

ENERGIEEINSPARUNG UND UMWELTSCHUTZ



VERSCHÄRFTE ANFORDERUNGEN AN DEN WÄRMESCHUTZ: WOHIN MIT DEN DÄMMDICKEN ?

H. Bangerter, berat.Ing. usic/sia, c/o WEDER + BANGERTER AG Bauingenieure und Bauphysiker CH - 8302 Kloten/Zürich

ZIELSETZUNG:

- Erläuterung eines interaktiven Berechnungsmodells zur Ermittlung von ökonomisch oder ökologisch optimalen Gebäudehüllen sowie Darstellung der Zusammenhänge, welche dies mit einem Minimum an Dämmstoffkubatur (oder Materialkosten, oder Herstellungsenergie) gewährleisten.
- Vorstellung von entsprechenden Instrumenten und angebotenen Serviceleistungen für Bauherren und Planer.

INHALT:

- Historischer Rückblick
- Dämmstoff – Minimierung durch Umschichtung
- Politisch oder fachlich begründete Grenzwerte ?
- Das Konzept <OEKO – PRIORITY^â für die Gebäudehülle> (Separatbeilage)
- Erwägungen zur Leitgrösse <Gebrauchsdauer von Bauteilen>
- Fazit

Herbst 2006

1. Historischer Rückblick

Der folgende Rückblick bezieht sich auf die in der Schweiz beobachtete Entwicklung des Marktfeldes „Energietechnik Gebäude“, angefangen vom reinen Mauerblümchen – Dasein hin zu einem wichtigen Wirtschaftsfaktor. In anderen westeuropäischen Ländern dürfte eine analoge Entwicklung stattgefunden haben.

Systematische Hinweise oder Anforderungen zum baulichen Wärmeschutz finden sich in der Fachliteratur etwa ab Mitte des letzten Jahrhunderts. Mehrheitlich war es das Verdienst einzelner Autoren, die sich im Rahmen ihrer wissenschaftlichen Veröffentlichungen zu bauphysikalischen Fragen betreffend Wohnhygiene und Behaglichkeit, Kondensationsschäden, sommerlicher Klimabedingungen usw. für einen hinreichenden Wärmeschutz einzusetzen begannen. Erste Ansätze entsprechender Regelungen finden sich dagegen im Normenwerk des schweizerischen Ingenieur – und Architekten -Vereins (SIA) zunächst nur in Form von Dimensionierungsregeln zur Leistungs - berechnung von Zentralheizungen. Erstmals fließt dort auch der Begriff $\langle U - \text{Wert} \rangle$ (damals noch $k - \text{Wert}$) in das schweizerische Normenwerk ein.

Neuere Festlegungen mit der erklärten Zielvorgabe, haushälterischen Umgang mit der benötigten Heizenergie eines Gebäudes zu pflegen, werden im Prinzip erst nach dem berühmten, weltweiten Oelschock von 1973 getroffen. Dabei entwickelte sich eine klassische $\langle \text{Try and Learn} - \text{Methodik} \rangle$, an welcher sich alle möglichen Gruppierungen – auch in Erwartung einer interessanten geschäftlichen Marktnische – beteiligten: Gewerbliche und wissenschaftliche Fachgremien, ad – hoc zusammen - gestellte Vereinigungen und Interessengruppen, Hauseigentümer – und Mieterverbände, Genossenschaften, sowie öffentliche Bauverwaltungen aller Hierarchiestufen.

Es wurden millionenschwere staatlich finanzierte Impulsprogramme zum baulichen Energiesparen initiiert, flächendeckende statistische Erhebungen über den aktuellen Energieverbrauch nach Gebäude – und Nutzungskategorien lanciert und eine Armada von Normenschaffenden „in Bewegung gesetzt“.

Als Erstes wurden verbindliche $U - \text{Werte}$ (damals noch $k - \text{Werte}$) für die Einzel – Bauteile eingeführt. Kaum waren solche in Kraft bedurfte es schon einer Revision, um diese „den neuen Erkenntnissen“ anzupassen, also weiter herab zu setzen. Es entstand dabei auch eine Art „sportlich – intellektueller Wettbewerb“, indem es sich gewisse (öffentliche) Bauträger nicht nehmen liessen, über die aktuellen Bestimmungen hinausgehende Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz für ihre eigenen Bauten vorzuschreiben. Auf diese Weise entstanden in der Folge auch Begriff und Definition des sogenannten mittleren $U - \text{Wertes}$ (damals noch $k - \text{Wert}$) der Gebäudehülle, welcher zur neuen Bemessungsvorgabe wurde. Auch dieser im Jahre 1977 in Empfehlung SIA 180/1 normativ eingeführte Kennwert wurde nachträglich in mehreren Revisionen anforderungsmässig verschärft. Ausserdem wetteiferten zu dieser Zeit interessierte Kreise um eine Verbindlich – Erklärung von umfassenden Energiebilanzen, mittels welcher alle Verbrauchs – (und Gewinn -) Komponenten des

jährlichen Energiebedarfs berücksichtigt werden sollten. Die ersten Verbrauchsgrenzen – ausgedrückt im MJ pro Quadratmeter Energiebezugsfläche – hatten dabei ihren Ursprung in unzähligen statistischen Erhebungen über den Energieverbrauch von Wohnbauten aus den boomenden Nachkriegsjahren, woraus dann einerseits „zumutbare“ Grenzwerte für künftige Neubauten, und andererseits entsprechende Minimalziele für energetische Gebäudesanierungen abgeleitet wurden.

Zwischenzeitlich hat das emsige nationale Normenschaftern (aller Länder) auch die EN – Zentrale in Brüssel erfasst, so dass sich auch von dieser Seite eine weitere Anpassung (und Angleichung) der massgebenden Regeln, Begriffe und Verfahren abzeichnet. Als Beispiel hierfür soll lediglich der Hinweis gelten, dass – der Computertechnik sei „Dank“ – aus der Forderung nach Durchführung einer von Hand noch zu bewältigen Energie – Jahresbilanz nunmehr die Forderung nach zwölf getrennten Monatsbilanzen für den Energienachweis zum Standard geworden ist.

Bei der beschriebenen Entwicklung des baulichen Energiesparens sind zusammenfassend zwei Schwerpunkte festzustellen. Einerseits haben sich die Bemessungs – und Nachweisverfahren (über die Einhaltung von definierten Grenzwerten) extrem erweitert: Von Einzel – U – Werten über Mittel – U – Wert (der Hülle) zu Energiebilanzen, umfassend (auch) alle a) theoretischen und b) anrechenbaren Energiegewinne, der Einbezug des Strom – und Warmwasserbedarfs, die Berücksichtigung der Wirkungsgradverluste, der Primärenergieanteile usw. Die Berechnungsmethodik und Genauigkeitsanforderungen (Lambdawerte, Flächenmasse, Klimawerte, Speichermassen, punktuelle und lineare Wärmebrücken usw. usw) wurden dabei ihrerseits durch eigene Normungsregeln „aufgewertet“. Was heute dank EDV berechenbar ist, wurde flugs zum normativen Standard erhoben. Selbstverständlich bedarf die zum behördlichen Wärmeschutznachweis damit unumgänglich gewordene Software ihrerseits wiederum einer behördlich attestierten „Zulassung“.

Neben dieser technisch – wissenschaftlichen Aufwertung der energetischen Gebäudetechnik, von deren Hochhaltung heute ganze Institute, Universitätsteile und weitere Kreise dank staatlicher Fördermittel gut leben, ist noch eine zweite Einflussgrösse auf die geschilderte Entwicklung zu verfolgen:

Im unmittelbaren Nachgang zum ersten Oelschock von 1973 war es eindeutig die Sorge um die nationale Versorgungssicherheit mit Energie, welche die ganzen Energiesparbestrebungen (namentlich im Baubereich, nicht unbedingt beim Individualverkehr) auslöste. Vor der pessimistischen Erwartung, die Energiepreise würden ins Unermessliche steigen, konnte – über die Sorge um die staatliche und individuelle Versorgungssicherheit hinaus – gleichzeitig auch der „kleine Einfamilienhausbesitzer“ mit rein betriebswirtschaftlichen Argumenten für entsprechende Aktivitäten motiviert werden.

Der damalige Versorgungsengpass löste sich erfreulicherweise bald wieder auf, und auch die Erdölpreise pendelten sich wieder auf ein akzeptables Niveau ein. Damit aber entstand gegenüber

dem „kleinen Investor“ ein gewisser Erklärungsnotstand, indem die propagierten Energiespar - massnahmen wertmässig mit den hierfür benötigten Investitionen nicht mehr mithalten konnten. Ein neues „Generalargument“ musste her:

In der Schweiz war es die Luftreinhalteverordnung (Stichwort Waldsterben). Mit deren Inkraftsetzung im Jahre 1987 wurde eine massive Reduktion des SO_2 und NO_x – Ausstosses für die Zukunft postuliert, was hinsichtlich der erstgenannten Emission insbesondere mit der Gebäudebeheizung in Zusammenhang gebracht werden konnte. Die angelaufenen technischen, insbesondere aber administrativen und politischen Aktivitäten rund um „Bau und Energie“ konnten dadurch begründeterweise weitergeführt werden.

Die Luftverschmutzung (und das politische Thema Waldsterben) haben sich – wohl auch dank eingeführter Katalysatortechnik – zwischenzeitlich quasi „verflüchtigt“, so dass wiederum neue Argumente für die weitere Verschärfung der Anforderungswerte (sei es bezüglich Gesamt - Energieverbrauch pro m^2 Wohnfläche, oder bezüglich Heizwärmebedarf pro m^2 Gebäudehülle, → siehe Règlement grand – ducal 3. 8. 05, etc.) beigebracht werden mussten.

Energie – Verbrauchsgrenzen waren politisch nicht mehr mit nationaler Versorgungssicherheit (oder gar mit betriebswirtschaftlichem Individual – Nutzen), und auch nicht mehr ohne weiteres mit Fragen der Volksgesundheit und der Sicherung von Energie - Ressourcen zu rechtfertigen. Hingegen zeichnete sich plötzlich globaler Handlungsbedarf ab, welcher dringend nach drastischer Reduktion des CO_2 – Ausstosses (Kyotoprotokoll) rief. Weil der heizungsbedingte CO_2 – Ausstoss zur bedrohlichen, weltweiten Klimaerwärmung beiträgt, richtet sich heute die Argumentation für eine energiesparende Bauweise eindeutig auf ökologische Gesichtspunkte aus.

Für den nüchternen Techniker stellt es eine Herausforderung dar, einmal zu hinterfragen, ob bzw. nach welchen rationalen Kriterien die wechselnden, vornehmlich „politisch“ motivierten Grenzwerte zum baulichen Energiehaushalt denn auch gerechtfertigt werden könnten – oder aber relativiert werden müssten. Davon soll in Abschnitt 3 die Rede sein.

2. Dämmstoff – Minimierung durch Umschichtung

Nach diesem generellen Rückblick wollen wir unser Augenmerk jetzt gezielt auf den Energiehaushalt der Gebäudehülle richten. Wir gehen dabei davon aus, dass der Wärmeverlust aus Konvektion – einerseits infolge natürlicher Luftwechsel, und andererseits als Folge von unerwünschten Undichtigkeiten der Gebäudehülle – von der Dämmstärke kaum beeinflusst ist und somit für unsere weiteren Betrachtungen ausgeklammert werden kann. Desgleichen steht der Transmissionsverlust von Raumwärme durch die Fenster nicht zur Diskussion.

Von besonderem Interesse ist für uns somit der wichtige Verlustanteil: Transmissionswärme der opaken Gebäudehülle.

Es ist in den letzten 30 Jahren erheblicher Einfluss auf diesen grossen Verlustanteil genommen worden:

- Die zulässigen U – Werte der einzelnen Bauteile wurden (und werden) fortschreitend reduziert
- Konstruktiv bedingte Wärmebrücken müssen neu als separate Verlustquellen erfasst und ausgewiesen werden
- Die Prüfungs - und Berechnungsverfahren für die Lambdawerte von Baumaterialien (insbesondere für Dämmstoffe) wurden extrem verfeinert und standardisiert
- Für inhomogene Querschnitte und für Wärmeabfluss gegen das Erdreich wurden spezielle Rechenverfahren in Kraft gesetzt
- Bei umfassenden Energiebilanzen müssen auch Nebeneffekte, so zum Beispiel der Einfluss des Speicherverhaltens des Gebäudes auf die Anrechenbarkeit von Wärmegewinnen berücksichtigt werden
- (Auflistung sicher nicht abschliessend)

Zusammenfassend sind also vor allem exaktere, oft nur noch dank Computerdechnik durchführbare Rechenverfahren sowie drastisch verschärfte Grenzwerte durchgesetzt worden, welche leider auch eine gewisse Verteuerung der Planungs – und Baukosten mit sich bringen.

These:

Diese normative Situation muss akzeptiert werden. Geht man aber von einer entsprechend geplanten (und akzeptierten) Gebäudehülle aus, so bestehen nach grober Abschätzung statistisch immer noch etwa 5% – 15 % (Energie -) Sparpotential – ohne dass hierfür im Prinzip auch nur ein zusätzlicher EURO aufgewendet werden muss!

Diese zentrale Behauptung soll im Rahmen des Referates näher begründet werden!

Verständigung und Wirkungsprinzip:

Wenn der spezifische Wärmeverlust einer opaken Gebäudehülle – ausgedrückt durch den mittleren U – Wert – als gegebene (erlaubte) Grösse feststeht, so müssen wir uns bewusst sein, dass er im Prinzip aus einer zufälligen Kombination von Einzel – U – Werten der beteiligten Bauteile entstanden ist.

Nun gibt es aber theoretisch unendlich viele Möglichkeiten, durch Variation der Einzel – U – Werte zum verlangten mittleren U – Wert zu gelangen. Es braucht dazu weder andere Dämmstoffe noch deren Abtausch unter den Bauteilen, sondern lediglich eine Optimierung der gegebenen Materialien hinsichtlich ihrer Schichtstärken.

Zwar ist dieser Optimierungsprozess von vielen (variablen) Einflüssen abhängig und in der Bearbeitung komplex, folgt jedoch grundsätzlich einer einfachen Regel:

Eine vergleichsweise starke Dämmschicht (gegenüber jenen der anderen Bauteile) ergibt sich dann, wenn bestimmte Einflussfaktoren im Zähler des unten beschriebenen <***Quotienten> vergleichsweise gross, und die restlichen drei Grössen (im Nenner) vergleichsweise klein ausfallen. Die Trennung der einzelnen Werte in der nachstehenden „Formel“ (,) stellt hier aber kein Operationszeichen dar!

Definition <*** Quotient (je Bauteil)> : $(A, U_0, m/n, b) / [\lambda, (I + f)]$

A = Bauteilfläche

U_0 = U – Wert ohne Dämmschicht

m = Gebrauchsdauer der Konstruktion

n = Planungshorizont für die Optimierung

b = Temperatur – Gradient (Korrekturfaktor zur Basis $[t_i - t_e] = 1$)

λ = Wärmeleitfähigkeit des betreffenden Dämmstoffs

I = Investitionsaufwand (Dämmstoffkubatur, oder – Kosten, oder – Grauenergie, oder – Masse)

f = Prozentanteil von I für den Rückbau am Gebrauchsende

Des Weiteren werden diese <***Quotienten> auch von allfälligen Zinssätzen und Teuerungsraten (bezogen auf I resp. f) beeinflusst.

Bevor nun der Zusammenhang an einem einfachen Beispiel dokumentiert werden soll, muss das mit 5 – 15 % Reduktionsmöglichkeit in Aussicht gestellte <(Energie -) Sparpotential> näher definiert werden:

Aussage: Die Dämmstärken resp. Einzel – U – Werte nach Bauteilen sollen so aufeinander abgestimmt werden, **dass**

A) unter Beibehaltung des geforderten / gegebenen mittleren U – Wertes der Hülle wahlweise

- A1) Die Herstellungsenergie für die benötigten Dämmstoffe minimal wird
- A2) Die Kubatur für die benötigten Dämmstoffe minimal wird
- A3) Die Kosten für die benötigten Dämmstoffe minimal werden
- A4) Die Masse (Gewicht) für die benötigten Dämmstoffe minimal wird

Im Fall von A1) können wir von einer energetisch/ökologischen Optimierung sprechen. Im Fall von A2) erfolgt eine räumliche (platzsparende) Optimierung. Im Fall 3 (und Fall 4) sprechen wir von einer betriebswirtschaftlich / ökonomischen Optimierung. Fall 4 ersetzt hierbei unbekannte / unsichere Dämmstoffpreise in grober Annäherung durch „linear – proportionale“ Raumgewichte.

Desgleichen wird im Durchschnitt ein 5 – 15 % - iges Sparpotential realisiert, **wenn**

B) unter Beibehaltung des (vorgegebenen) Charakteristikums A1) oder A2) oder A3) resp. A4)

B1 – B4) Der jeweils tiefest - mögliche, d.h. beste mittlere U – Wert für die opake Gebäudehülle angestrebt wird.

Zusammenfassend geht es also darum, basierend auf definierten Vorgaben (Kosten, oder Kubatur, oder Herstellungsenergie – oder für unveränderten U – Wert / Transmissionswärmebedarf) durch optimierte Dämmstärken **ein Maximum an Wirkung** zu erzielen. Ein **einfaches Beispiel** soll dies verdeutlichen. Dabei sei hier die Bauhülle aus lediglich zwei unterschiedlichen Fassaden gebildet:

Zusammen mit den jeweiligen Rohbauanteilen ergibt sich aus den je 100 mm Dämmstärke ein mittlerer (gewogener) U – Wert von ca. 0.367 W/m²K. (siehe nächstes Bild).

Formular 1: Eingabedaten Zeitgrößen					
Planungshorizont für Systembetrachtung n =	50 Jahre				
Zins (z) für Dämmkosten /-Gewichte; Nutzenabschlag (sz) für Grauenergie =	0.00 %				
Teuerung (t) für Dämmkosten /-Gewichte; Wertigkeitszuwachs (w) für Grauenergie =	0.00 %				

Formular 2: Eingabedaten Bauteile					
Bauteil	Kurzbezeichnung	Fläche A	¹⁾ U _o vorhanden	²⁾ U _{max} zul.	³⁾ b
[Nr.]	[fakultativ]	[m ²]	[W/m ² K]	[W/m ² K]	[Kt]
1	Fassade 1	100.00	1.00	1.00	1.00
2	Fassade 2	200.00	3.00	3.00	1.30

Formular 3: Eingabedaten Zuordnung Dämmstoffe								
Bauteil	Dämmstoff	⁴⁾	⁵⁾ J	⁶⁾ λ	d _{vorh.}	⁷⁾ B	⁸⁾ m	⁹⁾ f
[Nr.]	[Materialbasis]	[kg/m ³]	[MJ/m ³]	[W/mK]	[mm]	[Preis/m ³]	[Jahre]	[-]
1	Dämmstoff 1	120.00	2000.00	0.040	100	*	20	0.20
2	Dämmstoff 2	60.00	1500.00	0.035	100	*	40	0.10

BILD 1: Ausgangslage, Erläuterung ad hoc

Die beiden Dämmstärken (bisher je 100 mm) sollen nun so gegeneinander optimiert werden, dass einmal die Zielvorgabe A1) →“Minimum an Herstellungsenergie, U – Wert unverändert 0.367 W/m²K“ eingehalten ist → Bild 2). Alsdann Zielvorgabe A2) → „ Minimum an Kubatur, U – Wert unverändert 0.367 W/m²K“ → Bild 3). Schliesslich Zielvorgabe A3/4) → Minimum an Kosten (hier Raumgewicht), U – Wert unverändert 0.367 W/m²K“ → Bild 4). Die jeweiligen Ergebnisse werden ad hoc kommentiert.

Optimierte Anordnung der Dämmschichten mit ökologischer Priorität

Detaillierte Zielvorgabe:

Minimiere Grauenergiebedarf auf $\Sigma [J \cdot d_{opt} \cdot A]_{result.}$

unter Beibehaltung des Transmissionswärme – Verlustes von $\Sigma [U_{vorh.} \cdot A \cdot b]$

Bauteil [Nr.]	d _{opt} [mm]	U _{result.} [W/m ² K]	[J · d _{opt} · A] _{result.} [als EL _{äquiv.} in Liter]	[J · d _{vorh.} · A] _{vorh.} [als EL _{äquiv.} in Liter]	[U _{result.} · A · b] [Wh]
1	42	0.488	233	556	49
2	137	0.235	1142	833	61
		Σ	1375	1389	110
		Σ'	2270	2812	[Σ _{result.} ~ Σ _{vorh.}]
		%	99 80.7	100 100	U' _{result.} = 0.367W/m ² K

Der unterschiedliche Grauenergiebedarf (J · d · A) vor und nach der Optimierung ist in den Tabellenspalten 4 und 5 als **entsprechendes Heizöläquivalent** E_{äquiv.} (Heizöl extra - leicht, in Liter) ausgewiesen.

BILD 2 : Zielvorgabe A1) →“Minimum an Herstellungsenergie, U – Wert unverändert 0.367 W/m²K“
(Kommentar ad hoc)

Optimierte Anordnung der Dämmschichten mit definierter Priorität

Detaillierte Zielvorgabe:

Minimiere Dämmstoffkubatur auf $\Sigma [J \cdot d_{opt} \cdot A]_{result.}$

unter Beibehaltung des Transmissionswärme – Verlustes von $\Sigma [U_{vorh.} \cdot A \cdot b]$

Bauteil [Nr.]	d _{opt} [mm]	U _{result.} [W/m ² K]	[J · d _{opt} · A] _{result.} [als EL _{äquiv.} in Liter]	[J · d _{vorh.} · A] _{vorh.} [als EL _{äquiv.} in Liter]	[U _{result.} · A · b] [Wh]
1	49	0.449	272	556	45
2	128	0.251	1422	1111	65
		Σ	1694	1667	110
		Σ'	2772	3194	[Σ _{result.} ~ Σ _{vorh.}]
		%	101.7 86.8	100 100	U' _{result.} = 0.367W/m ² K

BILD 3 : Zielvorgabe A2) →“Minimum an Dämmstoffkubatur, U – Wert unverändert 0.367 W/m²K“
(Kommentar ad hoc)

Optimierte Anordnung der Dämmschichten mit ökonomischer Priorität

Detaillierte Zielvorgabe:

Minimiere Dämmstoff"kosten" $[\Theta] \text{ auf } \Sigma [\Theta \cdot d_{\text{opt}} \cdot A]_{\text{result.}}$

unter Beibehaltung des Transmissionswärme – Verlustes von $\Sigma [U_{\text{vorh.}} \cdot A \cdot b]$

(Θ je nach Vorgabe: "Preis" oder "Gewicht")

Bauteil [Nr.]	d_{opt} [mm]	$U_{\text{result.}}$ [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]	$[\Theta \cdot d_{\text{opt}} \cdot A]_{\text{result.}}$	$[\Theta \cdot d_{\text{vorh.}} \cdot A]_{\text{vorh.}}$	$[U_{\text{result.}} \cdot A \cdot b]$ [Wh]
1	33	0.548	396	1200	55
2	152	0.214	1824	1200	56
		Σ	2220	2400	110
		Σ'	3696	5250	$[\Sigma_{\text{result.}} \sim \Sigma_{\text{vorh.}}]$
		%	92.5	100	$U'_{\text{result.}} = 0.368 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$
			70.4	100	

BILD 4 : Zielvorgabe A3/4) → "Minimum an Dämmstoffkosten, U – Wert unverändert 0.367 W/m²K"
(Kommentar ad hoc)

In den nächsten Bildern 5 – 7) sind die Ergebnisse aus entsprechender „Umkehrung“ dargestellt:

Zielvorgabe B1) → „Minimierter mittlerer U – Wert, basierend auf unverändertem Bedarf an Herstellungsenergie“ → Bild 5). Zielvorgabe B2) → „Minimierter mittlerer U – Wert, basierend auf unveränderter Dämmstoffkubatur “ → Bild 6). Zielvorgabe B3/4) → „Minimierter mittlerer U – Wert, basierend auf unverändertem Dämmstoffgewicht (für Kosten) “ → Bild 7). Die jeweiligen Ergebnisse werden ad hoc kommentiert.

Optimierte Anordnung der Dämmschichten mit ökologischer Priorität

Detaillierte Zielvorgabe:

Minimiere Transmissionswärme - Verlust auf $\Sigma [U_{\text{opt.}} \cdot A \cdot b]$,

unter Beibehaltung des Grauenegie – Bedarfs von $\Sigma [J \cdot d \cdot A]$

Bauteil [Nr.]	d_{opt} [mm]	$U_{\text{result.}}$ [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]	$[U_{\text{result.}} \cdot A \cdot b]$ [Wh]	$[U_{\text{vorh.}} \cdot A \cdot b]$ [Wh]	$[J \cdot d_{\text{opt.}} \cdot A]$ (als $EL_{\text{equiv.}}$ in Liter)
1	73	0.354	35	29	406
2	139	0.232	60	81	1158
		Σ	96	110	1564
					$\Sigma' = 2809$
		%	87	100	$[\Sigma_{\text{result.}} \sim \Sigma_{\text{vorh.}}]$
		U'_{result}	0.319 $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$		

BILD 5: Zielvorgabe B1) → „Minimierter mittlerer U – Wert, basierend auf unverändertem Bedarf an Herstellungsenergie“ (Kommentar ad hoc)

Optimierte Anordnung der Dämmschichten mit definierter Priorität

Detaillierte Zielvorgabe:

Minimiere Transmissionswärme - Verlust auf $\Sigma [U_{opt.} \cdot A \cdot b]$,

unter Beibehaltung der Dämmstoffkubatur von $\Sigma [J \cdot d \cdot A]$

Bauteil [Nr.]	d_{opt} [mm]	$U_{result.}$ [W/m ² K]	$[U_{result.} \cdot A \cdot b]$ [Wh]	$[U_{vorh.} \cdot A \cdot b]$ [Wh]	$[J \cdot d_{opt} \cdot A]$ (als EL _{äquiv.} in Liter)
1	77	0.342	34	29	428
2	126	0.254	66	81	1400
		Σ	100	110	1828 $\Sigma' = 3208$ [$\Sigma_{result.} \sim \Sigma_{vorh.}$]
		%	91.1	100	
		U'_{result}	0.334W/m ² K		

BILD 6: Zielvorgabe B2) → „Minimierter mittlerer U – Wert, basierend auf unverändertem Bedarf an Dämmstoffkubatur“ (Kommentar ad hoc)

Optimierte Anordnung der Dämmschichten mit ökonomischer Priorität

Detaillierte Zielvorgabe:

Minimiere Transmissionswärme - Verlust auf $\Sigma [U_{opt.} \cdot A \cdot b]$,

unter Beibehaltung der Dämmstoff"kosten" von $\Sigma [\Theta \cdot d \cdot A]$

(Θ je nach Vorgabe: "Preis" oder "Gewicht")

Bauteil [Nr.]	d_{opt} [mm]	$U_{result.}$ [W/m ² K]	$[U_{result.} \cdot A \cdot b]$ [Wh]	$[U_{vorh.} \cdot A \cdot b]$ [Wh]	$[\Theta \cdot d_{opt} \cdot A]$
1	71	0.36	36	29	852
2	163	0.2	52	81	1956
		Σ	88	110	2808 $\Sigma' = 5245$ [$\Sigma_{result.} \sim \Sigma_{vorh.}$]
		%	80.1	100	
		U'_{result}	0.294W/m ² K		

BILD 7: Zielvorgabe B3) → „Minimierter mittlerer U – Wert, basierend auf unveränderten Dämmstoffkosten (Kommentar ad hoc)

Zusammenfassend:

Zielvorgabe	Einsparung
A1	19.3% (1%)
A2	13.2% (- 1.7%)
A3	29.6% (7.5%)
B1	13.0%
B2	8.9%
B3	19.9%

TABELLE 1: Einsparungen gegenüber der akzeptierten Lösung (Kommentar ad hoc)

FAZIT: Es ist leicht vorstellbar, dass bei durchschnittlich etwa 5 – 8 ungleichen Bauteilen einer Gebäudehülle (Steildach, Flachdach/Terrasse, Fassade, Wände gegen unbeheizte Räume, Erdgeschoss - Boden oder beheizter Keller gegen Erdreich, etc.) kaum je die optimale energetische Abstimmung unter den Bauteilen durch „zufällig richtige Dämmstärken“ ohne entsprechende Überprüfung schon ausgeschöpft ist.

Um den Nachweis von durchschnittlich ca. 5 – 15 % Sparpotential anhand einer grösseren Feldstudie zu untermauern, stellen sich die Veranstalter dieser Tagung gerne zur Verfügung.

Ein abschliessendes Beispiel mit sechs unterschiedlichen Bauteilen soll für das Kriterium

B1) → „Minimierter mittlerer U – Wert, basierend auf unverändertem Bedarf an

Herstellungsenergie“ nochmals einen Gesamteindruck aus praktischer Anwendung vermitteln.

Als ergänzender Hinweis dazu im Voraus: Würde die Optimierung hier nach Kriterium A1: „Minimum an Herstellungsenergie, U – Wert unverändert“ erfolgen, ergäbe sich eine Einsparung (an Herstellungsenergie) von rund 11% oder (einmaligen) ca. 10500 (resp. 5600) Liter Heizöl – Äquivalent.

INGABEDATEN

Profil: Krankenhaus Bassersd

Formular 1: Eingabedaten Zeitgrößen

Planungshorizont für Systembetrachtung $n =$ **75** Jahre
 Zins (z) für Dämmkosten f -Gewichte; Nutzenabschlag (sz) für Grauenergie = **0.00** %
 Teuerung (t) für Dämmkosten f -Gewichte; Wertigkeitszuwachs (w) für Grauenergie = **0.00** %

Formular 2: Eingabedaten Bauteile

Bauteil	Kurzbezeichnung	Fläche A	¹⁾ U_o vorhanden	²⁾ U_{max} zul.	³⁾ b
[Nr.]	[fakultativ]	[m ²]	[W/m ² K]	[W/m ² K]	[Kh]
1	Aussenwände	1440.00	1.08	0.40	1.00
2	Steildach	1790.00	1.17	0.40	1.00
3	Flachdach	640.00	3.25	0.40	1.00
4	Wand gegen Erdreich	255.00	3.07	0.60	0.50
5	Wand gegen Keller	155.00	2.10	0.60	0.50
6	Boden g.Erdreich+BH	1770.00	1.18	0.60	0.75

Formular 3: Eingabedaten Zuordnung Dämmstoffe

Bauteil	Dämmstoff	⁴⁾	⁵⁾ J	⁶⁾ λ	$d_{vorh.}$	⁷⁾ B	⁸⁾ m	⁹⁾ f
[Nr.]	[Materialbasis]	[kg/m ³]	[MJ/m ³]	[W/mK]	[mm]	[Preis/m ³]	[Jahre]	[-]
1	Glaswolle	40.00	1640.00	0.036	100	*	40	0.10
2 ns	Glaswolle	80.00	3280.00	0.054	140	*	45	0.10
3	FOAMGLAS in Heissbit.	120.00	4000.00	0.040	120	*	45	0.20
4	Extrudierter Polystyrol	35.00	3850.00	0.035	80	*	30	0.50
5	Extrudierter Polystyrol	35.00	3850.00	0.035	0	*	30	0.50
6 ns	PUR / PIR	30.00	3000.00	0.020	60	*	75	0.70

Profil: Krankenhaus Bassersd

Optimierte Anordnung der Dämmschichten mit ökologischer Priorität

Detaillierte Zielvorgabe:

Minimiere Transmissionswärme - Verlust auf $\Sigma [U_{opt.} \cdot A \cdot b]$,

unter Beibehaltung des Grauenergie - Bedarfs von $\Sigma [J \cdot d \cdot A]$

Bauteil [Nr.]	d_{opt} [mm]	$U_{result.}$ [W/m ² K]	$[U_{result.} \cdot A \cdot b]$ [Wh]	$[U_{vorh.} \cdot A \cdot b]$ [Wh]	$[J \cdot d_{opt.} \cdot A]$ (als EL _{äquiv.} in Liter)
1	158	0.188	271	389	10365
2	115	0.335	600	519	18755
3	88	0.399	255	193	6258
4	47	0.599	76	49	1282
5	80	0.362	28	163	1326
6	71	0.227	302	345	10473
		Σ	1532	1658	48458 $\Sigma' = 95860$ $[\Sigma_{result.} \sim \Sigma_{vorh.}]$
		%	92.4	100	
		U'_{result}	0.253W/m ² K		

Der vorgegebene und beizubehaltende Grauenergiebedarf ($J \cdot d \cdot A$) ist in Tabellenspalte 6 als **entsprechendes Heizöläquivalent** $E_{äquiv.}$ (Heizöl extra - leicht, in Liter) ausgewiesen.

Bild 8: Eingabe – und Resultatformular für minimierten U – Wert bei unveränderter Herstellungsenergie; Einsparung jährlich wiederkehrend! (Kommentar ad hoc).

3. Politisch oder fachlich begründete Grenzwerte?

Wir haben gesehen, dass aus einer in allen Belangen akzeptierten (opaken) Gebäudehülle nachträglich durch „Umschichtungen“ der vorgegebenen Dämmstoffe kostenlos ein erhebliches Sparpotential herausgeholt werden kann.

Nun besteht natürlich auch die Möglichkeit – ausgehend von einem schon bei Planungsbeginn definierten und einzuhaltenden Wert U'_{soll} der (opaken) Gebäudehülle – die vorgesehenen Dämmstoffe in optimaler Schichtstärke zueinander anzuordnen. Ein praktisches Beispiel für einen einzuhaltenden Wert $U'_{\text{soll}} = 0.30 \text{ W/m}^2\text{K}$, mit der Zielvorgabe A1: „Die Herstellungenergie für die benötigten Dämmstoffe sei minimal“, ist nachstehend abgebildet und wird ad hoc kommentiert.

→ Version française: <http://www.cellularglassengineering.com/fr/programs/index.php>

Formular 1: Eingabedaten Zeitgrößen

Planungshorizont für Systembetrachtung n =	75 Jahre
Nutzenabschlag (sz) für Grauenergie =	2.00%
Wertigkeitszuwachs (w) für Grauenergie =	1.00%
Einzuhaltender mittlerer U'_{soll} – Wert der opaken Gebäudehülle =	0.300 W/m²K

Formular 2: Eingabedaten Bauteile

Bauteil	Kurzbezeichnung	Fläche A	¹⁾ U_o vorhanden	²⁾ $U_{\text{max zul.}}$	³⁾ b
[Nr.]	[fakultativ]	[m ²]	[W/m ² K]	[W/m ² K]	[Kh]
1	Terrasse befahren	50.00	1.80	0.40	1.00
2	Flachdach begrünt	100.00	2.20	0.40	1.00
3	Steildach	150.00	2.20	0.40	1.00
4	Fassade bekleidet	80.00	0.85	0.40	1.00
5	Fassade verputzt	240.00	1.40	0.40	1.00
6	Wand gegen Erdreich	50.00	2.50	0.60	0.90
7	Boden gegen Erdreich	100.00	2.50	0.60	0.75
8	Boden(-H)g.-A-Luft	200.00	0.80	0.40	1.40

Formular 3: Eingabedaten Zuordnung Dämmstoffe

Bauteil	Dämmstoff	⁴⁾ ρ	⁵⁾ J	⁶⁾ λ	⁷⁾ m	⁸⁾ f
[Nr.]	[Materialbasis]	[kg/m ³]	[MJ/m ³]	[W/mK]	[Jahre]	[-]
1	FOAMGLAS in Splitt	120.00	2000.00	0.040	35	0.10
2	FOAMGLAS in Heissbit.	120.00	4000.00	0.040	50	0.20
3	Steinwolle	120.00	1410.00	0.038	50	0.10
4	Glaswolle	60.00	2460.00	0.037	35	0.10
5 ns	Expandierter Polystyrol	20.00	2625.00	0.036	20	0.30
6 ns	Extrudierter Polystyrol	40.00	4400.00	0.040	30	0.50
7	FOAMGLAS in M-Beton	150.00	2500.00	0.050	75	0.10
8	PUR / PIR	30.00	3000.00	0.028	25	0.50

1) U_o – Wert ohne Berücksichtigung der Dämmschicht

2) Physiologisch bedingter / vorgeschriebener Grenzwert (entsprechender Dämmstoffbedarf bleibt ausserhalb der Optimierung)

3) Korrekturfaktor pro Bauteil je nach Temperaturgradient "innen – aussen". Standardgefälle erfordert Eingabe b = 1.0. Für abweichende Temperaturgefälle wie Wärmeabfluss gegen unbeheizte Räume oder Bodenheizung gegen Aussentemperatur, etc. (0.25 ≤ b ≤ 2.0) erfolgt Eingabe entsprechend der Dimensionierungsgrundlage

4) Rohdichte des Dämmstoffs, informativ

5) Grauenergie – Inhalt des Dämmstoffs

6) Lambda – Rechenwert des Dämmstoffs

7) Mutmassliche Gebrauchsdauer des Dämmstoffs im erstellten Bauteil (je nach Konstruktion / System)

8) Koeffizient "Entsorgung / Neubau" je Dämmstoff (Grauenergie-Einheit); falls Belastungen am Nutzungsende unberücksichtigt: f = 0.

Optimierte Anordnung der Dämmschichten mit ökologischer Priorität

Detaillierte Zielvorgabe:

Minimiere Grauenergiebedarf auf $\Sigma [J \cdot d_{opt} \cdot A]_{result.}$

unter Einhaltung des Transmissionswärme – Verlustes gemäss Vorgabe $[U'_{soll}]$

Bauteil [Nr.]	d_{opt} [mm]	$U_{result.}$ [W/m ² K]	$[U_{result.} \cdot A \cdot b]$ [Wh]	$[U_{WD} \cdot d_{opt} \cdot A]_{result.}$ [als EL _{äquiv.} in Liter]
1	145	0.239	12	403
2	116	0.298	30	1289
3	210	0.167	25	1234
4	103	0.253	20	563
5	73	0.365	88	1278
6	71	0.46	21	434
7	175	0.256	19	1215
8	67	0.275	77	1117
			$\Sigma = 291 \text{ Wh}$	$\Sigma = 7532 \text{ EL}_{\text{äquiv.}}$
			$U'_{result.} = 0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$	$J'_{WD result.} = 7,76 \text{ EL}_{\text{äquiv.}}/\text{m}^2$

Der minimierte Grauenergiebedarf ($J \cdot d_{opt} \cdot A$) ist in Tabellenspalte 5 als **entsprechendes**

Heizöläquivalent $E_{\text{äquiv.}}$ (Heizöl extra - leicht, in Liter) ausgewiesen.

BILD 9, 10: Praktisches Beispiel nach Zielvorgabe A1, mit $U'_{soll} = 0.30 \text{ W/m}^2\text{K}$

Bis vor kurzem bestand (z.B. laut Empfehlung (Norm) SIA 180/1) tatsächlich die Vorschrift, den einzuhaltenden Grenzwert für den mittleren U – Wert der Gebäudehülle (hier inkl. Fenstereinfluss) nachzuweisen. Ähnliches gilt für das Règlement grand – ducal du 3 aout 2005 betreffend Einhaltung des jährlichen Heizwärmebedarfs IE1. Auch dort kann man, nach Abzug der Lüftungsverluste, den verbleibenden Heizwärmebedarf [kWh/m²a] aufgrund der Gebäudegeometrie und der Klimavorgaben in einen einzuhaltenden U'_{soll} – Wert der Gebäudehülle umrechnen.

Es stellt sich nun einmal die Frage, ob denn derartige, normative Vorgaben grundsätzlich als politisch motivierte oder aber als fachlich begründete Grenzwerte bezeichnet werden können? Wie sind sie mit Versorgungssicherheit, mit Volksgesundheit, mit Wirtschaftlichkeit oder mit Klimaschutz/Ökologie zu begründen?

Wie schon einleitend festgestellt, werden heutige die entsprechenden behördlichen Vorschriften rund um alle „energetischen Fragen“ vornehmlich mit globalen, klimatisch – ökologischen Anliegen gerechtfertigt. Dagegen ist nicht das Geringste einzuwenden! Ob nun aber Verbrauchsgrenzen unter Berufung auf „Ökologie“ oder auf „Wirtschaftlichkeit“ erhoben werden: In beiden Fällen sollte es doch möglich sein, dies auch in fachlich nachvollziehbarer Form zu tun!

Der folgende Ansatz soll dieser Erwartung entsprechen:

Als „ökologisch optimal“ kann eine Bauhülle aus energetischer Sicht dann bezeichnet werden, wenn die Summe aller Energiemengen [kWh] – bestehend aus der benötigten Heizenergie über die Lebensdauer des Gebäudes plus der zur Dämmung des Gebäudes benötigten Energie – minimal werden.

Oder:

Als „wirtschaftlich optimal“ kann eine Bauhülle aus energetischer Sicht dann bezeichnet werden, wenn die Summe aller energiebezogenen Kosten [Euro] – resultierend aus den Heizenergiekosten über die Lebensdauer des Gebäudes plus den zur Dämmung des Gebäudes benötigten Materialkosten – minimal werden.

Nach dieser plausiblen Definition, welche sich problemlos in einen mathematischen Ansatz umlegen lässt, stellt sich lediglich noch die Frage, inwieweit das Resultat aus entsprechender Berechnung mit einer „zufälligen“ politischen Vorgabe zur Deckung kommt.

Auch wenn sich ein „gerechnetes Ergebnis“ wegen der vielen zu definierenden Einflussfaktoren in ähnlicher Weise beeinflussen lässt wie eine Vorgabe aus aktuellem „politischem mainstream“, so haben fachlich begründete Grenzwerte doch den grossen Vorteil, dass die zahlreichen Einflüsse auf das Ergebnis bewusst zur Kenntnis genommen werden, bzw. dass darüber ganz konkret befunden werden muss. Das fachlich begründete Ergebnis ist daher im Gegensatz zur politisch motivierten Vorgabe jederzeit nachvollziehbar!

Es soll im weiteren Verlauf gezeigt werden, wie ein solches umfassendes Optimierungskonzept für den Teilbereich <opake Gebäudehülle>, also mit Bezug auf die Frage der Gebäudedämmung, aussehen kann.

4. Das Konzept <OEKO - PRIORITY[®] für die Gebäudehülle> (Separatbeilage)

(→ Ausschnitt aus Referat c/o Luxemburgische Architektenkammer, Nov. 2006)

Es wird im Folgenden ein Berechnungsmodell vorgestellt, welches die eben diskutierte, fachlich begründbare Optimierung der Gebäudehülle aus ökologischer oder (betriebs -) wirtschaftlicher Sicht möglich macht.

Dabei handelt es sich um das mit Markenschutz versehene Konzept <OEKO - PRIORITY[®] für die Gebäudehülle>, welches in einem separaten Prospekt im Detail beschrieben ist (Prospekt wird abgegeben; franz., deutsch).

Zusammenfassend erfolgt die Optimierung nach OEKO – PRIORITY[®] in drei Schritten:

- 1) Es wird für verschiedene (beliebige) U'_{soll} – Werte die optimale Verteilung der vorgesehenen Dämmstoffe unter den gegebenen Bauteilen ermittelt (entsprechend gezeigtem Beispiel nach BILD 9,10). Jeder Lösung ist eine auf den Planungshorizont (Nutzungsdauer Gebäude) hochgerechnete Summe an benötigter Grauenergie (Herstellungsgenergie für den betreffenden Dämmstoffbedarf) zugeordnet. Dazu kann das vorstehend gezeigte Rechenprogramm verwendet werden.
- 2) Mit einem zweiten Programm wird aufgrund der zu ermittelnden Korrelation $\langle U'_{\text{soll}} \leftrightarrow \Sigma \text{Grauenergie} \rangle$ jener $U'_{\text{result.}}$ - Wert gefunden, welcher bei entsprechend optimierter Dämmstoffverteilung (Schritt 3) das gesuchte Gesamtoptimum ergibt. Wie das folgende Beispiel zeigt, ist der gefundene Wert $U'_{\text{result.}}$ von verschiedenen Einflussfaktoren abhängig, welche im Prinzip individuell festgelegt werden können.
- 3) Wie eben erwähnt, wird der nach Schritt 2) gefundene optimale U – Wert ($U'_{\text{result.}}$) wiederum in das für Schritt 1) verwendete Programm eingegeben und die benötigten Dämmschichten für dieses Gesamtoptimum ermittelt.

In analoger Weise ist es möglich, statt einer „Öko – Optimierung“ eine „Kostenoptimierung“ der Gebäudehülle vorzunehmen – oder gegebenenfalls auch nur einzelne Bauteile auf ein entsprechendes Gesamtoptimum zu bemessen. Ferner ist es möglich, in gleicher Weise statt eines Neubaus die Sanierung eines bestehenden Objektes anzugehen.

Das folgende Beispiel zur „Öko – Optimierung eines Neubaus mit der Zielsetzung: „Minimaler Gesamtenergie – Verbrauch aus Herstellung + (Heiz -) Energie“ verdeutlicht das Prinzip. Es handelt sich um dasselbe Beispiel, das sich im Prospekt zu OEKO - PRIORITY[®] findet (Erläuterungen ad hoc).

→ Version française: <http://www.cellularglassengineering.com/fr/programs/index.php>

Formular 1: Eingabedaten Zeitgrößen

Planungshorizont für Systembetrachtung n =	75 Jahre
Nutzenabschlag (sz) für Grauenergie =	2.50%
Wertigkeitszuwachs (w) für Grauenergie =	0.00%
Einzuhaltender mittlerer U'_{soil} – Wert der opaken Gebäudehülle =	0.125 W/m²K

Formular 2: Eingabedaten Bauteile

Bauteil	Kurzbezeichnung	Fläche A	¹⁾ U_o vorhanden	²⁾ $U_{\text{max zul.}}$	³⁾ b
[Nr.]	[fakultativ]	[m ²]	[W/m ² K]	[W/m ² K]	[Kh]
1	Dach	425.00	3.00	3.00	1.00
2	Terrasse	75.00	2.50	2.50	1.00
3	Aussenwand	950.00	1.10	1.10	1.00
4	Wand gegen Erdreich	230.00	0.86	0.86	1.00
5	Boden gegen Erdreich	375.00	0.33	0.33	1.00

Formular 3: Eingabedaten Zuordnung Dämmstoffe

Bauteil	Dämmstoff	⁴⁾ ρ	⁵⁾ J	⁶⁾ λ	⁷⁾ m	⁸⁾ f
[Nr.]	[Materialbasis]	[kg/m ³]	[MJ/m ³]	[W/mK]	[Jahre]	[-]
1	Dämmschicht 1	120.00	2000.00	0.040	40	0.50
2	Dämmschicht 2	120.00	2000.00	0.040	40	0.50
3	Dämmschicht 3	120.00	2000.00	0.040	40	0.50
4	Dämmschicht 4	120.00	2000.00	0.040	75	0.50
5	Dämmschicht 5	120.00	2000.00	0.040	75	0.50

BILD 11a: Vorgaben für praktisches Beispiel (Prospekt OEKO - PRIORITY^â)

Optimierte Anordnung der Dämmschichten mit ökologischer Priorität

Detaillierte Zielvorgabe:

Minimiere Grauenergiebedarf auf $\Sigma [J \cdot d_{\text{opt}} \cdot A]_{\text{result.}}$,

unter Einhaltung des Transmissionswärme – Verlustes gemäss Vorgabe [U'_{soil}]

Bauteil [Nr.]	d_{opt} [mm]	$U_{\text{result.}}$ [W/m ² K]	$[U_{\text{result.}} \cdot A \cdot b]$ [Wh]	$[U_{\text{WD}} \cdot d_{\text{opt}} \cdot A]_{\text{result.}}$ [als EL _{äquiv.} in Liter]
1	293	0.131	55	6918
2	290	0.131	10	1208
3	278	0.127	121	14672
4	336	0.105	24	4293
5	201	0.124	47	4188
			$\Sigma = 257 \text{Wh}$	$\Sigma = 31279 \text{ EL}_{\text{äquiv.}}$ $\Sigma = 45477 \text{ EL}_{\text{äquiv.}}$
			$U'_{\text{result.}} = 0.125 \text{W/m}^2\text{K}$	$J'_{\text{WD result.}} = 15.22 \text{ EL}_{\text{äquiv.}}/\text{m}^2$

BILD 11b: Optimierte Dämmstoff – Anordnung für $U'_{\text{soil}} = 0.125 \text{ W/m}^2\text{K}$

Optimierte Anordnung der Dämmschichten mit ökologischer Priorität

Detaillierte Zielvorgabe:

Minimiere Grauenergiebedarf auf $\Sigma [J \cdot d_{opt} \cdot A]_{result.}$

unter Einhaltung des Transmissionswärme – Verlustes gemäss Vorgabe [$U'_{soll.}$]

Bauteil [Nr.]	d_{opt} [mm]	$U_{result.}$ [W/m ² K]	$[U_{result.} \cdot A \cdot b]$ [Wh]	$[J_{WD} \cdot d_{opt} \cdot A]_{result.}$ [als EL _{äquiv.} in Liter]
1	278	0.137	58	6564
2	275	0.137	10	1146
3	202	0.168	159	10661
4	243	0.138	32	3105
5	190	0.129	48	3958
			$\Sigma = 308Wh$	$\Sigma = 25434 EL_{äquiv.}$ $\Sigma' = 36892 EL_{äquiv.}$
			$U'_{result.} = 0.15W/m^2K$	$J'_{WD result.} = 12.38 EL_{äquiv.}/m^2$

BILD 11c: Optimierte Dämmstoff – Anordnung für $U'_{soll} = 0.150 W/m^2K$

Optimierte Anordnung der Dämmschichten mit ökologischer Priorität

Detaillierte Zielvorgabe:

Minimiere Grauenergiebedarf auf $\Sigma [J \cdot d_{opt} \cdot A]_{result.}$

unter Einhaltung des Transmissionswärme – Verlustes gemäss Vorgabe [$U'_{soll.}$]

Bauteil [Nr.]	d_{opt} [mm]	$U_{result.}$ [W/m ² K]	$[U_{result.} \cdot A \cdot b]$ [Wh]	$[J_{WD} \cdot d_{opt} \cdot A]_{result.}$ [als EL _{äquiv.} in Liter]
1	209	0.18	76	4935
2	206	0.18	14	858
3	183	0.182	173	9658
4	220	0.15	35	2811
5	121	0.165	62	2521
			$\Sigma = 360Wh$	$\Sigma = 20783 EL_{äquiv.}$ $\Sigma' = 30373 EL_{äquiv.}$
			$U'_{result.} = 0.175W/m^2K$	$J'_{WD result.} = 10.11 EL_{äquiv.}/m^2$

BILD 11d: Optimierte Dämmstoff – Anordnung für $U'_{soll} = 0.175 W/m^2K$

Optimierte Anordnung der Dämmschichten mit ökologischer Priorität

Detaillierte Zielvorgabe:

Minimiere Grauennergiebedarf auf $\Sigma [J \cdot d_{opt} \cdot A]_{result.}$

unter Einhaltung des Transmissionswärme – Verlustes gemäss Vorgabe $[U'_{soll}]$

Bauteil [Nr.]	d_{opt} [mm]	$U_{result.}$ [W/m^2K]	$[U_{result.} \cdot A \cdot b]$ [Wh]	$[U_{W/D} \cdot d_{opt} \cdot A]_{result.}$ [als $EL_{äquiv.}$ in Liter]
1	157	0.235	100	3707
2	155	0.234	18	646
3	133	0.236	224	7019
4	160	0.194	45	2044
5	75	0.204	76	1563
			$\Sigma = 463Wh$	$\Sigma = 14979 EL_{äquiv.}$ $\Sigma' = 22012 EL_{äquiv.}$
			$U'_{result.} = 0.225W/m^2K$	$J'_{W/D result.} = 7.29 EL_{äquiv.}/m^2$

BILD 11e: Optimierte Dämmstoff – Anordnung für $U'_{soll} = 0.225 W/m^2K$

OBJEKTBEZEICHNUNG: OEKO - PRIORITY rev. Mai 08		
ÜBERTRAG VON WERTEPAAREN $\langle U'_{soll} \leftrightarrow$ GRAUENERGIE \rangle AUS DEM DÄMMSTOFF – UMSCHICHTUNGSPROGRAMM (SCHRITT 1):		
WERTEPAARE: (mindestens zweit)	U'_{soll} [W/m^2K]	GRAUENERGIE – HEIZÖL – ÄQUIVALENT [l]
(minimale Angaben)	0.1250	45477
	0.1500	36892
(weitere Angaben)	0.1750	30373
	0.2250	22012
RESULTIERENDER KORRELATIONSKOEFFIZIENT r		0.99966
WEITERE FESTLEGUNGEN:	NUTZUNGSDAUER GEBÄUDE (Übertrag aus Schritt 1)	75 Jahre
	SUMMIERTE DÄMMFLÄCHE (Übertrag aus Schritt 1)	2055 m²
	REALZINS FÜR GRAU-ENERGIE (Übertrag aus Schritt 1)	2.5 %
	REALZINS FÜR HEIZ-ENERGIE	0 %
	HEIZGRAD – TAGE / JAHR	3500 (K'd)
RESULTIERENDER ÖKO – OPTIMALER U – WERT $U'_{result.}$		0.179 (W/m²K)
-> ÜBERTRAG VON $U'_{result.}$ IN DAS DÄMMSTOFF – UMSCHICHTUNGSPROGRAMM (SCHRITT 3) !		

BILD 12: Korrelation $U'_{soll} \hat{=} \text{Grauennergie (Heizöl - Äquivalent)}$; optimaler Wert $U'_{result.}$

Optimierte Anordnung der Dämmschichten mit ökologischer Priorität

Detaillierte Zielvorgabe:

Minimiere Grauenergiebedarf auf $\Sigma [J \cdot d_{opt} \cdot A]_{result.}$

unter Einhaltung des Transmissionswärme – Verlustes gemäss Vorgabe $[U'_{soll.}]$

Bauteil [Nr.]	d_{opt} [mm]	$U_{result.}$ [W/m^2K]	$[U_{result.} \cdot A \cdot b]$ [Wh]	$[J_{W/D} \cdot d_{opt} \cdot A]_{result.}$ [als $EL_{äquiv.}$ in Liter]
1	198	0.189	80	4675
2	195	0.19	14	813
3	180	0.185	176	9500
4	216	0.152	35	2760
5	120	0.166	62	2500
			$\Sigma = 368Wh$	$\Sigma = 20248 EL_{äquiv.}$ $\Sigma' = 29556 EL_{äquiv.}$
			$U'_{result.} = 0.179W/m^2K$	$J'_{W/D result.} = 9.85 EL_{äquiv.}/m^2$

BILD 13: Gesamt – optimale Konstruktion für gefundenen Wert $U'_{result.} = 0.179 W/m^2K$

Es ist folgende generelle Tendenz erkennbar:

Mit steigenden Ansprüchen an den Wärmeschutz der opaken Gebäudehülle (tiefer mittlerer U – Wert) nimmt der Einfluss aus den U_0 - Werten auf den Unterschied in der Dämmstärke der betreffenden Bauteile ab. Dies gilt nur sehr bedingt auch für die übrigen Einflussfaktoren!

Die im Beispiel unter BILD 13 ausgewiesene Angleichung der Dämmstärken ist auf die standardisierte Festlegung für die Dämmstoffe: Einheitlicher Grauenergie – Inhalt, einheitlicher Lambdawert und auf die Vereinfachung: Bauteile „über Terrain“ = 40 Jahre Nutzungsdauer, resp. „unter Terrain“ = 75 Jahre Nutzungsdauer zurückzuführen. Diese Vorgaben folgen somit (zusammen mit weiteren Empfehlungen) einer vorgeschlagenen Standardisierung von Eingabegrössen nach entsprechendem Eingabeformular zu OEKO - PRIORITY[®]. Selbstverständlich können aber immer auch individuelle Vorgaben getroffen werden.

5. Erwägungen zur Leitgrösse <Gebrauchsdauer von Bauteilen>

Die optimierte Dämmdicke eines Bauteils fällt um so grösser aus, je länger dieses – im Vergleich zu anderen Bauteilen mit identischem Dämmmaterial – genutzt werden kann. Trotz höherem „Kaufpreis“ reduziert sich damit der auf das Jahr umgerechnete Investitionsaufwand, und zwar, ob er nun in energetisch / ökologischen oder im monetären Einheiten gemessen wird. Da mit der grösseren Dämmstärke gleichzeitig auch weniger Heizenergie verbraucht wird, ist eine lange Gebrauchsdauer des Bauteils in doppelter Hinsicht wertvoll.

Die Frage ist nun allerdings, wie hoch die Gebrauchsdauer eines Bauteils zu veranschlagen ist.

Es gilt hier eine erste Selektion zu treffen, indem gegen das Erdreich gedämmte Bauteile später nicht mehr verändert / erneuert werden können, so dass hier <Gebrauchsdauer Bauteil = Planungshorizont = Nutzungsdauer Gebäude> vorzusehen ist. Vorzeitiger (vermuteter) Ersatzbedarf muss statt dessen über einen gemittelt schlechteren Lambdawert des verwendeten Dämmstoffs berücksichtigt werden, denn ein „schlechter“ Lambdawert führt bei der Optimierung ebenso zu einer vergleichsweise bescheidenen Dämmstärke wie eine nur kurze Gebrauchsdauer. Siehe dazu vorstehende Ausführungen zum Begriff <***Quotient (je Bauteil)>.

Eine zweite Differenzierung der Gebrauchsdauer kann aus der Systemwahl für den betreffenden Bauteil erfolgen. So ist es naheliegend, dass (als statistische Grösse) die Gebrauchsdauer einer zweischaligen, hinterlüfteten Fassade deutlich höher anzusetzen ist, als jene einer sogenannt verputzten Aussendämmung (Putz auf Polystyrol oder Mineralfaser, direkt auf Tragwand). Ähnliches gilt beispielsweise für ein (konventionelles) Flachdach gegenüber einem auf durchgehender Holzschalung erstellten und gedämmten, zweischaligen Steildach.

Eine dritte Differenzierung ergibt sich je nach verwendetem Dämmstoff, und zwar insofern, als dieser gewisse Konstruktionsvarianten für ein bestimmtes Bauteil ermöglicht (oder leider ausschliesst), welche sich dank besonderer Robustheit durch ein minimales Risiko hinsichtlich Schadensentstehung, aber auch durch ein Minimum an allfälliger Schadensausbreitung auszeichnen. Es sind dies im allgemeinen sogenannte Verbund – Konstruktionen, bei denen die drei Funktionen <Tragen>, <Dichten> und <Dämmen> physikalisch und chemisch aufeinander abgestimmt sind (FOAMGLAS – Kompaktdach, belastbare FOAMGLAS – Bodenkonstruktionen, dampfdichte Innendämmungen von Aussenwänden, etc.).

Solange es sich um Dämmstoff - Optimierungen in der hier gezeigten Art handelt, ist es ausreichend, wenn die „Proportionen“ der unterschiedlichen Gebrauchsdauer von einzelnen Bauteilen im <System Gebäudehülle> untereinander gewahrt sind. Hierfür mag die eben skizzierte Differenzierung in drei Stufen eine ausreichende Hilfe sein.

Wenn es jedoch darum geht, sogenannte Direktvergleiche unter konkurrierenden Systemen (Bauteilen) nach wirtschaftlichen oder ökologischen Gesichtspunkten anzustellen, kommt der Gebrauchsdauer eine nochmals erhöhte Bedeutung zu. Dabei besteht in der Festlegung einer festen Grösse eine erhebliche Unsicherheit, handelt es sich dabei doch – im konkreten Einzelfall, also isoliert betrachtet – um eine Prognose, die von der Gegenseite jederzeit mit Fug und Recht angefochten werden könnte.

Für solche Fälle ist ein neutrales Berechnungsmodell entwickelt worden, welches u.a. bei verschiedenen Serviceleistungen für Bauherren und Planer (folgende Ausführungen) seine Anwendung findet. Es handelt sich dabei um eine fachkundige Schätzung aus statistischer Sicht, mit der charakteristischen Fragestellung: „Ausgehend von hundert identischen Konstruktionen (z.B. ein bestimmtes Flachdachsystem) ist – in Kenntnis der technischen Besonderheiten und Risiken – mit einer mittleren Lebensdauer von optimistisch etwa ??? – Jahren und pessimistisch etwa ??? – Jahren zu rechnen?“ Bei einer als zuverlässig eingeschätzten Konstruktion wird für beide Werte eine vergleichsweise hohe Zahl, insbesondere aber eine nur geringe Differenz zwischen den beiden Schätzwerten resultieren.

Mit Hilfe dieser beiden Schätzwerte wird in der Folge nach statistischen Methoden eine bestimmte Häufigkeitsverteilung generiert, so dass die „Variable Gebrauchsdauer“ nicht mehr als Einzelwert, sondern mit rund hundert verschiedenen, ungleich gewichteten Werten in die Rechnung eingeht. Entsprechende Anwendungen dieses Grundprinzips finden sich beispielsweise in den Serviceprogrammen Nr. 6, Nr. 7, Nr. 13, und Nr. 18.

Das gesuchte Resultat einer von der Gebrauchsdauer beeinflussten Berechnung (allgemein: bei Wirtschaftlichkeitsrechnungen) wird dann ebenfalls nicht mehr durch einen Einzelwert ausgedrückt, sondern folgt einer Wahrscheinlichkeitsverteilung, innerhalb welcher im Prinzip jedes Resultat „seine Chance“ hat. Zwar mag diese Angabe von Ergebnissen für den Laien noch etwas gewöhnungs – bedürftig sein, die Aussage selber ist aber viel zuverlässiger und bei Konkurrenzsituationen viel weniger umstritten.

Die folgenden Bilder zeigen ein paar typische Anwendungen dieser Methodik (Kommentar / Erläuterung erfolgt ad hoc). ./.

WIRTSCHAFTLICHKEIT VON FOAMGLAS - KOMPAKTDÄCHERN

Resultattabelle

Diese Resultate basieren auf folgenden Angaben: BEISPIEL

Nomineller Zinssatz: **5 % pro Jahr**
 Nominelle Bauteuerung: **2.5 % pro Jahr**
 Planungshorizont: **45 Jahre**
 Erstellungskosten FOAMGLAS Kompaktdach (Referenzdach-System): **100000** (DIM. = Währung)
 Erstellungskosten Konkurrentdach (Vergleichsdach-System): **80000** (DIM. = Währung)
 Rückbaukosten FOAMGLAS Kompaktdach (Referenzdach-System): **32** (DIM. = Prozent)
 Rückbaukosten Konkurrentdach (Vergleichsdach-System): **40** (DIM. = Prozent)
 Gebrauchsdauer Konkurrentdach, optimistisch: **40 Jahre**
 Gebrauchsdauer Konkurrentdach, pessimistisch: **25 Jahre**

1 (Σ - %)	2 (Jahre)	3 (Kostendifferenz/Währung)	4 (Integral)	5 (rel. Rentabilität, %)	6 (Δ Zins, %)
95	11.4		-177017	49.87	5.21
90	16.0		-99967	28.16	4.06
85	19.0		-69992	19.72	3.40
80	21.3		-52813	14.88	2.91
75	23.2		-41240	11.62	2.52
70	24.8		-32902	9.27	2.19
65	26.2		-26464	7.46	1.89
60	27.5		-21092	5.94	1.61
55	28.7		-16579	4.67	1.35
50	29.8		-12774	3.60	1.10
45	30.9		-9251	2.61	0.85
40	31.9		-6268	1.77	0.61
35	33.0		-3205	0.90	0.33
30	34.0		-602	0.17	0.07
25	35.1		2081		
20	36.3		4812		
15	37.6	■	7563	2322	
10	39.1	■	10495		
5	41.1	■	14048		

Es spricht nur der hellgraue Bereich unten für die Konkurrenzvariante.

Wahrscheinlichstes Ergebnis:

(Σ - %)	(Jahre)	(Kostendifferenz/Währung)	(rel. Rentabilität, %)	(Δ Zins, %)
<input type="text" value="37"/>	<input type="text" value="32.5"/>	<input type="text" value="-4571"/>	<input type="text" value="1.29"/>	<input type="text" value="0.46"/>

Enter

[Wie lese ich die Resultattabelle <PDF>?](#)

Legende:

- Prozentwerte der Summenhäufigkeit; Über - resp. Unterschreitungshäufigkeit für ein Resultat
- Prognostizierte Gebrauchsdauer des zum FOAMGLAS - Kompaktdach in Konkurrenz stehenden Vergleichsdaches. Mit zugeordneter Überschreitungs - Wahrscheinlichkeit nach 1
- Gesamtkostendifferenz der konkurrierenden Dächer.
 - Negativedifferenzen = Kostenvorteil zugunsten Kompaktdach, mit zugeordneter Überschreitungs - Häufigkeit gem. Spalte 1
 - Positivedifferenzen = Kostenvorteil zugunsten Vergleichsdach, mit zugeordneter Überschreitungs - Häufigkeit gem. Spalte 1
- Risiko - Kosten Integral (grössere Zahl = grösserer Kostenvorteil)
- Relative Rentabilität für FOAMGLAS - Kompaktdach: Jährliche Minderkosten Kompaktdach geteilt durch Mehrinvestition für Kompaktdach, mit zugeordneter Unterschreitungs - Häufigkeit.
- Erf. Zuschlag Δz auf Kalkulationszinssatz z → erf. Aktiwerzinsung (z + Δz) für Investitionskosten - Differenz ΔE₀, damit Kostensummen - Gleichheit innerhalb Planungshorizont (n), mit zugeordneter Unterschreitungs - Häufigkeit.

BILD 14: Wirtschaftlichkeitsvergleich von Flachdach - Systemen

GRENZKOSTEN DER DACHRENOVATION: RESULTATTABELLE

Diese Resultate basieren auf folgenden Angaben: BEISPIEL

Nomineller Zinssatz:	5 % pro Jahr	Nominelle Bauteuerung:	2.5 % pro Jahr
Nominelle Energiepreis-Teuerung	1.5 % pro Jahr	Aktuelle Nutzwärme - pro kWh	0.05 (DIM. = Währung)
Heizgradstunden:	84000 (K*h) pro Jahr	Energie-Verlustfläche:	1000 m²

Festlegungen für FOAMGLAS-Kompaktdach als "Alternative Neudach"

Gebrauchsdauer (=Planungshorizont)	45 Jahre
Brutto-Erstellungsbetrag	180000
Gleichzeitigkeits-Gutschrift	-50000
Rückbaukosten Neudach	50000, aktuelle Preisbasis (!)
U-Wert für Neudach	0.25 W/m²K

Festlegungen für Renovationsdach

Rückbaukosten Renovationsdach	40000, aktuelle Preisbasis (!)
U-Wert für Renovationsdach nach Sanierung	0.40 W/m²K
Prognose Restgebrauchsdauer nach Sanierung	optimistisch: 25 Jahre; pessimistisch: 10 Jahre

1 (Σ - %)	2 (Jahre)	3 (Grenzkosten für Dachrenovation, Währung)	
5	26.3		76236
10	24.3		70458
15	22.9		66167
20	21.7		62316
25	20.6		58638
30	19.6		55166
35	18.6		51564
40	17.7		48206
45	16.7		44341
50	15.8		40735
55	14.8		36580
60	13.7		31821
65	12.6		26852
70	11.5		21661
75	10.2		15221
80	8.8		7891
85	7.2		-1029
90	5.4		-11826
95	3.1		-26934

Im Graubereich fällt eine Renovation generell ausser Betracht

Wahrscheinlichstes Ergebnis:

(Σ - %)	(Jahre)	(Grenzkosten für Dachrenovation / Währung)
<input type="text" value="40"/>	<input type="text" value="17.5"/>	<input type="text" value="47444"/>

[Wie lese ich die Resultattabelle <PDF>?](#)

Legende:

- 1 Prozentwerte der Summenhäufigkeit; Über- resp. Unterschreitungshäufigkeit für ein Resultat
- 2 Prognostizierte Rest-Gebrauchsdauer für das Renovationsdach. Mit zugeordneter Überschreitungs-Häufigkeit (Wahrscheinlichkeit) nach 1
- 3 **Grenzkosten für die Dachrenovation***)**
infolge Rest Gebrauchsdauer nach Spalte 2, mit Über- oder Unterschreitungs-Häufigkeit je nach Grafikverlauf, gemäss Spalte 1.
- Positivwerte → Zulässiger Maximalbetrag für die Renovation
- Negativwerte → Für Kostengleichheit mit dem Sofortersatz müsste eine die realen Sanierungskosten (zur Erreichung der Rest Gebrauchsdauer nach Spalte 2) in Höhe des Nennbetrags übersteigende Entschädigung ausgerichtet werden. (Sanierungssubvention > Sanierungsaufwand!).
***) merke: Dieser Grenzbetrag stellt streng genommen den Kapitalwert aller Sanierungsmassnahmen dar, welche innerhalb der Rest- Gebrauchsdauer (zu deren Erreichung) getätigt werden dürfen. An Stelle eines einmaligen Renovationsaufwandes zum Zeitpunkt "jetzt", sind auch jährliche Teilsanierungen (mit rechnerisch gemittelter, allfälliger U - Wert - Verbesserung) möglich, sofern deren diskontierte Kostensumme den ausgewiesenen Grenzbetrag nicht übersteigt.

BILD 15: Grenzkosten von Dachrenovationen

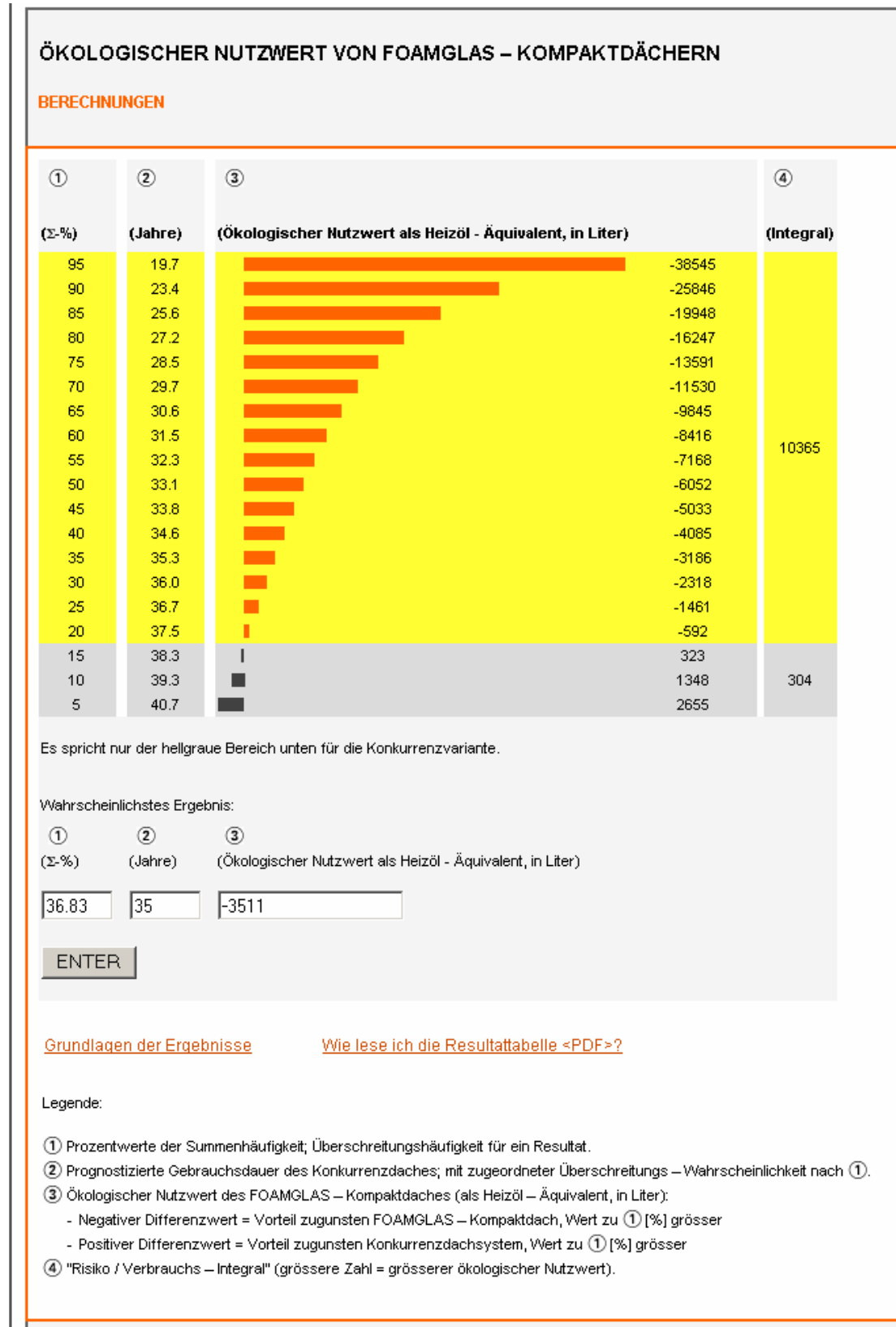


BILD 16: Ökologischer Vergleich von Dachvarianten

→ Version française: <http://www.cellularglassengineering.com/fr/programs/index.php>

LIFE CYCLE COSTING (LCC) - PROFILE VON BAUTEILEN DER GEBÄUDEHÜLLE			
BERECHNUNGEN			
GRUNDLAGEN DER BERECHNUNG			
Bezeichnung	FOAMGLAS - Kompaktdach, zu erstellen 10 Jahre nach einer Altdach - Renovation		
Bauteil	optimistisch	fix	pessimistisch
Kosten der Erst - Erstellung		120.00 ***/m ²	
Zeitpunkt der Erst - Erstellung; (r) - Jahre (normalerweise (r) = 0 Jahre nach Referenzzeitpunkt)		10.0 Jahre	
Rückbau - Kosten, in % der Erstellungskosten	21.00 %	≤	49.00 %
Periodischer (Bau-) Unterhalt pro Jahr		1.20 ***/m ²	
(+/-) Unterhalts - Zuwachs pro Jahr (umfangmässig)	0.00 %	≤	1.00 %
Gebrauchsdauer (g) - Jahre	45 Jahre	>	35 Jahre
Vorinvestition / "Einmal-Zahlung" ("von Hand" diskontierte Kostensumme zwischen 0 und (r) - Jahren; Ohne Abschreibung und Restwert! Inkl. allfälligem Unterhalt.		60 ***/m ²	
Allgemein / Energie	optimistisch	fix	pessimistisch
(+/-) (Bau-) Teuerung pro Jahr	2.00 %	≤	5.00 %
U₀ - Wert bis (r) - Jahre nach Referenzzeitpunkt		0.50 W/m ² K	
U - Wert des Bauteils, ab Zeitpunkt (r)		0.25 W/m ² K	
Nutzwärmepreis (aktuell)		0.08 ***/kWh	
(+/-) Energiepreisteuerung pro Jahr	1.00 %	≤	6.00 %
(+/-) Kapitalverzinsung pro Jahr	3.50 %	≤	8.25 %
allgemeine Inflationsrate		1.25 %	
Heizgradtage pro Jahr		3500 Kd	
Bezugshorizont (i) - Jahre		35 Jahre	

*** in der betreffenden Landeswährung

BILD 17a: Life Cycle Costing (LCC) – Profil für FOAMGLAS – Flachdach (Eingaben)

→ Version française: <http://www.cellularglassengineering.com/fr/programs/index.php>

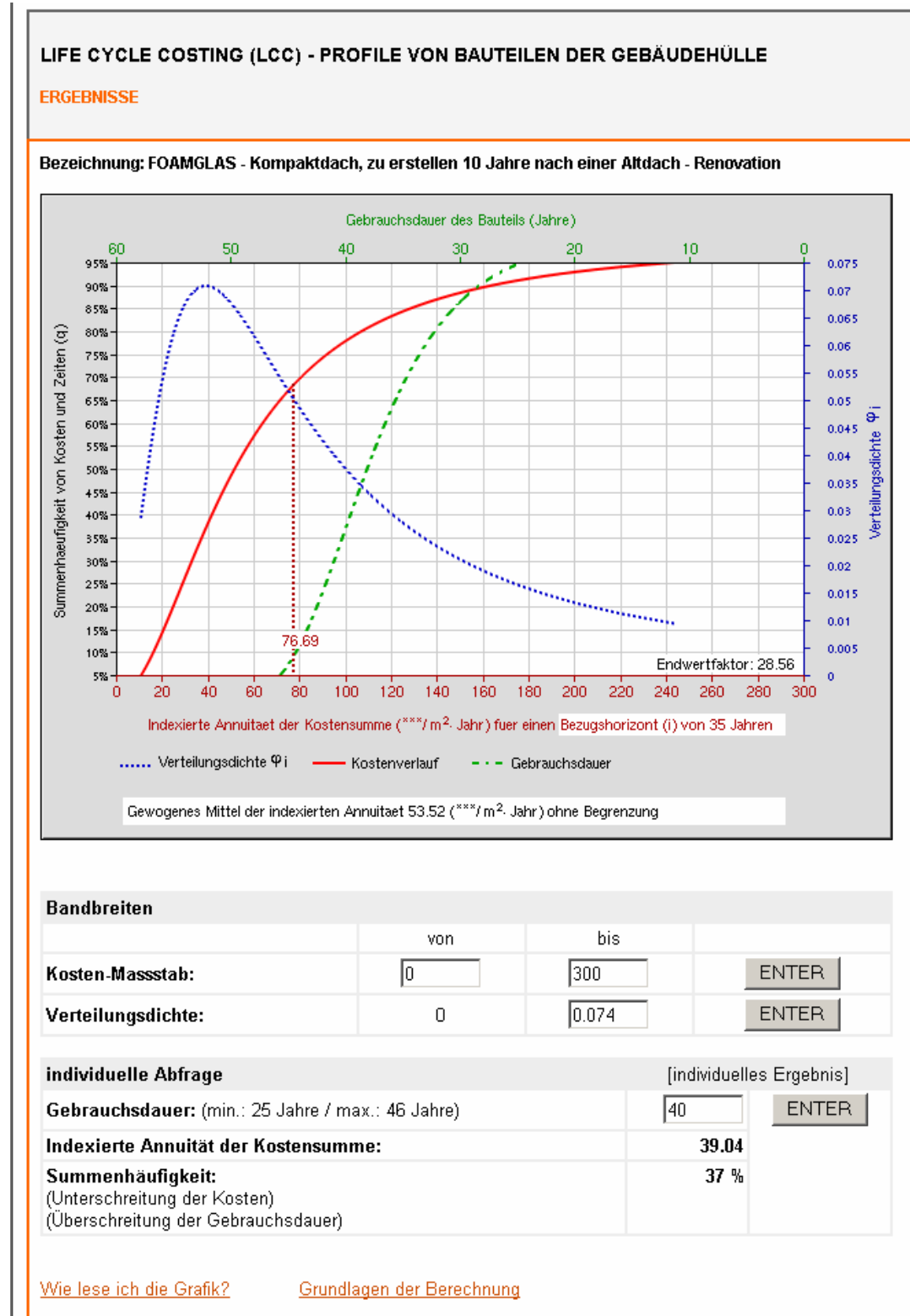


BILD 17b: Life Cycle Costing (LCC) – Profil für FOAMGLAS – Flachdach (Resultat)

6. Fazit

Die Dämmstärken werden weiter anwachsen. Es ist dies die Folge einer fortschreitenden Verschärfung der Wärmeschutznormen. Diese Verschärfung wiederum folgt weitgehend einer mehr oder weniger zufälligen und wechselhaften „politischen Motivation“ – und weniger den fachlich begründeten Zusammenhängen.

Ausgehend von einer normativen Energie – Verbrauchsvorgabe können die benötigten Dämmstoffe unter den Bauteilen so angeordnet werden, dass die Zielvorgabe mit einem Minimum an „Aufwand“ erreicht wird. Als „Aufwand“ kann dabei ein Minimum an Dämmstoffkosten, an entsprechender Herstellungsenergie oder an benötigter Dämmstoffkubatur verstanden werden. Desgleichen ist es möglich, ausgehend von einem akzeptierten „Aufwand“, die einzelnen Dämmstärken so festzulegen, dass dabei ein Maximum an Wirkung (minimaler mittlerer U – Wert) erzielt wird.

Wenn wir uns also einleitend mit gewisser Sorge gefragt haben: „Wohin mit den Dämmstoffen?“ (räumlich oder entwicklungsmässig), so zeigt die hier vorgestellte <Optimierung durch Umschichtung> eine Möglichkeit, ohne zusätzliche Kosten „das Bestmögliche“ aus dieser Entwicklung zu machen.

Im Herbst 2006

H. Bangerter, berat. Ing. usic/sia; c/o WEDER + BANGERTER AG; Ingenieure und Bauphysiker, Zürich