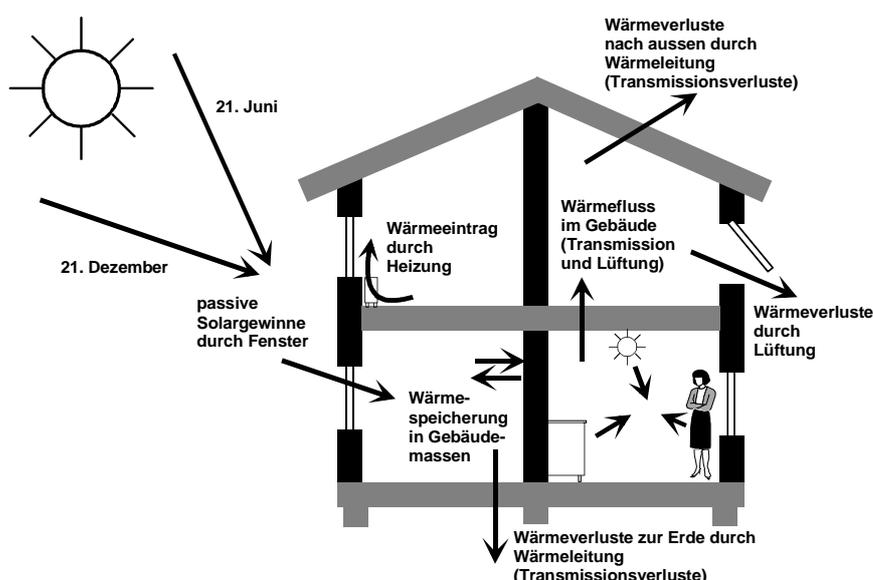


<b>4</b>	<b>PASSIVE SONNENENERGIENUTZUNG .....</b>	<b>125</b>
4.1	Einleitung .....	125
4.2	<b>Systemtechnische Beschreibung .....</b>	<b>127</b>
4.2.1	Begriffe .....	127
4.2.2	Kennzahlen .....	128
4.2.3	Systemkomponenten .....	129
4.2.4	Funktionale Systeme .....	138
4.3	<b>Transparente Wärmedämmung (TWD) .....</b>	<b>143</b>
4.4	<b>Bauliche Systeme zur passiven Sonnenenergienutzung .....</b>	<b>147</b>
4.4.1	Solarhaus .....	147
4.4.2	Passivhaus .....	148
4.4.3	Vergleich Solarhaus - Passivhaus .....	149

## 4 Passive Sonnenenergienutzung

### 4.1 Einleitung

Die Bezeichnung "passive Solarenergienutzung" hat sich in den siebziger Jahren eingebürgert. Mit Hilfe des Kriteriums "zugeführte Hilfsenergie" sollte eine klare Abgrenzung zu den anlagentechnischen Systemen hergestellt werden. Beim Einsatz von Hilfsaggregaten (z. B. Ventilatoren) wurden die Systeme als Hybridsysteme bezeichnet. Der Übergang zwischen passiven und aktiven Systemen wurde dadurch unscharf, denn beispielsweise ist ein Fenster mit automatisch betriebener Verschattung gleichfalls passiv wie hybrid. Erst in jüngster Zeit erfassen Definitionen die passive Solarenergienutzung realitätsnäher und schärfer. Danach erfolgt die Umwandlung der Sonnenstrahlung in Wärme bei passiven Solarsystemen direkt durch die Gebäudestruktur, d. h. durch transparente Hüll- und massive Speicherbauteile. Charakteristisch für die passive Solarenergienutzung (oft auch als passive Solararchitektur bezeichnet) ist damit die Nutzung der Gebäudehülle als Kollektor und die Nutzung der Gebäudekonstruktion als Speicher, möglichst ohne zwischengeschaltete Wärmetransporteinrichtungen. Allerdings ist auch mit Hilfe dieser Definition die Zuordnung der Systeme zur aktiven oder passiven Solarenergienutzung nicht immer eindeutig.



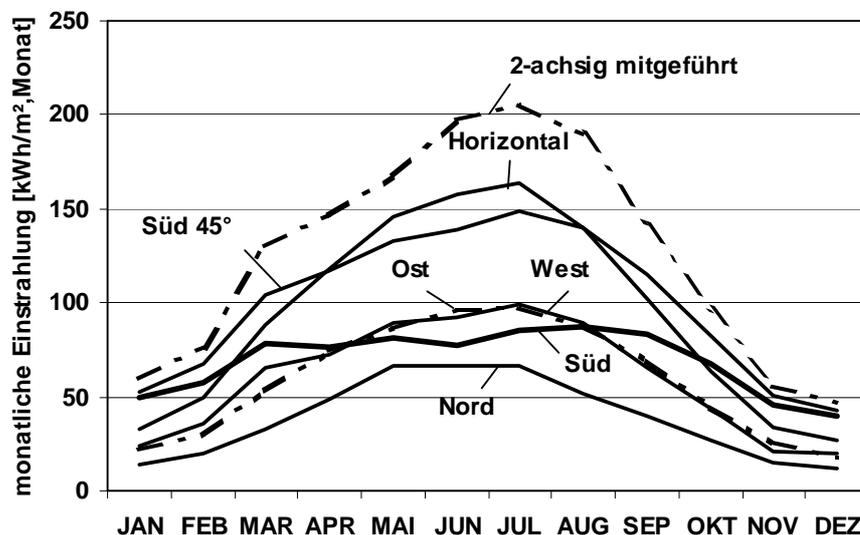
**Abb. 4.1** Wesentliche Energieflüsse innerhalb eines Gebäudes

In einem Gebäude treten verschiedene Energieflüsse auf (Abb. 4.1). Der Energieeintrag in das Gebäude erfolgt primär durch die Wärmeabgabe der Heizung (sogenannte Heizwärme), die von Personen, die von der Beleuchtung und die von Haushaltsgeräten (sogenannte innere Wärme) sowie die der passiven solaren Erträge u. a. durch transparente Flächen (sogenannte passive Sonnenenergienutzung). Wärmeverluste bzw. ggf. auch –gewinne – je nach Außentemperatur – entstehen durch Wärmeleitung durch die Gebäudeaußenhülle (d. h. Transmission). Zu weiteren Wärmeverlusten kann es durch die Lüftung des Gebäudes kommen; diese ist i. Allg. notwendig, um die Luftqualität im Gebäude in bezug auf maximal erlaubte Konzentrationen an Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) und bestimmte Schadstoffe, die relative Luftfeuchte und an bestimmten Gerüchen zu gewährleisten. Zusätzlich kann innerhalb eines Gebäudes Energie von den vorhandenen Speichermassen in Form absorbiertes Solarstrahlung aufgenommen bzw. abgegeben werden. Zusätzlich kann durch die Speichermassen auch Wärme infolge einer

Übertemperierung der Räume gegenüber diesen Speichermassen aufgenommen und (zwischen-)gespeichert werden. Die Wärmeabgabe erfolgt dann, wenn die Speichermasse wärmer als die umgebende Raumtemperatur ist. Im Folgenden wird nur die passive Sonnenenergienutzung behandelt, die damit nur ein Teil der verschiedenen Energieflüsse darstellt, durch die ein Gebäude gekennzeichnet ist.

Passive Sonnenenergienutzung basiert auf der Absorption der kurzwelligigen Solarstrahlung im Inneren nach Durchgang durch eine Transparente Aussenfläche oder an den Außenbauteilen von Gebäuden. Die absorbierte Energie erwärmt den Bauteil, welcher die Energie wiederum über Konvektion und langwellige Strahlung an die Umgebung abgibt. Das Ausmass der aufgenommenen Energie einer bestrahlten Fläche wird durch die Faktoren Ausrichtung, Verschattung und Absorptionskoeffizient der Absorberfläche bestimmt vgl. Abb. 2.11 und Abb. 4.2). Die Höhe und zeitliche Verschiebung der Energieabgabe wird durch die Wärmeleitfähigkeit, Dichte und spez. Wärmekapazität des Absorbers bzw. des dahinterliegenden Materials und der Temperaturdifferenz zur Umgebung beeinflusst

Entscheidend für den Energieertrag einer Solaranlage ist auch die geographische Ausrichtung. Abb. 4.2 zeigt deshalb die monatliche Globalstrahlungssumme (d. h. Summe aus Direkt- und Diffusstrahlung) auf verschieden ausgerichtete Flächen. Demnach trifft auf nach Süden ausgerichtete senkrechte Flächen in der Heizperiode die höchste Strahlung aller senkrechten Flächen und außerhalb der Heizperiode eine geringere Einstrahlung als auf senkrechte Ost/West-Flächen. Auf senkrechte Nordflächen trifft während der Heizperiode nur diffuse Strahlung. 45° nach Süden geneigte Dachflächenfenster haben im Sommer eine sehr hohe Einstrahlung, im Winter liegt sie ähnlich der auf die senkrechte Südwand. Deshalb haben z. B. Wintergärten mit nach Süden ausgerichteter Schrägverglasung oft sommerliche Überhitzungsprobleme. Die oberste Linie zeigt das theoretische Maximum einer 2-achsig nachgeführten Fläche. Im Winter trifft auf die senkrechte Südfläche ebenfalls nur geringfügig weniger Solarstrahlung.



**Abb. 4.2** Globalstrahlung auf verschieden ausgerichtete Flächen für Mitteleuropa (Klima Graz)

Passive Systeme können zur Reduzierung des Energiebedarfs des Gebäudes, sowohl für Heizung und Kühlung als auch für die Tageslichtnutzung verwendet werden. Um dies zu erreichen ist eine gemeinsame Planung von Hausherr, Architekt sowie Haus- und Heizungstechniker von größter Bedeutung.

**Passive Sonnenenergienutzung kann praktisch nicht nachgerüstet werden.**

Die Planung beginnt bei der Auswahl des Grundstückes und der Lage des Hauses auf dem Grundstück (vgl. Abb. 2-11 in Kap 2.4). Während die Sonne im Winter möglichst ungehindert auf die Absorberfläche des Hauses strahlen sollte, sollte diese im Sommer möglichst abgeschattet sein, um Überhitzungen zu vermeiden. Die Absorberflächen sollten daher nach Süd ( $\pm 15^\circ$ ) ausgerichtet sein. Damit lässt sich eine sommerliche Abschattung durch geeignete Dachüberstände erzielen.

Die klassische Form der passiven Sonnenenergienutzung ist unregelt. Die durch die Sonne aufgewärmten Speichermassen des Hauses geben die Wärme zwar zeitlich versetzt und in der Temperaturamplitude abgeschwächt, aber ohne Einflussnahme des Benutzers an den Innenraum ab. Bei passiven Speichern muss darauf geachtet werden, dass durch sie keine Übertemperaturen in den zu beheizenden Räumen auftreten. Daher ist es wichtig, die zeitliche Verzögerung und die Dämpfung des Wärmeflusses durch den passiven Speicher zu kennen. Zur Verminderung der Energieaufnahme müssen im Sommer zumeist Abschattungseinrichtungen vorgesehen werden.

Indirekt beheizte Speichermassen (z. B. unbeheizte Innenwände) können nur genützt werden, wenn eine entsprechende Raumtemperaturschwankung zugelassen wird. Bei hohen Raumtemperaturen fließt die Wärme langsam in die Speichermasse und heizt diese vom Raum her allmählich auf. Sinken die Raumtemperaturen unter die Oberflächentemperatur der Speichermasse, so gibt diese die gespeicherte Wärme wieder an den Raum ab. Die gespeicherte Energie ist von der Temperaturdifferenz zwischen warmem und kaltem Speicher, der spezifischen Wärmekapazität  $c_p \cdot \rho$  [W/m<sup>3</sup>K] des Speichermediums und der Zeit, die zum Laden und Entladen zur Verfügung steht, abhängig. Steht nur eine kurze Zeitspanne zur Verfügung, so wärmt sich der Speicher nur an der Oberfläche auf, und die aufgenommene Energiemenge ist gering (siehe Abb. 4.7 bzw. Kap. 3.4.1, Abb. 3-23).

Der Heizungsenergieverbrauch ist mit Speichermassen nicht senkbar, da die Tagesmitteltemperatur im Winter im Regelfall unter der gewünschten Raumtemperatur liegt, und die Speichermassen nur zu einer Vergleichmäßigung der Raumtemperatur führen. Dies zeigen auch viele Berechnungen und Messungen zeigen.

## **4.2 Systemtechnische Beschreibung**

### **4.2.1 Begriffe**

Als opak werden lichtundurchlässige Hüllbauteile eines Gebäudes bezeichnet. Dies können z. B. eine gemauerte Wand oder ein mit Dachziegeln belegtes Dach sein.

Transparente oder transluzente Bauteile sind für die solare Strahlung durchlässig (z. B. Fenster). Transparent bedeutet dabei im allgemeinen Sprachgebrauch "klar durchsichtig", während transluzent mit "durchscheinend" gleichgesetzt wird. In der Solarenergienutzung wird der Begriff transparent jedoch häufig auch für durchscheinende, nicht klar durchsichtige Hüllbauteile verwendet; damit wird verdeutlicht, dass derartige Bauteile nicht nur für Licht, sondern auch für die nicht sichtbaren Bestandteile des Solarspektrums durchlässig sind.

Unter der solaren Aperturfläche wird die lichtdurchlässige Hüllfläche verstanden, die zur Solarenergienutzung verwendet wird.

## 4.2.2 Kennzahlen

Im Folgenden werden einige u. a. für die passive Sonnenenergienutzung wichtige Kennzahlen beschrieben.

**Transmissionskoeffizient.** Der Strahlungstransmissionsgrad bzw. Transmissionskoeffizient  $\tau_e$  gibt den Anteil an der gesamten außen auf ein Bauteil auftreffenden Globalstrahlung an, der durch die Verglasung hindurch direkt als kurzwellige Strahlung in den Innenraum des Bauteils gelangt. Er berücksichtigt damit auch die nicht sichtbaren Wellenlängenbereiche der Solarstrahlung. Wird der Transmissionsgrad auf den senkrechten Strahlungseinfall bezogen, wird er als  $\tau_e^*$  bezeichnet.

**Sekundäre Wärmeabgabe.** Die sekundäre Wärmeabgabe  $q_i$  beschreibt den Anteil der durch ein Bauteil absorbierten Globalstrahlung  $\dot{G}_G$ , der durch langwellige Strahlung und Konvektion in das Bauteilinnere abgegeben wird (Hahne et al. 2003). Beispielsweise absorbiert auch ein lichtdurchlässiges Bauteil (Verglasung) einen Teil der auftreffenden Solarstrahlung, erwärmt sich dadurch etwas und hat daher eine sekundäre Wärmeabgabe.

**Energiedurchlassgrad (g-Wert).** Der g-Wert oder Energiedurchlassgrad berücksichtigt zusätzlich zum Energieeintrag durch Strahlungsdurchgang (d. h. zusätzlich zum Transmissionskoeffizient  $\tau_e$ ) die sekundäre Wärmeabgabe  $q_i$ . Er ist für einen senkrechten Strahlungseinfall und gleiche Temperaturen auf beiden Seiten des Bauteils definiert. Für transparente Bauteile (Verglasungen) setzt sich der g-Wert aus dem Strahlungstransmissionsgrad bezogen auf den senkrechten Strahlungseinfall  $\tau_e^*$  und der sekundären Wärmeabgabe  $q_i$  zusammen (Gleichung (4.1)).  $q_{zu}$  ist dabei der dem Bauteil zugeführte Wärmestrom, aus dem mit der Globalstrahlung  $\dot{G}_G$  die sekundäre Wärmeabgabe  $q_i$  berechnet werden kann.

$$g = \tau_e^* + q_i \quad \text{mit} \quad q_i = \dot{q}_{zu} / \dot{G}_G \quad (4.1)$$

**Diffuser Energiedurchlassgrad (diffuser g-Wert).** Die Solarstrahlung fällt in Abhängigkeit von der Tages- und Jahreszeit mit z. T. sehr unterschiedlichen Winkeln auf eine transparente Hüllfläche eines Gebäudes; sie trifft damit im Mittel nicht senkrecht auf eine transparente Fläche. Hinzu kommt in den gemäßigten Breiten ein hoher Diffusstrahlungsanteil, der rund 60 % der gesamten eingestrahlteten Sonnenenergie einnimmt und im Mittel einen Einfallswinkel von rund 60° aufweist. Diese daraus resultierenden Abminderungen gegenüber dem Wärmedurchgangskoeffizient bzw. g-Wert bei senkrechter Einstrahlung, die bei rund 10 % (EN 13790, 2004) liegen, werden durch den diffusen g-Wert  $g_{diffus}$  berücksichtigt. Daher werden mit diesem diffusen g-Wert realistischere Angaben als mit dem herkömmlichen g-Wert (g) erzielt.

**Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert).** Der U-Wert oder Wärmedurchgangskoeffizient beschreibt die Wärmemenge, die, bezogen auf eine Fläche von 1 m<sup>2</sup>, innerhalb einer Sekunde durch eine Fassadenfläche bei einer Temperaturdifferenz von 1 K zwischen Wandvorder- und Wandrückseite hindurch geht. Er setzt sich aus dem Wärmeübergang von der Luft an den Bauteil, die Wärmeleitung im Bauteil und dem Wärmeübergang vom Bauteil wiederum an die Luft zusammen. Im Falle z. B. einer Doppelverglasung findet dabei der Wärmetransport im Scheibenzwischenraum durch langwellige Wärmestrahlung und Konvektion statt. Bei Fenstern unterscheidet man zusätzlich zwischen dem  $U_V$ -Wert, der sich ausschließlich auf die Verglasung bezieht, und dem  $U_W$ -Wert; letztere berücksichtigt auch die Wärmeverluste des Rahmens und gilt somit für das gesamte Fenster.

**Äquivalenter Wärmedurchgangskoeffizient (äquivalenter U-Wert).** Die Differenz zwischen dem spezifischen Wärmeverlust eines Bauteils und dessen spezifischem Energiegewinn durch solare Einstrahlung wird durch den äquivalenten U-Wert beschrieben. Er ist neben dem U-Wert

und dem g-Wert auch von der Einstrahlung auf die transparente Fläche und dem dahinter liegenden Gebäude mit seinem dynamischen Verhalten abhängig. Zudem darf bei seiner Bestimmung der Energiegewinn nur in Zeiten der Heizperiode berücksichtigt werden, da eine Überhitzung der Räume durch eine solare Einstrahlung durch verglaste Flächen nicht wünschenswert ist. Deshalb bedeutet beispielsweise ein negativer äquivalenter U-Wert, dass eine transparente Fläche mehr nutzbringende Energie gewinnt als über Transmission abgegeben wird. Der äquivalente U-Wert  $U_{eq}$  kann überschlägig aus dem  $U_W$ -Wert des gesamten Fensters (inklusive Rahmen), dem g-Wert (Energiedurchlassgrad) und einem Korrekturfaktor für die Ausrichtung des Fensters  $S_F$  nach Gleichung (4.2) abgeschätzt werden. Der Korrekturfaktor  $S_F$  variiert dabei zwischen 0,95 bei Nordausrichtung, 1,65 bei Ost- bzw. Westausrichtung und 2,4 bei Südausrichtung.

$$U_{eq} = U_W - S_F \cdot g, \tag{4.2}$$

Nord:  $S_F = 0,95$ ; West/Ost:  $S_F = 1,65$ ; Süd:  $S_F = 2,4$

**Transmissionsverluste.** Die Wärmeverluste eines Gebäudes  $\dot{Q}_l$  setzen sich nach Abb. 4.1 aus den Lüftungsverlusten  $\dot{Q}_V$  und den Transmissionsverlusten  $\dot{Q}_T$  zusammen. Die Transmissionsverluste errechnen sich dabei aus den jeweiligen U-Werten für die entsprechenden Flächen (d. h. den Flächen  $A_n$ ) und der Temperaturdifferenz zwischen der jeweiligen Raumtemperatur  $T_i$  und entsprechenden Außentemperatur  $T_e$  aller Außenbauteile des Hauses (Gleichung (4.3)). Die Transmissionsverluste sind dabei nicht zu verwechseln mit den Transmissionsgraden  $\tau_e$  von transparenten Bauteilen.

$$\dot{Q}_T = \sum_{n=1}^m (U_n \cdot A_n \cdot (T_i - T_e)) \tag{4.3}$$

### 4.2.3 Systemkomponenten

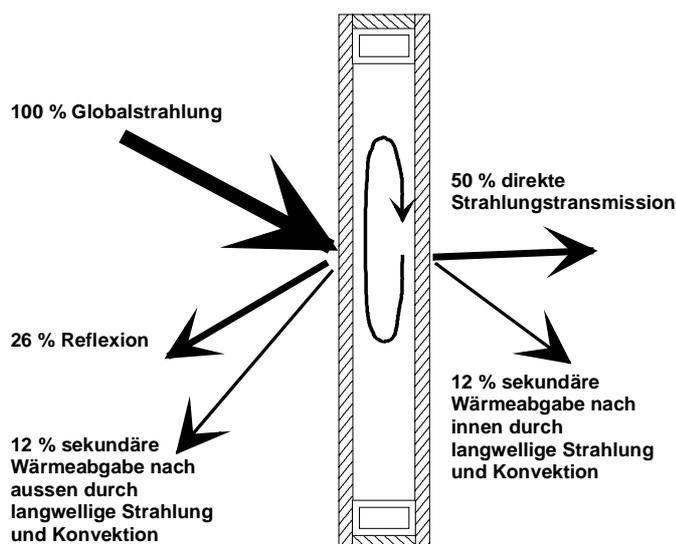
Passive Solarsysteme setzen sich in der Regel aus transparenter Abdeckung (Fenster, transparente Wärmedämmung), Absorber, Speicher und Verschattungseinrichtungen zusammen.

**Transparente Abdeckungen.** Abb. 4.3 zeigt exemplarisch den Energiefluss durch eine Doppelglasscheibe. Die auftreffende Solarstrahlung gelangt demnach nur zum Teil in den Innenraum; ein Teil wird an der Außenoberfläche der äußeren Scheibe an die Umgebung zurück reflektiert. Der Anteil der Strahlung, der direkt durch beide Scheiben in den Innenraum gelangt, wird – im Verhältnis zur Einstrahlung auf die Außenseite der Scheibe – durch den Transmissionskoeffizienten bzw. Strahlungstransmissionsgrad  $\tau_e$  beschrieben. Ein weiterer Teil der auftreffenden Solarstrahlung wird an den Scheiben absorbiert und bewirkt eine Erwärmung des Scheibenzwischenraumes. Daraus resultiert wiederum eine Wärmeabgabe der Scheibe in den Innenraum durch langwellige Strahlung und Konvektion. Die gesamte Wärmeabgabe nach innen in Bezug auf die auftreffende Solarstrahlung beschreibt der g-Wert oder der Energiedurchlassgrad.

Solche durchsichtigen Abdeckungen (z. B. Fenster) haben die Aufgabe, einen möglichst großen Anteil der solaren Strahlung zum Absorber durchzulassen und gleichzeitig einen möglichst guten Wärmeschutz nach außen zu gewährleisten. Diese beiden Eigenschaften werden typischerweise

durch den  $g$ -Wert (Energiedurchlassgrad) bzw. den  $U$ -Wert (Wärmedurchgangskoeffizient) der transparenten Abdeckung beschrieben.

Damit weisen gute transparente Abdeckungen hohe  $g$ -Werte und niedrige  $U$ -Werte auf. Früher gebräuchliche Einfach- und Isolierverglasungen besitzen zwar hohe  $g$ -Werte, aber auch vergleichsweise hohe und damit ungünstige  $U$ -Werte. Durch eine Füllung mit Edelgasen mit geringerer Wärmeleitfähigkeit, geringerer spezifischer Wärmekapazität und höherer Viskosität kann der Wärmedurchgang durch Konvektion zwischen den Scheiben reduziert werden. Für diese Gase können zudem die Scheibenzwischenräume auf geringstmöglichen  $U$ -Wert optimiert werden. Tabelle 4.1 zeigt die optimalen Scheibenzwischenräume und die Stoffwerte für einige gängige Füllgase von Fenstern.



**Abb. 4.3** Gesamtennergiedurchlassgrad einer durchschnittlichen 2-fach Wärmeschutzverglasung (nach Hahne et al.)

**Tabelle 4.1** Optimaler Scheibenzwischenraum und thermodynamische Kennwerte einiger Füllgase von Fenstern bei 10 °C (Hahne et al.)

Füllgas	optimaler Scheibenzwischenraum [mm]	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/m K]	Dichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Dynamische Viskosität $\eta$ [Pas]	spez. Wärmekapazität $c_p$ [J/kg K]
Luft	15,5	2,53 10 <sup>-2</sup>	1,23	1,75 10 <sup>-5</sup>	1007
Argon	14,7	1,648 10 <sup>-2</sup>	1,699	2,164 10 <sup>-5</sup>	519
Krypton	9,5	0,9 10 <sup>-2</sup>	3,56	2,34 10 <sup>-5</sup>	345
SF6	4,6	1,275 10 <sup>-2</sup>	6,36	1,459 10 <sup>-5</sup>	614

Der Wärmeverlust durch Strahlungsaustausch im Scheibenzwischenraum kann durch sogenannte Low $\epsilon$ -Beschichtungen, welche den Emissionskoeffizienten von langwelliger Strahlung von ursprünglich  $\epsilon = 0,84$  auf  $\epsilon_{low\epsilon} = 0,04$  reduzieren, vermindert werden. Für kurzwellige Strahlung sind diese Schichten hochtransparent. Zwei- und Dreifach-Wärmeschutzverglasungen mit Edelgasfüllung und infrarotreflektierend beschichteten Scheiben erreichen niedrige  $U$ -Werte, gleichzeitig aber auch nur geringe  $g$ -Werte.

**Tabelle 4.2** Diffuser g-Wert und U-Wert verschiedener Verglasungen und TWD-Materialien (Wittwer, 1992, Platzer, 1995)

	Diffuser g-Wert in W/(m <sup>2</sup> K)	U-Wert Scheibe
Isolierverglasung (4+16+4 mm, Luft)	0,65	3,00
Zweifach-Wärmeschutzverglasung (4+14+4 mm, Argon)	0,60	1,30
Zweifach-Wärmeschutzverglasung (4+14+4 mm, Xenon)	0,58	0,90
Dreifach-Wärmeschutzverglasung mit Argonfüllung	0,44	0,80
Dreifach-Wärmeschutzverglasung mit Kryptonfüllung	0,44	0,70
Dreifach-Wärmeschutzverglasung mit Xenonfüllung	0,42	0,40
Kunststoffkapillaren 10 cm, ein Abdeckglas	0,67	0,90
Kunststoffwaben 10 cm, ein Abdeckglas	0,71	0,90
Glaskapillaren 10 cm, zwei Scheiben	0,65	0,97
Aerogel 2,4 cm granular, zwei Scheiben mit Luft	0,50	0,90
Aerogelplatte 2 cm evakuiert (100 mbar), zwei Scheiben	0,60	0,50

Der diffuse g-Wert wurde bei einer 4 mm dicken eisenarmen Frontscheibe gemessen und der U-Wert bei einer Probenmitteltemperatur von 10 °C.

Durch die Entwicklung von Gläsern mit hohem Energiedurchlassgrad und transparenter Wärmedämmstoffe (TWD) wurden transparente Abdeckungen mit hoher Strahlungsdurchlässigkeit und gleichzeitig gutem Wärmeschutz möglich. Tabelle 4.2 zeigt die g- und U-Werte einiger typischer Verglasungen und transparenter Dämmsysteme. Dabei wird zur Beschreibung der Strahlungsdurchlässigkeit der diffuse g-Wert herangezogen, da die Solarstrahlung abhängig von Tages- und Jahreszeit in unterschiedlichen Winkeln auf die transparente Hüllfläche auftrifft und damit der diffuse g-Wert den Gesamtenergiedurchlass besser beschreibt als der üblicherweise verwendete g-Wert für senkrecht auftreffende Direktstrahlung.

Die Differenz zwischen spezifischem Wärmeverlust und spezifischem Energiegewinn durch solare Einstrahlung wird durch den äquivalenten U-Wert beschrieben. Er ist neben dem statischen U-Wert und dem g-Wert auch von der Einstrahlung auf die transparente Fläche und dem dahinterliegenden Gebäude mit seinem dynamischen Verhalten abhängig. Zudem darf der Energiegewinn nur in Zeiten der Heizperiode verbucht werden, da eine Überhitzung der Räume durch die Einstrahlung durch verglaste Flächen nicht wünschenswert ist. Ein negativer äquivalenter U-Wert bedeutet, dass eine transparente Fläche mehr nutzbringende Energie gewinnt als über Transmission abgegeben wird. Überschlägig kann nach Gleichung (3.1) (Treberspurg, 1994) der äquivalente U-Wert  $U_{eq}$  aus dem U-Wert des gesamten Fensters (inklusive Rahmen)  $U_W$ , dem Energiedurchlassgrad  $g$  und einem Korrekturfaktor für die Ausrichtung des Fensters  $S_f$  folgendermaßen abgeschätzt werden:

$$U_{eq} = U_W - S_f * g, \tag{4.4}$$

Nord:  $S_f = 0,95$ ; West/Ost:  $S_f = 1,65$ ; Süd:  $S_f = 2,4$

Tabelle 4.3 zeigt so ermittelten äquivalenten Wärmedurchgangskoeffizienten für verschiedene Verglasungen. Bei Südverglasungen erreicht man bereits mit 2-Scheiben Wärmeschutzverglasungen, welche heute bereits Standard sind, einen Ausgleich der Wärmeverluste und Energiegewinne. Mit hochwertigen Dreischeiben-Wärmeschutzverglasungen können selbst Nordfenster mehr Energie gewinnen als abgeben.

**Tabelle 4.3** Diffuser Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert), Fenster-Wärmedurchgangskoeffizient ( $U_W$ -Wert) und äquivalenter U-Wert (für  $U_{eq,W}$  verschiedener Verglasungen nach Treberspurg, 1994

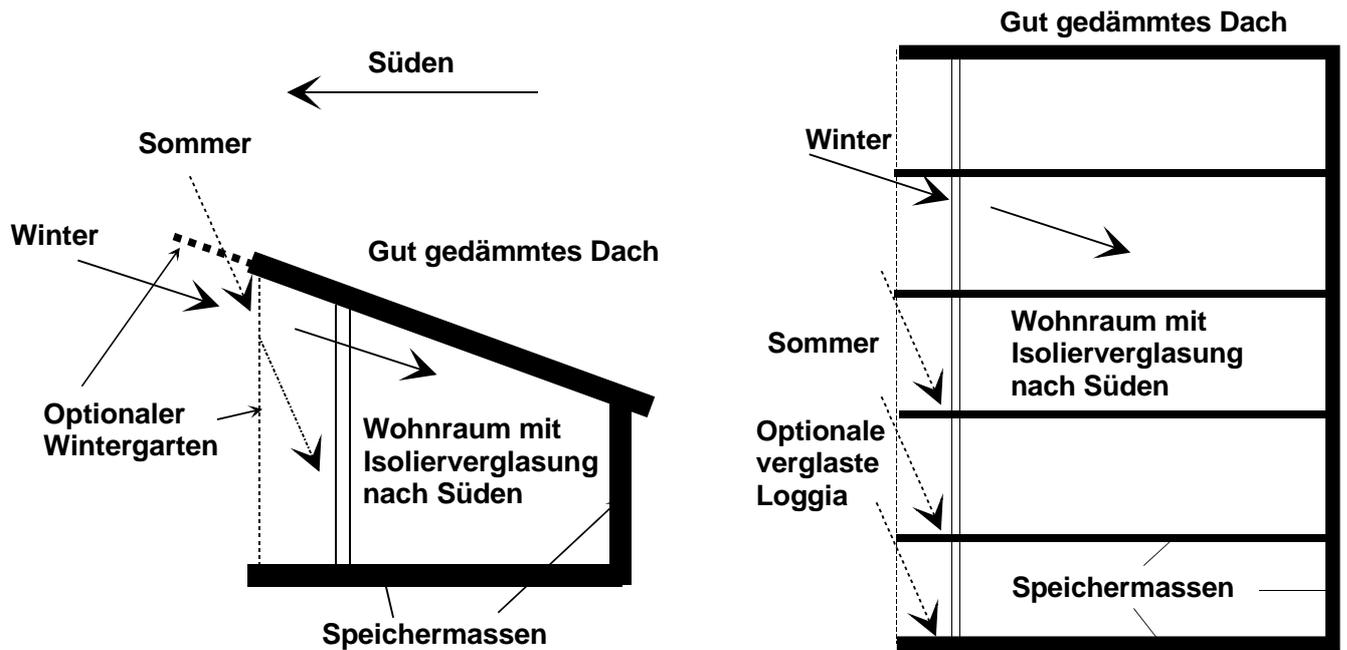
	g	$U_W$	$U_{eq,W}$ Süd	$U_{eq,W}$ Ost/West	$U_{eq,W}$ Nord
	alle in $W/(m^2 K)$				
Einfach Glas	0,87	5,8	3,7	4,4	5,0
Zweifach Glas (Luft 4+12+4)	0,78	2,9	1,0	1,6	2,2
Zweifach-Wärmeschutzverglasung (6+15+6 mm, Argon)	0,60	1,5	0,1	0,5	0,9
Dreifach-Wärmeschutzverglasung mit Kryptonfüllung (4+8+4+8+4)	0,48	0,9	-0,3	0,1	0,4
Dreifach-Wärmeschutzverglasung mit Xenonfüllung (4+16+4+16+4)	0,46	0,6	-0,5	-0,2	0,2

Zu berücksichtigen ist, dass der g-Wert nur für die Verglasung gilt. und bei der Berechnung von Fenstern der Rahmenanteil von der Fensterfläche abgezogen werden muss. Der  $U_W$ - Wert bezieht sich auf ein Fenster mit einem Rahmenanteil von 30%, was nur bei großflächigen Fensterverglasungen erreicht wird. Bei kleinen Fenstern muss der  $U_W$ -Wert über den Wärmedurchgangskoeffizient von Rahmen und Scheibe, sowie unter Berücksichtigung der zusätzlichen Wärmeverluste durch den Randverbund der Scheibe neu berechnet werden. Der g-Wert einer Verglasung wird weiters um die Scheibenverschmutzung und eine allfällige Abschattung abgemindert. Nach Feist (1998) muss selbst für häufig gereinigte Flächen ein Abminderung des g-Wertes durch Verschmutzung  $F_{Schmutz}$  von 5 % angenommen werden. Für den momentanen Strahlungseinfall muss zudem eine Abminderung aufgrund des schräg einfallenden Lichtes (Winkelfaktor) berücksichtigt werden. Dies wurde in Tabelle 4.2 und Tabelle 4.3 durch die Verwendung des diffusen g-Wertes bereits berücksichtigt.

Das solare Wärmeangebot im Raum  $G_{solar}$  berechnet sich nun aus der Multiplikation der solaren Einstrahlung auf die Fensterfläche  $G_{G,g,a}$  (vgl. Kap. 2.5), dem g-Wert und den Abminderungsfaktoren aus feststehender Verschattung  $F_S$  (siehe Tabelle 4.4 bis Tabelle 4.6), aus Verschmutzung  $F_{Schmutz}$ , aus Rahmenanteil  $F_F$  und flexiblen Sonnenschutzvorrichtungen  $F_C$  (siehe Tabelle 4.7).

$$G_{solar} = F_S F_{Schmutz} F_C F_F g_{Wert} G_{G,g,a} \quad (4.5)$$

**Verschattungseinrichtungen.** Eine Abschattung der Strahlen der hochstehenden Sonne im Sommer kann ohne Mehraufwendungen auch durch eine geeignete Gebäudeausbildung z. B. durch Balkone oder Vorsprünge erreicht werden. Ihr großer Vorteil liegt in der Einfachheit und dauerhaften Funktion, da bewegliche Teile fehlen und keine Regelung vonnöten ist. Sie müssen jedoch bereits in der Entwurfsphase durch den Architekten vorgesehen werden und jedenfalls nach Süden ausgerichtet sein. Hier kann im Sommer durch den hohen Sonnenstand eine gute Verschattung und im Winter eine große Einstrahlung durch die tief stehende Sonne erreicht werden (siehe Abb. 4.4). Bei einer Ausrichtung nach Osten oder Westen dringt die Sonne auch im Sommer durch die tieferstehende Sonne weit ins Gebäude ein und im Winter kommt aus diesen Himmelsrichtungen nur eine geringe Einstrahlung (vgl. Abb. 4.2). Diese feststehenden Verschattungselemente vermindern allerdings die Systemeffizienz, da sie auch in den Übergangszeiten (Frühling und Herbst), wo noch eine Heizungsanforderung gegen ist, für eine Teilverschattung der Solarsysteme sorgen. Neben der Berechnung der Wirksamkeit solcher feststehender Verschattungselemente mit dynamischen Gebäudesimulationen können die Verschattungsfaktoren auch nach Tabelle 4.5 und Tabelle 4.6 ermittelt werden.



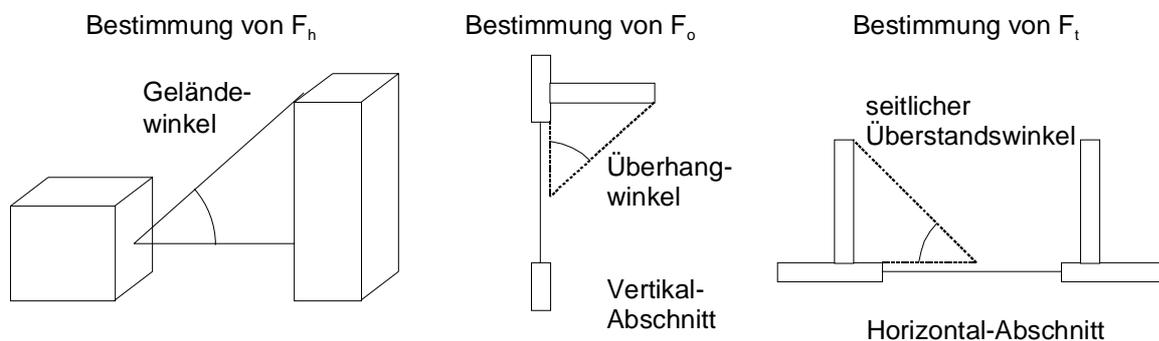
**Abb. 4.4** Abschattung von transparenten Gebäudeflächen durch Dachüberstände (Einfamilienhaus links und Mehrfamilienhaus rechts)

Die Verschattung ist von folgenden Parametern abhängig:

- Verschattung durch Horizont (diese kann mit Hilfe des Sonnenweg-Diagramms (vgl. Abb. 2.18) oder nach Tabelle 4.4 ermittelt werden).
- Verschattung durch herausragende Elemente (Überhänge siehe Tabelle 4.5, seitliche Überstände siehe Tabelle 4.6).

Abb. 4.5 zeigt die Definition der hierbei relevanten Winkel. Der Verschattungsfaktor  $F_S$  setzt sich aus den drei Faktoren  $F_h$  (Teilverschattungsfaktor für den Horizont),  $F_o$  (Teilverschattungsfaktor für Überhänge) und  $F_f$  (Teilverschattungsfaktor für seitliche Überstände) zusammen.

$$F_S = F_h F_o F_f \quad (4.6)$$



**Abb. 4.5** Definition der Winkel für die verschiedenen Verschattungskomponenten (nach EN 13790, 2004)

**Tabelle 4.4** Teilverschattungsfaktor für die Verschattung durch Horizont  $F_h$  für verschiedene geographische Breiten, Fensterausrichtungen und Geländewinkel nach EN 13790 (2004)

Geländewinkel	45° nördliche Breite			55° nördliche Breite			65° nördliche Breite		
	S	O/W	N	S	O/W	N	S	O/W	N
0°	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
10°	0,97	0,95	1,00	0,94	0,92	0,99	0,86	0,89	0,97
20°	0,85	0,82	0,98	0,68	0,75	0,95	0,58	0,68	0,93
30°	0,62	0,70	0,94	0,49	0,62	0,92	0,41	0,54	0,89
40°	0,46	0,61	0,90	0,40	0,56	0,89	0,29	0,49	0,85

**Tabelle 4.5** Teilverschattungsfaktor für die Verschattung durch Überhänge  $F_o$  für verschiedene geographische Breiten, Fensterausrichtungen und Geländewinkel nach EN 13790 (2004)

Geländewinkel	45° nördliche Breite			55° nördliche Breite			65° nördliche Breite		
	S	O/W	N	S	O/W	N	S	O/W	N
0°	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
30°	0,90	0,89	0,91	0,93	0,91	0,91	0,95	0,92	0,90
45°	0,74	0,76	0,80	0,80	0,79	0,80	0,85	0,81	0,80
60°	0,50	0,58	0,66	0,60	0,61	0,65	0,66	0,65	0,66

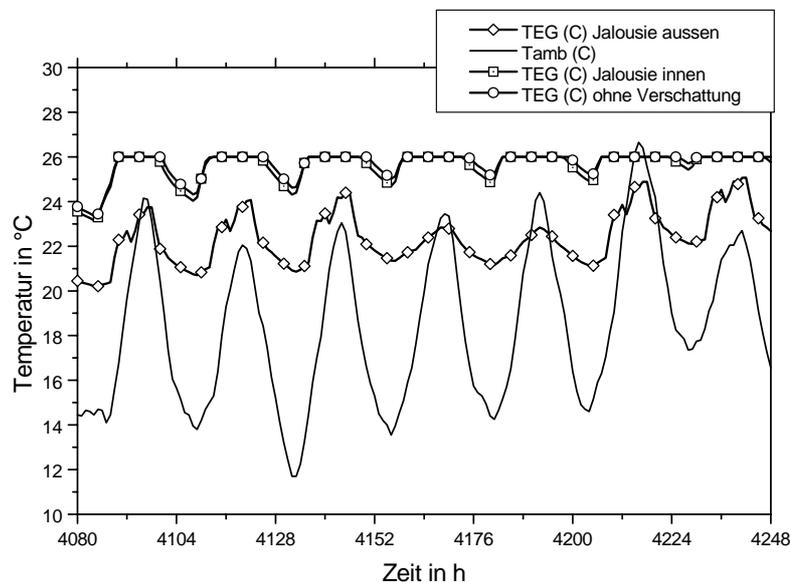
**Tabelle 4.6** Teilverschattungsfaktor für die Verschattung durch seitliche Überstände  $F_t$  für verschiedene geographische Breiten, Fensterausrichtungen und Geländewinkel nach EN 13790 (2004)

Geländewinkel	45° nördliche Breite			55° nördliche Breite			65° nördliche Breite		
	S	O/W	N	S	O/W	N	S	O/W	N
0°	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
30°	0,94	0,92	1,00	0,94	0,91	0,99	0,94	0,90	0,98
45°	0,84	0,84	1,00	0,86	0,83	0,99	0,85	0,82	0,98
60°	0,72	0,75	1,00	0,74	0,75	0,99	0,73	0,73	0,98

Durch verstellbare Verschattungseinrichtungen werden passive Solarsysteme geregelt. Übersteigt der solare Wärmegewinn die notwendige, durch das solare System zu deckende Wärmenachfrage im passiv solar beheizten Raum, wird zur Verhinderung von Raumüberwärmung die solare Aperturfläche abgeschattet. Außenliegende Verschattungen wie Jalousien und Rollläden geben die absorbierte Strahlungswärme wieder an die Umgebungsluft ab und sind daher meist effizienter als innenliegende Verschattungseinrichtungen. Dagegen werden innenliegende Systeme (Folienrollläden, Plisseestores) nicht der Witterung ausgesetzt und sind daher konstruktiv einfacher zu gestalten. Tabelle 4.7 zeigt die im vorigen Kapitel verwendeten Abminderungsfaktoren  $F_c$  für verschiedene verstellbare Sonnenschutzvorrichtungen in Abhängigkeit von ihrer Stellung (der Transmission) In Abb. 4.6 ist die Wirkung von Jalousien an einem Beispiel, berechnet mit dynamischer Gebäudesimulation, gezeigt. Über 26°C Raumtemperatur wurde ein aktive Kühlung des Gebäudes angenommen, so dass die Raumtemperatur nicht über diesen Wert steigt. Deutlich wird, dass innenliegende Jalousien die Raumtemperaturen nur geringfügig senken können. Mit außenliegenden Jalousien kann die Raumtemperatur doch um einige °C gesenkt werden. Im vorliegenden Fall war bei Verwendung von Außenjalousien keine zusätzliche Kühlung mehr erforderlich.

**Tabelle 4.7** Abminderungsfaktoren  $F_C$  für ausgewählte Sonnenschutzvorrichtungen, raumseitig oder außenseitig angebracht (EN 13790, 2004)

Sonnenschutzvorrichtung	Optische Eigenschaften der Sonnenschutzvorrichtung		Abminderungsfaktor $F_C$ mit	
	Absorption	Transmission	Sonnenschutz raumseitig	Sonnenschutz außenseitig
Weiße Jalousien	0,1	0,05	0,25	0,10
		0,1	0,30	0,15
		0,3	0,45	0,35
Weiße Gewebe	0,1	0,5	0,65	0,55
		0,7	0,80	0,75
		0,9	0,95	0,95
Farbige Gewebe	0,3	0,1	0,42	0,17
		0,3	0,57	0,37
		0,5	0,77	0,57
Aluminiumbeschichtetes Gewebe	0,2	0,05	0,20	0,08



**Abb. 4.6** Einfluss der Verschattung durch innen- und außenliegende Jalousien (Heimrath, 2000)

Scheibenintegrierte Systeme lassen Zuverlässigkeitssteigerungen erwarten. Dabei sind unterschiedliche Funktionsprinzipien möglich.

- Thermotrope Verglasungen werden bei einer bestimmten Außen- oder Systemtemperatur lichtundurchlässig, weil sich die Moleküle einer verglasungsintegrierten Gelschicht zusammenlagern.
- Elektrochrome Verglasungen besitzen spezielle Beschichtungen, die bei Anlegen einer minimalen Spannung vom transparenten zum opaken Zustand "umschalten".
- Mit holografischen Verglasungen bedruckte Folien reflektieren die hochstehende Sommersonne und lassen die flach geneigten Sonnenstrahlen ungehindert zum Absorber durchdringen.

**Absorber und Speicher.** Während bei aktiven Solarsystemen Absorber und Speicher als technische Komponenten ausgeführt werden, sind sie in der passiven Solararchitektur im Regelfall Bestandteil der Gebäudekonstruktion.

Als Absorberoberflächen eines Direktgewinnsystems (vgl. Kap. 4.2.4) dienen die Raumumschließungsflächen, die von der solaren Strahlung erreicht werden. Als Wärmespeicher dienen Raum umgebende Decken und Wände. Gut absorbierende Raumbooberflächen und eine auf das Solarsystem abgestimmte und gut wärmespeichernde Gebäudekonstruktion sind deshalb von Vorteil.

Die klassische Form der passiven Sonnenenergienutzung ist unregelmäßig. Die durch die Sonne aufgewärmten Speichermassen des Hauses geben die Wärme zwar zeitlich versetzt und in der Temperaturamplitude abgeschwächt, aber ohne Einflussnahme des Benutzers an den Innenraum ab. Bei passiven Speichern muss darauf geachtet werden, dass durch sie keine Übertemperaturen in den zu beheizenden Räumen auftreten. Daher ist es wichtig, die zeitliche Verzögerung und die Dämpfung des Wärmeflusses durch den passiven Speicher zu kennen. Zur Verminderung der Energieaufnahme müssen im Sommer zumeist Abschattungseinrichtungen vorgesehen werden.

Indirekt beheizte Speichermassen (z.B. unbeheizte Innenwände) können nur genutzt werden, wenn eine entsprechende Raumtemperaturschwankung zugelassen wird. Bei hohen Raumtemperaturen fließt die Wärme langsam in die Speichermasse und heizt diese vom Raum her allmählich auf. Sinken die Raumtemperaturen unter die Oberflächentemperatur der Speichermasse, so gibt diese die gespeicherte Wärme wieder an den Raum ab. Der Wärmefluss und die gespeicherte Energie ist von der Temperaturdifferenz zwischen warmen und kalten Speicher, der spezifischen Wärmekapazität  $c_p \cdot \rho$  [W/m<sup>3</sup>K] und der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  [W/mK] des Speichermediums sowie der Zeit, die zum Laden und Entladen zur Verfügung steht, abhängig. Steht nur eine kurze Zeitspanne zur Verfügung, so wärmt sich der Speicher nur an der Oberfläche auf, und die aufgenommene Energiemenge ist gering.

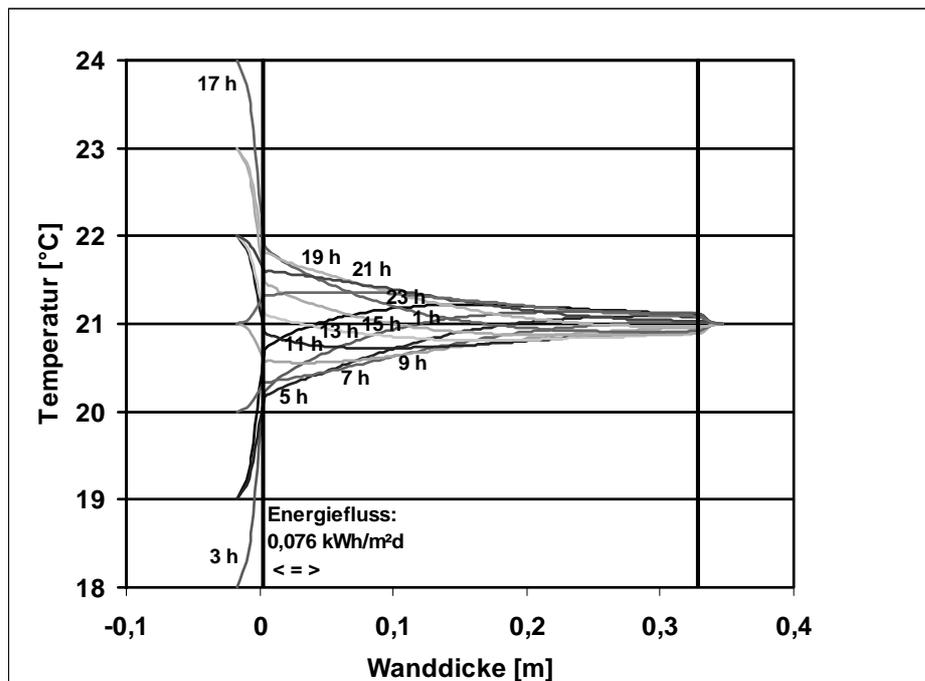
Physikalisch wird dies mit dem (eindimensionalen) Fourier'schen Erfahrungssatz der Wärmeleitung:

$$\dot{q} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad [W/m^2] \quad (4.7)$$

und dem aus einem Element ein- und ausfließende Wärmestrom (Speichergleichung) beschrieben.

$$\frac{\partial \dot{q}}{\partial x} = -\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad [W/m^3] \quad (4.8)$$

In Abb. 4.7 sind die Wandtemperaturen für eine Innenwand aus Beton (Speicherwand) mit über 24 Stunden um 6°C variierenden Temperaturen auf einer Raumseite dargestellt. Eine signifikante Änderung der Temperatur ist nur bis ca. 15 cm Wandtiefe festzustellen. Die Wand dicker auszuführen bringt keinen Gewinn an Wärmespeicherung. Die in der Wand über 24 Stunden gespeicherte und wieder abgegebene Energiemenge beträgt 0,076 kWh/m<sup>2</sup>d.



**Abb. 4.7** Temperaturverlauf einer Innenwand mit Einstrahlung und wechselnder Temperatur an einer Seite (links)

Bei indirekten Gewinnssystemen (vgl. Kap. 4.2.4) wird primär nur die Außenwand zur Wärmespeicherung herangezogen und ist deshalb entsprechend massiv ausgebildet. Als Absorber dient die äußere Wandoberfläche, die mit schwarzer Farbe gestrichen oder mit Absorberfolie beklebt wird.

Nur bei abgekoppelten Systemen findet eine räumliche Trennung zwischen Absorber und Speicher statt. Die Absorberfunktion wird meist von einem schwarzen, ggf. selektiv beschichteten Blech übernommen. Der Wärmeträger wird über einen Kanal oder ein aufwendigeres Leitungssystem zum Speicher transportiert. Der Speicher kann ebenfalls Bestandteil der Gebäudekonstruktion sein, z. B. wenn er als Hohlerdecke oder zweischalige Wand ausgebildet wird. Geröllspeicher erbringen dagegen keinen "Doppelnutzen" und zählen nicht zur Baukonstruktion.

Über dynamische Gebäudesimulationen kann der aus Wärmeverlusten des Gebäudes  $Q_l$  reduziert um die nutzbare Energiemenge aus der solaren Einstrahlung  $G_{solar}$  und der inneren Wärmen  $Q_i$  der resultierende Heizenergiebedarf  $Q_h$  ermittelt werden. Eine vereinfachte Methode wird in EN 13790 (2004) angegeben. Sie beruht auf der Ermittlung eines Ausnutzungsgrades  $\eta$  des solaren Wärmeanbots  $G_{solar}$  und der inneren Wärmegewinne  $Q_i$  durch Abwärme von Personen und Geräten aufgrund von den Kennzahlen Wärmegewinn-/verlustverhältnis  $\gamma$  und der internen thermischen Trägheit des beheizten Bereichs  $\tau$ .

$$Q_h = Q_l - \eta Q_g = Q_l - \eta (G_{solar} + Q_i) \quad (4.9)$$

$$\gamma = Q_g / Q_l = (G_{solar} + Q_i) / Q_l \quad (4.10)$$

$$\eta = \frac{1 - \gamma^a}{1 - \gamma^{a+1}} \quad \text{für } \gamma \neq 1; \quad \eta = \frac{a}{a+1} \quad \text{für } \gamma = 1; \quad (4.11)$$

$$a = a_0 + \frac{\tau}{\tau_0} \quad \text{mit}$$

$$a_0 = 1,0 \quad \text{und} \quad \tau_0 = 16 \quad \text{für monatliche Berechnung} \quad (4.12)$$

$$a_0 = 0,8 \quad \text{und} \quad \tau_0 = 28 \quad \text{für jährliche Berechnung}$$

$$\tau = C/H \quad (4.13)$$

Hierbei ist C die wirksame Wärmespeicherfähigkeit der Temperaturzone des Innensystems und H der spezifische Wärmeverlust des Gebäudes aus Transmissions- und Lüftung. Dies ist die Wärme, die in den Bauteilen gespeichert wird, wenn die Innentemperatur in Form einer Sinuskurve über 24 h variiert und die Amplitude 1 K beträgt. Für Mitteleuropa kann der Ausnutzungsgrad  $\eta$  für Wärmegewinn-/verlustverhältnis  $\gamma$  kleiner als 1,6 und gängige thermische Trägheiten nach Feist (1998) über folgende Faustformel bestimmt werden:

$$\eta = 1 - 0,3 \gamma \quad (4.14)$$

#### 4.2.4 Funktionale Systeme

Abhängig von Ausbildung und Anordnung der einzelnen Komponenten können vier funktionale Systemgrundtypen unterschieden werden.

- Direktgewinn-Systeme
- Indirekte Systeme
- Abgekoppelte Energiesysteme
- Unabhängige Energiegewinnsysteme und Wintergärten

**Direktgewinnsysteme.** Sonnenlicht tritt durch lichtdurchlässige Hüllflächen direkt in den Raum und wird an den inneren Raumboberflächen in Wärme gewandelt. Die Raumtemperatur und Raumboberflächentemperatur verändern sich fast gleichzeitig. Typische Direktgewinnsysteme sind Fenster und Oberlichter (Abb. 4-8).

Vorteile dieser Systeme sind der einfache Systemaufbau, der geringe Regelaufwand sowie die niedrigen Speicherverluste, da die Strahlungsenergie im Rauminneren und damit direkt am Ort der Nutzung in Wärme gewandelt wird. Nachteilig kann sich die geringe Phasenverschiebung zwischen Einstrahlung und Innentemperatur auswirken. Direktgewinnsysteme lassen sich nur über eine Verschattung regeln, denn die Wärmeabgabe der Speichermassen an den Raum ist nicht beeinflussbar. Durch hohe Speichermassen kann allerdings eine Zeitverschiebung und eine Dämpfung der Temperaturschwankung erzielt werden. Heizsysteme mit geringer Trägheit sind notwendig, um eine gute Ausnutzung der Solargewinne sicherzustellen.

Die Anwendung von Direktgewinnsystemen ist besonders sinnvoll, wenn Wärmenachfrage und Einstrahlung zeitgleich auftreten. Dies ist z. B. in vielen Bürogebäuden der Fall. Dort können Direktgewinnsysteme auch mit Tageslichtsystemen zur Einsparung von Beleuchtungsenergie kombiniert werden. Direktgewinnsysteme eignen sich daher insbesondere als Ergänzung zu indirekten Gewinnsystemen mit Phasenverschiebung zwischen solarem Strahlungsangebot und Wärmenachfrage.

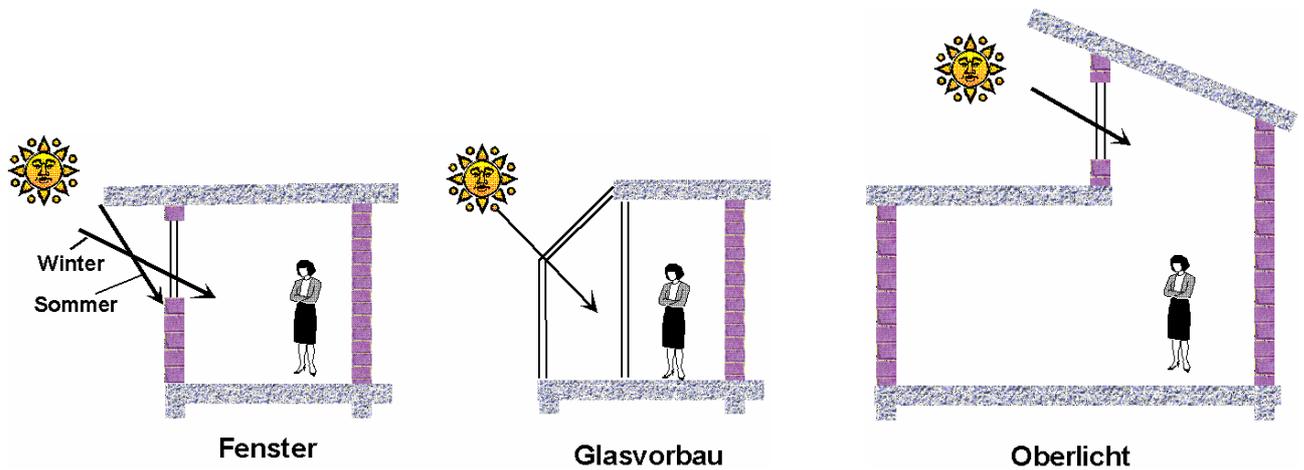


Abb. 4-8 Beispiele einiger Direktgewinnsysteme

**Indirekte Gewinnsysteme.** Bei indirekten Gewinnsystemen (Solarwand) wird solare Strahlung an der raumabgewandten Seite eines Speicherbauteils in Wärme gewandelt. Im Speicherbauteil fließt die Energie durch Wärmeleitung zur raumseitigen Oberfläche des Speichers und wird dort an die Luft abgegeben. Innentemperatur und Einstrahlung sind damit phasenverschoben. Diese Phasenverschiebung kann durch Speicherbauteilmaterial und -dicke beeinflusst werden.

Vorteile von Solarwandsystemen sind ihr einfacher Systemaufbau, die phasenverschobene Raumerwärmung und die gegenüber Direktgewinnsystemen geringeren Raumtemperaturvariationen. Nachteilig wirken sich die im Vergleich zum Direktgewinn erhöhten Wärmeverluste nach außen aus. Der Wärmeeintrag kann nur über Verschattungen geregelt werden. Sobald die Einstrahlung vom Speicherbauteil absorbiert ist, lässt sich die Wärmeabgabe an den Raum nicht mehr beeinflussen. Bei konvektionsunterstützten Systemen muss die Innenseite der transparenten Abdeckung gereinigt werden können, da sich Raumluft und Heizluft vermischen.

Solarwandsysteme eignen sich als Ergänzung zu Direktgewinnsystemen, da durch eine Kombination beider Systeme die Dauer der Wärmeabgabe in den Raum verlängert wird. Vor allem bei eher kontinuierlicher Wärmenachfrage (z.B. Wohnungen) bringen Systemkombinationen Vorteile.

Allerdings ist der Wärmeverlust nach außen höher und die Tageslichtnutzung ist auf der Absorberfläche nicht möglich. Abb. 4-9 zeigt einige Beispiele für indirekte Gewinnsysteme. Das System rechts ist als auch Trombé-Wand bekannt und stellt eine Mischung aus direktem und indirektem Gewinnsystem dar.

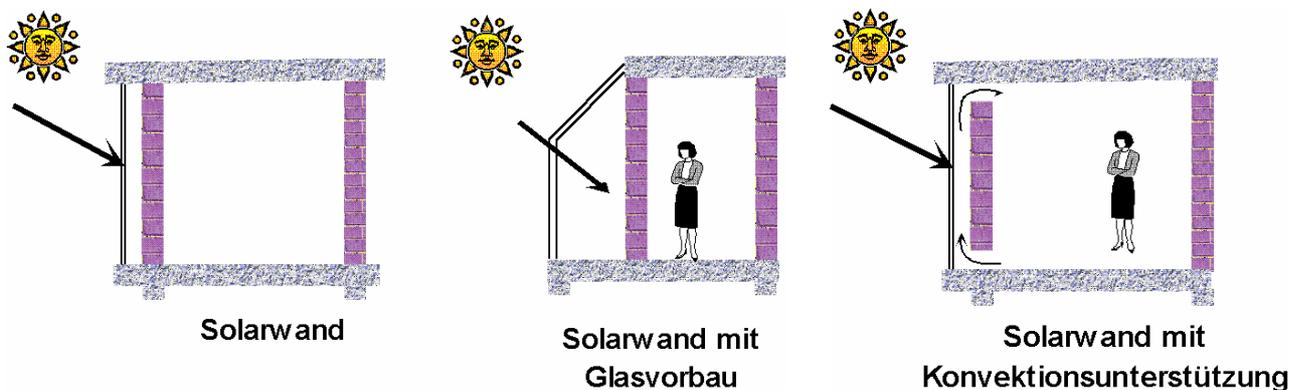
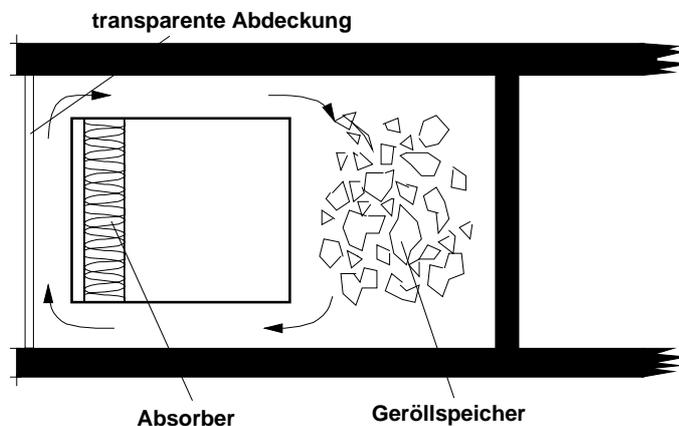


Abb. 4-9 Beispiele einiger indirekter Gewinnsysteme

**Abgekoppelte Systeme.** Da bei abgekoppelten Solarsystemen einige Systemkomponenten keine Bestandteile der Gebäudekonstruktion sind (z.B. Wärmetransporteinrichtungen, Ventilatoren), sondern zur Anlagentechnik zählen, ist hier eine eindeutige Abgrenzung gegenüber aktiven Systemen nicht immer zweifelsfrei möglich.

Bei abgekoppelten Systemen wird die solare Einstrahlung an einer vom Raum thermisch isolierten Absorberfläche in Wärme umgewandelt (Abb. 4.10). Die Solarwärme wird über ein Kanalsystem mit dem Wärmeträger Luft in einen Wärmespeicher geleitet, der Bestandteil der Gebäudekonstruktion oder ausschließlich anlagentechnisch sein kann. Hohldecken oder zweischalige Wände sind Beispiele für Speicher als Gebäudebestandteile; Geröllspeicher oder Wasserspeicher sind dagegen bereits technische Anlagen, die von der Gebäudekonstruktion unabhängig sind. Erfolgt der Wärmeaustausch ausschließlich konvektiv, d. h. ohne Hilfsaggregate, und ist der Speicher Gebäudebestandteil, ist die Zuordnung zu ausschließlich passiven Solarenergiesystemen eindeutig. Dienen Ventilatoren der Umwälzung, spricht man auch von semi-passiven Systemen. Die Wärmeabgabe an den Raum lässt sich bei thermisch gedämmten Speichern unabhängig von der Absorber- bzw. Speichertemperatur regeln.



**Abb. 4.10** An der Gebäudehülle angebrachtes thermisch abgekoppeltes System (nach Kerschberger, 1994)

Der entscheidende Vorteil von abgekoppelten Systemen ist ihre gute Regelungsfähigkeit. Aufgrund der Wärmedämmung zwischen Absorber und Innenraum sind außerdem die nächtlichen Wärmeverluste gering. Dem stehen als Nachteil hohe bauliche Aufwendungen, die Empfindlichkeit gegenüber Defekten (z.B. Undichtigkeiten) und die hohen Temperaturen im Absorber entgegen.

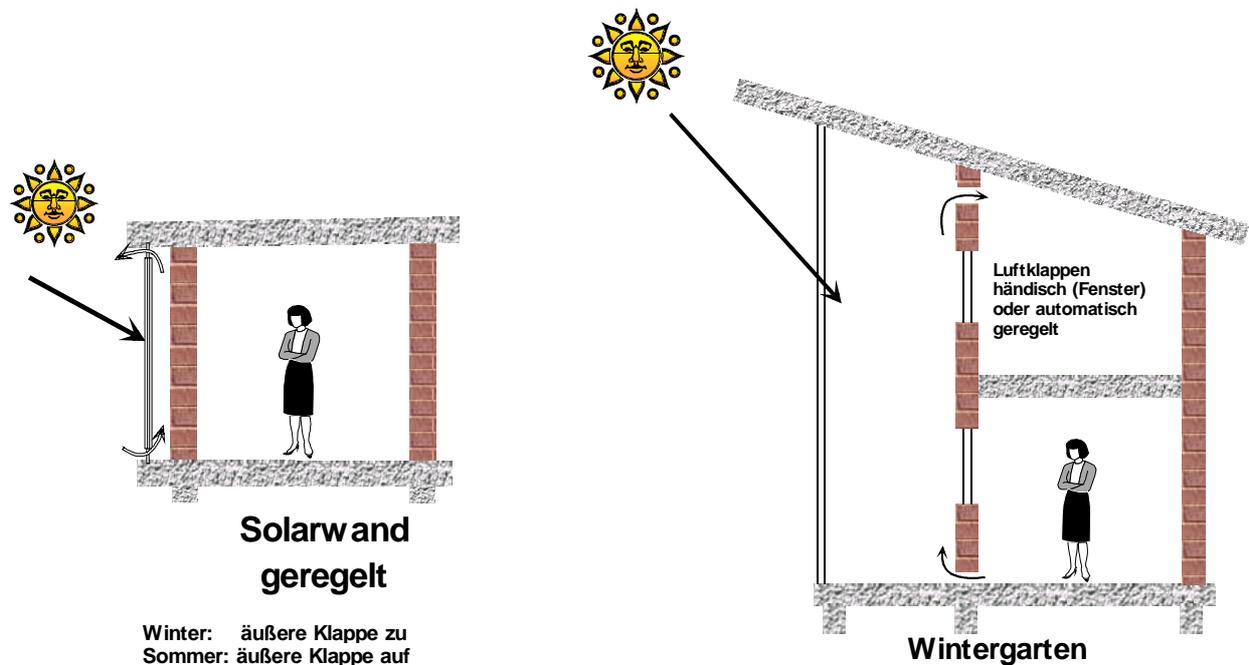
Thermisch abgekoppelte Systeme eignen sich für Nutzungen mit großen Phasenverschiebungen zwischen Einstrahlung und Wärmenachfrage und für Gebäude, in denen separate Wärmespeicher bereits vorhanden sind oder einfach in die Gebäudekonstruktion integriert werden können.

### Unabhängige Energiegewinnsysteme und Wintergärten

Bei unabhängigen Energiegewinnsystemen wird von der klassischen Passivnutzung ohne Fremdenergie und Regelung abgegangen. Hier wird die Wärmezufuhr mittels Klappen oder Ventilatoren geregelt (siehe Abb. 4-11).

Bekanntestes Beispiel ist der **unbeheizte Wintergarten**, dessen Türen zum Wohnraum dann geöffnet werden, wenn ein Heizbedarf besteht und der Wintergarten eine höhere Temperatur als

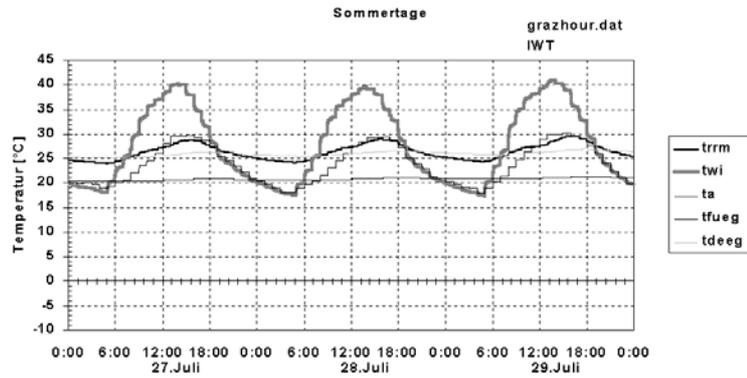
der angrenzende Wohnraum hat. Ein Wintergarten über zwei oder mehr Stockwerke kann zudem für eine Luftumwälzung im Haus genutzt werden. Im Winter treten Mindesttemperaturen um die 0°C auf. Im Sommer sollte die Wärme aus dem Wintergarten nach draußen weggeführt werden können da sonst sehr hohe Temperaturen (bis 50°C) auftreten. Aus diesem Grund sollten auch keine schrägverglasten Wintergärten gebaut werden, sondern das Dach sollte gut gedämmt sein. Zudem ist es ungünstig den Wintergarten nach Ost oder West auszurichten, da im Winter nur mehr eine geringe nutzbare Einstrahlung auf diese Flächen fällt und im Sommer eine Abschattung nur mit Jalousien aber nicht mittels Dachüberstand erreichbar ist.



**Abb. 4-11** Beispiele einiger unabhängiger Energiegewinnsysteme

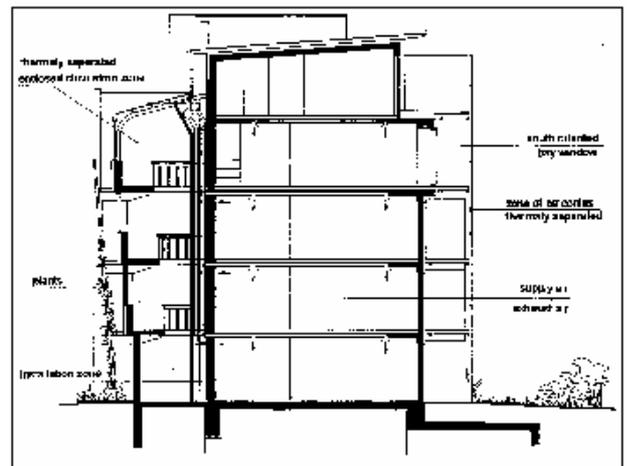
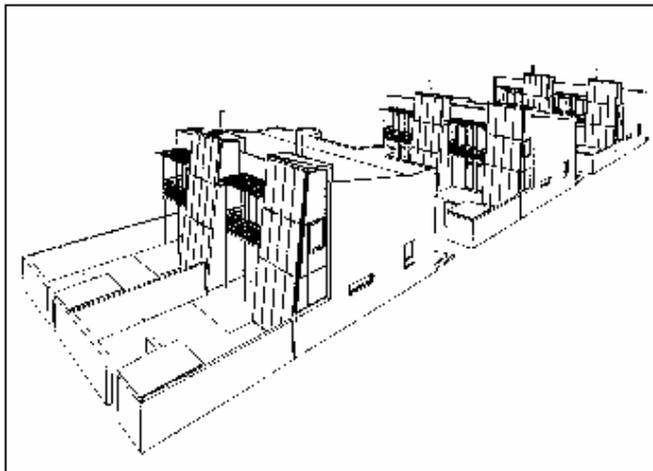
Ein gut ausgelegter Wintergarten liefert über die Heizperiode gleich viel oder mehr Energie ans Haus, wie das Haus an ihn abgibt. Neben der passiven Nutzung der Sonnenenergie senken unbeheizte Wintergärten die Heizlast, da das System Wand - Wintergarten - Wand im Normalfall einen kleineren U-Wert hat als die reine Außenwand. Ein beheizter Wintergarten stellt dahingegen im Normalfall einen erhöhten Wärmeverlust dar.

Im Sommer kommt es in Wintergärten, auch wenn sie durch Dachüberstände fix verschattet sind, oft zu Übertemperaturen. Abb. 4-12 zeigt beispielhaft den Temperaturverlauf eines Wintergartens nach Abb. 4-11 (twi), der Wohnraumtemperatur (trrm), der Außentemperatur (ta) und die Fußboden- (tfueg) und Deckentemperaturen (tdeeg) in einem Haus mit Fußbodenheizung an drei schönen Sommertagen. Trotz einer zugrundegelegten hohen Luftwechselrate nach außen steigt die Temperatur im Wintergarten auf über 40 °C an. Die dahinterliegende Wohnraumtemperatur liegt maximal bei 30°C.



**Abb. 4-12** Temperaturverlauf in einem Wintergarten im Sommer (Heimrath, 2000)

Wintergärten können auch als Verkehrsflächen (Gänge) im Mehrfamilienhäusern genutzt werden, da hier Raumtemperaturschwankungen eher akzeptabel sind als in Wohnräumen. Bei solch hohen freien Räumen muss jedoch auf die Temperaturverteilung im Wintergarten und eventuelle Naturzirkulation - Luftströmungen Bedacht genommen werden. Zumeist sind unten und oben mit Klappen versehene Öffnungen ins Freie zum Einlassen von Frischluft bzw. Auslassen von zu stark aufgewärmter Luft ins Freie.



**Abb. 4-13** Ausführung von Wintergärten in Mehrfamilienhäusern des Wiener Architekten M. Treberspurg



**Abb. 4-14** Vier Stockwerke hoher Erschließungsgang für Wohnungen (Architekt M. Trebersburg, Objekt: Brünnerstraße, Wien)

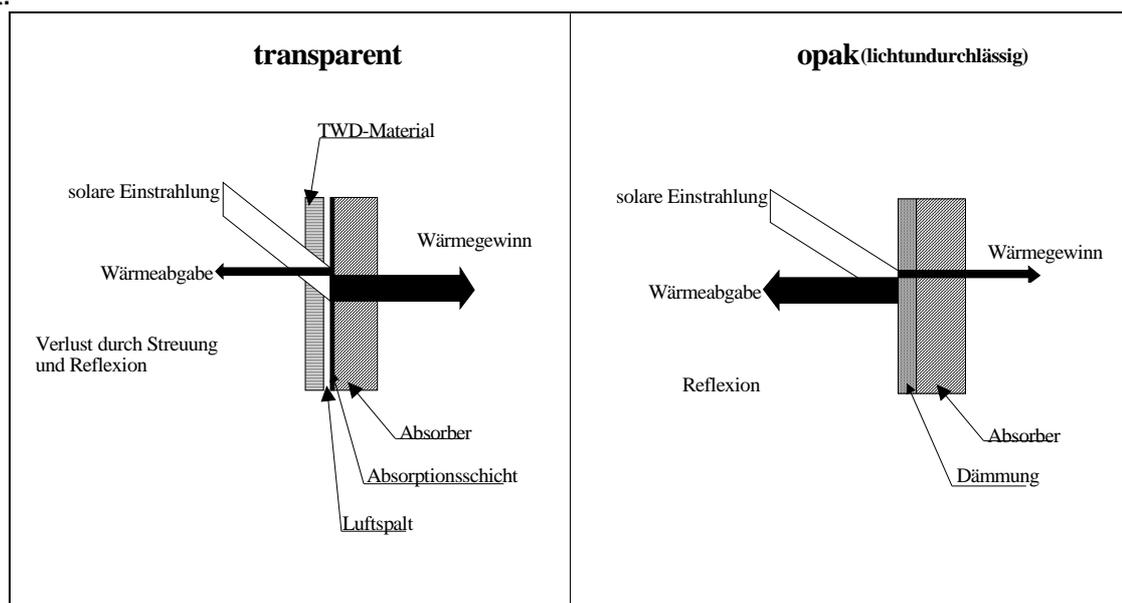
Abb. 4-13 und Abb. 4-14 zeigen solchen Wintergärten für zwei Wiener Objekte gestaltet durch den Architekten M. Trebersburg. Bei solch hohen freien Räumen muss jedoch auf die Temperaturverteilung im Wintergarten und eventuelle Naturzirkulation-Luftströmungen Bedacht genommen werden.

### 4.3 Transparente Wärmedämmung (TWD)

Neben der direkten Nutzung der Sonneneinstrahlung durch die Fenster wurde in den letzten Jahren die transparente Wärmedämmung (TWD) zur Erhöhung der passiven Gewinnen entwickelt. Sie stellt eine Form der indirekten Gewinnssystem dar.

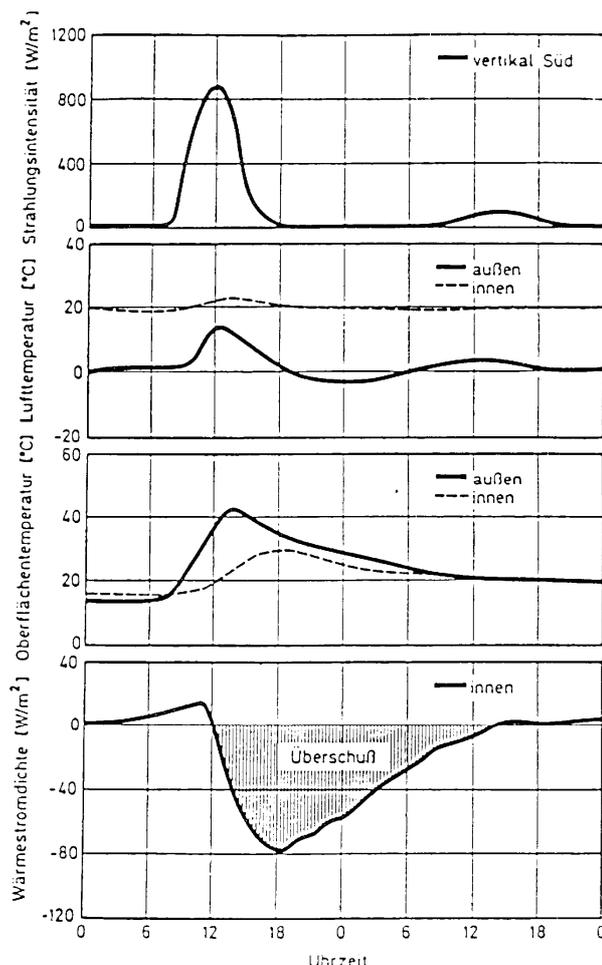
Die auf eine opake (lichtundurchlässige) Dämmung auftreffende Solarstrahlung kann nur zu einem geringen Teil genutzt werden (Abb. 4-15, rechts). Bei der Absorption der Solarstrahlung kann sich die Außenoberfläche zwar erwärmen, aber wegen der geringen Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht gelangt auch bei großen Temperaturdifferenzen (zwischen Innen- und Außenraum) nur relativ wenig Wärme nach innen.

Im Gegensatz dazu wird bei einem transparent gedämmten Körper ein großer Teil der Solarstrahlung durch die Dämmschicht hindurchgelassen und am schwarz beschichteten Körper (Absorber) in Wärme umgewandelt (Abb. 4-15, links). Bedingt durch den hohen Wärmedurchlasswiderstand des Dämmmaterials wird ein Großteil der Wärme in den Absorber geleitet.



**Abb. 4-15** Vergleich von transparenter und opaker Wärmedämmung

Abb. 4-16 zeigt den zeitliche Verlauf von Temperaturen und Wärmestromdichte für einen beispielhaften Wandaufbau. Um die am Absorber entstehende Wärme möglichst gut nach innen ableiten zu können (Nutzen) und somit die Maximaltemperaturen nicht zu hoch werden zu lassen, muß die Wand hinter der TWD aus Baustoffen mit großer Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  [W/m<sup>2</sup>K] und großer Speicherefähigkeit  $\rho \cdot c_p$  [J/m<sup>3</sup>K] ausgeführt sein. Dies bedeutet jedoch eine schlechte Wärmedämmung. Daher sind die Gesamt-U-Werte einer TWD-Wand meistens höher als für eine rein gedämmte Wand. Nachts hat diese Wand daher, wenn die Speichermassen bereits ausgekühlt sind, höhere Verluste als eine rein gedämmte Wand. Die Wärmegewinne überkompensieren jedoch bei gut ausgeführten TWD-Wänden die Verluste, sodaß die äquivalenten U-Werte (unter Berücksichtigung der solaren Gewinne) zumeist niedriger oder sogar negativ (Nettowärmegewinn) sind.



**Abb. 4-16** Zeitlicher Verlauf der Temperaturen und der Wärmestromdichte an einer Südwand mit TWD während zweier Wintertage (1. Tag strahlungsreich 2. Tag strahlungsarm, Wandaufbau von außen nach innen: Glas, 3 cm TWD aus Acrylschaum, 20 cm Normalbeton,  $U_{\text{gesamt}}=1,0$  W/m<sup>2</sup>K,  $U_{\text{TWD}}=1,1$  W/m<sup>2</sup>K)

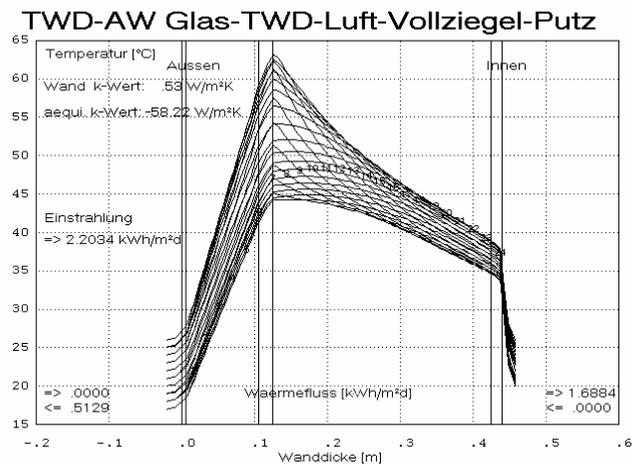
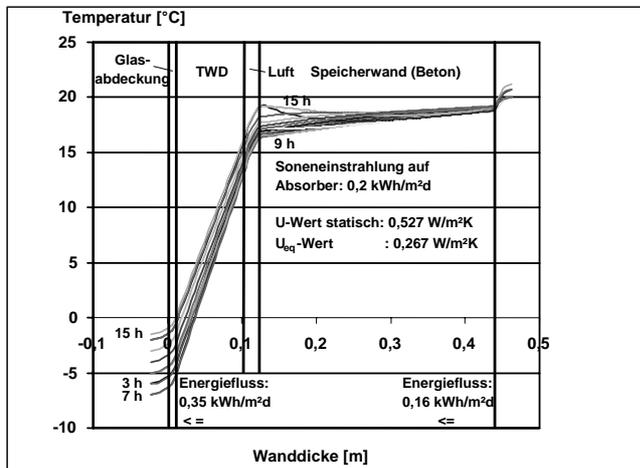
Außenseite gut absorbierend) und einem Innenputz. Im Beispiel aus Abb. 4-17 links liegt der stationäre U-Wert bei 0,527 W/m<sup>2</sup>K und der äquivalente U-Wert an diesem extrem ungünstigen Tag bei 0,267 W/m<sup>2</sup>K. Im Beispiel auf der rechten Seite ist dieselbe Wand für einen Sommerfall dargestellt. Die Absorberrtemperaturen steigen auf annähernd 65°C an und es ergibt sich ein

Um die am Absorber entstehende Wärme möglichst gut nach innen ableiten zu können (Nutzen) und somit die Maximaltemperaturen nicht zu hoch werden zu lassen, muss die Wand hinter der TWD aus Baustoffen mit großer Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  [W/mK] und großer Speicherefähigkeit  $\rho \cdot c_p$  [J/m<sup>3</sup>K] ausgeführt sein. Dies bedeutet jedoch eine schlechte Wärmedämmung. Daher sind die gesamt-U-Werte einer TWD-Wand meistens höher als für eine rein gedämmte Wand. Nachts hat diese Wand daher, wenn die Speichermassen bereits ausgekühlt sind, höhere Verluste als eine rein gedämmte Wand. Die Wärmegewinne überkompensieren jedoch bei gut ausgeführten TWD-Wänden die Verluste, so dass die äquivalenten U-Werte (unter Berücksichtigung der solaren Gewinne) zumeist niedriger oder sogar negativ (Nettowärmegewinn) sind.

Abb. 4-17 zeigt den zeitliche Verlauf von Temperaturen sowie die Wärmestromdichten und den statischen und den äquivalenten U-Wert für einen beispielhaften TWD Wandaufbau über einem kalten Wintertag und einen heißen Sommertag (jeweils 24 Stunden). Der Wandaufbau besteht aus einer Glasplatte, der TWD, einem Luftspalt, der Speichermasse (Beton, auf der

Wärmefluss von 1,7 kWh/m<sup>2</sup>d in den Raum. Die TWD muss daher für den Sommerfall abgeschattet werden.

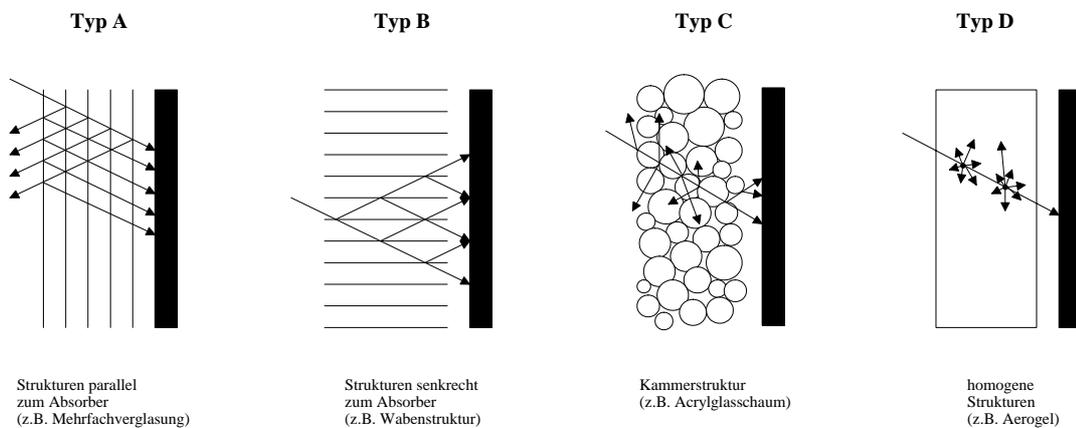
Das älteste transparente Wärmedämmmaterial das wir kennen ist Glas. Hohe Transmission für Sonnenstrahlung und Absorption für Wärmestrahlung, sowie die Verhinderung des Luftaustausches bewirken einen Treibhauseffekt. Doppelscheiben, Isolierverglasung oder Wärmeschutzgläser verbessern den Wärmeschutz, reduzieren jedoch gleichzeitig die solare Transmission durch höhere Reflexionsverluste (Typ A, Abb. 4-18).



**Abb. 4-17** Temperaturverlauf in einem System Glas – TWD –Luft –Absorber – Betonwand an einem kalten und nebligem Wintertag (links) und einem heißen Sommertag (rechts)

Neuartige senkrecht zum Absorber ausgerichtete Waben- oder Kapillarstrukturen aus Kunststoff haben deutlich geringere Reflexionsverluste, wobei die einfallende Sonnenstrahlung hauptsächlich durch vorwärts gerichtete Reflexion auf den Absorber trifft (Typ B, Abb. 4-18). Marktgängige Materialien werden aus transparentem Acrylglas (PMMA) oder Polycarbonat (PC) in typischen Dicken zwischen 20 und 200 mm hergestellt. Die Verarbeitung von Hostafion oder Glas als Basismaterialien für Hochtemperaturanwendungen wird derzeit erprobt.

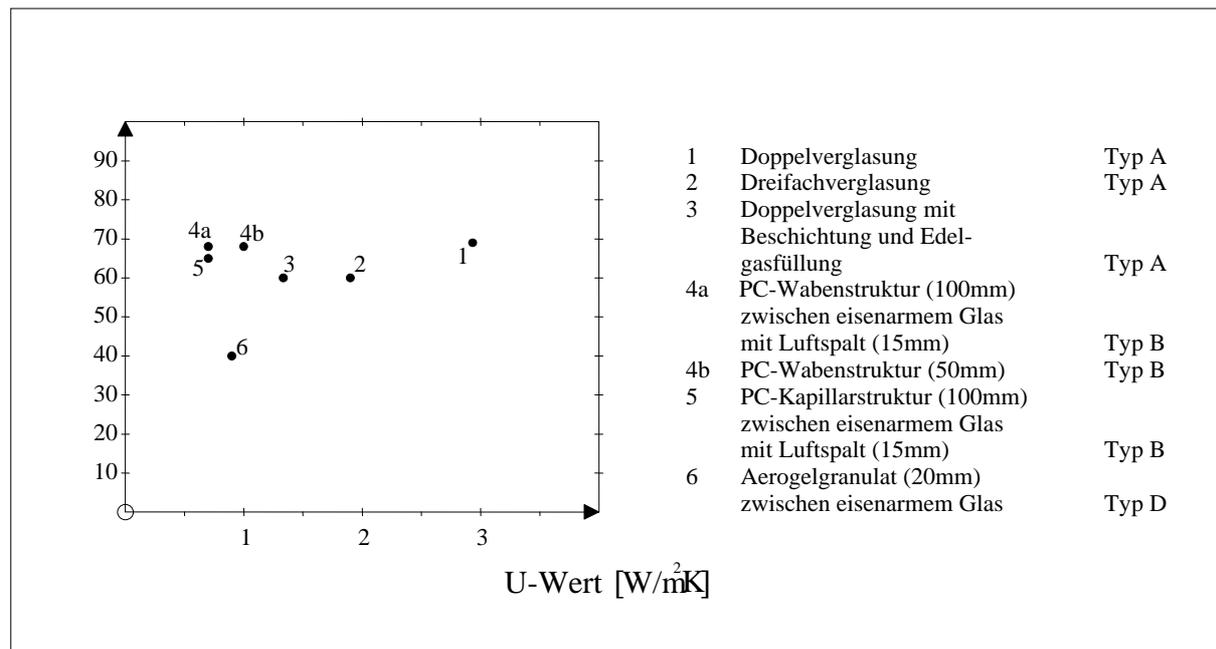
Wärmeverluste durch Konvektion können durch die Verwendung von TWD-Materialien mit Kammerstruktur (Acrylglasschaum, Typ C, Abb. 4-18) fast vollständig unterdrückt werden. Durch ihre relativ geringe Transmission finden sie jedoch kaum Verwendung.



**Abb. 4-18** Typenklassifizierung verschiedener TWD-Materialien (Lichtweg ist angedeutet)

Auf der Basis von kostengünstigen anorganischen Siliziumverbindungen werden sogenannte Aerogele in Form von Granulat hergestellt, die aus einer offenporigen Struktur von reinem Quarz bestehen (Typ D, Abb. 4-18).

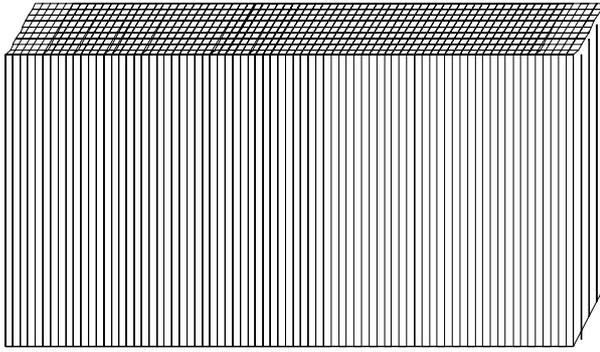
Mit Ausnahme der Mehrfachverglasungen und des homogenen Aerogels wirken alle TWD-Materialien mehr oder weniger lichtstreuend, da die klare Durchsichtigkeit für die Verwendung in Sonnenkollektoren nicht wesentlich ist. Ein ideales TWD-Material sollte bei hoher solarer Transmission einen geringen Wärmedurchgangskoeffizienten aufweisen. Wird auch der durch Absorption der Solarstrahlung im Material entstehende Wärmegewinn berücksichtigt, kann dies durch den sogenannten Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) beschrieben werden. Abb. 4-19 zeigt im Vergleich den Gesamtenergiedurchlassgrad und den Wärmedurchgangskoeffizienten ausgewählter TWD-Materialien. Gute Materialien liegen im Diagramm oben links (BINE/1990).



**Abb. 4-19** Diffuser und Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) und U-Wert einiger Fenster und TWD-Materialien im Vergleich

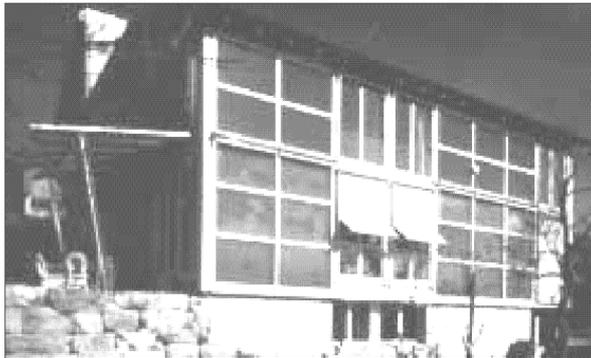
TWD liegt meist in Wabenstruktur aus Polycarbonat vor (siehe Abb. 4-20). Sie wird in unterschiedlicher Dicke (z.B. Dicke 60 mm, Höhe 700 mm, Breite 16 mm, Raumgewicht 31 kg/m<sup>3</sup>) geliefert. Durch die geringe Wanddicke (45 µm) ist es möglich eine kleinzellige Struktur zu schaffen, was zu einem geringen U-Wert führt ( $U_{10} = 1,14 \pm 0,04$  [W/m<sup>2</sup>K], laut Herstellerangabe). Die TWD ist einfach auf die benötigte Länge zuzuschneiden und werden flächenfüllend in einer Halterung angeordnet.

Ein Nachteil der TWD aus Polycarbonat ist die niedrige Dauergebrauchstemperatur (vom Vertreiber genannte 120°C, Baustoffklasse B2 Normal entflammbar nach DIN 4102). Neuerdings versucht man mit andern Kunststoffen oder Glaskapillaren eine TWD für höhere Temperaturen zu entwickeln. Der Transmissionsfaktor ist zwar bei senkrechter, hauptsächlich direkter Einstrahlung mit  $\tau_0 \approx 0,95$  sehr hoch, nimmt jedoch bei Einstrahlwinkeln größer 60° ( $\tau_{60} \approx 0,80$ ) und hohem Anteil an diffusem Licht ab. Durch gebrochene, gebogene oder verklebte Wabenenden und geringen Staubablagerungen an den Wabenwänden kommt es zu einer unerwünschten zusätzlichen Streuung des Lichtes. Dadurch wird der Transmissionsgrad der TWD nochmals verschlechtert (Platzer/1992).



**Abb. 4-20** TWD in Wabenstruktur

Abb. 4-21 zeigt zwei ausgeführte Beispiele von TWD-Wänden an Häusern.

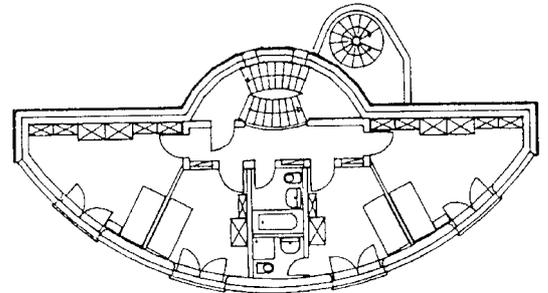
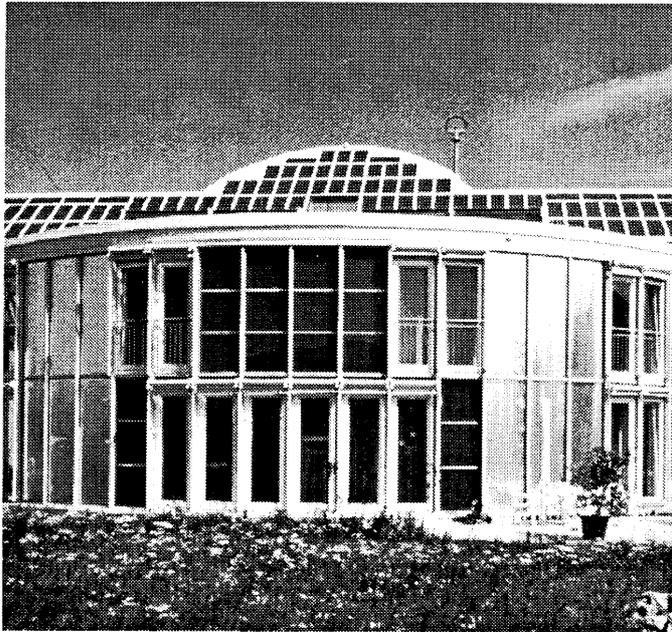


**Abb. 4-21** Beispiele für TWD-Wände an ausgeführten Häusern (Schweiz)

## **4.4 Bauliche Systeme zur passiven Sonnenenergienutzung**

### **4.4.1 Solarhaus**

Um einen hohen Ertrag an passiver Sonnenenergie zu erzielen, muss die Absorberfläche (Südseite des Hauses) groß gehalten werden. Dies führt jedoch auch zu höheren Wärmeverlusten des Gebäudes, da das Volumen/Oberflächen Verhältnis größer wird. Gebäudesimulationen haben gezeigt, dass eine langgestreckte Form jedoch günstiger ist, als die von den Wärmeverlusten her optimale Würfelform. Eine weitere geringfügige Verbesserung kann durch gekrümmte Südfassaden erzielt werden, wie sie z.B. im Solarhaus Freiburg (Planung: Fraunhofer Institut für solare Energiesysteme, Freiburg) gebaut wurde (siehe Abb. 4-22). Dieses sehr gut gedämmte Haus ist energieautark. Die passiven Gewinne überwiegen über die Heizperiode die Wärmeverluste durch die großen Absorberflächen mit schlechterem U-Wert als sie eine gedämmte Wand hätte. Der Heizenergiebedarf wird primär über diese passiven Gewinne gedeckt. Zusätzlich wird über Photovoltaik Wasserstoff erzeugt, der für Kochen und Zusatzheizung eingesetzt wird.



**Abb. 4-22** Ansicht und Grundriss des Obergeschosses des energieautarken Solarhauses in Freiburg



**Abb. 4-23** Drehbares Solar-Haus (Heliotrop) des deutschen Architekten Rolf Disch

Gegen die Überhitzung im Sommer müssen Solarhäuser mit Lüftungssystemen und gegen Temperaturschwankungen Tag/Nacht mit ausreichend Speichermassen im Haus versehen werden.

Eine Extremvariante des Solarhauses stellt das drehbare Haus des Architekten R. Disch dar (Abb. 4-23). Solange Passiverträge erwünscht sind, wird die Absorberfläche des Hauses zur Sonne hin gedreht bzw. mit der Sonne mitgedreht. Im Sommer wird sie von der Sonne weggedreht. Die so erzielbaren zusätzlichen Gewinne stehen jedoch in keinem Vergleich zum Aufwand eines drehbaren Hauses.

#### 4.4.2 Passivhaus

Eine andere Möglichkeit den Energiebedarf eines Hauses zu minimieren, ist die konsequente Reduzierung des Heizenergie- und Lüftungsbedarfs (siehe auch Kap. 3.3.1.2). Hier sind kompakte Baukörper, niedrigste U-Werte und eine Abluftwärmerückgewinnung notwendig. Die Absorberflächen (Fenster) werden bei dieser Bauart nicht über das normale Maß hinaus vergrößert. Sie sind trotzdem primär nach Süden ausgerichtet, um einen möglichst hohen Passivertrag zu erzielen.

Abb. 4-24 zeigt ein solches Haus das von W. Feist, Passiv-Haus Institut, Darmstadt, geplant wurde. Der Restheizenergiebedarf liegt bei ca. 15 kWh/m<sup>2</sup>a. Dieser wird durch eine Wärmepumpe in der Abluftwärmerückgewinnungsanlage mit Luftvorwärmung in einem Erdkollektor aufgebracht. Aktive Sonnenenergienutzung wird nur mehr für die Brauchwasserbereitung benötigt.

Derzeit wird an der Verringerung der Baukosten für solche Häuser gearbeitet. Die letzten Bauvorhaben 1997 erfüllten bereits die Kriterien der Wohnbauförderung.

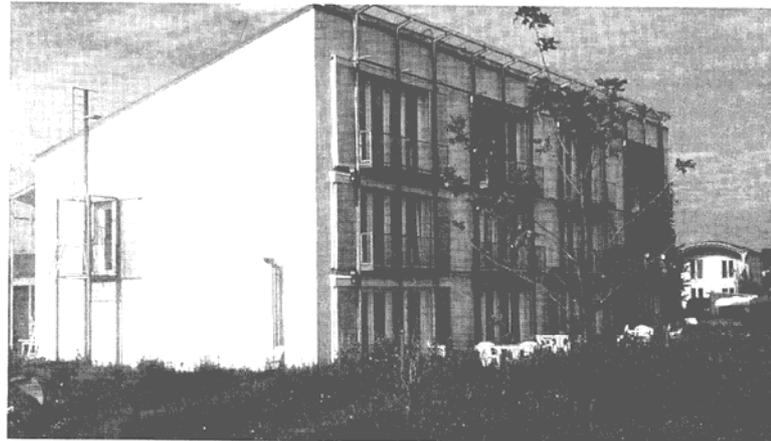


Abb. 4-24 Passivhaus in Darmstadt Kranichstein (1991)

#### 4.4.3 Vergleich Solarhaus - Passivhaus

Zur Einteilung von Solar- und Passivhäusern wurden von Voss (1997) die Kennzahlen  $H'$  und  $A'_{eff}$  entwickelt.

- **Spezifische Wärmeverlustleistung  $H'$  [W/m<sup>2</sup>K]**

Dieser Wert stellt die Wärmeverlustleistung des gesamten Hauses bezogen auf die beheizte Wohnfläche dar. Je kleiner dieser Wert ist, desto eher kann von einem Passivhaus gesprochen werden.

$$\begin{aligned}
 H &= (\dot{Q}_{\text{Transmission}} + \dot{Q}_{\text{Lüftung}}) / \Delta\vartheta_{\text{Auslegung}} \\
 &= \Sigma(U \cdot A)_i + \Sigma(0,5 \cdot U \cdot A)_j + (\rho \cdot c_p)_{\text{Luft}} \cdot V \cdot n_{\text{eff}} && \text{[W/K]} \\
 H' &= H/A_W && \text{[W/m}^2\text{K]}
 \end{aligned}$$

mit:

- $\dot{Q}$  Wärmeverluste durch Transmission und Lüftung
- $\Delta\vartheta_{\text{Auslegung}}$  Auslegungs-Temperaturdifferenz zwischen Raum und Außenluft
- $H$  bzw.  $H'$  Wärmeverlustleistung absolut ( $H$ ) oder spezifisch ( $H'$ )
- $U$   $U$ -Werte aller  $i$  Bauteile gegen Außenluft und aller  $j$  Bauteile gegen das Erdreich
- $A$  Bauteilflächen
- $(\rho \cdot c_p)_{\text{Luft}}$  spez. Wärmekapazität der Luft, 0,34 Wh/m<sup>3</sup>,K
- $A_W$  beheizter Teil der Wohnfläche nach DIN 277
- $V$  zu lüftendes Innenvolumen, in der Regel  $V = 2,5 \cdot A_W$

$n_{\text{eff}}$

energetisch wirksamer Luftwechsel inkl. Fugenlüftung und Wärmerückgewinnung

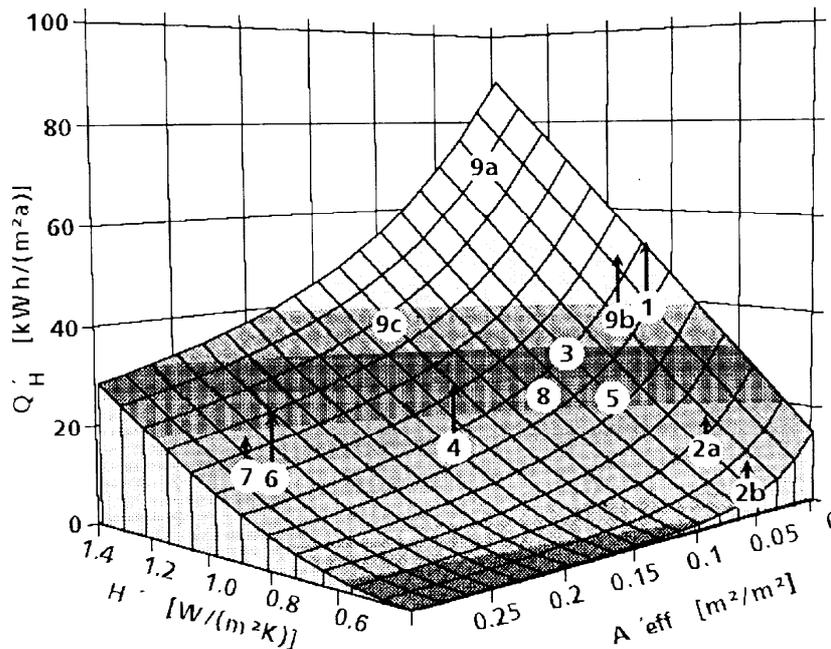
• **effektive Aperturfläche  $A'_{\text{eff}}$  [ $\text{m}^2/\text{m}^2$ ]**

Dieser Kennzahl ergibt sich aus den Absorberflächen des Hauses (gewichtet mit dem Energiedurchlaßgrad bei Fenstern und dem solar-thermische Wirkungsgrad bei TWD) ebenfalls dividiert durch auf die beheizte Wohnfläche. Große Werte der spezifischen Aperturfläche deuten auf das Konzept des Solar-Hauses hin.

$$\begin{aligned} A_{\text{eff}} &= A_{\text{eff,Fenster}} + A_{\text{eff,TWD}} \\ &= (g \cdot A)_{\text{Fenster}} + \Sigma(\eta \cdot A)_{\text{TWD}} \\ A'_{\text{eff}} &= A_{\text{eff}}/A_w \end{aligned} \quad \begin{array}{l} [\text{m}^2] \\ [\text{m}^2/\text{m}^2] \end{array}$$

mit

- $A_{\text{eff}}$  bzw.  $A'_{\text{eff}}$  effektive Aperturfläche absolut ( $A_{\text{eff}}$ ) bzw. spezifisch ( $A'_{\text{eff}}$ )
- $g$  Gesamtdurchlassgrad für ungerichtete Solarstrahlung
- $\eta$  solar-thermischer Wirkungsgrad, mit  $\eta = g_{\text{TWD}} \cdot [1 + (K_{\text{TWD}}/K_w)]^{-1}$
- $K_{\text{TWD}}$  Wärmedurchgangskoeffizient der transparenten Wärmedämmung
- $K_w$  Wärmedurchgangskoeffizient der Wand, ohne TWD
- $A$  Aperturfläche der Fenster bzw. der TWD-Systeme, hier ausschließlich diejenigen mit Südorientierung



**Abb. 4-25** Gebäudekennfeld für ein Gebäude mittelschwerer Bauart und einigen realisierten Gebäuden: 7: Solarhaus Freiburg, 2: Passivhaus Kranichstein (a: Endhaus, b: Mittelhaus),  $Q'_H$ : spezifischer Heizenergiebedarf (Voss, 1997)

Abb. 4-25 zeigt ein auf diesen Kennzahlen beruhendes Kennfeld für verschiedene Häuser. Die Passivhäuser finden sich rechts unten und die Solar-Häuser links im Kennfeld. Beide Konzepte allein führen nicht bis zum Nullheizenergiehaus, sondern es muss jeweils eine Kombination aus beiden Philosophien verwendet werden.