0,88
Solar pv	0,81	0,81	0,72	0,85
Solar thermal			0,85	

Quelle: Seebregts et al. (1999), table 5.1.

### f) *Entwicklung der Investitionskosten für Wärmedämminvestitionen in Zukunft*

In der Literatur gibt es keine derartigen empirisch basierten Kostenschätzungen für Wärmedämm-Investitionen bei Gebäuden. Da die in dieser Analyse erhobenen Kostenangaben der Vergangenheit jeweils in nominellen Preisen waren, wurden sie auf Preisbasis 2000 hochgerechnet. Wo es von Bedeutung erscheint, wird jeweils auch die Information über die technische Verbesserung der Wärmeschutzinvestitionen gegeben. Die Dynamisierung der Investitionskosten erfolgt dann anhand typischer Investitionen (und nicht für alle denkbaren Differenzierungen der Investitionsmöglichkeiten). Insofern ist die Dynamisierung der Wärme-

dämmung bei Fassaden, Fenstern und Lüftungssystemen in diesem Bericht noch rudimentär und sollte durch weitere Recherchen und Differenzierungen in Zukunft verbessert werden; beispielsweise müssten Technologiesprünge wie die Beschichtung von Zweiglas-Systemen oder in Zukunft die Vakuumelement-Isolation von Fassaden detaillierter behandelt werden, als dies in dieser Arbeit möglich war.

#### 4.5.2 Wärmedämmung bei Fassaden

##### a) Bisherige Entwicklung der Dämmtechnik und Dämmstoffe

Die Komplexität der Wärmedämmtechnik hat in den letzten 10 Jahren erheblich zugenommen, und mittlerweile besteht ein grosses Angebot für energie- und kostenoptimierte Detaillösungen (vgl. Kap. 4.3). Die Kostenentwicklung sei jeweils kurz zusammengestellt, um die entsprechenden Informationen für die Wahl der Kostendegressionskoeffizienten offen zu legen.

Die thermische Leitfähigkeit (Lambda-Wert) der heute gebräuchlichsten Dämmstoffe hat sich in den letzten Jahren nur noch sehr langsam verbessert (d.h. abgenommen, vgl. Tab. 4.5-3); sie dürfte aber im Bereich der kunststoffbasierten Dämmstoffe in den kommenden Jahren eine weitere Verbesserung um etwa 20 % bis 40 % erfahren (z.B. BASF "Neopor" auf Basis Styropor).

Tabelle 4.5-3 Preisentwicklung, nominal und real in Preisen von 2000 für Wärmedämmung für Kompaktfassaden aus Polystyrol seit 1985

	1985	1988	1990	1991	1992	1993	1995	2001
Material (CHF/ m <sup>3</sup> )								
- nominal	183	199.5	218	228	236	236	223	188
- real	210	225	240	249	255	252	235	188
Übliche Dämmstärke cm	6-8							12
Materialkosten Dämmstoff CHF/m <sup>2</sup>	22							20
Zubehör, Gerüst CHF/m <sup>2</sup>	23-34							20-30
Montagekosten CHF/m <sup>2</sup>	88-93		80-82					75-85
Total CHF/m <sup>2</sup> (real) <sup>1)</sup>	133-149							115-135
* in Preisen von 2000								

Quellen: Interview mit Firma Mamoran, 2001;

#### Kompaktfassaden

Die zunächst nominal dargestellte Preisentwicklung von Wärmedämmungen wurde in reale Werte umgerechnet. Allerdings zeigt sich schon bei den Nominalwerten, dass bei den Montagekosten in den 90er Jahren erhebliche Produktivitätsfortschritte – trotz Lohnsteigerungen – stattgefunden haben (ca. 3%/a seit 1985). So konnte seit 1980 konnte der Arbeitsaufwand von 2.1 h/m<sup>2</sup> auf 1.7 h/m<sup>2</sup> gesenkt werden (Quelle: Unternehmen HF 3). In realen Werten führten die Lern- und Skaleneffekte in den vergangenen 15 Jahren zu einer Kostenreduktion der PS-Kompaktfassaden von etwa 0.6 % pro Jahr.

Selbst ein Produktivitätsfortschritt bei der Herstellung des Dämmstoffes wirkt sich infolge des relativ geringen Kostenanteils von ca. 15 % an den Gesamtkosten kaum auf die gesamten Flächenpreise aus. Die entscheidende Frage ist vielmehr, ob Kostenreduktionen bei der Installation der Wärmedämmung durch Produktivitätsfortschritte auch in Zukunft erzielt werden könnten, die nicht durch Lohnerhöhungen kompensiert würden.

### b) Kostenschätzungen 2000-2030

Für die Zukunft wird davon ausgegangen, dass sich die Materialkosten des Polystyrol bis 2020 noch jeweils um 1 CHF/m<sup>2</sup> und Dekade vermindern, sie dann aber wegen zunehmender Erdölpreise (vgl. Kap. 4.1) stagnieren, weil die Produktivitätsfortschritte bei der Herstellung und Lieferung durch die Rohstoffpreissteigerungen kompensiert werden. Es wird weiterhin unterstellt, dass weitere Rationalisierungen bei Planung, Montage und Gerüstkosten von etwa 0,5%/a möglich sind. Dies würde bei den traditionellen Kompaktfassaden mit 12 cm Polystyrol Wärmedämmung um etwa 5% realer Kostensenkung pro Dekade führen (vgl. Tab. 4.5-4).

Tabelle 4.5-4 Geschätzte Kostenentwicklung für Wärmedämmung (12 cm Polystyrol) für Kompaktfassaden (in Preisen von 2000), 2000-2030

Kostenart	2000	2010	2020	2030
Materialkosten 12 cm Dämmstoff	20	19	18	19
Zubehör, Gerüst, Vorbereitung	20-30	19-28	18-26,5	17-25
Montagekosten, Anschlüsse	75-85	71-80	68-76	64-72
Summe	115-135	109-127	104-121	100-116
Mittelwert CHF/m <sup>2</sup>	125,-	118,-	112,50	108,-

Quelle: CEPE

Die durchschnittlichen Fassadenkosten bei einer 20 cm starken Wärmedämmung liegen heute bei rd. 145,- CHF/m<sup>2</sup> bzw. rd. 175,- CHF/m<sup>2</sup> bei 30 cm Wandstärke. Die Mehrkosten von

- 25,- CHF/m<sup>2</sup> bei 20 cm Wärmedämmung entfallen zu etwa 12,- CHF/m<sup>2</sup> auf das Dämmmaterial und zu 8,- CHF/m<sup>2</sup> auf zusätzliches Montagmaterial (Dübel) und Montagekosten.
- 50,- CHF/m<sup>2</sup> bei 30 cm Wärmedämmung entfallen zu etwa 30,- CHF/m<sup>2</sup> auf das zusätzliche Dämm-Material und 20,- CHF/m<sup>2</sup> auf zusätzliches Montagmaterial und Montage sowie leicht erhöhte Gerüstkosten.

Während in Zukunft das traditionelle Dämmmaterial analog zum Fall der 12 cm Wärmedämmung um die gleichen (relativ geringen) Kostendegressionen zurückgehen wird, kann bei den Montagmaterial- und Lohnkosten von grösseren Lern- und Skaleneffekten ausgegangen werden, weil die 20 cm und 30 cm Fassaden-Kompaktdämmung heute die Ausnahme darstellt. Es wird angenommen, dass sich die Degressionseffekte annähernd wie diejenigen der 12 cm Wärmedämmung für 1985 bis 2000 verhalten, d.h. mit durchschnittlich knapp 1%/a vermindern und sich in der letzten Dekade auf 0,5% verlangsamen. Die Ergebnisse dieser Überlegungen führen dazu, dass die Kosten für eine 20 cm bzw. 30 cm starke Fassadendämmung um durchschnittlich 0,7% pro Jahr zurückgehen und in 2020 die Kosten der 20 cm-Dämmung den heutigen Kosten für eine 12 cm starke Dämmung entsprechen, bzw. die Kosten der 30 cm-Dämmung den heutigen Kosten einer 20 cm-Dämmung (vgl. Tabelle 4.5-5).

Neue Materialien, Konzepte und Innovationen im Bereich der Dämmstoffe haben zunächst einen höheren Preis; aber sie haben in der Regel höhere Kostendegressionspotenziale als die traditioneller Produkte der Wärmedämmung. Bei der Wärmedämmung ergibt sich der interessante Fall, dass die Gesamtkosten für einen bestimmten Energieeffizienzgewinn sprunghaft fallen können, wenn die Wärmedämmeigenschaft des Materials je cm Stärke durch Technologiewechsel verbessert werden kann. Diese Entwicklung deutet sich in den kommenden Jahren an.

### Styropor mit Hochleistungsdämmkern als Beispiel eines Technologiesprungs

Die Dämmplatte aus Styropor wird mit einem Kern aus einem anderen geschäumten Kunststoff versehen, welcher eine um den Faktor 1.8 geringere thermische Leitfähigkeit aufweist. Dadurch kann die Dämmstärke gegenüber dem heutigen Material um rund 40% vermindert werden. Bei Dämmstärken von 100 bis 120 mm dieses neuen Materials und konstruktiven Lösungen insbesondere im Bereich der Anschlüsse, die kostenseitig für die Montage der heutigen Praxis entsprechen, kann der Niedrigenergiestandard erreicht werden. Das Produkt ist auf dem Markt erhältlich, aber derzeit mit einem Mehrpreis der Dämmplatte von rund 30 bis 40% bei gleicher Dämmwirkung relativ teuer für eine breite Anwendung, auch wenn Kompensationen für geringere Montagekosten berücksichtigt würden. Das Produkt bedeutet jedoch einen Technologiesprung mit entsprechenden Kostenreduktionsmöglichkeiten in wenigen Jahren, wenn Skaleneffekte beim Material und weitere Lerneffekte bei den Montagekosten erzielt werden können. Übernimmt man die Kostenschätzungen für die 12 cm Wärmedämmung (vgl. Tab. 4.5-4) und geht von einem Degressionskoeffizienten für Skaleneffekte von zunächst 0.85 bis 2020 und später von 0.90 aus, dann ergeben sich ab der Periode 2010 bis 2020 kostenmässige Vorteile gegenüber dem traditionellen PS-Dämmmaterial (vgl. Tab. 4.5-6).

Tabelle 4.5-5 Geschätzte Kosten für Wärmedämmung von Kompaktfassaden mit Polystyrol für 20 und 30 cm Stärke (in Preisen von 2000), 2000-2030, CHF/m<sup>2</sup>

Kostenart		2000	2010	2020	2030
Material	20 cm	32,-	30,-	28,-	28,-
	30 cm	50,-	47,-	44,-	45,-
Übrige Kosten <sup>1)</sup>	für 20 cm WD PS	113,-	104,-	95,-	91,-
	für 30 cm WD PS	125,-	114,-	106,-	101,-
Total	für 20 cm WD PS	145,-	134,-	124,-	119,-
	für 30 cm WD PS	175,-	161,-	150,-	146,-
* Gerüst, Zubehör, Montagekosten, Vorbereitung, Oberfläche: jährl. Degression (vgl. Text)					

Quelle: CEPE

Die Ergebnisse - bei einer moderat angenommenen Marktdurchdringung - zeigen den Vorteil der dünneren Wärmedämmschicht nach einer Periode von etwa 20 Jahren, wenn die Kosten der vergleichbaren Wärmedämmleistung konventionellen Polystyrols gleichauf liegen und in der Periode 2020-2030 die Kosten der konventionellen Dämmung unterschreiten (vgl. Tab. 4.5-6). Es wäre zu prüfen, ob die Verdopplungsraten des neuen Polystyrol-Dämmmaterials durch spezielle Förderung auch schneller erreicht und damit auch die Kostendegressionen früher erzielt werden könnten. So wäre durchaus auch eine Kostengleichheit bis etwa 2010 denkbar.

Die Kostenunterschiede zwischen den beiden konventionellen Dämmmaterialarten Polystyrol sowie Glas- und Steinwolle, die heute zu beachten sind, dürften auch in Zukunft erhalten bleiben. Für Neuentwicklungen wird abzuwarten sein, ob auch im Bereich der mineralischen Dämmmaterialien technische Neuerungen dazu führen, dass die Wärmedämmeigenschaften verbessert werden.

Tabelle 4.5-6 Geschätzte Kosten für Wärmedämmung mit PS-Hochleistungsdämmkern (12 cm und 20 cm) für Kompaktfassaden (in Preisen von 2000), 2000 -2030

Kostenart		2000	2010	2020	2030
Materialkosten PS-Kern					
Dämmmaterialstärke	12 cm	45.-	35.-	30.-	28.-
	18 cm	65.-	55.-	50.-	45.-
Übrige Kosten <sup>1)</sup>	für 12 cm <sup>2)</sup>	105.-	99.-	95.-	89.-
	für 18 cm <sup>3)</sup>	113.-	104.-	96.-	91.-
Total	für 12 cm PS-Kern	150.-	134.-	125.-	117.-
	für 18 cm PS-Kern	210.-	159.-	146.-	136.-
<ul style="list-style-type: none"> <li>· Gerüst, Zubehör, Montagekosten, Vorbereitung, Anschlüsse, Oberfläche</li> <li>· Analog zu Kostenentwicklung in Tabelle 4.5-4 für 12 cm</li> <li>· Analog zu Kostenentwicklung in Tabelle 4.5-5 für 20 cm</li> </ul>					

Quelle: CEPE

### Hinterlüftete Fassaden

Da die hinterlüfteten Fassaden bei den kleinformatischen Faserelementen als kostengünstigste Variante dieser Dämmtechnologie mit etwa 50.- CHF/m<sup>2</sup> teurer sind als die Kompaktfassaden, sind bei der Dynamisierung die Kostenreduktionspotentiale von besonderem Interesse. Da ausserdem bei einer Dämmstärke von ca. 20 cm beim Typ der Unterkonstruktion von Holz auf Holz-Metall mit einem Kostensprung von etwa 5.- bis 8.- CHF/m<sup>2</sup> und für die Montagekosten von etwa 10.- CHF/m<sup>2</sup> zu rechnen ist, wären neue, z.B. vakuumbasierte Wärmedämmelemente ein Technologiesprung, der in dieser Arbeit noch nicht behandelt werden konnte. Ihr Kosteneinfluss könnte in Zukunft ebenfalls von Bedeutung sein. Nachteilig ist, dass für die hinterlüfteten Fassaden keine so langfristigen empirischen Daten für die Vergangenheit ermittelt werden konnten, so dass hier auf die Degressionseffekte durch Lernen und Mengendegression und auf die Beobachtungen für die Kompaktfassaden zurückgegriffen werden muss (s.o.).

Die Annahmen zu den Kostenveränderungen basierten zunächst auf einer relativ differenzierten Kostenstruktur für die heutigen hinterlüfteten Fassaden (vgl. Tab. 4.5-7). Dabei wurde davon ausgegangen, dass sich die Kosten für Gerüst, Baustelleneinrichtung, Vorbereitung und Zubehör nicht weiter verringern lassen, ebenso kaum die Kosten für das Dämm-Material, zumal nach 2020 eine Energiepreissteigerung erwartet wird, sowie für die Kleinfaserplatten und ihre Montage. Weiterhin wurde davon ausgegangen, dass die Kostendegressionen bei den übrigen Kostenanteilen für die kleinen Dämmstärken über weniger Potenzial in Zukunft verfügen als die grossen Dämmstärken, da diese bis heute noch nicht sehr zum Einsatz kommen und Lern-, Angst- und Pionieraufschläge genommen werden, wie die Erhebungen auch zeigten (vgl. Kap.4.3).

Insgesamt kommen die – relativ vorsichtigen - Kostenschätzungen zu dem Ergebnis, dass die Gesamtkosten der hinterlüfteten Fassaden über eine 30-Jahresperiode bei der Referenzstärke von 12 cm und unveränderter Technologie und Montage um lediglich 10 % zurückgehen, d.h. um 0.35 % pro Jahr, während der Rückgang der grösseren Dämmstärken bei 14 %, d.h. bei durchschnittlich 0.5 % pro Jahr liegen könnte. Bei einer intensiveren Marktentwicklung – als hier unterstellt – wären auch etwas zügigere Kostenminderungen möglich, die aber hier nicht weiter quantifiziert wurden.

Tabelle 4.5-7 Geschätzte Kostenentwicklung für Wärmedämmung von hinterlüfteten Fassaden mit Steinwolle (in Preisen von 2000), 2000 -2030

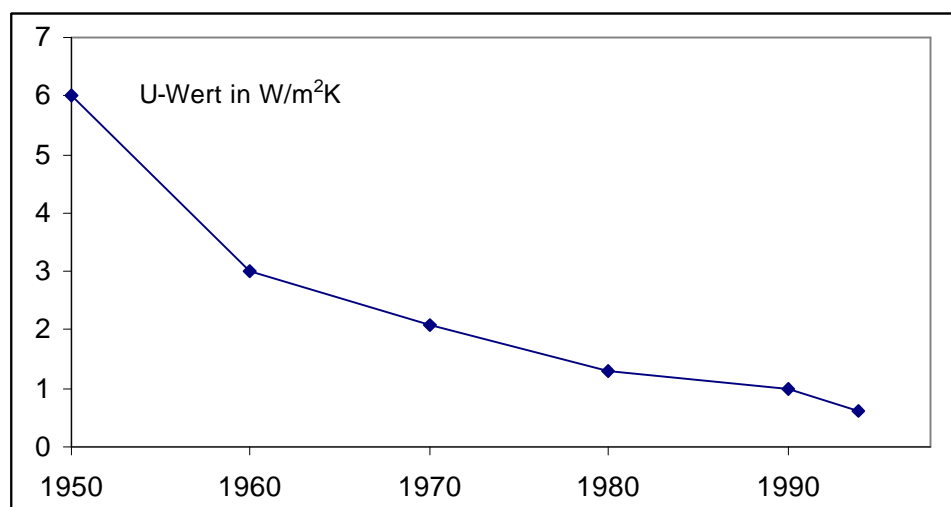
Kosten- und Materialart	2000	2010	2020	2030
Dämmmaterial in CHF/m <sup>2</sup>				
- 12 cm, Steinwolle	23.-	22.-	21.-	22.-
- 20 cm, Steinwolle	38.-	36.-	34.-	34.-
- 30 cm, Steinwolle	55.-	52.-	49.-	50.-
Gerüst, Vorbereitung, Zubehör				
- 12 cm	20.-	20.-	20.-	20.-
- 20 cm	23.-	23.-	23.-	23.-
- 30 cm	27.-	26.-	25.-	25.-
Unterkonstruktion				
- 12 cm	57.-	49,50	47.-	45.-
- 20 cm	58.-	54.-	50.-	47.-
- 30 cm	67.-	62.-	58.-	54.-
Dämmmaterialmontage				
- 12 cm	15.-	14,50	14.-	13,50
- 20 cm	25.-	23,50	22.-	20.-
- 30 cm	33.-	30,50	28,50	26.-
Kleinfaserplatten und Montage	86.-	83.-	81.-	80.-
Fensterleibungen, Anschlüsse				
- 12 cm	37.-	35.-	32.-	30.-
- 20 cm	40.-	37.-	35.-	33.-
- 30 cm	44.-	41.-	38.-	35.-
<b>Total</b>				
- 12 cm	234.-	224.-	215.-	210.-
- 20 cm	272.-	257.-	245.-	234.-
- 30 cm	313.-	295.-	280.-	270.-

Quelle: Schätzungen und Berechnungen des CEPE

### 4.5.3 Fenstersysteme

#### a) Bisherige Entwicklung

Das Fenster ist ein typisches Beispiel verbesserter technischer Leistungsfähigkeit und dies zu Preisen, die seit vielen Jahren nominell ungefähr konstant blieben oder gar gesunken sind. Die U-Werte der Fensterverglasungen sind von  $6.0 \text{ W/m}^2\text{K}$  im Jahr 1950 über  $3.0 \text{ W/m}^2\text{K}$  im Jahr 1960 auf  $0.5 \text{ W/m}^2\text{K}$  in der Gegenwart gesunken (vgl. Abbildung 4.5-2), diejenigen von Zweischeiben-Gläsern von  $0.3 \text{ W/m}^2\text{K}$  in 1970 auf  $1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$  bis heute. Dies entspricht einer durchschnittlichen technischen Verbesserung von 3.3 % pro Jahr in diesen drei Jahrzehnten. Die Fortschritte in der Rahmenkonstruktion waren nicht so schnell, so dass sich die U-Werte der Fenstersysteme jährlich um durchschnittlich 1.5 bis 1.8 % pro Jahr verbesserten, je nach Material und konstruktiver Lösung dieser Zweischeiben-Fenstersysteme.



Quelle: Führendes Glasherstellungsunternehmen

Abbildung 4.5-2 Entwicklung der U-Werte von Fensterverglasungen (ohne Berücksichtigung der Rahmen), 1950-2000

Da die erhobenen Kostenangaben jeweils in nominellen Preisen waren, wurden sie zunächst auf Preisbasis 2000 mit geeigneten Preisindizes umgerechnet (z.B. Schweizer Baudokumentation, 1994; BFS, 1997). Wo dies möglich ist, wird jeweils auch die Information über die technische Verbesserung der Wärmeschutzinvestitionen gegeben. Die Dynamisierung der Investitionskosten ist in diesem Bericht noch rudimentär und könnte durch weitere Recherchen und Differenzierungen verbessert werden, beispielsweise müssten Technologiesprünge wie die Beschichtung von Zweiglas-Systemen oder in Zukunft die Edelgasanwendung detaillierter behandelt werden.

Interessant bei der Entwicklung der Kosten ist, dass die Kostensteigerung durch Beschichtung der Gläser infolge von Produktivitätsfortschritten bei der eigentlichen Fensterfabrikation mehr als überkompensiert werden konnte. Wesentlicher Grund dafür ist die Kapitalkosteneinsparung, die aufgrund der immer schneller produzierenden Herstellungsmaschinen möglich wurde. Während 1985 noch mit  $3 \text{ h/m}^2$  für die Herstellung gerechnet wurde, sind es heute bei den modernen Fensterstrassen weniger als  $1 \text{ h/m}^2$ .

Betrachtet man die reale Preisentwicklung eines Standardfensters (ohne Baustellenanlieferung und Montage) in den letzten 30 Jahren, so betrug die Kostendegression im Durchschnitt 1% pro Jahr (vgl. Tab. 4.5-8). Nach den Angaben einer Holzfensterherstellers dürfte die Kostendegression in den letzten 15 Jahren allerdings etwas abgenommen haben (0,75%/a; vgl. Tab. 4.5-9), möglicherweise im Gegensatz zu Fenstern mit Kunststoffrahmen.

Tabelle 4.5-8 Kosten zur Fensterherstellung 1970 und heute, nominale und reale Werte, in CHF/m<sup>2</sup> Standardfenster (U-Wert 1970 ca. 2.5 bis 3.0 W/m<sup>2</sup>K, heute ca 1.3 W/m<sup>2</sup>K)

	Glas	Material, Beschichtung	Fenster- werk	Montage inkl. Transport	Kalk. Kosten- deckungsbeitrag	Total
1970						
- nominal	150	70	120	60	80	480
- real <sup>1)</sup>	202 <sup>2)</sup>	94 <sup>2)</sup>	135 <sup>3)</sup>	80 <sup>2)</sup>	90 <sup>3)</sup>	601
2000	100	100	80	80	90	450
<sup>1)</sup> in Preisen von 2000 <sup>2)</sup> bereinigt mit Produzentenpreisindex verarbeitende Produktion						
<sup>3)</sup> durchschnittlicher Preisindex für Wohnbautenerstellung						

Quelle Interview mit Vertreter SZFF

Tabelle 4.5-9 Preisentwicklung von Holzfenstern mit Zwei- und Dreifachverglasung (in CHF/m<sup>2</sup>) und technische Entwicklung, 1985-2001

Preisentwicklung in CHF/m <sup>2</sup>		1985	1990	1993	1996	1999	2001	Änderung %/a
- nominal	IV	390	400	400	400	400	410	-
- real	IV	4533	442	429	416	404	406	0,75
- nominal	3fach IV	430	485	485	505	505	495	-
- real		500	536	520	525	510	490	0,13
U-Wert Glas <sup>1)</sup>	IV	3.0	1.5	1.2	1.1	1.1	0.9	6,5
	3fach IV	2.0	1.1	0.7	0.5	0.5	0.5	8,8
<sup>1)</sup> Die angegebenen Glas-U-Wert stellen jeweils den Bestwert dar und nicht die Marktdurchdringung								

Quelle: Führender Hersteller von Holz- und Holzmetallfenstern ()

Die Preisentwicklung der Zweischeibenverglasung verlief bei etwa konstanter Nachfrage von 2.6 bis 2.9 Mio m<sup>2</sup> Isolierglas pro Jahr während der letzten drei Dekaden relativ bewegt: preisbereinigt (in 2000er Preisen) nahmen die Preise von rd. 160.- CHF/m<sup>2</sup> auf 65.- CHF/m<sup>2</sup> trotz des o.g. technischen Fortschritts erheblich mit durchschnittlich um 2.7% jährlich ab (vgl. Tab. 4.5-10). Bezieht man diesen Effekt auf Skalen- und Lerneffekte, so wäre der Degressionskoeffizient bei etwa 0.85 über die Zeitspanne seit 1970. Allerdings war er in den 90er Jahren etwas grösser, wovon aber für die Zukunft infolge des Reifegrades dieser Technik nicht ausgegangen wird. Unterstellt man für die Zukunft eine vergleichbare Kostendegression, so würden sich ohne weiteren Technologiesprung die Kosten für die Doppelverglasung in den kommenden 30 Jahren noch einmal um 15% auf etwa 55.- bis 50.- CHF/m<sup>2</sup> reduzieren. Hier wird die Reife dieser



Technologie deutlich, aber auch die Frage nach neuen Isolierglasscheiben mit grösseren Kostenreduktionspotenzialen.

Die Preisentwicklung der Dreifachverglasung bestätigt die vielen Beobachtungen der Erfahrungskurven: bei gleichem technischem Standard und neuer Technologie verläuft die Degression mit 1.5%/a zwischen 1970 und 1990; der Technologiesprung ab 1996 führt zu höheren Preisen, die aber wieder deutlich rückläufig sind (Tab. 4.5-10).

Bei den dreifach verglasten Holzfenstern ist der Preis während der letzten 15 Jahren in etwa konstant geblieben, obwohl der U-Wert der eingebauten Verglasung sich um den Faktor 4 verbesserte. Die Halbierung des U-Wertes zwischen 1985 und 1990 machte sich preislich am deutlichsten bemerkbar (vgl. Tab. 4.4-9). Allerdings liegt der Marktanteil der dreifach verglasten Fenster heute, auch 10 Jahre nach der Markteinführung der 3-fach IV-Gläser, erst bei etwa 7%. Hier sind deshalb noch deutlich höhere Kostendegressionen als bei Zweifachverglasungen zu erwarten (vgl. Tab. 4.4-11).

Tabelle 4.5-10 Preisentwicklung und technische Entwicklung von Zwei- und Dreifach-Verglasungen, 1970-2000

Werte CHF/m <sup>2</sup>	in	1970	1980	1985	1990	1993	1996	1999	2001
- nominal	IV, Ug 1.1	120	100	90		80			65
- real		160	122	105		86			64
	3fach	IV U-Wert 2.2 – 1.8 W/m <sup>2</sup> K				IV 0.5 W/m <sup>2</sup> K			
- nominal		100	90		80			150	120
- real		135	110		99			152	120

Quelle: Führender Hersteller von Isoliergläsern

Tabelle 4.5-11 Preisentwicklung und technische Entwicklung von Zwei- und Dreifach-Verglasungen, 1970-2000, nominelle Preisangaben, CHF/m<sup>2</sup>

	1970	1980	1985	1990	1993	1996	1999	2001
2-fach IV	60	60	60	60	60	60	60	65
2-fach IV mit Wärme- schutzbeschichtung			150	150	130	110	110	120
3-fach IV		95	95	95	95	95	95	105
3-fach IV mit Wärme- schutzbeschichtung				300	260	215	215	240

Quelle: Führender Hersteller von Isoliergläsern

Tabelle 4.5-12 Entwicklung der relativen Produktionsmengen von Zwei- und Dreifachverglasungen, 1970-2000, Angaben in %

	1970	1980	1985	1990	1993	1996	1999	2001
2-fach IV	100	97	82	38	27	17	14	13
2-fach IV mit Wärmeschutzbeschichtung			3	60	70	78	80	80
3-fach IV	3	15						
3-fach IV mit Wärmeschutzbeschichtung				2	3	5	6	7

Quelle: Führender Hersteller von Isoliergläsern

### b) Kostenschätzungen 2000-2030

Die modernen Dreifachverglasungen mit U-Werten um  $0.5 \text{ W/m}^2\text{K}$  starteten Ende der 90er Jahre mit ähnlichen Preisen wie die Preise der Doppelverglasungen Anfang der 70er Jahre, nämlich mit etwa  $160.- \text{ CHF/m}^2$ . Es wird davon ausgegangen, dass die Lern- und Skaleneffekte auch bei diesem Dreifachglas die  $\text{m}^2$ -Preise in den kommenden drei Jahrzehnten vergleichbar senken werden, d.h., es wird ein Degressionskoeffizient von etwa  $0.85$  bei einem Produktionsbeginn von 1996 und relativ kleinen Stückzahlen unterstellt.

Für die zukünftige Kostenentwicklung der Fenster mit einem U-Wert von  $1.4 \text{ W/m}^2\text{K}$  und 2 Flügeln mit  $4 \text{ m}^2$  wird ein geringerer Kostendegressionseffekt angenommen, da die Kosten der Rahmenherstellung in der Vergangenheit nicht in dem Masse wie die Glaserzeugungskosten gesenkt werden konnten und wahrscheinlich auch in Zukunft kaum bei gleicher Funktionalität des Fensters grössere technische Fortschritte bei der Fertigung und dem Einbau des Fensters möglich erscheinen. Deshalb wird von einem ähnlichen Rückgang der realen Preise mit einem Degressionskoeffizienten von  $0.9$  ausgegangen, wie er in der Vergangenheit beobachtet wurde. Ausserdem wurde davon ausgegangen, dass die Baustellenanlieferung und Montage kostenseitig nicht mehr verbessert werden kann. Dies transponiert sich in einen Kostenrückgang in realen Preisen um etwa  $0.35\%$  pro Jahr, d.h. Preise für Holzfenster mit U-Wert von  $1.4$  um  $600.- \text{ CHF/m}^2$  in 2000 und  $540.- \text{ CHF/m}^2$  in 2030 (vgl. Tab. 4.5-13).

Bei den besser gedämmten Holzfenstersystemen wurden für die Verglasung und die Rahmenherstellung höhere Rationalisierungserfolge unterstellt, z.B. beim wärmegeprägten Holzrahmen von  $990.- \text{ CHF/m}^2$  in 2000 auf  $640.- \text{ CHF/m}^2$  in 2030, d.h.  $1.4\%/a$ . Für Holz-Metallfenster dürften die Werte - bei einer sich leicht vermindernenden Preisdifferenz zum Holzfenster - sich proportional entwickeln (vgl. Tab. 4.5-11). Auch hier muss betont werden, dass die Kostendegressionen in Zukunft durch höhere Stückzahlen als unterstellt deutlicher ausfallen könnten. Hierbei mögen kleinere und grössere Innovationen am Produkt oder am Herstellprozess weitere Reduktionen oder technische Verbesserungen ermöglichen.

Weiteres Verbesserungspotential kann über die Abstandhalter realisiert werden. Seit Beginn der 1990er Jahre wurden Alu-Abstandhalter mit einem linearen Psi-Wert von  $0.07 \text{ W/m}^2\text{K}$  verwendet. Heute sind Abstandhalter (spacer) aus Edelstahl und Kunststoff auf dem Markt, die Psi-Werte von  $0.05$  bzw.  $0.04$  oder noch tiefer haben. Die Mehrpreise von Fenstern mit diesen Abstandhaltern sind relativ gering ( $12$  bis  $30 \text{ CHF/m}^2$ ), so gering, dass sie bei den Regressionsanalysen kaum als erklärende Variable in Erscheinung traten (Kap. 4.3.7). Trotzdem werden sie laut Fensterhersteller kaum nachgefragt, d.h. bei der Devisierung kaum verlangt. Sie würden jedoch, gerade bei Fenstern mit tiefen Glas-U-Werten, eine ca.  $15\%$ ige Verbesserung des Fenster-U-Wertes bringen. (vgl. Tabelle 4.5-14).

Ein neuer technologischer – und zunächst auch preislicher – Sprung wären Verglasungen mit selektiven Folien zwischen den Gläsern oder vakuumierte Gläser, die derzeit am Markt schon erhältlich sind oder sich in der Pilot- bzw. Demonstrationsphase befinden. Auf diese Fenstersysteme und ihre mögliche Kostenentwicklung wurde in diesem Bericht noch nicht eingegangen, weil die Kosten der ersten Serie noch nicht bekannt sind.

Tabelle 4.5-13 Dynamisierung der Investitionskosten für doppeltes und Dreifach-Wärmeschutzglas und Holzfenster 2000 -2030 (CHF/m<sup>2</sup>) in Preisen von 2000

Investition	2000	2010	2020	2030
Glas				
- Doppelglas	61.-	61.-	57.-	55.-
- Dreifachverglasung <sup>1)</sup>	130.-	105.-	85.-	75.-
Fenstersystem <sup>2)</sup> mit				
- Holzrahmen, U-Wert 1,4	450.-	425.-	405.-	390.-
- Holz-Rahmen, U-Wert 1,24 <sup>3)</sup>	530.-	480.-	430.-	400.-
- Holzrahmen, U-Wert 1,1 <sup>1)</sup>	585.-	535.-	470.-	440.-
- Holzrahmen, U-Wert 0,8 <sup>1)</sup>	830.-	600.-	530.-	490.-
Baustellenanlieferung, Montage				
- Doppelglas	150.-	150.-	150.-	150.-
- Dreifachglas	160.-	160.-	155.-	150.-
Total, Fenstersystem <sup>2)</sup>				
- Holzrahmen, U-Wert 1,4	600.-	575.-	555.-	540.-
- Holz-Rahmen, U-Wert 1,24 <sup>3)</sup>	690.-	640.-	585.-	550.-
- Holzrahmen, U-Wert 1,1 <sup>1)</sup>	745.-	695.-	625.-	590.-
- Holzrahmen, U-Wert 0,8 <sup>1)</sup>	990.-	760.-	685.-	640.-
<sup>1)</sup> Glas-U-Wert 0,5 <sup>2)</sup> Doppelflügel <sup>3)</sup> Glas-U-Wert 0,7				

Quelle: CEPE

Tabelle 4.5-14 Resultierender Fenster-U-Wert in Funktion des Abstandshalter bei verschiedenen Glas- und Rahmen-U-Werten, 1.7m<sup>2</sup> Fensterfläche, 7.7 m Glasrandlänge

Abstandshalter:	Rahmen-U-Wert = 1.5 W/m <sup>2</sup> K			Rahmen-U-Wert = 0.8 W/m <sup>2</sup> K		
	0.07	0.05	0.035	0.07	0.05	0.035
Glas-U-Wert <b>1.1</b>	1.52	1.43	1.37	1.31	1.22	1.16
<b>0.9</b>	1.38	1.29	1.23	1.17	1.08	1.02
<b>0.7</b>	1.24	1.15	1.09	1.03	0.94	0.88
<b>0.5</b>	1.10	1.01	0.95	0.89	0.80	0.74

Quelle: Berechnungen CEPE

#### 4.5.4 Lüftungsanlagen

Die Fülle technischer Lösungen zu einer angemessenen Raumlüftung bei gut gedichteten Fenster- und Türsystemen sind zu zahlreich, um sie in diesem Bericht systematisch einer Analyse zu zukünftigen Kosten zu unterziehen. Die Kosten der Lüftungsanlagen haben lt. Aussagen von Fachleuten in den 1990er Jahren nominell um etwa 20 bis 30 % zugenommen, d.h. inflationsbereinigt zwischen 0 und 10 %. Die Qualität der Geräte hat gegen Ende der 1990er Jahre zugenommen (bessere Wärmerückgewinnung und bessere Ventilatoren). Deutlich abgenommen dagegen (etwa Halbierung) haben die Planungs- und Bauaufsichtskosten in den vergangenen 10 Jahren. Dies dürfte auch durch eine Verschiebung der beteiligten Unternehmen von den klassischen Raumlüftungsfirmen zu den Sanitär- und Heizungs-Installationsfirmen zurückzuführen sein (Systemanbieter). Die technische Demonstrationsphase der Komfortlüftungen ist seit Beginn dieses Jahrzehnts abgeschlossen; noch sind die Stückzahlen gering, aber die Marktdiffusion dürfte in diesem Jahrzehnt beginnen.

Es fehlen wegen der erst begonnenen Marktdiffusionsphase der Komfortlüftungen neben repräsentativen Angaben zur Vergangenheitsentwicklung der Kosten auch Zahlen der installierten Einheiten nach einzelnen Anwendungen (Neubau, Modernisierung) und Techniklinien sowie Wohnungsgrößen (Anzahl der Zimmer).

Die Analyse in Kap. 4.3.10 ergab, dass bei Neubauten mit einer Einsparung von gut 40 bis knapp 70 MJ/m<sup>2</sup> a an Heizwärme zu rechnen ist und bei Sanierungen mit 50 bis 150 MJ/m<sup>2</sup> a. Hierzu sind die Investitionskosten mit etwa 60.- bis 130.- CHF je m<sup>2</sup> Wohnfläche und Unterhaltskosten zwischen 130.- je Wohnung (Mehrfamilienhäuser) bis zu 300.- CHF (Einfamilienhäuser) pro Jahr erheblich; sie weisen bereits darauf hin, dass auch andere Aspekte als Energieeinsparung mit in die Bewertung des Nutzens von Lüftungsanlagen einfließen müssen, um von angemessenen Kosten für die Lüftungsanlagen sprechen zu können (vgl. Kap. 4.6).

Als Beispiel für die Dynamisierung wurden die zentrale Komfortlüftung und die Komfortlüftung pro Wohnung für Neubauten herausgegriffen.

Tabelle 4.5-15 Investitions-Kosten einer zentralen Komfortlüftungsanlage (mit Deckenverteilung) und Wärmerückgewinnung, in Preisen von 2000) 2000-2030

Kostenart	2000	2010	2020	2030
Grundkosten je Wohnung				
- Anteil Geräte mit Steuerung und Schalldämpfer	3'300.-	2'700.-	2'400.-	2'250.-
- Aussenluft, Fortluft	2'000.-	1'760.-	1'610.-	1'500.-
- Projektierung, Bauaufsicht	1'500.-	1'350.-	1'250.-	1'200.-
- Bauleistung	1'000.-	930.-	880.-	840.-
3,2 Zimmer-Wohnungsgrösse				
- Leitungen	1'280.-	1'100.-	1'000.-	930.-
- Auslässe	320.-	300.-	290.-	280.-
- Verteilung über Decke	960.-	860.-	800.-	750.-
Summe	10'360.-	9'000.-	8'230.-	7'750.-

Quelle Kosten Jahr 2000: HTA Luzern, Annahmen und Berechnungen zu den künftigen Kosten: CEPE

Die grössten Kostendegressionen sind infolge wachsender Stückzahlen bei der zentralen Anlage selbst und ihrer Steuerung sowie dem Schalldämpfer zu erwarten (vgl. Tab. 4.5-15). Relativ geringe Lerneffekte sind bei den Projektierungs- und Bauaufsichtsleistungen und moderate Rationalisierungseffekte mit geringerer Kostendegression bei allen übrigen Leistungen zu erwarten. Insgesamt könnten mit diesen Annahmen die Kosten in der jetzigen Dekade um 1.4% jährlich rückläufig sein und zwischen 2020 und 2030 nur um etwa 0,6 % jährlich. Bei langsamer Marktdurchdringung, so wurden die Zahlen kommentiert, könne man allerdings nur bei den Geräten und Auslässen die angenommenen Degressionen erwarten, da bis Ende dieses Jahrzehnts eine erforderliche Qualitätszunahme (Schall, Leckagen, Zugänglichkeit für Reinigung und die Wärmedämmung) die erreichbaren Degressionseffekte kompensieren dürften. Manche der Gesprächspartner erachten diese unterstellte Kostenentwicklung in Tab. 4.5-15 als optimistisch.

#### 4.5.5 Neubauten: Dynamisierung des bottom-up Ansatzes durch neue Technologien

Die zunehmend grösseren Wärmedämmstärken lassen sich vor allem bei skelettartigen Baukonstruktionen in die Gebäudehülle integrieren; hierzu bietet der Holzbau sehr gute Möglichkeiten. Vermehrt dürfte auch im Wohnungsbau die vorgehängte Fassade zur Anwendung gelangen, um so die Vorteile der massiven Tragkonstruktion (Betondecken, Innenwände und von der Fassade zurückgesetzte Stützen) und der Leichtbauweise der Gebäudehülle zu nutzen. Dies bedeutet eine zunehmende Produktion der benötigten Materialien und zusätzliche Lerneffekte bei der Planung und Installation, wie sie im Trend für die Kostenschätzungen angenommen wurden (vgl. Tabelle 4.5-7).

Die transparente Wärmedämmung ist z.T. aus ästhetischer Sicht noch wenig akzeptiert; sie dürfte sich aber bei entsprechenden architektonischen Konzepten und weiter reduzierten Herstellungs- und Installationskosten künftig besser etablieren. Es zeigt sich hier das Problem der erforderlichen Kostenreduktion in einem Pionier- und Einführungsmarkt, der aber durch verschiedene technische Optionen anderer Wärmedämmsysteme (z.B. verbessertes Polystyrol, Vakuum-Isolation) sehr klein bleiben könnte und damit die erforderlichen Kostenreduktionen entlang der Erfahrungskurve nicht erreichen kann. Welches der Systeme und Produkte sich durchsetzen wird, kann im Moment noch nicht abgeschätzt werden. Die Technik der Vakuum-Isolation ist vielversprechend und attraktiv, insbesondere für die Architekten aufgrund der hohen Dämmwirkung bei relativ geringer Dämmstärke bzw. Bautiefe der Paneel-Elemente. Die Themen und Titel der aktuellen Forschungsberichte im Bereich Vakuum-Isolation verdeutlichen in etwa den Stand der Technik im Innovationsprozess. Die Markteinführung hat noch nicht stattgefunden, und deshalb konnten zu dieser technischen Option noch keine Kostenerhebungen und keine zeitliche Dynamisierung durchgeführt werden.

Die neueren Haustechnik-Konzepte mit Kühldecken, Flächenheizungen in Wänden und kombinierten Heiz-Kühl-Systemen (mit Vorlauftemperaturen von 23-25° C) dürften künftig nicht nur im Bürobau, sondern auch im Wohnungsbau Einzug halten und an Bedeutung gewinnen. Kostenseitig wurde diese technologische Entwicklung wegen ihrer geringen Bedeutung in dieser Analyse beim bottom-up Ansatz noch nicht berücksichtigt. Hier sollte man zunächst eine Kostenanalyse für den Nichtwohnbereich machen, um dann auf den Wohnbereich mit besserem empirischen Material schliessen zu können.

#### 4.5.6 Dynamisierung von Neubaukonzepten durch industrielle Vorfertigung

Man kann in der heutigen Bautätigkeit eine zunehmende Tendenz zur Standardisierung beobachten. Dabei unterscheidet sich diese grundsätzlich von der letzten Standardisierungstendenz der 60er- und 70er Jahre. Diese hatte sich aus den Bestrebungen der Moderne

entwickelt und versuchte eine Kostenreduktion durch Rationalisierung im Bausektor. Die Initiative zu dieser Entwicklung ging dabei primär von der Industrie aus; es ging um Steigerung der Quantität bei gleichzeitigem Mangel an Arbeitskräften. Das Ziel waren vorgefertigte Elemente (vgl. die Plattenbauten hierzulande z.B. von Göhner in Greifensee, Rümlang) oder ganzer Häuser (Entwicklung von Fertighäusern durch zahlreiche Hersteller). Der Ort, d.h. der Bauplatz als Bestandteil eines Perimeters, einer bebauten Umgebung, spielte damals kaum eine Rolle für die Projektierung des Objektes.

Heute kommt dem Ort verstärkt eine zentralere Bedeutung im Entwurfsprozess zu. Die Standardisierung findet heute innerhalb einer zunehmenden Individualisierung statt: während sich das Objekt individuell an den örtlichen Gegebenheiten anpasst, sucht man im Innern, d.h. in Tragstruktur und Konstruktion, nach einer Standardisierung. Dies führt wieder zu Typologien zurück, die in der traditionellen Baugeschichte wie auch in der Moderne ihre Anwendung fand: eine klare Trennung von rasterartig gegliederten Tragelementen und dazwischen sich frei bewegenden nicht tragenden raumtrennenden Elementen.

Nebst der Rückbesinnung auf ökonomische Grundrisse liegt das Gewicht heute vor allem auf der Vorfertigung von Bauteilen; diese begründet sich im rationellen Bauprozess: komplexe konstruktive Bauteile werden unter günstigen Rahmenbedingungen in Hallen erstellt, die Bauzeit vor Ort, d.h. der Witterung ausgesetzt, verkürzt sich dabei auf wenige Tage. Die Qualität des Bauwerks kann dadurch erheblich erhöht werden. Die Vorfertigung dürfte jedoch in den nächsten zwei Jahrzehnten kaum zu jenen grösseren Kosteneinsparungen führen, die die Baufachleute sich zum Teil erhoffen. Gerade im Hinblick auf zunehmende Energieeffizienz könnte die Vorfertigung jedoch eine interessante Option sein, wenn z.B. an Stelle einer Wand mit zunehmend aufwändiger Befestigung des Dämmstoffs ein Wandelement tritt, bei dem der Dämmstoff in die Konstruktion des vorgefertigten Elements integriert wird. Ein weiterer Vorteil dieser Bauweise ist die geringere Bautiefe des Wandelements verglichen mit der Massivbauvariante und aussen angebrachter Wärmedämmung.

Das hierfür notwendige Umdenken in Planung und Fertigung fand bis heute vor allem im Holzbau statt, hier wiederum schwergewichtig im Bereich des Einfamilienhauses. Die Standardisierung von Kleinstrukturen ermöglicht trotzdem einen hohen Flexibilitätsgrad in der Umsetzung, was zu einer hohen Diversität führt. Zur weiteren Steigerung der Kosteneffizienz werden die vorgefertigten Strukturen immer grösser, Modulkonstruktionen finden sich immer öfters in Fachzeitschriften besprochen. Diese addierbaren Module führen entsprechend zu einer Reduktion der Diversität, sowohl in der Gestaltung der Grundrisse wie auch im ästhetischen Ausdruck des Hauses.

Der massive Preisdruck auch im Sektor der Massivbauweise ruft auch hier zunehmend nach Standardisierung und Automatisierung. Vereinzelt werden heute bereits auf der Baustelle solche Fertigungsmethoden wie z.B. Mauerwerksroboter angewandt. Doch lassen die heute üblichen Rahmenbedingungen auf dem Bauplatz, bedingt durch Abläufe, Ausführungs- und Projekttypen das in diesen Fertigungsmethoden vorhandene Rationalisierungspotenzial nicht ausschöpfen. Es wird auch hier notwendig sein, eine vollständig neue, prozessorientierte Systemplanung zu entwickeln. Dem stehen allerdings die kleinen Betriebseinheiten der meisten Baufirmen mit wenig qualifiziertem Personal entgegen.

Um hier nicht wieder in die gleiche Entwicklung zu verfallen, die gleichen Fehlern und Schwachstellen zu wiederholen, die in den 1960er und 1970er Jahren zum Verlassen dieser Bauweise geführt haben, ist eine ganzheitliche Problemlösung dringend notwendig; der Anbieter (z.B. Generalunternehmer) präsentiert sich dem Kunden gegenüber zunehmend als fachübergreifender Systemanbieter vollständiger Lösungen. Im Bereich des Marketing hat diese Entwicklung mit der zunehmenden Profilierung der Generalunternehmer als

Totalunternehmer bereits eingesetzt, im Bereich der Fertigung hinkt diese Entwicklung jedoch noch weit hinterher. Betrachtet man gesamtheitlich den Gestaltungsspielraum sowohl im finanziellen wie auch im gestalterisch-konstruktiven Bereich eines Projektes im Zeitablauf von Projektierung bis Ausführung, so liegt das grosse Sparpotenzial vor allem im frühen Stadium der Projektierung. Voraussetzung für eine optimale Ausschöpfung dieses Sparpotenzials ist die intensive Zusammenarbeit in Form eines Know how-Transfers von Planung, Fertigung und Einbau von Elementbauteilen; die Erfahrung der Ausführenden muss ebenfalls integrierender Bestandteil der Planung werden. Der Fertigungsprozess von Bauteilen muss somit entwurfsbestimmend werden, unabhängig, ob es sich um einen Holz- oder Massivbau handelt.

Aufgrund von (vielleicht nicht ganz repräsentativen) Beobachtungen am Immobilienmarkt lassen sich eine zunehmende Nachfrage und vermehrte Angebotsargumente hinsichtlich Minergie-Standard feststellen. "Minergie-Standard ist im EFH-Bereich ein Muss", sagen manche Architekten. Auch bei der öffentlichen Hand wird mancherorts heute dieses Qualitätsmerkmal für Neubauten vorgeschrieben. Derzeit sind etwa 5% der Neubauten mit dem Minergie-Standard vergleichbar. Somit kann man annehmen, dass bis 2010 der Minergie-Standard sich mit einem relativ grossen Anteil bei den Neubauten durchsetzen könnten.

Dies hätte erhebliche Auswirkungen auf die Kostendegression bei hocheffizienten Dämm-Materialien und Fenstersystemen, wie sie in Kap. 4.5.1 bis 4.5.3 noch nicht unterstellt wurden. Insofern sind die in diesem Kapitel dargestellten Kostenentwicklungen als relativ konservativ einzuschätzen. Ab 2010 bis 2020 könnte sich zudem der Minergie-P oder der Passivhaus-Standard als häufig gewählte Option im Neubau durchsetzen (in Deutschland sind bereits etwa 1000 Häuser mit diesem Standard gebaut), so dass zusätzliche Mengendegressionen bei den Wärmeschutzinvestitionen, den Dämm- und Fenstersystemen und den Lüftungsanlagen zu erwarten sind. Hierzu quantitative Abschätzungen zu machen, würde ein formalisiertes Kostenmodell erfordern, um alternative Mengen-Kostendegressionen schnell ermitteln zu können. Dies zu entwickeln, lag ausserhalb der hier finanzierten Arbeiten.

#### 4.6 Nicht-energetische Nutzen, Co-Benefits

Erneuerungen von Wohngebäuden werden sehr selten allein im Hinblick auf energetische Verbesserungen vorgenommen, und die Erneuerungen an der Gebäudehülle umfassen in aller Regel mehr als nur energierelevante Massnahmen (z.B. Verschönerung der Fassaden, Badrenovierungen, Ausbau von Dachgauben, Feuchtigkeitsschutz von Kellerwänden). Hinzu kommt, dass Wärmeschutz- und Energieeffizienz-Investitionen häufig in mehrfacher Hinsicht einen *zusätzlichen Nutzen* (Co-benefits) zu den Energiekosteneinsparungen mit sich bringen; diese zusätzlichen Nutzen müssen schon aus betriebswirtschaftlichen Gründen in einem gesamtheitlichen Kontext betrachtet werden (vgl. Ostertag u.a. 1999).

Die ökonomische Bewertung derartiger zusätzlicher Nutzen (z.B. Wertsteigerung des Gebäudes, bessere Vermietbarkeit, Komforterrhöhung (angenehme Wandtemperaturen im Winter und Sommer, gut glüftete Räume), Verbesserung der Sicherheit oder Verdunklungsmöglichkeit am Tage, Verbesserung des Lärmschutzes; vgl. Tabelle 4.6-1) wird in einzel- und energiewirtschaftlichen Bewertungen bisher kaum explizit gemacht; sie ist in der Regel auch nur mit erheblichem Mehraufwand möglich und wird selbst vom Investor meist nur teilweise quantitativ, ansonsten lediglich qualitativ in seine Entscheidungen einbezogen (IWÖ 2000); der Eigennutzer zieht seine Präferenzen mit ein, und der Vermieter seine Einschätzung über zusätzlich zu erzielende Mieteinnahmen, die verbesserte Vermietbarkeit oder die Wertsteigerung infolge des erhöhten Wohnkomforts (Müller 2000). Dieses Beispiel zeigt bereits, dass die ökonomischen Bewertungsansätze für private Gebäudebesitzer, Immobiliengesellschaften und Mieter zumindestens in ihrer formalen quantitativen Form verschieden sein können, wenn nicht aus Gründen der Mietgesetzgebung sein müssen (Graf/Sager 1998).

Es gibt weitere Aspekte, z.B. eine Absicherung der Warmmiete gegen langfristig kaum absehbare Steigerungen der Energiepreise (auch wenn sie explizit in den Mietverhandlungen heute selten eine Rolle spielen, wohl aber nach den Ölpreissteigerungen der Jahre 1973 und 1980 von Bedeutung waren), verminderte Leerstandsrisiken und damit eine verbesserte Bonität bei den Banken als Kunde für Fremdkapital nach dem Baseler Abkommen, geringere Mieterfluktuation, ökologisches Image des Gebäudeeigners oder der Mieters. Nicht alle diese Aspekte werden im folgenden behandelt, wenngleich sie in der Praxis bei den Entscheidungen der verschiedenen Akteure eine Rolle spielen mögen (z.B. Graf/Sager 1998, ecoplan, 2000).

Für einzelne Bauelemente lassen sich weitere begleitende Nutzen beobachten. Beispielsweise sind beim Fenster weitere Nutzen zu nennen:

- Das verminderte Ausbleichen von Teppichen, Möbeln etc. bei zweifach statt einfach beschichteten Fenstern. Die damage-weighted transmission reduziert sich laut Untersuchungen des Lawrence Berkeley National Laboratory um bis zu 50%.
- Das weniger häufige Auftreten von Kondenswasser am Glasrand bei Glasabstandshaltern aus Aluminium oder Kunststoff oder auf der Fensteroberfläche (bei 0°C Aussentemperatur beträgt die kritische relative Luftfeuchtigkeit, über der Kondensation auftritt, bei einer Doppelverglasung ohne Beschichtung 40%, Argon-Doppelverglasung 60%, bei einer Dreifachverglasung 75%; das Kondensationsrisiko wird also sukzessive reduziert).

Der Einbezug derartiger Nutzen in die formale ökonomische Bewertung scheidet nicht selten an den verfügbaren Informationen zur Quantifizierung dieser Effekte oder ihrer Monetarisierung. Hier ist deshalb noch ein hoher Forschungsbedarf, um im Erneuerungsalltag und der Energiepolitik zu sachgerechten Entscheidungen zu kommen (Brown, BP: „What gets measured, gets managed“).



Tabelle 4.6-1 Beispiele des nicht-energetischen Nutzens von Wärmeschutzmassnahmen und methodische Ansätze zu seiner Monetarisierung

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

Quelle CEPE

#### 4.6.1 Methodisches Vorgehen

Die Bestimmung des nicht-energetischen Nutzens erfolgt i.a. in einem dreistufigen Verfahren: Identifikation, Quantifizierung und Monetarisierung. Für die Quantifizierung muss zunächst von einem Referenzfall ausgegangen werden, der sich, ähnlich wie die Sanierungsfälle, auf verschiedene Typgebäude oder Modernisierungs- oder Neubaulalternativen definieren muss. Deshalb wird zunächst für jede Art des Zusatznutzens (vgl. Tabelle 4.6-1) eine Referenzerneuerung der Gebäudehülle und der Haustechnik definiert, die den technischen Stand und die übliche Investitionspraxis reflektiert (z.B. Putzausbesserung und neue Wandfarbe sowie Installation eines Niedertemperatur-Heizkessels und 'normale' Wärmeschutzverglasung). Der zusätzliche Nutzen einer Zusatzinvestition zählt dann nur insoweit, als er Komfort erhöhungen bedeutet oder andere Kosten (z.B. Einbruch- und Diebstahlversicherungen, Krankheitskosten) reduziert.

Die *Quantifizierung des Zusatznutzens* ist teilweise als Zwischenschritt zur Monetarisierung erforderlich desselben (z.B. Behaglichkeitszuwachs, ausgedrückt in einem Raumtemperaturabsenkungspotenzial, verminderter Lärmpegel in Dezibel, verbesserte Luftqualität in der Staub- und Aerosolkonzentration, erweiterte Wohnfläche in m<sup>2</sup>), teilweise aber nicht notwendig, insbesondere, wenn es sich um eine Ja-/Nein-Situation handelt (z.B. Komfortlüftung, Rollläden).

Die *Monetarisierung des Zusatznutzens* erfolgt - wo dies möglich ist - nach den traditionellen Möglichkeiten der ökonomischen Bewertung von Zusatznutzen (Co-Benefits) einer modernen

betriebswirtschaftlichen Kostenrechnung, d.h., entweder durch den Ansatz vermiedener Kosten oder der direkten ökonomischen Bewertung des Zusatznutzens (Ostertag u.a. 1999). Letzterer muss zum Teil auf die Methoden der Zahlungsbereitschaft (Willingness to Pay) oder Willingness to Sell zurückgreifen (z.B. Hohmeyer u.a., 1996).

Allerdings ist ein Teil des absehbaren Zusatznutzens nicht in die private Kostenrechnung mit einzubeziehen (z.B. vermiedene Krankheitskosten durch verminderten Lärm und durch bessere Luftqualität), weil die vermiedenen Kosten von vornherein externalisiert waren (z.B. durch die Krankenversicherung und die Lohnfortzahlung des Arbeitgebers im Krankheitsfall). Es muss daher versucht werden, derartige Unterscheidungen jeweils mit zu berücksichtigen.

Derartige Quantifizierungen und Monetarisierungen müssten für viele unterschiedliche Sanierungs- oder Neubaufälle unterschieden werden, da hierzu aber das Budget dieser Untersuchung nicht angelegt war, beschränkte sich die Monetarisierung exemplarisch auf jene nicht-energetischen Zusatznutzen gewählter Investitionen, die das Kostenbild der zusätzlichen Wärmeschutzmassnahmen merklich verändern oder wo die Monetarisierung relativ einfach möglich war. Zum nicht-energetischen Nutzen gibt es für einige Aspekte bereits eine Literatur (z.B. Korrelation zwischen Wandtemperatur und Behaglichkeitsstufen, zwischen Lärmbelastung und Krankheitshäufigkeit bestimmter Krankheiten und verminderter Leistungsfähigkeit). Diese Literatur wurde nur teilweise ausgewertet.

In einem abschliessenden Schritt werden für die ausgewählten Investitionsfälle die nicht-energetische Nutzen den Grenz- bzw. den Gesamtkosten der betrachteten Investition gegenübergestellt, um die *energierelevanten Netto-Zusatzkosten* zu ermitteln. Diese Ergebnisse dürften nicht nur für die Bewertung der Zusatzmassnahmen aus Sicht der öffentlichen Hand (und nicht nur der Energie- und Klimapolitik, auch der Gesundheitspolitik) von Bedeutung sein, sondern auch für die Wohnungswirtschaft, die Hersteller von Wärmeschutztechnologien und Planer, Architekten und Gebäudeeigner, die ihre Mieter bzw. Kunden mit genaueren Informationen zu den Nettokosten überzeugen können.

#### 4.6.2 Wohnkomfort durch verstärkten Wärmeschutz

Für die Quantifizierung des Zuwachses an Wohnkomfort orientiert sich das vorgeschlagene Konzept an empirischen Untersuchungen zur Behaglichkeit anhand der Temperaturunterschiede zwischen Wand und Raumlufttemperatur sowie der Strömungsverhältnisse im Wohnraum. Schon vor Jahren fand man heraus, dass eine Verminderung der Temperaturdifferenz zwischen der Wand eines Raumes und seiner durchschnittlichen Lufttemperatur von etwa 5°C bei gleichem Behaglichkeitsniveau eine Absenkung der Raumtemperatur um 1°C ermöglicht (Gertis, König, Erhorn, 198?). Zusätzlich wurde festgestellt, dass eine Verminderung der natürlichen Luftumwälzung im beheizten Wohnraum sowie der Luftventilation im Fensterbereich auf eine hygienisch erforderliche Luftwechselrate von 0.3 pro Stunde eine weitere Raumtemperaturabsenkung um etwa ein halbes Grad C bei gleichem Behaglichkeitsniveau erlaubt. (Fanger, ?)

Beispielhaft sei der Zusammenhang zwischen Oberflächentemperatur und U-Wert für verschiedene Fensterqualitäten dargestellt (siehe Tabelle 4.6-2). Daraus wird ersichtlich, dass der Nutzen vor allem zwischen dem Ausgangszustand eines typischen älteren Wohngebäudes ohne bisherige wärmeechische Erneuerung und der Referenzerneuerung zum Tragen kommt und dass der begleitende Grenznutzen zwischen guten und sehr guten Fenstern bzw. zwischen guten und sehr guten Wärmedämmungen weit weniger deutlich zunimmt.

Tabelle 4.6-2 Oberflächentemperaturen der raumseitigen Scheiben bzw. Wände bei einer Raumlufttemperatur von 20 °C

	U-Wert W/m <sup>2</sup> K	Aussentemperatur		
		0°C	-5°C	-11°C
2fach-Isolierglas	3.0	+12°C	+11°C	+8°C
Beschichtetes Wärmeschutzglas	1.3	+17°C	+16°C	+15°C
Beschichtetes Wärmeschutzglas	0.7	+18°C	+18°C	+17°C
Wärmedämmung Wand 8 cm	0.31			+18.8
Wärmedämmung Wand 14 cm	0.20			+19.3

Quelle Glas und Praxis – Kompetentes Bauen und Konstruieren mit Glas

Auf der Basis dieser Erkenntnisse wurden für ausgewählte Investitionsfälle (Minergiestandard gegenüber den jetzigen Bauvorschriften im Neubau) zwei typische Hauswand- und Dachwärmedämm-Investitionen sowie Wärmeschutzverglasung mit Referenz-/Minergie-Standard im Wohngebäudebestand) die jeweils typischen Differenzen für Temperatur und Luftwechselrate ermittelt und dann mittels der vermiedenen Wärmekosten ökonomisch bewertet.

Die Resultate sind privat verrechenbare Nutzen, welche durch eingesparte Wärmemengen, die durch eine entsprechende Raumtemperaturabsenkung (bei gleichem Wohnkomfort) möglich wird, mit 10 bis 50 MJ/m<sup>2</sup>.a oder bei 0.20 bis 1.10 CHF je m<sup>2</sup> Wohnfläche und Jahr ermittelt wurden; dabei steht der höhere Wert für eine sehr gute Wärmedämmung gegenüber einem nicht isolierten Ausgangszustand und der geringere Wert für den Zusatznutzen des Minergie-Standards gegenüber einem Referenzneubau (Wärmekosten mit jeweils 0.022 CHF/MJ = 8 Rp/kWh angenommen). Der Nutzen mit weniger als 1 Rp/kWh ist relativ gering.

Dieses Fallbeispiel zeigt bereits, dass in vielen Fällen der Grenznutzen der Co-Benefits auch -ähnlich wie der Grenznutzen auf der Energieseite - mit zunehmendem Wärmeschutz deutlich abnimmt (vgl. Abbildung 4.6-1).

### 4.6.3 Geringere Lärmbelastung

Lärm im Wohnbereich wird heute nicht nur von vielen Bewohnern als grösstes Umweltärgernis relativ zu anderen Umweltbeeinträchtigungen empfunden (Züricher Kantonalbank 1988), sondern ist auch ab einem bestimmten Lärmniveau für viele Krankheitserscheinungen mit beeinflussender Faktor. Beispielsweise sind im Kanton Zürich 14 % der Wohngebäude einem Lärmpegel von mehr als 56 dB ausgesetzt (Tiefbauamt Kanton Zürich, o.J), einem Lärmpegelbereich, ab dem sich viele Menschen gestört fühlen. Die gesundheitlichen Auswirkungen von Lärm reichen von Konzentrations- und Schlafstörungen bis zu psychosomatischen Krankheiten und Herzinfarkt.

Zweifach- oder Dreifachverglasung mit asymmetrischem Glasaufbau und spezielle Glasarten (Giessharz), die Erneuerung von Rolladenkästen sowie mineralisches (schweres) Wärmedämmmaterial aus mineralischen Materialien tragen zur Verminderung der Transmission von Lärmenergie in das Innere von Wohngebäuden bei. Eine Quantifizierung der Lärminderung kann durch Vergleich zwischen Fenstern mit Gläsern unterschiedlicher energetischer und schalltechnischer Qualität bzw. durch unterschiedliche Dämmstärken mineralischen Dämmmaterials erfolgen. Der weitaus grössere lärmindernde Effekt ist vom

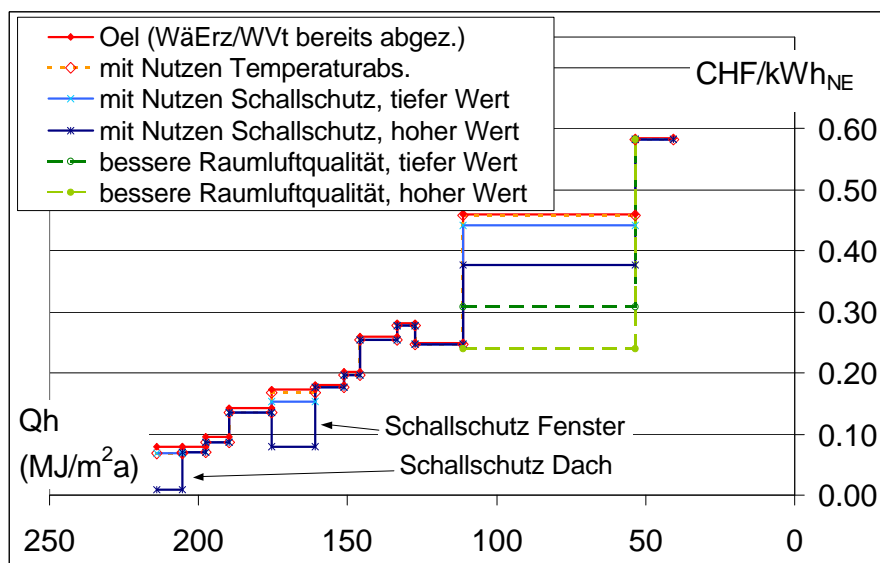
Bereich Fenster und/oder Rolläden zu erwarten, aber auch von Dämmmassnahmen mit mineralischen (schweren) Materialien im Bereich des Daches haben eine relevante Bedeutung (insbesondere gegen Fluglärm oder über weitere Strecken übertragenen Verkehrslärm und Lärm von gewerblichen Produktionsanlagen).

Als Referenzfall wurden wiederum der normale Baustandard für Neubauten sowie die typische Referenzsituation vor Erneuerungsmassnahmen im Bereich Fenster, Rolläden/-kasten und Dächer definiert, die häufig vorkommen. Diese wurden dann mit Fenstern mit erhöhten energie- und/oder schalltechnischen Anforderungen, der energie- und/oder schalltechnischen Rollädenerneuerung und mit verstärkter Wärmedämmung mit mineralischem Material verglichen, um die erzielbare Lärminderung (z.B. in Dezibel-Jahresstunden, in denen Abwesenheiten von der Wohnung und verminderte Fensteröffnungszeiten im Fall von Wohnungslüftungen mitberücksichtigt wurden) zu quantifizieren. Dadurch wurden die Interaktion und mögliche Synergieeffekte zwischen Wärme- und Schallschutz sichtbar.

Die Monetarisierung wurde über die in der Literatur verfügbaren Kostendaten zu Willingness to Pay-Ansätzen versucht. Die Mietpreisanalysen, die eine Abhängigkeit der Miethöhe vom Lärmpegel mit durchschnittlich 0.9% Minderung je zusätzliches dB für die Schweiz ermittelten (Ecoplan 2000, Zürcher Kantonalbank 1988), führen zu direkten Nebennutzen von Wärmedämm-Massnahmen zwischen 10 Rp pro m<sup>2</sup> Wohnfläche und Monat (1 dB Lärminderung bei 12 CHF/m<sup>2</sup> und Monat Miete) und 60 Rp pro m<sup>2</sup> und Jahr (4 dB Lärminderung in Dachwohnungen in Ballungszentren mit hohem Mietzins von 17 CHF/m<sup>2</sup>).

Das Problem bei derartigen Monetarisierungen zu den lärmbedingten Mietkostenunterschieden über statistische Methoden ist in der Regel die Tatsache, dass mehrere Einflussfaktoren (z.B. soziales Image des Wohnquartiers, Nähe zu öffentlichen Verkehrsmitteln, wahrgenommene Luftqualität oder die Nähe zu Einkaufsmöglichkeiten, Kindergarten Spaziermöglichkeiten) die Miethöhen mitbestimmen (Schelbert-Syfrig, Maggi, 2000, Ecoplan 2000). Hinzu kommt bei der Ermittlung des Grenznutzens des lärmindernden Effekts zur Hochschätzung für den Schweizer Gebäudebestand, dass die statistische Zuordnung des Gebäudebestandes nach Erneuerungspotenzial und Lärmexposition nicht bekannt ist und deshalb im erheblichen Umfang Annahmen gemacht werden müssten, um die Grenzkostenverläufe der Wärmeschutzinvestitionen um den Einfluss ihrer lärmindernden Wirkungen sachgerecht abbilden zu können.

Die gewählten Beispiele zeigen, dass der Schallschutz bei Fenster und Dach die Rentabilität der Wärmeschutzmassnahme entscheidend beeinflussen kann (Abbildung 4.6-1). Umgerechnet auf Nutzen je kWh Nutzenergie ergibt der begleitende Nutzen durch Lärminderung Werte zwischen 6 und 8 Rp/kWh. Für diese Beispiele reduzieren sich die Grenzkosten auf die Höhe heutiger Wärmekosten.



Quelle: Berechnungen CEPE

Abbildung 4.6-1 Grenzkostenkurve von Wärmedämminvestitionen unter Berücksichtigung ausgewählter Co-Benefits (höherer Komfort, Schallschutz, bessere Raumluftqualität durch Lüftungsanlagen)

Ein Teil der durch zusätzlichen Wärmeschutz vermiedenen externen Kosten durch Lärm-minderung, die vermiedenen Krankheits- und Lohnausfallkosten, bleibt allerdings in dieser betriebs- und energiewirtschaftlichen Netto-Kostenrechnung noch weiterhin unberücksichtigt. Hierzu gehören insbesondere vermiedene, lärmbedingte Krankheits- und Berufsunfähigkeitskosten, die nicht vom einzelnen Lärmverursacher, sondern von der Solidargemeinschaft der Versicherten getragen werden und somit als externe Kosten zu bewerten sind (vgl. Kap. 4.7).

#### 4.6.4 Bessere Raumluftqualität

Durch Wärmeschutz bedingte bessere Raumluftqualität dürfte im wesentlichen in zwei typischen Fällen erreicht werden:

- Zum einen wird eine verbesserte Luftqualität im Innern von solchen Wohngebäuden erreicht, die in stark belasteten Wohnquartieren (z.B. sehr verkehrsreiche Strassen) gelegen sind, und zwar entweder durch eine reduzierte Luftwechselrate bei Fenster- und Türsanierungen oder durch Filterung der Aussenluft bei Lüftungsanlagen und/oder dem Ansaugen der Luft von der strassenabgewandten Seite.
- Der andere Fall ist eine zu geringe Luftwechselrate in gut wärmegeprägten Wohngebäuden, die ein zu feuchtes Innenklima (z.B. durch aufsteigende Feuchte) oder durch die Bewohner (starkes Rauchen) bzw. durch die Inneneinrichtung (z.B. synthetische Teppiche, chemikalienhaltige Pressspanmöbel) verursachte relativ hohe Schadstoffkonzentrationen aufweisen, die für Asthmakranke und andere Menschen mit einer Disposition für Allergien und Erkrankungen der Atmungsorgane unverträglich sind.

Zur Quantifizierung der genannten Unterschiede für typische Raumkonzentrationen wurde zunächst eine Literaturanalyse durchgeführt mit dem Ziel, derartige Abhängigkeiten von Konzentration und Luftwechselrate zu erhalten. Die Analysen ergaben, dass es zwar für Laboruntersuchungen und eine Reihe von Einzelfällen entsprechende luft- und wohnungs-

hygienische Untersuchungen gibt, nicht aber hinreichend repräsentative Aussagen, um eine statistische Verteilung zwischen den wärmetechnischen Erneuerungsmöglichkeiten und den lufthygienischen Gegebenheiten ableiten zu können. Ausserdem wurde geprüft, wie häufig man von einer als kritisch anzusehenden Konzentration der Aussenluft (z.B. an viel befahrenen Wohnstrassen) ausgehen kann. Auch hier scheiterte der Ansatz an nicht hinreichend verfügbaren statistischen Daten. Um eigene Schätzungen anhand der für die Schweiz vorhandenen Immissionswerte durchführen zu können, fehlte in diesem Projekt die Zeit.

Die Quantifizierung des zweiten Falls (zu hohe Innenraumkonzentrationen) konnte man aufgrund der fehlenden Daten zum Schadensausmass auch durch den Schadensvermeidungsansatz, d.h. durch Annahmen zu einem häufigeren Lüften durch geöffnete Fenster und den damit zusammenhängenden Mehrbedarf für Heizen, erreichen. Als Referenzfall wurde ein normaler Wärmeschutz (ohne kontrollierte Lüftung) mit etwa 350 bis 400 MJ/m<sup>2</sup> .a unterstellt. Weiterhin wurde unterstellt, dass die zusätzlich erforderliche Heizenergiemenge, die zur Vermeidung zu hoher Innenraumkonzentrationen durch zusätzliche Lüftung über Fenster (per Hand) etwa 15 bis 25 % des Heizenergiebedarfs des Referenzfalls beträgt.

Die Monetarisierung konnte wegen der o.g. fehlenden repräsentativen Daten zur Verteilung der Immissionsituationen über den Gebäudebestand bzw. zu vermiedenen Schäden infolge niedrigerer Innenraumkonzentrationen nicht über verminderte Krankheits- und Lohnfortzahlungskosten erfolgen, sondern nur über die Bewertung der zusätzlich erforderlichen Heizkosten oder der zusätzlichen Nettokosten für die Komfortlüftung abzüglich der verminderten Heizkosten durch vermindertes Lüften über die Fenster. Mit diesem Ansatz über die zusätzlich erforderliche Lüftung würden die Schadensvermeidungskosten bei ca. 1.40 bis 2.40 CHF/m<sup>2</sup> .a liegen und damit für eine 100 m<sup>2</sup>-Wohnung etwa 15 bis 30 % der Jahreskosten der Lüftungsanlage bei Mehrfamilienhäusern decken bzw. 8 bis 15 % bei Einfamilienhäusern, die allerdings infolge ihrer Siedlungslage meist keine grösseren Immissionsbelastungen der Aussenluft haben. Die Nutzen der Co-Benefits werden auch in der Darstellungsform der Jahreskosten sichtbar (vgl. Abbildung 4.6-2). Insbesondere der steile Kostenanstieg der Lüftungsanlage wird wesentlich flacher, wenn die mit einer Lüftungsanlage verbundenen Zusatznutzen miteinbezogen werden und wenn - fälschlicherweise - nicht alle Kosten allein der Energieeffizienz zugeordnet werden.

Im Gegensatz zu den Jahreskosten beginnen die Investitionskosten ab dem energetischen Referenzpunkt sofort zu steigen, wenn auch nur leicht (Abbildung 4.6-2). Entscheide, die sich nur auf die Investitionskosten abstützen, führen also nicht zu einer energetisch und ökonomisch optimalen Bauweise. So trivial und so wenig neu diese Feststellung ist, so häufig wird sie in der Realität nicht beachtet, in vielen Fällen wegen des Investor-/Nutzerdilemmas und einer Mietgesetzgebung, die diese Zusammenhänge nicht hinreichend wahrnimmt.

Hinzu kämen auch noch vermiedene externe Kosten durch vermiedene Krankheits- und Lohnausfallkosten. Dieser Nutzen ist im wesentlichen als vermiedene externe Kosten zu bewerten, der aber im Rahmen dieser Analyse nicht weiter zu quantifizieren war.

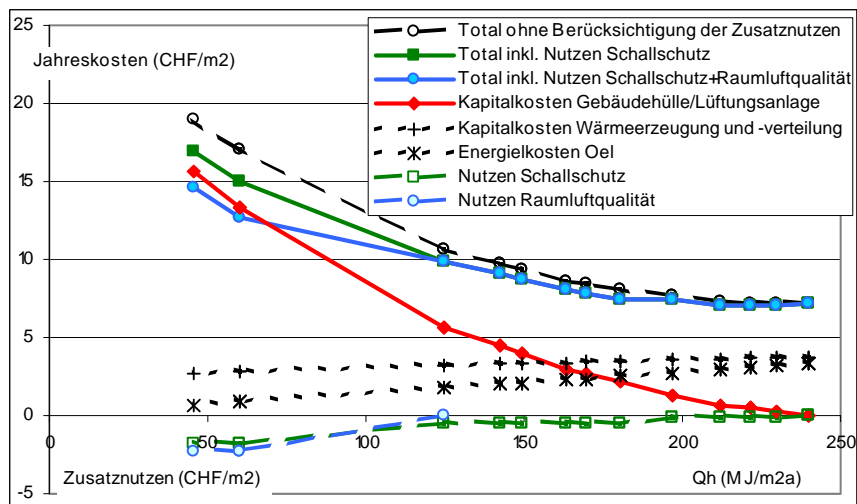


Abbildung 4.6-2 Gesamte Jahreskosten und ihre Komponenten (Mehrkosten der Energieeffizienzinvestitionen, Minderkosten der Wärmeenergieerzeugung- und -verteilung) sowie der Zusatznutzen. Beispielhafte Darstellung für einen MFH-Neubau. Annahmen: Realzins 3%, Brennstoffpreis 4.5 Rp/kWh

#### 4.6.5 Grössere Wohnraumfläche

In diesem Fall sind folgende Fälle angesprochen:

- verglaste Balkone und Terrassen, die als passive Solarenergienutzung hier unterstellt werden, d.h., eine energetisch unsachgemässe Beheizung dieser Flächen wird nicht angenommen. Neben dem Wärmegewinn im Winterhalbjahr hat der Wohnungsnutzer auch einen Wohnraumflächengewinn in den Jahresübergangszeiten und an Regentagen im Sommerhalbjahr.
- Zwischen einer energetischen Erneuerung des Steildachs und dem Ausbau von Dachräumen zu Wohnzwecken ergeben sich häufig Synergieeffekte. Der Dachraumausbau ist ein Auslöser für die energetische Verbesserung im Dachraumbereich und ermöglicht ausserdem eine Finanzierungsmöglichkeit weiterer (energetischer) Erneuerungen am Gebäude, denn die Kapitalisierung der zusätzlichen Mieterträge ist oft höher als die Kosten des Dachraumausbaus, selbst wenn energetisch weitergehende Lösungen zur Anwendung kommen.

Dieser Zusatznutzen, der neben dem Wärmegewinn den Kosten gegenübergestellt werden muss, wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter quantifiziert, beispielsweise über die zusätzlichen Tage, die ein verglaster Balkon bzw. Terrasse pro Jahr genutzt werden kann. Eine Monetarisierung könnte für derartige Fälle anhand typischer Mietpreise (ohne Nebenkosten) je m² für die gewählten typischen Wohngebäude erfolgen.

#### 4.6.6 Verbesserte Einbruchssicherung und weitere Nebeneffekte

Dicht schliessende Rollläden, insbesondere wärmegeämmte Rollläden, tragen einerseits zur Energieeinsparung bei, andererseits lassen sie sich auch für andere Funktionen nutzen: als Einbruchssicherung bei Abwesenheit, als Verdunklungsmöglichkeit über Tage und als Sonnen- und Hitzeschutz an heissen Sommertagen. Auch Dreifachverglasungen schützen vor Einbruch besser, und sei es nur aus psychologischen Gründen, dass dreimal die Gefahr von

Lärmentwicklung beim Durchbrechen/Zerschneiden einer Scheibe zu überwinden ist. Ausserdem bieten Fensterhersteller spezielle Einbruchschutzfenster an.

Die Quantifizierung der verbesserten Einbruchssicherheit durch die zwei genannten technischen Wärmeschutzmassnahmen könnte anhand statistischer Auswertungen der Häufigkeit von Einbruchdelikten bei verschlossenen Fenstern erfolgen. Erste Anfragen bei Gebäudeversicherungen haben gezeigt, dass Informationen zu Fenstereinbrüchen mit und ohne Rollladenschutz bzw. zu der Art der Fenster nur teilweise vorliegen, daher konnten diese Arbeiten nicht im Laufe dieser Analysen zu Ende geführt werden.

Die Monetarisierung der vermiedenen Schäden könnte anhand der durch Rollläden verminderten Einbruchswahrscheinlichkeit und der durchschnittlichen Schadenshöhe durchgeführt werden. Die Monetarisierung der Verdunklungsmöglichkeit wurde mit den Kosten einer alternativ im inneren Fensterbereich möglichen Jalousie oder eines schweren, dunklen Vorhangs ermittelt. Unterstellt man in beiden Fällen eine Installation durch einen Fachmann oder Handwerker, so liegen allein die Verdunklungskosten der Rollladenalternative bei 60 bis 85 % der Rollladenkosten..

Weitere Funktionen von Rollläden und ihre Nebeneffekte (z.B. nächtlicher Lärmschutz, sommerlicher Hitze- und Sonnenschutz) wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht ermittelt. Sie seien hier aber erwähnt, um die multifunktionalen Nutzen mancher Energieeffizienzinvestitionen am Beispiel des Rollladen deutlich zu machen und die Notwendigkeit einer vollständigen Nutzenbewertung derartiger Investitionen zu unterstreichen, um gravierende Fehleinschätzungen zu vermeiden.



#### 4.7 Vermiedene externe Kosten durch zusätzliche Wärmeschutzinvestitionen

Nutzen und Kosten von Wärmeschutz- und Energieeffizienz-Investitionen sind in einzelwirtschaftlichen Bewertungen nie vollständig enthalten, wie bereits im vorigen Kapitel mehrfach deutlich wurde. Von besonderer Bedeutung sind in diesem Fall diejenigen externen Kosten der Energienutzung, die durch die Energieeinsparung vermieden werden, beispielsweise die verminderten Schäden von Feinstaub-, CO- und SO<sub>2</sub>-Emissionen im örtlichen und regionalen Raum und des Treibhauseffektes durch verminderte Treibhausgasemissionen. Im Grunde müssten die durch verminderte energiebedingte Emissionen vermiedenen Schäden durch Wirkungspfad-Simulationen einschliesslich der jeweiligen Standortbedingungen ermittelt werden. Aber gross angelegte Analysen der EU (1999) für europäische Länder und die USA in dem Projekt ExternE haben gezeigt, dass so viele andere Unsicherheiten der Schadensbewertung vorhanden sind, dass man für stationäre Anlagen beispielsweise Durchschnittswerte benutzen kann (vgl. Tab. 4.7-1), die dann über die anlagenspezifischen Emissionsfaktoren und Wandlungswirkungsgrade auf den eingesetzten Brennstoff zurückgerechnet werden können (vgl. Tab. 4.7-2).

Tabelle 4.7-1: Spezifische externe Kosten klassischer Luftschadstoffe aus stationären Quellen in Deutschland in Euro je Tonne Schadstoff (Mittelwert über mehrere Standorte)

Schadstoffart	Euro / t Schadstoff
Feinstaub PM <sub>10</sub>	9 850
SO <sub>2</sub>	4 980
CO	0,4
NO <sub>x</sub>	2 920
NMVOG	1 650

Quelle: EU 1999

Die ausgewiesenen Werte sind Medianwerte und hängen von vielen Annahmen zur Quantifizierung und Monetarisierung der jeweiligen Schäden ab (vgl. Infrac/Econcept/Prognos, 1996). Dieses Bewertungsproblem verschärft sich noch bei der Bewertung der energiebedingten Treibhausgase infolge ihrer langen Verweilzeit in der Atmosphäre und ihrer weltweiten Verteilung. Diskontiert man beispielsweise in 100 Jahren erwartete Schäden mit 3 % pro Jahr ab, verbleiben nur 5 % der Schadenssumme als Gegenwartswert; vielfach werden die gleichen Krankheits- und Todesfälle in Industrieländern und Entwicklungsländern sehr unterschiedlich monetarisiert. So verwundert es nicht, wenn die Angaben zu den externen Kosten um ein bis zwei Grössenordnungen variieren (Ostertag u.a., 1999; Meier, 1998; IPCC, 2001).

Unterstellt man mittlere Schätzungen der externen Kosten der traditionellen Schadstoffemissionen, so liegen diese zwischen etwa 2 bis 3 Rp/kWh für die Kohle und das leichte Heizöl und bei Erdgas bei 0,5 bis 1 Rp/kWh infolge seines geringen Schwefelgehaltes und der damit verbundenen geringeren SO<sub>2</sub>-Emissionen; bei den Schätzungen für die externen Kosten aufgrund der Auswirkungen des Treibhauseffektes liegt das Kostenniveau höher, aber die Unterschiede zwischen Kohle und Erdgas sind entsprechend dem Unterschied des Kohlenstoffgehaltes der beiden Energieträger geringer. Unterstellt man diese Medianwerte externer Kosten für die hier betrachteten Wärmeschutzinvestitionen, so verdoppeln sich die

Kosten für heizöl- und kohlebasierte Wärmeerzeugung, und bei Wärme aus Erdgas würden sich die Gesteungskosten aus wohlfahrtsökonomischer Sicht um etwa zwei Drittel erhöhen.

An diesen (groben) Medianwerten wird deutlich, dass die energiewirtschaftliche Bewertung von Wärmeschutz-Investitionen aus dem Blickwinkel der Wohlfahrtsökonomie deutlich anders ausfallen wird als die einzelwirtschaftliche Bewertung. Dies bedeutet auch eine andere Bewertung der Energieeffizienzpolitik und ihrer ökonomischen Instrumente. Gerade die gewaltigen volkswirtschaftlichen Schäden in Österreich, Tschechien, Ostdeutschland, Indien und China im Sommer 2002 weisen auf die Legitimation öffentlicher Anreize für Investitionen zur Emissionsminderung wieder einmal hin. IPCC (2002) geht davon aus, dass diese Hinweise in Zukunft häufiger und deutlicher kommen werden.

Tabelle 4.7-2: Externe Kosten stationärer Energiewandler für Heizöl, Kohle und Erdgas (Medianwerte der Schätzungen in Rp/kWh Brennstoffinput)

Brennstoffart	Schäden konventioneller Schadstoffe	Netto – Schäden durch Klimawandel	Gesamtsumme externer Kosten
Heizöl leicht	1.8 bis 3.6	5.5 bis 6.5	Ca. 7 bis 10
Steinkohle	1.8 bis 3.8	7.5 bis 8.5	Ca. 9 bis 12
Erdgas	0.5 bis 1.2	4 bis 5	4.5 bis 6.2

Quellen: EU 1999, Infrac/econcept/Prognos 1996; Friedrich/Krewitt 1997, IPCC 2002, Meier, 1998, Rahl/Spadaro 1999