Fenster und Energiehaushalt: eine kritische Bilanz

Autor(en): **Keller, Bruno / Grether, Paul / Brader, Kurt**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **100 (1982)**

Heft 51/52

PDF erstellt am: **29.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-74911

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Fenster und Energiehaushalt

Eine kritische Bilanz

Von Bruno Keller, Paul Grether und Kurt Brader, Winterthur

Einführung

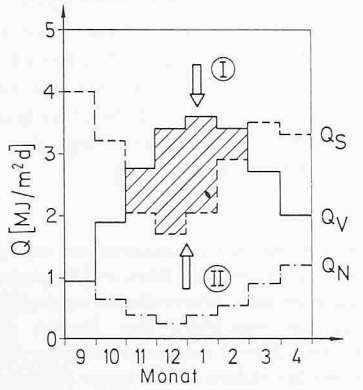
Architekten, Bauherren und Politiker sind sich darüber einig, dass der *Energiebedarf* für die Heizung von Häusern *minimalisiert* werden muss. Ebenso ist erkannt worden, dass *das Fenster* als bestimmendes Element der Hauptaustauschfläche (der Fassade) eine Schlüsselrolle spielt.

Es wurden in letzter Zeit viele und kontroverse Behauptungen über die Rolle des Fensters publiziert. *Abrupte Modeschwenker* in der Architektur waren die Folge: vom Engadinerhaustrend zum Glashaus und zum Wintergarten. Eine sorgfältige experimentelle Überprüfung fehlt häufig, und man bekommt den Eindruck, dass in manchen Fällen wesentliche Aspekte der Behaglichkeit auf dem Altar des Energiesparens geopfert werden.

Wir haben deshalb verschiedene Berechnungsmethoden und Modelle auf ihren Gültigkeitsbereich und ihre theoretische und experimentelle Stichhaltigkeit hin untersucht und mit eigenen Resultaten verglichen. Als erstes Resultat dieser Arbeit möchten wir hier nicht eine abschliessende Meinung äussern, sondern vielmehr versuchen, die *heutige Situation darzustellen* und auf *noch offene Fragen* aufmerksam zu machen.

Um realistische Verhältnisse zu erhalten, die auch auf Mehrfamilienhäuser und Bürobauten anwendbar sind, betrachten wir einen *Wohn- oder Arbeitsraum*, dessen Wärmeaustauschfläche mit der Umgebung sich aus Aussenwand und Fenster zusammensetzt. Da die Verluste durch Dach und Keller bei heutigen Bauten sehr klein gehalten werden können, ist es sinnvoll, die Wärmeflüsse auf die Fassade zu beziehen, welche sich zu unterschiedlichen Prozentsätzen aus Fenster und Wand zusammensetzen soll. Als wesentlicher zusätzlicher Verlust kann auch der Luftwechsel bei gegebener Raumtiefe (hier 6 m) auf die Fassadenfläche bezogen werden.

Bild 1. Angebot und Nachfrage für eine Fassade mit 50% 3fach IV und Mauer ($k = 0{,}5$ W/m²K)



Q_S = Sonnenenergie von der Südseite
Q_N = Sonnenenergie von der Nordseite
Q_V = Verluste durch Transmission und Lüftung ($n = 0{,}5\ h^{-1}$)
(Alles Monatsmittelwerte)

Sparstrategien

Betrachtet man die Bilanz von Angebot und Nachfrage (Bild 1) für eine Süd- bzw. Nordfassade an Hand der Monatsmittelwerte, so zeichnen sich *zwei Sparstrategien* ab:

- *Minimierung der Verluste (I):* hochisolierte Hülle, kontrollierte Lüftung, Wärmerückgewinnung
- *Maximierung der Gewinne (II):* Süd-Ausrichtung, maximale Strahlungsdurchlässigkeit, grossflächige Fenster, grosses Speichervermögen.

Oder als

- *Hybride Strategie (III):* bei Tag nach II, bei Nacht nach I. Diese Strategie verlangt allerdings täglich entsprechende Massnahmen für diesen Wechsel: Die Bedienung von Roll- oder Klappladen zur richtigen Zeit.

Die *einseitige* Durchsetzung einer einzigen solchen Strategie führt zwingend zu einer *katastrophalen Komfortverschlechterung:*

I: zu einer Höhle ohne Tageslicht, da die Fenster ohne Berücksichtigung der Einstrahlung relativ schlecht isolieren,

II: zum kaum bewohnbaren Glashaus mit raschem Wechsel zwischen Überhitzung bei starker Einstrahlung, Frieren und hohem Energieverbrauch bei bedecktem Himmel.

Eine optimale Lösung wird in einem *vernünftigen Kompromiss* zwischen I und II zu finden sein. Eine solche Strategie muss jedoch eine Reihe weiterer Randbedingungen berücksichtigen, soll sie von einer Mehrzahl von Hausbewohnern und Bauherren akzeptiert werden:

- Gewährleistung der notwendigen Behaglichkeit: Temperaturgrenzen für die Innenluft, Vermeidung von starker Strahlungsasymmetrie und von Zugerscheinungen, genügende Tageslichtbeleuchtung,
- akzeptable Kosten: Investition und Betrieb,
- Betriebssicherheit, geringe Reparaturanfälligkeit,
- möglichst geringe Beeinträchtigung des eigentlichen Verwendungszwekkes des Gebäudes und der Raumnutzung,
- möglichst unabhängig von der topografischen Lage realisierbar.

Wie weit man so mit der Strategie I kommen kann, hängt wesentlich von der Verfügbarkeit gut isolierender Fenster und ihrer Auswirkung auf das Raumklima und den Energiehaushalt ab.

Die Möglichkeiten der Strategie II stehen und fallen mit dem unter Wahrung einer akzeptablen Behaglichkeit nutzbaren Anteil der einfallenden Sonnenenergie, d. h. wieder mit der Wechselwirkung zwischen Fenster und Raum.

Qualitative Aspekte des Fensters

Statistik des Energieflusses

Der Energiefluss durch das Fenster wird wesentlich durch folgende Grössen bestimmt:

- k-Wert (genaugenommen sowohl temperatur- als auch einstrahlungsabhängig),
- g-Wert (Gesamtenergietransmission für die solare Einstrahlung, berücksichtigt sowohl fühlbare Wärme an der Oberfläche als auch Strahlungsdurchgang in die Raumtiefe)

Der *Nettofluss* in den Raum ergibt sich zu:

$$P_N = g \cdot P_S - k(\vartheta_i - \vartheta_a)$$

wobei:

P_S = Sonneneinstrahlung (W/m²)
ϑ_i = Innentemperatur
ϑ_a = Aussentemperatur

Falls $P_N > 0$ (Überschuss) so leistet das Fenster einen Beitrag zur Deckung der übrigen Verluste und eventuell zur Speicheraufladung.

Bevor wir die Einflussgrössen für die Speicherung des Überschusses untersuchen, sei die Häufigkeit des Eintretens von $P_N \geqq 0$ betrachtet. Damit $P_N \geqq 0$ gilt, muss

$$\frac{\vartheta_i - \vartheta_a}{P_S} \leqq \frac{g}{k}$$

erfüllt sein.

Zählt man die Heizstunden einer Heizperiode aus, für welche diese Beziehung gilt, so erhält man die Anzahl Dekkungsstunden N_D mit mindestens ausgeglichener Bilanz.

Diese sind in Relation zu setzen zu

- der Anzahl Lichtstunden N_L: Stunden mit Solaranteil überhaupt: $P_S > 0$
- der Anzahl der Nachtstunden N_N: Stunden mit $P_S = 0$

und

- der Anzahl der Heizstunden N_H: Stunden mit $\vartheta_a \leqq$ Heizgrenze, z. B. 12 °C: $N_H = N_N + N_L$

Die Anteile dieser drei Kategorien an der Gesamtzahl der Heizstunden vom 1.9.–30.4. eines Jahres zeigt Bild 2 für ein bestimmtes Jahr für Genf [1] bzw. Maugwil [2].

Die Position von typischen Fenstern ist durch Pfeile markiert (gilt nur für die Fläche, ohne Rahmen) [3]:

	k	g	g/k
Zweifach-Isolierverglasung (2f-IV)	2,8	0,8	0,29
Dreifach-Isolierverglasung (3f-IV)	1,9	0,7	0,37
Wärmeschutzglas (WS)	1,1	0,6	0,55
Prototyp (PT)	0,6	0,5	0,83

Für die Deckungsstunden N_D gilt: Rechenwert $k' = 0$, für die teilweise gedeckten Stunden $N_L - N_D$: $k' < k$ und für die Nachtstunden $N_N = N_H - N_L$ gilt der volle k-Wert, wobei für etwa ⅔ dieser Stunden mit einem Laden eingegriffen werden kann.

Die Graphik zeigt, dass im Klima des schweizerischen Mittellandes nur ein recht kleiner Teil von Heizstunden einen Überschuss aufweist. Von den heute erhältlichen Verglasungen weisen die besser isolierenden nicht nur einen geringeren Nachtverlust infolge kleineren k-Wertes, sondern auch eine grössere Anzahl Deckungsstunden auf.

Ob und inwieweit die während der relativ wenigen Überschussstunden anfallende Energie zur Deckung des Bedarfs der Mangelzeiten beitragen kann, hängt davon ab,

- wieviel des Überschusses überhaupt gespeichert werden kann,

und

- wieviel vom Gespeicherten auf die Mangelzeiten übertragen werden kann.

Dabei spielen *folgende Parameter* eine im einzelnen noch abzuschätzende Rolle

- Fensteranteil
- Raumtiefe
- Aufbau von Wänden, Decken
- Komfortgrenzen, Benützerverhalten
- Luftwechselrate
- innere Wärmequellen, Beleuchtung
- Heizsystem und seine Regelcharakteristik

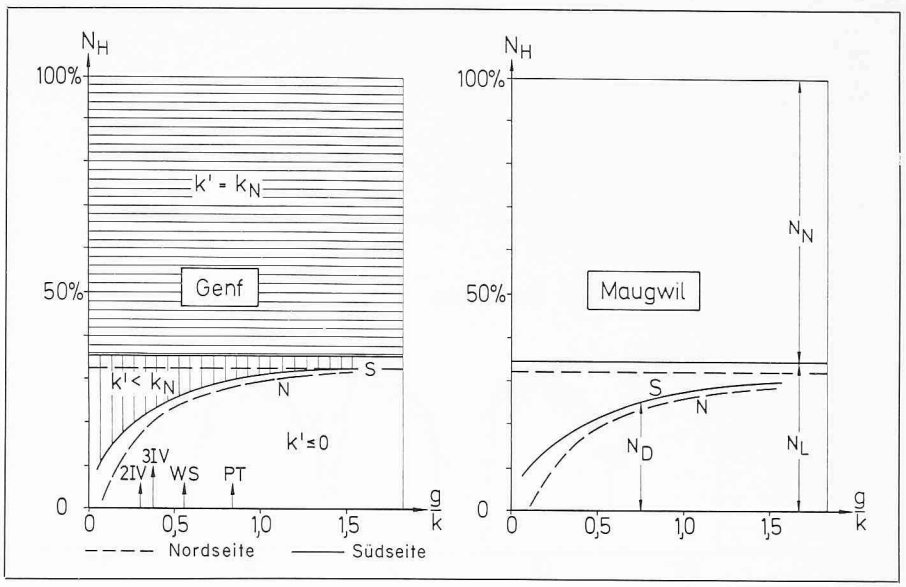


Bild 2. Statistik der Deckungs- und Lichtstunden

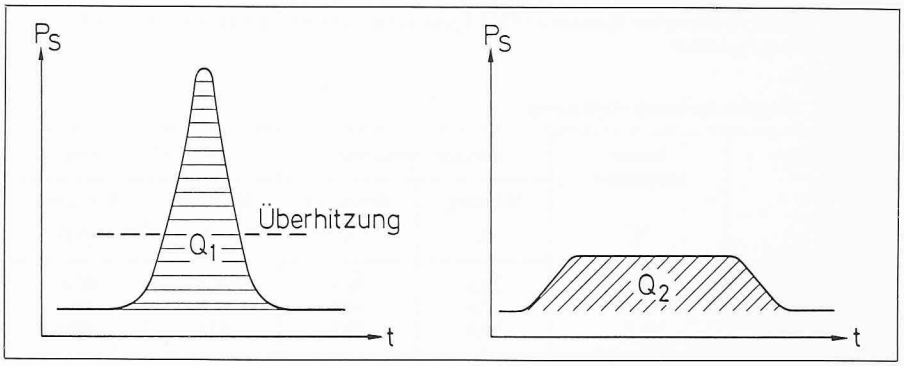


Bild 3. Unterschiedlicher Einstrahlungsverlauf, qualitativ

- Aussenklima: Korrelation zwischen Einstrahlung und Aussentemperatur.

Dynamik des Einstrahlungsvorganges

Die *Komfortgrenzen* (Lufttemperatur, Einstrahlung sowie Blendung) bestimmen den Zeitpunkt, bis zu welchem ein Überschuss an Sonnenenergie eingelassen wird. Wie rasch die obere Grenze des Komfortbereichs erreicht wird, hängt ab von den momentanen Verlusten des Raumes als Ganzes: Transmission, Lüftung sowie von der Speicherfähigkeit und den dabei beteiligten Wärmeübergängen: z. B. nackter Beton verglichen mit Teppich auf Inlaid und schwimmendem Estrich.

Dabei muss beachtet werden, dass alle *Wärmeleitungsvorgänge relativ langsam* verlaufen, die *Einstrahlung sich aber sehr rasch* ändern kann. Als Mass für die Dynamik von Transmissionsverlusten und Einstrahlung kann die erste Ableitung von gP_s bzw. $k\,(\vartheta_i - \vartheta_a)$ benützt werden. Typische Werte liegen bei $\Delta P_s = 600$ W/m² bzw. $\Delta\vartheta_a = 2$–4 °C je innerhalb einer halben Stunde:

$$\frac{d\,(g\,P_S)}{dt} \cong \frac{0{,}8 \cdot 600}{0{,}5}$$

also bis 900 W/m²h

$$\frac{d\,[k\,(\vartheta_i - \vartheta_a)]}{dt} \cong \frac{0{,}8 \cdot 4}{0{,}5}$$

also bis 6,4 W/m²h

Das heisst, dass selbst bei einem an sich guten Speichervermögen die Ausnutzung noch stark vom zeitlichen Verlauf der Einstrahlung abhängt. Trotz gleicher Energiemenge Q_1 bzw. Q_2 wird im Fall 2 wesentlich mehr gespeichert: Bild 3.

Je kleiner nun die Verluste eines Raumes sind, desto rascher erreicht die Lufttemperatur die Komfortgrenze, und der weitere Überschuss wird ausgesperrt (erhöhte Lüftung oder Storen, Vorhänge usw.). Hochisolierte Räume neigen wesentlich rascher zu Überheizung als schlecht isolierte. Allerdings kann sich die hohe Isolation trotzdem infolge der vielen Stunden mit Unterdeckung auszahlen.

Diese qualitativen Überlegungen zeigen, dass es notwendig ist, das Fenster zusammen mit einem benutzten Raum zu betrachten und dass es sinnlos ist, quantitative Angaben über die Energiebilanz des Fensters allein zu machen [5, 6].

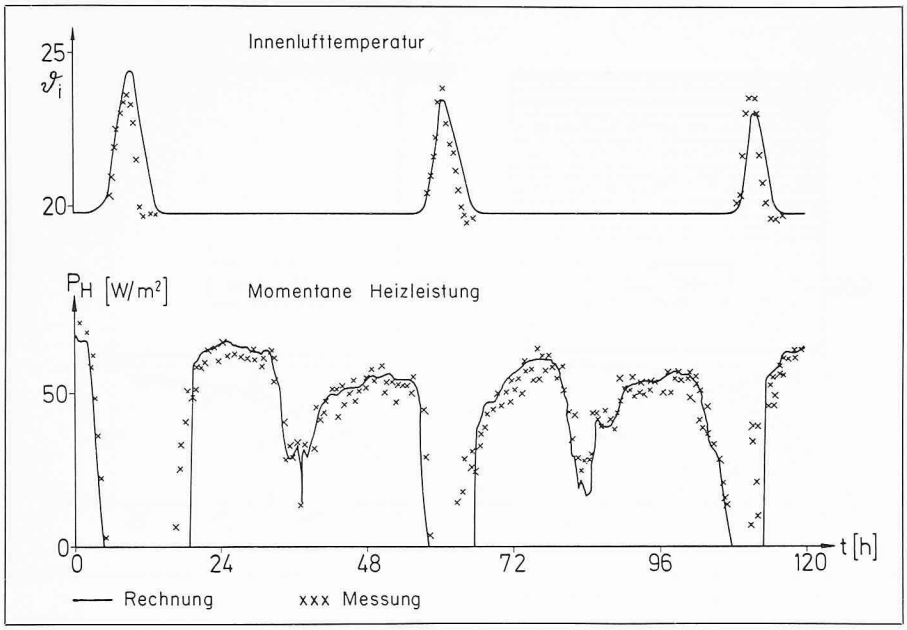


Bild 4. Vergleich Rechnung mit Messung an EMPA-Messkabine: Innenlufttemperatur (oben) und momentane Heizleistung P_H (unten)

Tabelle 1. Vergleich Rechnung mit Messung

Betriebsart	*Aussen-temperatur*	*Innenlufttemperatur*		*Mittl. Heizleistung*	
		Messung	Rechnung	Messung	Rechnung
	°C	°C	°C	W/m²	W/m²
ϑ_i = konst.	+2,23	20,0	20,3	40,5	40,6
Nachtabsenkung	−0,95	17,8	18,6	46,0	49,3
Rolladen Nacht	−1,3	19,9	20,3	47,0	44,0

Berechnungsmethoden

Die Zielsetzung einer *Raumsimulation* muss die folgende sein:

- Verstehen des thermischen Verhaltens bestehender Räume,
- Beschaffung von Unterlagen für die Konzipierung von Gebäudehüllen mit wesentlich geringerem Energiebedarf als zurzeit üblich.

Diese Zielsetzung und die im vorstehenden Kapitel dargelegten Gesichtspunkte zeigen, dass *schlichte Bilanzrechnungen mit statischen Modellen* nach der Art [4, 6]:

$$Q_H = Q_{Tr} + Q_{LW} - \eta_S Q_S - \eta_i Q_i$$

im allgemeinen *keine zuverlässigen Angaben* liefern können, es sei denn für Räume mit schlechtem Wärmeschutzstandard. Solche Methoden können wegen ihrer Einfachheit für den Praktiker dann wieder aktuell werden, wenn es gelingt, die Abhängigkeit von η_s und η_i für eine Reihe von Parametern präzise anzugeben. Dazu sind aber dynamische Rechnungen notwendig.

Unter einer *dynamischen Rechnung* ist eine solche zu verstehen, die reale Wetterdaten mit Zeitschritten $t \ll \tau$ (τ = Zeitkonstante eines Raumes) verwendet und die zeitgerechte Simulation der Reaktion der Bewohner gestattet. Diese Zeitkonstanten (aus einer ersten exponentiellen Näherung an die Auskühlkurve bestimmt) liegen in der Grössenordnung von 20 bis 200 h, je nach Bauweise. Das heisst, dass eine Berechnung mit Wochen- oder sogar Tagesmittelwerten noch nicht dynamisch ist.

Unter den tatsächlich dynamischen Modellen können 3 Stufen unterschieden werden:

- *grob (1-Kapazitätsmodell):* Wenig Aufwand, nur beschränkte Aussagekraft, geeignet für Tendenzabklärungen [3, 7]
- *mittel (Netzwerkmodelle):* elektrische Netzwerke aus Widerständen und Kapazitäten [8, 9 u. v. a.], mittlerer Aufwand, detailliertere Aussagen, aber immer noch diverse Näherungen: Wärmeleitung in Bauelementen, Strahlungstransfer usw.
- *fein (FE-Modelle):* weitgehend vollständige Modelle, vollständige Erfassung des Strahlungstransfers für IR und Solar, Wärmeausbreitung mit finiten Elementen, finiten Differenzen oder Responsefaktoren, auf Gebäude ausdehnbar (z. B. DOE). Grosser Aufwand, aber sicher und differenziert.

Ein-Kapazitätsmodell

Das Speicherverhalten eines Raumes wird sehr global *durch eine einzige Speicherkapazität* von berechenbarer Grösse [3, 7] simuliert, die durch die Sonneneinstrahlung aufgeladen und durch die Verluste (Transmission und Lüftung) entladen wird. Mit Hilfe eines solchen Modells haben wir für verschiedene Konfigurationen mit gemessenen Wetterdaten [1] eine ganze Heizperiode (in ½-h-Werten) durchgerechnet, unter Berücksichtigung eines Komfortbereichs von $20 \leqq \vartheta_i \leqq 25$ °C und einer Nachtabsenkung von 22.00 bis 06.00 Uhr. Zudem wurde diese sehr grobe Näherung durch Messungen an einem Testhaus der EMPA überprüft. Der Vergleich von Messung und Rechnung in Bild 4 und Tabelle 1 zeigt eine überraschend gute Übereinstimmung.

Mit diesem Modell können selbstverständlich nicht alle Grössen berücksichtigt werden. Es wurden im Sinne einer Vorabklärung *folgende Grössen variiert:* Fensteranteil (mauerlichtbezogen), Fenstertyp, *k*-Wert der Aussenwand und Luftwechselrate. Dabei wurde auf sinnvolle Kombinationen von *k*-Wert (Wand) und Luftwechsel geachtet. Bild 5 zeigt einige repräsentative Resultate (für eine Kapazität C = 300 kJ/m²K, also eher Schwerbau). Ein ähnliches Modell ist auch vom Forschungslabor von Philips entwickelt und überprüft worden [7].

Aus diesen Kurven lässt sich folgendes ableiten:

1. Für die S-Seite (übrigens auch für O/W) existiert ein optimaler Fensteranteil: Energieminimum (was sich auch mit der Erfahrung im Vergleich Glashaus und Engadinerhaus deckt).
2. Die Ausnutzung der Sonnenenergie ist bei grossen Verlusten wesentlich höher als bei kleinen Verlusten (Bild 6).
3. Auch auf der Nordseite liegt ein wenn auch kleinerer Strahlungsbeitrag vor.
4. Besser isolierende Fenster im Rahmen der hier untersuchten Typen führen zu eindeutig geringeren Verlusten.
5. Wird der Fensteranteil wesentlich über das Optimum hinaus erhöht, so nimmt der Energieverbrauch im allgemeinen wieder zu: Die Nacht- und Schlechtwetterverluste nehmen zu, und vom Überschuss der Einstrahlung muss ein zunehmender Teil wegen Überhitzung an sonnigen Tagen ausgesperrt werden.

Im Rahmen dieses groben Modells lassen sich *keine abschliessenden quantitativen Aussagen* machen. Die Minima können sich etwas verschieben, aber als

allgemeine Tendenz lässt sich doch mit Sicherheit herausschälen, dass

- es keinen absoluten Sonnenenergie-Gewinn gibt,
- dass der nutzbare Sonnenenergiegewinn vielmehr ganz wesentlich von den Verlusten abhängt und primär zu deren teilweiser Deckung dient,
- dass hochisolierende Fenster Vorteile aufweisen, auch wenn ihre Gesamtenergietransmission etwas geringer ist: der Verbrauch ist geringer, die Temperatur- und Heizleistungsschwankungen sind kleiner und der Gestaltungsspielraum (Fensteranteil) ist grösser.

Wenn man in Gebiete von sehr niedrigem Energieverbrauch vorstossen will (Bild 4c), so genügen solche Modelle kaum mehr, erreicht man doch bei $n = 0{,}2\ h^{-1}$ und $k_w = 0{,}25\ W/m^2K$ bereits die Grössenordnung des Beitrags der inneren Quellen: 0,5 – 1,5 MJ/m²d (Menschen, Apparate, Beleuchtung).

Netzwerkmodelle

Von diesem Typ sind an verschiedenen Orten eine ganze Reihe von Varianten im Gebrauch [8, 9]. Sie gestatten eine wesentlich *detailliertere Simulation* eines Raumes: Oberflächentemperaturen, Lufttemperatur, Strahlungstransfer, Konvektion. Allerdings müssen für die Wärmeausbreitung in den Bauelementen (Speichereffekte) ziemlich grobe Näherungen gemacht werden. Das würde eigentlich eine genaue Überprüfung an möglichst realitätsnahen Räumen von hohem Wärmeschutzstandard notwendig machen. Leider wurden unseres Wissens bis jetzt aber nur Messboxen einerseits [8, 9] und relativ schlecht isolierte, komplexe Solarhäuser [9] andererseits gerechnet und gemessen, so dass noch keine abschliessende Beurteilung möglich ist.

FE-Modelle

Grundsätzlich stellt die vollständige Simulation *keine neuen physikalischen Probleme*. Die Problematik liegt weniger in den beteiligten Mechanismen als in der *Vielzahl der beteiligten Parameter* und in der Unsicherheit bei der *Simulation des Benützerverhaltens*. Für mehr oder weniger grobe Näherungen kann der Anlass also nur im Wunsch nach einer Reduktion des Computeraufwands liegen. Andererseits kann man sich fragen, ob man nicht erst dann den Aufwand reduzieren sollte, wenn man genau weiss, welche Parameter man vernachlässigen kann. Das bedeutet, dass man zuerst möglichst alle Einflüsse berücksichtigt, dann die Parameterempfindlichkeit untersucht und erst dann entsprechend dem Ergebnis vereinfacht.

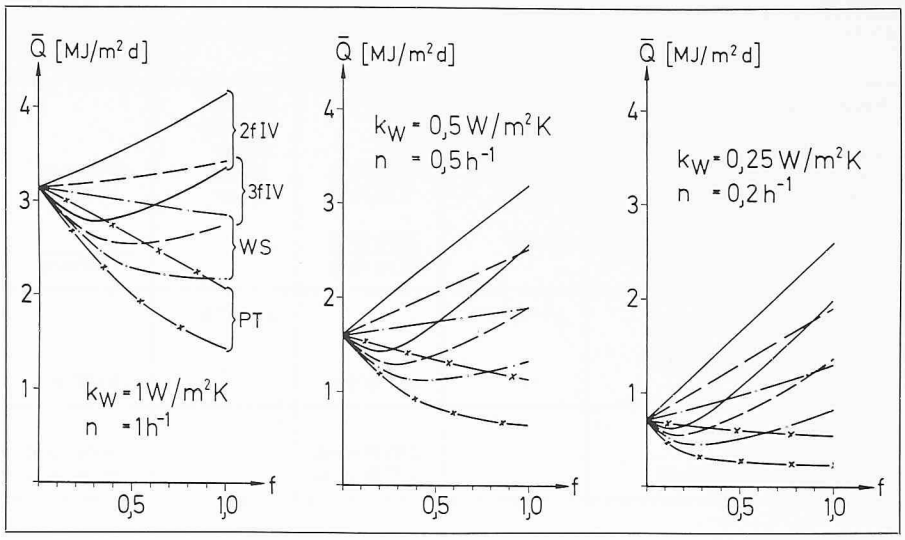


Bild 5. Mittlerer Heizbedarf Q pro m² Fassade und mittleren Heiztag in Funktion des Fensteranteils f

Zu diesem Zweck wurden an verschiedenen Orten recht aufwendige Programme entwickelt (DOE 2.1, 10, 11). Speziell auf die Fenster-Raum-Wechselwirkung zugeschnitten ist allerdings keines, Anpassungen sind jedoch im Gange [10].

Aus diesem Grunde haben wir für unsere Zwecke selber ein entsprechendes Modell entwickelt, das die möglichst uneingeschränkte Simulierung eines Raumes inklusive der angrenzenden Räume ermöglichen soll (Bild 7):

- *Energietransfer durch das Fenster:* Berücksichtigung auch von Temperatur- und Einstrahlungsabhängigkeit,
- *Solarstrahlung:* Direkte und diffuse Strahlung getrennt, inklusive diffuser Mehrfachreflexion im Raum,
- *IR-Strahlung:* Berücksichtigen der Emission, der Geometrie und der diffusen Mehrfachreflexion
- *Konvektionsübergänge:* z. T. nach Grashof, Nusselt, d. h. temperaturabhängig, z. T. konstant.
- *Wärmeausbreitung in Wänden, Decken usw.:* vollständig mit finiten Differenzen nach Crank-Nicholson,
- *angrenzende Räume:* diese werden als gleich mit dem untersuchten vorausgesetzt, ausser bei der Rückwand: Korridor mit vorschreibbarem Verhalten. Physikalisch entspricht das periodischen Randbedingungen. Nach Wunsch können aber auch Boxen, Eckräume usw. simuliert werden.

Selbstverständlich wurde auch dieses Programm mit unseren Messungen am Testhäuschen der EMPA verglichen, wobei die Übereinstimmung gut war.

Erste Untersuchungen haben ergeben, dass

- für den Wämeaustausch im Innern eines Raumes: Decke zu Wand, Fenster usw. der Infrarotstrahlungsaustausch wirksamer ist als der Austausch über die Luft,
- die Struktur der oberflächennahen Schichten eine erhebliche Rolle spielt, z. B. nackter Betonboden, verglichen mit einem Teppich auf Inlaid. Die Einstrahlung hat einen wesentlich rasanteren Anstieg der Oberflächentemperatur zur Folge, in Übereinstimmung mit Messungen,
- ein erheblicher Unterschied besteht, zwischen dem Verhalten eines Rau-

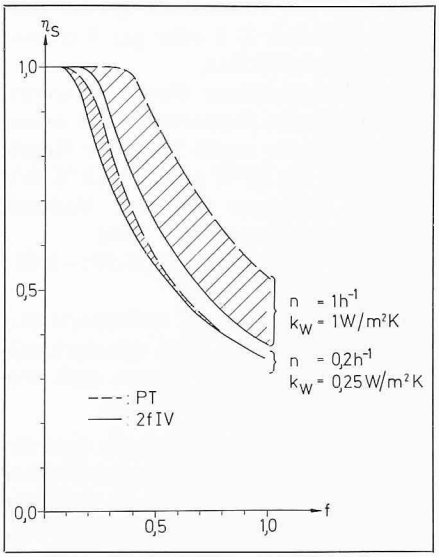


Bild 6. Sonnenenergie-Nutzung für extreme Wärmeschutzstandards. Andere Fenstertypen liegen im schraffierten Gebiet

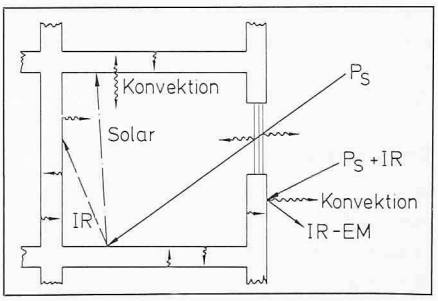


Bild 7. Modellraum für Computermodell. Wand- und Deckenaufbau siehe Text

Tabelle 2. Vergleich Messbox mit Raummodul

	Box		*Modul*	
Raummasse	6·4·2,6 = 62,4 m³		6·4·2,6 = 62,4 m³	
Südfassadenfläche:	10,4 m²		10,4 m²	
- Fenster (k = 2 W/m²K)	5,2 m²	10,40 W/K	5,2 m²	10,40 W/K
- Mauer (k = 0,2 W/m²K)	5,2 m²	1,04 W/K	5,2 m²	1,04 W/K
Restl. Aussenfläche (k = 0,2 W/m²K)	89,6 m²	17,92 W/K	-	-
Transmissionsverluste		29,36 W/K		11,44 W/K
Luftwechsel	n = 0,5 h^{-1}		n = 0,5 h^{-1}	
Lüftungsverluste: $Vc\varrho\, n/3600$ = 62,4·950·1,28·0,5/3600 =		10,5 W/K		10,5 W/K
Mittl. k-Wert, wenn alles auf S-Fassade bezogen		2,82 W/m²K		1,10 W/m²K
mit Fenster k = 1,1 W/m²K		2,37 W/m²K		0,65 W/m²K

mes, der mit nur einer Fassadenfläche an die Aussenwelt grenzt und Räumen mit 2, 3 oder gar 6 (Messbox) Grenzflächen,

- eine Energiebilanz über eine sonnige, aber kalte Januarwoche für einen Normalraum ergibt bei einer Regelstrategie für 20 °C $\leqq \vartheta_{Luft} \leqq$ 23 °C folgende Gewinne (+) bzw. Verluste (−) für das Fenster (f = 50%)
  2f-IV: −0,24 kWh/m²d; 3f-IV: −0,08; WS: +0,29; PT: +0,39
  Der Widerspruch zu andernorts publizierten Werten zeigt, wie stark solche Aussagen vom Raum und von der Regelstrategie abhängen.

Die weitere Arbeit zeigte auch, dass die Simulation von Heizsystemen inklusive ihrer Regelcharakteristik zu anderen Resultaten führt, als wenn mit idealen, rein numerisch eingefügten Heizleistungen gerechnet wird: der Raum reagiert und überschwingt. Folglich sind hier *noch ergänzende Arbeiten notwendig,* die die Simulation von Heizsystemen und auch der Beleuchtung und inneren Lasten in einem genügenden Ausmass erlauben sollen.

Testsysteme

Weltweit werden Simulationsmodelle mit Hilfe von Testhäuschen und Testboxen geprüft. Auch unser Einkapazitätsmodell haben wir mit solchen Messungen verglichen und waren erstaunt über die ausgezeichnete Übereinstimmung (Bild 4). Dies hat uns veranlasst, die Eignung von solchen Testboxen für Modellüberprüfungen zu untersuchen.

Von einem realen Raum unterscheiden sich die meisten Testboxen in *zweierlei Hinsicht:*

- *Schichtaufbau der Hülle:* Bei Boxen meist eine äussere 10–20 cm dicke Isolation und je nach Bauart (leicht oder schwer) auf der Innenseite eine 10–20 cm dicke Schicht aus Beton, Formsteinen oder Backsteinen, z. T. sogar einfach im Innern aufgeschichtet [9]. Ein realer Raum hohen Wärmeschutzstandards weist jedoch entweder ein Zweischalenmauerwerk oder ein hochisolierendes Fassadenelement als Aussenwand, einen Teppich oder sonst einen angenehmen Bodenbelag, aus akustischen Gründen einen schwimmenden Estrich und erst dann eine Betondecke und als Trennwand zu andern Räumen meist eine Backsteinmauer mit Verputz auf. Bei Testboxen wird also meist mit zuviel Speichermaterial und vor allem mit zu geringen Übergangswiderständen von der Oberfläche in die Tiefe des Materials gearbeitet. Die Folge davon ist, dass ein zu grosses Speichervermögen oder eine zu geringe Temperaturerhöhung im Vergleich zu einem normalen Raum vorgetäuscht wird.
- *Transmissionsverluste:* Ein Wohn- oder Arbeitsraum in einem Haus grenzt mit mindestens 3 (Eckraum) meist aber 4 bis 5 seiner 6 Grenzflächen an andere, meist gleich oder ähnlich betriebene Räume. Eine Testbox jedoch grenzt mit allen 6 Flächen an die Aussenwelt. Dadurch bekommen die Transmissionsverluste ein zu grosses Gewicht, auch wenn diese Flächen relativ gut isoliert sind, wie Tabelle 2 zeigt. Zudem können sich so die speichernden Elemente laufend direkt durch die Isolation hindurch an die Aussenwelt entladen, während in einem realen Raum die Entladung nur durch den Raum hindurch via Aussenwand möglich ist (Bild 8). Damit werden bei der Box die kritischen Speichervorgänge in den Hintergrund gedrängt.

Ein *Vergleich* von Testbox und Raum im Gebäudeverband (Modul) anhand von Tabelle 2 zeigt, dass bei der Box die Transmissionsverluste durch die anderen Aussenflächen wesentlich grösser sind als durch die zu untersuchende Südfassade. Zudem verschiebt sich der Anteil von Transmissions- und Lüftungsverlusten. Rechnet man alle Verluste auf die Südfassade um, so erhält man k-Werte, die weit ab vom heutigen Standard liegen. Zudem ist die Empfindlichkeit auf die Bestimmungsgrössen der Fenster sehr gering. Folglich muss mit sehr hoher Genauigkeit gemessen und gerechnet werden, um die Auswirkung von zwei Fenstertypen auch nur unterscheiden zu können.

Um diese Kritik an den Testboxmodellen zu überprüfen, haben wir den Temperaturverlauf für drei verschiedene Raummodelle mit Hilfe unseres fortgeschrittenen Programms untersucht:

- *Modell 1:* Testbox mit 50% Dreifachverglasung in Südwand, Masse: 4·6·2,6 m³. Alle Aussenwände: aussen 15 cm Isolation (λ = 0,04 W/mK), innen 15 cm Beton (λ = 1,8 W/mK), k-Wert also 0,25 W/m²K, Luftwechselrate n = 0,5 h^{-1}, freistehend.
- *Modell 2:* Betonraum: gleich wie Testbox, aber mit 5 seiner Grenzflächen an gleiche Räume stossend, Innenwände und Decken 15 cm Beton, Aussenwand gleich wie Box, ebenso Luftwechsel.
- *Modell 3:* Normalraum, gleiche Abmessungen wie Box, an gleiche Räume stossend auf 5 Seiten. Aufbau der Wände: Verputz je 1 cm und Backstein 15 cm, Aussenwand: Zweischalenmauerwerk, 10 cm Backstein, 10 cm Isolation, 15 cm Backstein, k = 0,36 W/m²K, Boden, Decke: Teppich, Inlaid, 6 cm Mörtelestrich, 4 cm Kork, 21 cm Beton, Luftwechsel n = 0,5 h^{-1}

Gerechnet wurde das Verhalten der Räume für einige sonnige, aber kalte Januartage. Bild 9 zeigt den sehr unterschiedlichen Verlauf der Lufttemperaturen:

Schon das *Einfügen in einen Gebäudeverband* führt zu einer starken Änderung des Verhaltens, weil die Transmissionsverluste erheblich reduziert werden. Allerdings entspricht auch ein Betonmodul allem anderen als einem bewohnbaren Raum. Beim *Übergang zu einem realen Raum* zeigen sich denn auch nochmals erhebliche Änderungen: Die Temperatur überschreitet mehrmals die Komfortgrenze, was den Einsatz von erhöhter Lüftung oder von Storen usw. und damit eine Reduktion des gespeicherten Sonnenenergieanteils zur Folge hätte.

Aufgrund dieser Abklärungen ergibt sich,

- dass Testboxen nur zur Überprüfung von recht groben Modellen und nur

im Hinblick auf relativ niedrigen Wärmeschutz geeignet sind;
- dass Modelle, die den Anspruch erheben, allgemeingültig und vor allem auf hohen Wärmeschutzstandard anwendbar zu sein, nicht sinnvoll an solchen Testboxen getestet werden können, wenn sie wesentliche Näherungen enthalten;
- dass Boxen als Modellräume für Aussagen über die Energiebilanz von Fenstern [8] ungeeignet sind. Sie täuschen einen zu hohen Beitrag der Sonnenstrahlung vor im Vergleich zu realen Räumen;
- dass sich zuverlässige Aussagen nur mit Methoden machen lassen, die die Berücksichtigung der in bewohnbaren Räumen üblichen Schichtaufbauten und den Einbezug der angrenzenden Räume gestatten.

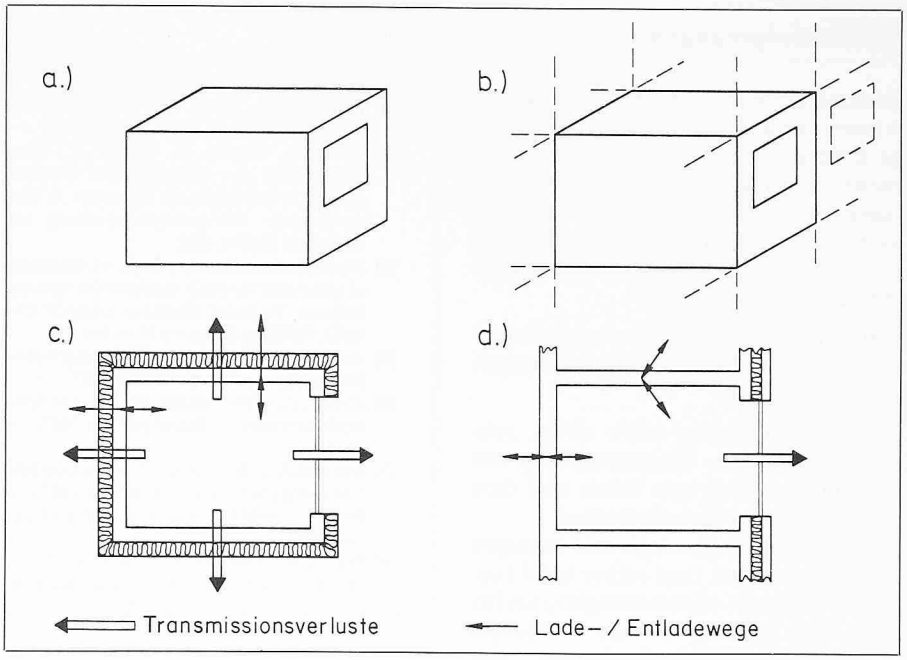


Bild 8. Vergleich Messbox mit Raum im Gebäudeverband

Zwischenlösung

Die kritische Analyse der zurzeit existierenden Modelle und Berechnungsmethoden hat unserer Ansicht nach ergeben, dass *zurzeit noch keine allgemeingültigen Modelle* existieren, die ohne wesentliche Einschränkungen sichere Voraussagen gestatten. Bis solche Methoden entwickelt sind, braucht es aber für den Praktiker Angaben, die ihm gestatten, wenigstens den Teil der anfallenden Sonnenenergie zu berücksichtigen, der mit Sicherheit genutzt werden kann. Dies auch im Interesse einer seriösen Beratung von Bauherren. Diese wurden schliesslich in letzter Zeit nur zu oft durch unhaltbare Versprechungen verunsichert.

Unserer Ansicht nach bieten sich als Zwischenlösung *zwei Methoden* an:

1. *Verzicht auf Speicherwirkung:* Da die Einflussfaktoren für die Speicherung von Überschüssen noch zu unsicher erfassbar sind, schlagen wir vor, vorläufig nur die Deckung des momentanen Verlustes durch das Fenster und eventuell auch der Lüftung und der Aussenwand zu berücksichtigen. Dies kann getan werden mit Hilfe der Kurven von Bild 2. Je nach Fenstertyp ergibt sich ein bestimmter Wert für die Quotienten g/k, z. B.: 3fach-IV: $g/k = 0{,}37$
   - Deckungsstunden: $N_D = 23\%$; $k' = 0$; Beitrag = 0.
   - restliche Lichtstunden: $N_L - N_D = 19{,}3\%$; $k' = k/2$; Beitrag = $0{,}193 \cdot 1{,}9/2 = 0{,}18$.
   - Nachtstunden: $N_N = 57{,}7\%$; $k' = k$; Beitrag = $0{,}577 \cdot 1{,}9 = 1{,}10$.

   Rechenwert für k: $k' = 0 + 0{,}18 + 1{,}10 = 1{,}28\ W/m^2K$.

   In den Gleichungen ergibt sich so der Rechenwert k' für k:

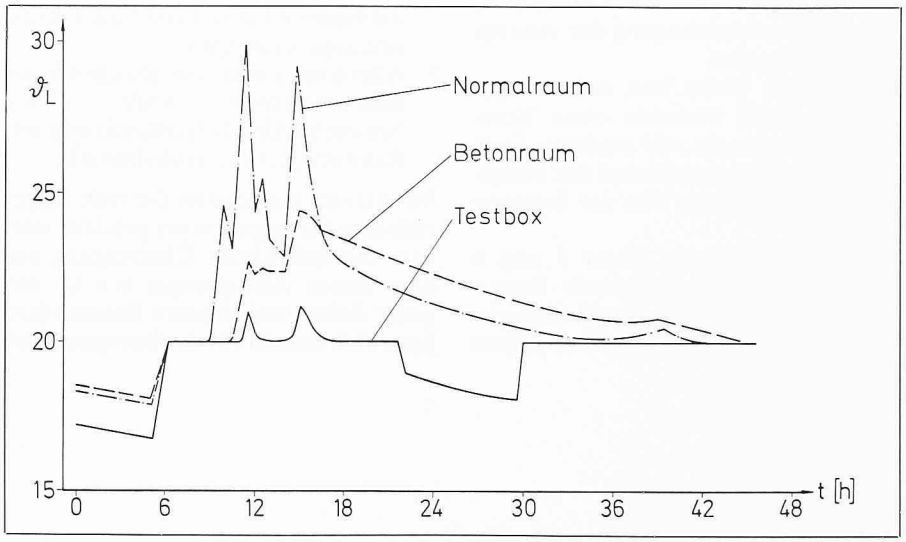


Bild 9. Verlauf der Lufttemperatur für 2 Januartage

$$k' = N_N k + (N_L - N_D)\, k/2$$

Der *Vorteil dieser Methode* ist, dass sie voraussetzungslos auf beliebige Fenster- und Wandkombinationen anwendbar ist, die Berücksichtigung von Läden oder ähnliches gestattet und nichts verspricht, was nicht gehalten werden kann.

2. Beschränkte Berücksichtigung der Einstrahlungsüberschüsse: Untersuchungen von *Gertis* und *Hauser* [12], mit ähnlichen Programmen wie bei den FE-Modellen erwähnt, haben ergeben, dass die Diffusstrahlung allein mit einem korrigierten k-Wert

$$k' = k - 1{,}0\, g$$

berücksichtigt werden kann. Auch damit bleibt man auf der sicheren Seite. Der Wunsch nach Berücksichtigung der direkten Strahlung führt zu den Ausdrücken

Süden	$k' = k - 2{,}4\, g$
Ost/West	$k' = k - 1{,}8\, g$
Nord	$k' = k - 1{,}2\, g$

Dabei muss allerdings vor einer exzessiven Anwendung insbesondere bei gut wärmegedämmten Bauten gewarnt werden, da dies zur Konstruktion von vermeintlichen Kraftwerken führen kann: $\bar{k} < 0$! Der erste Ansatz ist also im Zweifelsfalle vorzuziehen.

Beiden Vorschlägen ist gemeinsam, dass sie erstens einen Fortschritt im Vergleich zur Empfehlung SIA 180/1 und 180/3 darstellen und zweitens doch auf der sicheren Seite liegen. Erhebt jemand den Anspruch, den solaren Beitrag zur Energiebilanz weitergehend berücksichtigen zu können, so müsste er eigentlich den Nachweis mit einem entsprechenden differenzierteren Verfahren erbringen. Über die Zulassung solcher Verfahren müsste zu gegebener Zeit eine Einigung erzielt werden.

Schlussfolgerungen

Zusammenfassend muss darauf hingewiesen werden, dass für eine vollständige Erfassung und energieoptimale Dimensionierung noch nicht alle Grundlagen vorhanden sind. Es empfehlen sich deshalb vorläufig Methoden auf der sicheren Seite (siehe vorstehenden Abschnitt).

Einige Aussagen können aber doch aufgrund der dargelegten Untersuchungen gemacht werden:

1. Das Fenster darf *nicht allein,* sondern muss im Zusammenhang mit dem dazugehörigen Raum und dem Heizsystem beurteilt werden.
2. Die optimale Strategie mit heutigen Bauelementen liegt näher bei I (siehe Abschnitt «Sparstrategie») als bei II und besteht in einer wohlabgestimmten Dimensionierung von Heizsystem und Gebäudehülle: Wände, Dach, Fenster, Luftwechsel, unter Berücksichtigung der inneren Wärmequellen.
3. Auf diese Weise lässt sich mit gut isolierenden Fenstern ohne Komforteinbusse ein *sehr niedriger Energiebedarf* realisieren und das weitgehend unabhängig von der Topographie.
4. Ein Vergleich der Bilder 5 und 6 zeigt, dass *gut isolierende Fenster* trotz geringerem Gesamtenergiedurchlass im allgemeinen zu einem wesentlich geringeren Bedarf führen als hochtransparente. Der teure und unbequeme Einsatz von Läden kann sich sogar erübrigen.
5. Allerdings haben die heutigen Wärmeschutzfenster noch *einige Schwachstellen* [13] (Randverbund, Rahmen), die es zu beheben gilt.

Vor extrem auf solaren Gewinn ausgerichteten Strategien muss gewarnt werden: die unkritische Übertragung aus dem Raum Albuquerque u. a. O. auf unser Klima und unseren Baustandard kann sich sowohl für das Energiesparen wie auch für die Behaglichkeit als Sackgasse erweisen.

Die Autoren danken den Herren Dr. *J. Lüthi* und *W. Todt* von der Abteilung Heizung und Klima der Firma Gebr. Sulzer AG für ihre wertvollen Diskussionsbeiträge.

Adresse der Verfasser: Dr. *B. Keller,* dipl. Phys. ETH/SIA, *P. Grether,* El.-Ing. HTL, und *K. Brader,* Masch.-Ing. HTL, Geilinger AG, Zentrale Forschung und Entwicklung, Postfach 988, 8401 Winterthur.

Literatur

[1] Die Meteodaten verdanken wir Herrn Prof. *O. Guisan,* Universität Genf
[2] *Frank, Th., Grob, P.:* «Meteo-Daten Maugwil 1.9.80-30.4.81». EMPA 1981
[3] *Keller, B., Grether, P., Brader, K.:* «Zur Nutzbarkeit der eingestrahlten Sonnenenergie in bewohnbaren Räumen». 2. Status-Seminar Wärmeschutzforschung im Hochbau. EMPA 1982
[4] *Barakat, S.A., Sander, D.N.:* «Utilization of solar gain through windows for heating houses». National Research Council Canada, Building Research Note No 184
[5] Amt für Bundesbauten: «Energiegerechte Neubauten». p 59-95, EDMZ 1981
[6] *Kiraly, J.:* «Das Fenster als passives Sonnenheizsystem». Bauphysik 3/1982, p 87-94
[7] *Steinmüller, B.:* «Zum Energiehaushalt von Gebäuden». Diss TU Berlin 1982 c/o Philips GmbH Forschungslaboratorium Aachen
[8] *Gay, J.B., Eriksson, Ch., Rey, Y., Faist, A.:* «Bilan thermique dynamique des fenêtres». EPFL, Projektbericht NEFF No 48, 1982
[9] *Balcomb, J.D.:* «Physics of passive solar buildings». Amer. Society for Engineering Education Annual Conference, Los Angeles, June 1981
[10] *Johnson, R., Selkowitz, St., Winkelmann, F., Zentner, M.:* «Glazing Optimization Study for Energy Efficiency in Commercial Office Buildings». Lawrence Berkeley Lab LBL-12764 / 33. Symp on Energy Conservation, Dublin 1982
[11] *Hauser, G.:* «Rechnerische Vorherbestimmung des Wärmeverhaltens grosser Bauten». Diss Universität, Stuttgart 1977
[12] *Künzel, H., Hauser, G. et al.:* «Energetische Beurteilung von Fenstern während der Heizperiode». Glasforum 1/80, p 38-41
[13] *Keller, B., Grether, P., Brader, K.:* «Thermische Schwachstellenanalyse von Fenstersystemen». 2. Status-Seminar Wärmeschutzforschung im Hochbau. EMPA 1982

Klimadaten für die Energietechnik

Einführung

Die *Schweizerische Meteorologische Anstalt (SMA)* hat in den letzten Jahren ein *automatisches Wetterbeobachtungsnetz (ANETZ)* aufgebaut. Damit werden an etwa 60 Standorten in der Schweiz alle zehn Minuten die wichtigsten meteorologischen Grössen gemessen, unmittelbar danach an die SMA übermittelt und dort zu Klimadaten weiterverarbeitet. Es stehen deshalb heute relativ rasch aktuelle Klimawerte zur Verfügung. Sie sollen innerhalb einer nützlichen Frist möglichst vielen Benützern zugänglich gemacht werden. Aus diesem Grunde wird die SMA ausgewählte Klimadaten halbjährlich in dieser Zeitschrift veröffentlichen, wobei vor allem an folgende Anwendungen gedacht wird:

- aktuelle Ergänzung zur SIA-Empfehlung 381/3, welche die zehnjährigen Mittelwerte der Heizgradtage und der Heiztage enthält;
- Erleichterung der Energieverbrauchskontrolle von beheizten Gebäuden;
- Klimadaten für einfache Energiebedarfsberechnungen;
- Überprüfung eigener Messungen von meteorologischen Parametern.

Mess-Stationen

Für eine halbjährlich erscheinende Publikation von Klimadaten können nur Stationen aus dem ANETZ verwendet werden. Die Meteorologische Anstalt verfügt bei diesem Stationstyp über leistungsfähige Einrichtungen zur Daten-Kontrolle und -Verarbeitung. Ausserdem besitzt das ANETZ ein umfangreicheres Messprogramm als die konventionellen Beobachtungsstationen. Nahezu alle automatischen Wetterstationen liefern Messwerte der *Temperatur,* der *Globalstrahlung,* der *Sonnenscheindauer* und der *Windstärke.* Damit lassen sich selbst anspruchsvolle Bedürfnisse für die Energietechnik abdecken.

Bei der Wahl der *Standorte der Stationen* waren im ANETZ primär meteorologische Gesichtspunkte berücksichtigt worden. Diese verlangen einerseits eine gleichmässige Überdeckung der ganzen Schweiz und anderseits ein möglichst gutes Erfassen der regional klimatischen Unterschiede (Bild 1). Diese Kriterien kommen auch in den publizierten Tabellen zum Ausdruck. Die Statio-