Zeitschrift: Tec21

Herausgeber: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein

Band: 127 (2001)

Heft: 22: Glas

Artikel: Behaglicher Glasbau - ein Luftschloss?: eine Lösungsmethode für eine altbekannte Problematik

Autor: Keller, Bruno

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-80162

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Bruno Keller

Behaglicher Glasbau – ein Luftschloss?

Eine Lösungsmethode für eine altbekannte Problematik

Glasbauten liegen im Trend. Doch wegen schlechter Erfahrungen ist nach wie vor Skepsis vorhanden. Viele Beispiele missglückter Umsetzung sind daran schuld. Die Attraktivität von Glasbauten liegt trotz allem auf der Hand: Transparenz, Leichtigkeit der Erscheinung, Freiheitsgefühl. Lassen sich diese Vorteile durch intelligente Planung mit Behaglichkeit kombinieren? Anhand eines konkreten und inzwischen gebauten Projekts wurden praxistaugliche Regeln abgeleitet.

In der neuesten Version[1] der SIA 180 werden quantitative Angaben zum Sonnenschutz gemacht. Für die spezielle Situation von Allglasbauten[2] genügen diese allerdings nicht. Denn Bauten mit stockwerkhohen Verglasungen weisen zwei Grundprobleme auf: lokale «Zugerscheinungen» im Winter und eine Übererwärmung im Sommer. Dies führt zu Behaglichkeitsdefiziten. Da die Kälterezeptoren des Menschen peripher in der Haut angeordnet sind, empfindet er «Zug» lokal – etwa am Nacken, an den Füssen und den Knöcheln. Übererwärmung wird dagegen zentral im Gehirn wahrgenommen. Dementsprechend müssen die Kriterien[3/4] für Winter und Sommer differenziert betrachtet werden (Bild 1).

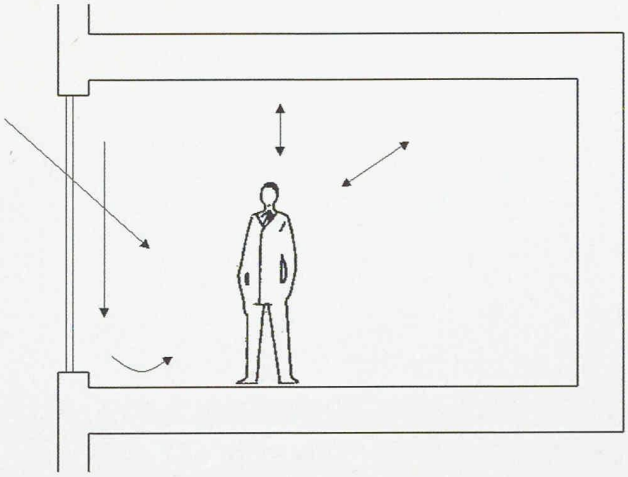
Winterproblematik

Verglasungen dämmen meist schlechter als Wände und weisen daher im Winter niedrigere Oberflächentemperaturen auf. Demzufolge nimmt eine grosse Glasfläche von davor sitzenden Personen mehr Wärmestrahlung auf, als sie abgibt – der Mensch erlebt dieses einseitige Strahlungsdefizit als «Zug», obwohl keine Luftströmungen im Spiel sind. Zudem kühlt sich die vor dem Glas befindliche Luft ab und strömt als kalte Grenzschicht

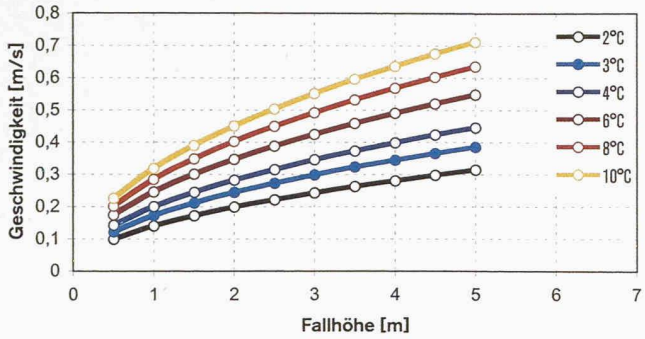
Schwitzkästen

(hg) Glasbauten haben in den letzten Jahren eine zwiespältige Aufmerksamkeit genossen. Gestalterisch gefallen die Transparenz und die optische Leichtigkeit des Materials; innen herrschen im Sommer tropische Temperaturen und im Winter Zugerscheinungen. Die Ursachen sind unter anderem das fehlende Problembewusstsein für die Themen Wärmelasten, Sonnenschutz und Behaglichkeit und das fehlende Wissen in den Bereichen Gebäudetechnik und Bauphysik. Mit Glas arbeiten hat einen Preis: Es muss gerechnet werden! Und zwar genau.

Es reicht nicht, gute Werte beim Gesamtenergie-Durchlass zu haben und sich im Übrigen auf den gesunden Architektenverstand zu verlassen. Auch die üblicherweise verwendeten Simulationsprogramme liefern bei Fassaden mit sehr hohem Glasanteil oft keine relevanten Aussagen. Die künftigen Nutzer aber haben ein hochsensibles Sensorium und sind bei Neubauten an die Erfüllung hoher Komfortansprüche gewöhnt. Daher ist es von Vorteil, genaue Abklärungen im Bereich Bauphysik zu treffen, denn Behaglichkeit ist von weit mehr Faktoren abhängig als von einer ausgeglichenen Raumtemperatur. Es lohnt sich, Fachleute zuzuziehen und schon in der Planungsphase dafür zu sorgen, dass nach der Fertigstellung niemand ins Schwitzen kommt.

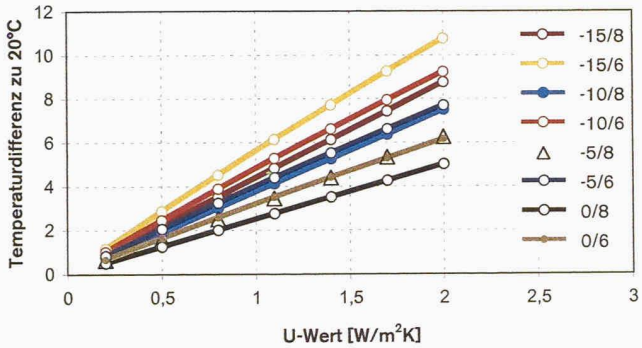


1
Situation mit Strahlungsaustausch und Kaltluftabfall



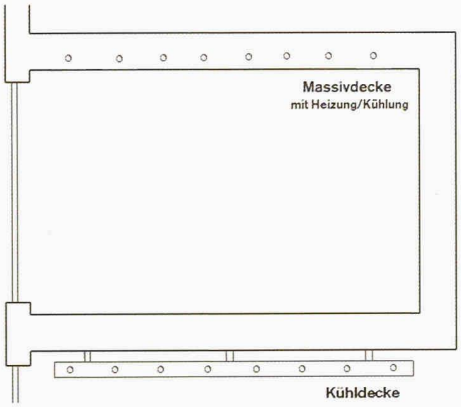
2

Maximale Grenzschichtgeschwindigkeit in Abhängigkeit von Fallhöhe (h) und Oberflächentemperaturdifferenz (zur Raumtemperatur von 20 °C); Beispiele: h = 3 m: $\Delta\vartheta \leq 2{,}2$ °C; h = 4 m: $\Delta\vartheta \leq 1{,}7$ °C; h = 5 m: $\Delta\vartheta \leq 1{,}3$ °C



3

Glasoberflächentemperaturen in Abhängigkeit vom U-Wert und vier verschiedenen Aussenlufttemperaturen (−15, −10, −5 und 0 °C), je für den Wärmeübergangskoeffizienten α_i = 8 und 6 W/m²K (Legende: Aussenlufttemp./α_i). Die Daten aus Bild 2 entsprechen bei −10 °C Aussenlufttemperatur folgenden U-Werten:
h = 3 m: U ≤ 0,6 W/m²K; h = 4 m: U ≤ 0,45 W/m²K; h = 5 m: U ≤ 0,35 W/m²K



4

Bei der thermisch kontrollierten Massivdecke sind die kühlflüssigkeitsgefüllten Rohre in der Decke verlegt, wobei auch der Beton der Decke selbst Strahlung aufnimmt. Bei der Kühldecke verlaufen die Rohre separat unterhalb der Decke

zu Boden. Dort wird sie abgelenkt und erreicht als kalte Luftströmung Füsse und Knöchel. Dieser Kaltluftabfall hängt in seiner Strömungsgeschwindigkeit[5] und Temperatur sowohl von der Oberflächentemperatur der Verglasung als auch von ihrer «Fallhöhe» ab und ist demnach bei stockwerkhohen Verglasungen[4] besonders ausgeprägt (Bild 2). In beiden Fällen ist ein genügend niedriger U-Wert (Wärmedämmung) der Verglasung von Vorteil. Dies erhöht die Oberflächentemperatur und reduziert dabei sowohl das einseitige Strahlungsdefizit wie auch den Kaltluftabfall (Bild 3).

Andere Studien[6] zeigten, dass Verglasungen mit U-Werten unter 1 W/m²K energetisch sowohl auf der Nordseite wie auch auf der Südseite einer gut gedämmten Wand überlegen sind. Energetisch besteht zwischen Verglasungen mit U-Werten von 1 und 0,7 W/m²K kein grosser Unterschied – auch nicht in der Abhängigkeit von der Verglasungsfläche. Die Behaglichkeit jedoch steigt, denn die Oberflächentemperaturen liegen bei niedrigerem U-Wert in einem günstigeren Bereich. Dies entschärft sowohl das einseitige Strahlungsdefizit wie auch den Kaltluftabfall (Bild 3).

Darüber hinaus kann die alte Regel, wonach Temperaturdifferenzen bis zu 3 °C keine haustechnische Kompensation erfordern, erweitert werden: Diese Temperaturdifferenz entspricht bei einer Fallhöhe bis 2 m thermischen Geschwindigkeiten, die kleiner sind als 0,25 m/s, also Werten, die durch den Menschen selbst erzeugt werden. Grössere Fallhöhen gestatten deshalb weniger grosse Temperaturdifferenzen (Bild 2). Sehr hohe Verglasungsfronten (h > 4 m) erfordern zusätzliche Massnahmen wie etwa Radiatoren oder Wärmerohre (Bild 3).

Solche Wärmeschutzverglasungen weisen auch im Sommer infolge ihres ebenfalls niedrigeren g-Wertes (Gesamtenergietransmission) die Vorteile eines verbesserten Sonnenschutzes auf. Es werden damit zwei Fliegen auf einen Schlag erledigt.

Sommerproblematik

Trotz Sonnenschutz kann die restliche, aber auch die indirekte, durch die Innenoberflächen reflektierte Sonneneinstrahlung ein Problem darstellen. Hinzu kommt noch die Abstrahlung von den erwärmten Glasoberflächen selbst. Um diese Probleme zu entschärfen, sind Kühleinrichtungen, welche direkt in das Strahlungsfeld eines Raumes eingreifen, sinnvoll: Kühldecken oder thermisch kontrollierte Massivdecken (Bild 4). Letztere weisen ein zusätzliches Potenzial durch ihr dynamisches Speichervermögen auf und können dadurch zeitlich begrenzt auch Extrembelastungen aufnehmen. Im Vergleich dazu weisen die traditionellen Luftsysteme eine wesentlich geringere Effizienz auf, da ihre Wärmeübergangskoeffizienten mit 1,5 bis 2 W/m²K geringer sind als diejenigen der Strahlung[7] mit 4,5 bis 5 W/m²K. Als Verdrängungs- oder Quelllüftung eingesetzt, können sie zwar der Lufthygiene und Feinjustierung der Raumtemperatur dienen, aber nicht die Grundlast tragen.

Kühlproblematik

Die eingestrahlte Wärme muss unter Beibehaltung der Raumtemperatur wieder abgeführt werden. Nach dem Energiesatz entspricht dies der folgenden Gleichung:

$$I \cdot A_{Glas} \cdot g_{eff} + P_{innQu} = q_{kühl} \cdot A_{Decke} \qquad (1)$$

I ist die Sonneneinstrahlungsintensität [W/m²], A_{Glas} die Glasfläche [m²], g_{eff} der g-Wert inklusive Sonnenschutz, P_{innQu} die Leistung der inneren Quellen [W], $q_{kühl}$ die Leistungsdichte der Kühlung [W/m²] und A_{Decke} die Deckenfläche [m²]. Um die Raumtiefe zu berücksichtigen, werden beide Seiten der Gleichung 1 durch t_{Decke}, die Deckentiefe, dividiert. Die mathematische Auflösung der Gleichung nach $q_{kühl}$ (unter der Berücksichtigung, dass $A_{Glas} = b_{Glas} \cdot h_{Glas}$ und $A_{Decke} = b_{Decke} \cdot t_{Decke}$ ist) ergibt:

$$q_{kühl} = (h_{Glas}/t_{Decke}) \cdot I \cdot g_{eff} + (P_{innQu}/A_{Decke}) \qquad (2)$$

Die Leistungsdichte der Kühlung ($q_{kühl}$) kann bei einer Kühlmitteltemperatur von 19 °C für Kühldecken bis zu 60 W/m², für Massivdecken etwa 40 W/m² betragen – während drei bis vier Stunden sind auch bis zu 80 W/m² möglich.

Lässt man die zu den Flächen meist proportionalen inneren Quellen (P_{innQu}) beiseite, so sieht man, dass für die notwendige Kühlleistungsdichte neben der Verglasung vor allem die Raumtiefe (t_{Decke}) ausschlaggebend ist. Dies bedingt, dass unter anderem Stellwänden Beachtung zu schenken ist (Bild 5). Eine Überprüfung des Möblierungsplans sowie der Raumeinteilung und die Information der Benutzer lohnen sich. Bei einer Maximaleinstrahlung von I = 600 W/m², einem g_{eff} von 0,15 und einer Glashöhe von h_{Glas} = 3 m erhält man ohne die Berücksichtigung der inneren Quellen:

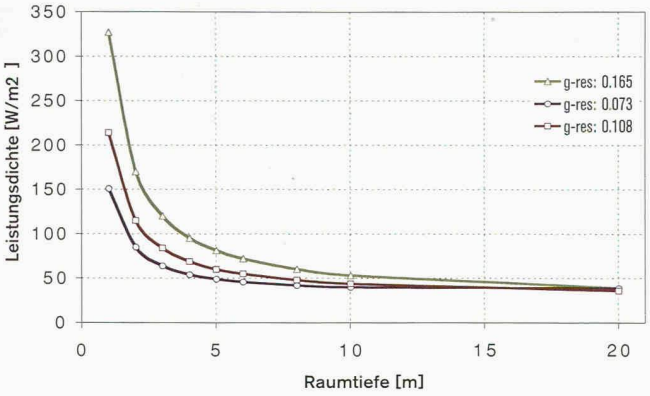
$$q_{kühl} \cdot t_{Decke} = 3 \cdot 0{,}15 \cdot 600 = 270 \text{W/m} \qquad (3)$$

Demzufolge muss die Raumtiefe mindestens 4,5 m betragen, wenn die Leistungsdichte der Kühlung ($q_{kühl}$) 60 W/m² beträgt. Bei einem $q_{kühl}$ von nur 40 W/m² ist eine grössere Raumtiefe – mindestens 6,75 m – nötig. Umgekehrt ist bei einem $q_{kühl}$ von 80 W/m² eine Mindestraumtiefe von nur gerade 3,4 m erforderlich (Bild 5).

Einflüsse in der peripheren Zone

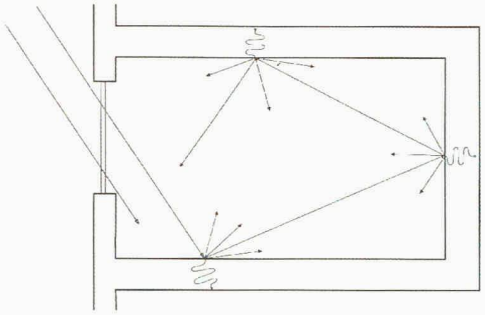
Die Wärmeabstrahlung der Glasoberfläche verteilt sich diffus im Innenraum. Sie wird dabei von kühleren Oberflächen wie etwa Decke oder Boden absorbiert und dem Strahlungsfeld entzogen (Bild 6). Die Oberflächentemperaturen des Innenraums sind näherungsweise durch diese Kühlflächen bestimmt.

Die restliche Sonneneinstrahlung hinter dem Sonnenschutz ist ebenfalls diffus, verteilt sich im Innenraum und wird an den Oberflächen zum Teil durch Absorption in Wärme umgewandelt und teilweise wieder diffus reflektiert. Auf der Körperoberfläche eines Benutzers treffen beide Strahlungsarten zusammen und werden als Wärme fühlbar.



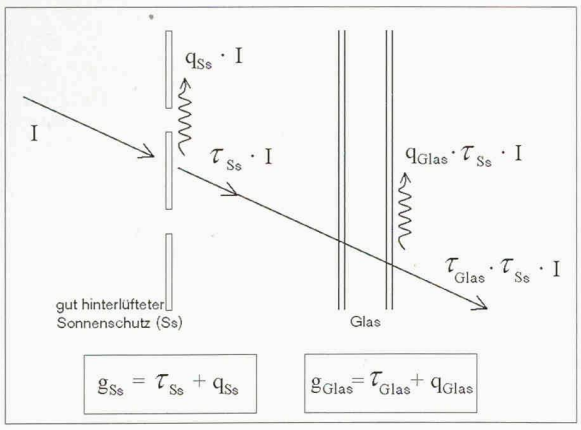
5

Notwendige Dichte der Kühlleistung in Abhängigkeit von der Raumtiefe für drei verschiedene g_{eff}-Werte bei 3 m hoher Verglasung und inneren Quellen von 24 W/m²



6

Strahlungsverteilung im Innenraum: direkte und diffuse Quellen



7
Kennwerte des Systems aus Sonnenschutz und Verglasung

Die Aufgabe besteht nun darin, die beiden Auswirkungen zusammenzurechnen, den Einfluss der Lufttemperatur zu berücksichtigen und die operative Temperatur, die für den Komfort massgebend ist, zu bestimmen.

Die Berücksichtigung der diffusen Einstrahlung

Das System aus Sonnenschutz und Verglasung kann durch zwei Angaben charakterisiert werden[4]:

Sonnenschutz (Ss): $g_{Ss} = \tau_{E\,Ss} + q_{i\,Ss}$ (4)

Glas: $g_{Glas} = \tau_{E\,Glas} + q_{i\,Glas}$ (5)

Falls der Sonnenschutz gut hinterlüftet ist, fällt $q_{i\,Ss}$ weg (Bild 7). Die Glasfläche inklusive Sonnenschutz wirkt in erster Näherung als diffus strahlende Fläche mit der Abstrahlungsintensität $I_i = I \cdot \tau_{Ss} \cdot \tau_{Glas}$. Die inneren Oberflächen sind durch ihr Absorptionsvermögen a respektive durch das diffuse Reflexionsvermögen r = 1–a charakterisiert. Auf wellenlängenabhängige Absorption verschiedener Farben wird nicht eingegangen.

Jede Fläche absorbiert aber nicht nur, sondern reflektiert auch. Dies kann durch eine Matrixgleichung unter Verwendung so genannter Formfaktoren berechnet werden. Die Formfaktoren tragen den geometrischen Verhältnissen Rechnung – sie berücksichtigen die Raumwinkel, unter denen sich die verschiedenen Flächen zueinander befinden. Für einen einfachen, rechtwinkligen Raum lässt sich dies gut in einem kleinen Tabellenprogramm lösen. Man erhält dann die auf jeder Fläche absorbierte und die auf den Benutzer eingestrahlte Leistung.

Temperaturerhöhung der inneren Glasoberfläche

Zuerst muss die effektive Temperatur infolge U-Wert, Aussenluftemperatur sowie sekundärer Wärmeabgabe q_i bestimmt werden. Für die sekundäre Wärmeabgabe der Glasinnenoberfläche ergibt sich dann:

$$q_{Glas} = \tau_{E\,Ss} \cdot q_{i\,Glas} \cdot I \qquad (6)$$

Daraus kann näherungsweise über den inneren Wärmeübergangskoeffizienten α_i die Erhöhung der Glasoberflächentemperatur bestimmt werden (Unsicherheit in α_i: 6 bis 8 W/m^2K):

$$\Delta\vartheta_{Glas} = (\tau_{E\,Ss} \cdot q_{i\,Glas} \cdot I)/\alpha_i \qquad (7)$$

Dazu kommt die innere Oberflächentemperatur infolge des Wärmeflusses von aussen, falls die Aussenlufttemperatur höher als die Raumtemperatur ist. Dies kann durch folgende Gleichung dargestellt werden (U entspricht dem U-Wert):

$$\Delta\vartheta_{Glas-U} = (U/\alpha_i) \cdot (\vartheta_a - \vartheta_i) \qquad (8)$$

Dazu ein Beispiel: Ein Sonnenschutzsystem wirkt als äusserer hinterlüfteter Sonnenschutz mit $\tau_{E\,Ss} = 0{,}15$, $q_{i\,Ss} = 0{,}05$, Wärmeschutzverglasung $g = 0{,}45 + 0{,}07$, Einstrahlung $I = 600\,W/m^2$ und $g_{eff} = \tau_{E\,Ss} \cdot g$. In Glei-

chung 7 eingesetzt, ergibt dies eine Erhöhung der Temperatur durch sekundäre Wärmeabgabe um 0,79 K. Die Aussenlufttemperatur beträgt 32 °C, die Raumtemperatur 26 °C, der U-Wert 1,2 W/m²K. Nach Gleichung 8 gilt zusätzlich: $\Delta\vartheta_{Glas-U} = 0{,}9$ K. Die gesamte Temperaturerhöhung erreicht also 1,69 K und die Oberfläche damit 27,69 °C bei einer Raumlufttemperatur von 26 °C.

Für die Auswirkung der Abstrahlung von den inneren Oberflächen müsste man im Prinzip wieder mit einer Matrixrechnung vorgehen wie für die solare Einstrahlung. Solange aber die Eigenabstrahlung des Benutzers im Vergleich zu derjenigen der Wände vernachlässigt werden kann und die Emissionsvermögen nahe bei 1 sind – wie das für die meisten Bauteiloberflächen zutrifft –, genügt es, mit Hilfe der Formfaktoren die Leistungsdichte auszurechnen, welche von jeder Wand bei bekannter Temperatur auf den Körper eingestrahlt wird. Auch das kann mit einem kleinen Tabellenprogramm bewältigt werden.

Solare und thermische Strahlung

Geht man wie im obigen Beispiel vor, so erhält man die Strahlungsintensität [W/m²], welche auf dem Körper des Benutzers landet – ähnlich wie wenn er rundherum von einer Umgebung von dieser mittleren Strahlungstemperatur angestrahlt würde. Dies ist – im Gegensatz zum «Kältefall» – zulässig, weil der zentrale «Überhitzungssensor» im menschlichen Gehirn vor allem auf die Gesamtbelastung und nicht auf lokale Überlastung reagiert. Diese Strahlungstemperatur lässt sich aus der Gesamtintensität $q_{tot} = q_w + q_{Sol}$ berechnen. Da q_w, q_{Sol} durch die Summe über die Formfaktoren vom Ort des Benutzers abhängen, erhält man die Strahlungstemperatur als Funktion der Ortskoordinaten des Benutzers im Raum. In diesem Fall versagen viele Simulationsprogramme, da meist nur eine gemittelte Strahlungstemperatur im Raum ausgewiesen wird. Auch eine raffiniertere Rechnung mit den Absoluttemperaturen hilft nicht weiter. Will man die mittlere Strahlungstemperatur zur Beurteilung der Behaglichkeit benutzen, so muss noch zusätzlich die Auswirkung der Lufttemperatur berücksichtigt werden: die operative Temperatur. Sinnvollerweise wird diese unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Wirksamkeit (Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha_{Str} \cong 5$ W/m²K, $\alpha_{Luft} \cong 2$ W/m²K) bestimmt:

$$\vartheta_{oper} = (\alpha_{Str} \cdot \vartheta_{Str} + \alpha_{Luft} \cdot \vartheta_{Luft})/(\alpha_{Str} + \alpha_{Luft}) \qquad (9)$$

Diese operative Temperatur ist nun das Kriterium für die Behaglichkeit: $\vartheta_{oper} \leq \vartheta_{KomfGrenze}$. Für Letztere kann 26 °C oder zeitweise vielleicht auch 28 °C eingesetzt werden – je nach der akzeptierten Anzahl der Unzufriedenen[9] und der Dauer des Zustandes.

Umsetzung für die Praxis

Um die obigen Zusammenhänge für den Praktiker in konkrete Angaben zu übersetzen, wurden am Computer einige praxisnahe Varianten durchgespielt. Ausgegangen wird vom Grundfall (Bilder 8–13): Eine Verglasung hat eine Resteinstrahlung von 40 W/m². Dies entspricht der Kombination eines sehr guten äusseren Sonnenschutzes mit einem modernen Wärmeschutzglas ($g \approx 0{,}35$–$0{,}4$). Die innere Oberflächentemperatur beträgt 32 °C. Der Raum weist folgende Abmessungen auf: h = 3 m, t = 5 m, b = 4 m. Man geht von einer Vollverglasung ohne Rahmenverschattung aus. Die Absorption der Decke ist a = 0,2 (hellgrau, beige), die des Bodens a = 0,4 (grau), die der Wände a = 0,2. Die Temperatur ist an der Decke 24 °C und am Boden 22 °C. An den Wänden beträgt sie 26 °C und ist damit komfortneutral. Ausgehend von diesem Grundfall werden die verschiedenen Parameter variiert:

1. Einstrahlung: 40, 60 und 80 W/m² (Bild 8)
2. Glasoberflächentemperatur: 30, 32 und 3°C (Bild 9)
3. Lufttemperatur: 20, 22 und 24 °C (Bild 10)
4. Deckentemperatur: 20, 22 und 24 °C (Bild 11)
5. Bodentemperatur: 20, 22 und 24 °C (Bild 12)
6. Absorption der Decke: 0,2 und 0,6; Absorption des Bodens: 0,4 und 0,8 (Bild 13)

Die Lufttemperatur wie auch die Einstrahlungsintensität wirken sich über die ganze Raumtiefe etwa gleichmässig aus. Die Änderung der operativen Temperatur beträgt, bezogen auf die Änderung der

Einstrahlungsintensität	0,74 K/(20 W/m²), also 0,037 K/(W/m²)	(10)
Lufttemperatur	0,29 K/K_{Luft}	(11)

Die Decken- und die Bodentemperatur wirken sich etwas stärker in der Raummitte als am Rand aus. Die Änderung der operativen Temperatur bezogen auf die Änderung der Deckentemperatur beträgt:

am Rand	0,13 K/K_{Decke}	(12)
in der Mitte	0,16 K/K_{Decke}	(13)

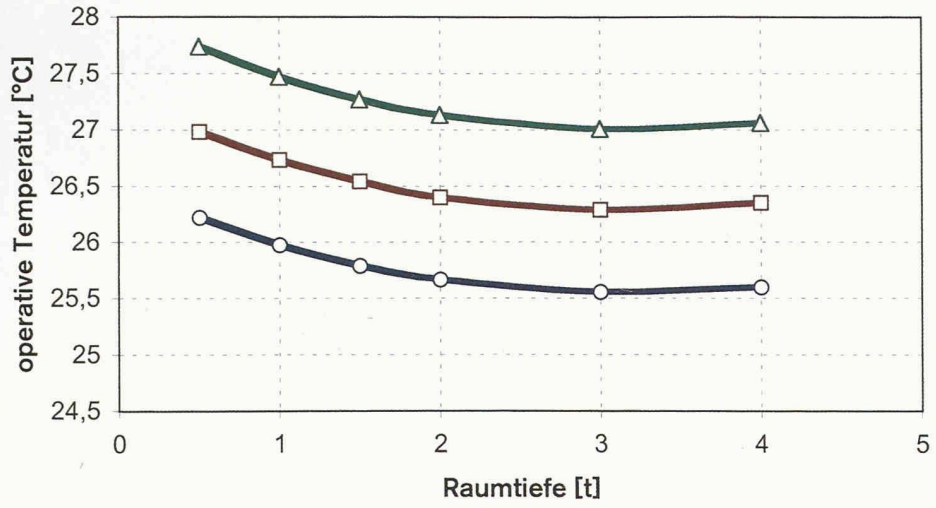
Dasselbe gilt auch für den Einfluss der Bodenoberflächentemperatur. Die Glasoberflächentemperatur wirkt sich erwartungsgemäss besonders in Fensternähe aus:

– bei t = 0,5 m sind es 0,24 K/K_{Glas}	(14)
– bei t = 2 m nur 0,15 K/K_{Glas}	(15)
– bei t = 3m nur noch 0,07 K/K_{Glas}	(16)

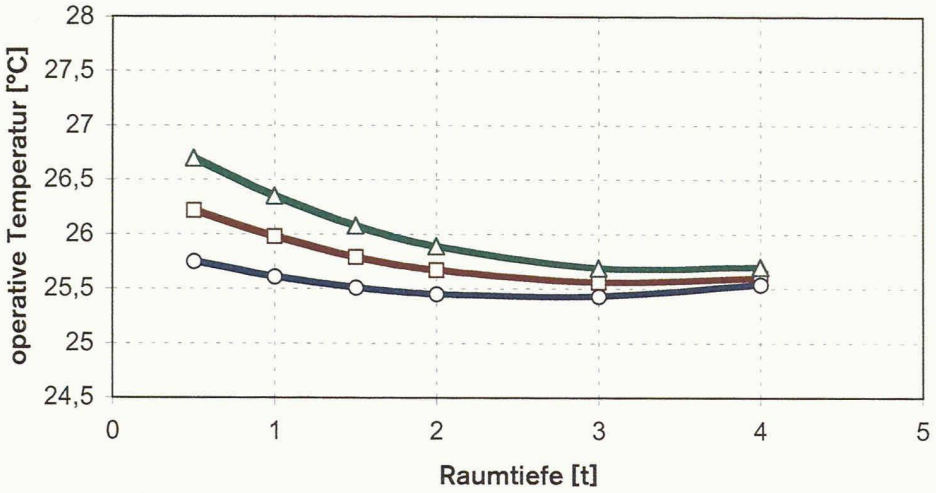
Eine Erhöhung des Absorptionsvermögens der inneren Oberflächen entzieht dem Einstrahlungsfeld Energie. Wenn dadurch die inneren Oberflächentemperaturen in erster Näherung nicht ansteigen (thermisch gesteuerte Decken), dann lässt sich eine erhebliche Absenkung der Strahlungsbelastung durch einen dunkleren Boden oder eine dunklere Decke erreichen:

$$\text{Decke/Boden} = 1{,}1\ \text{K}/\Delta a \qquad (17)$$

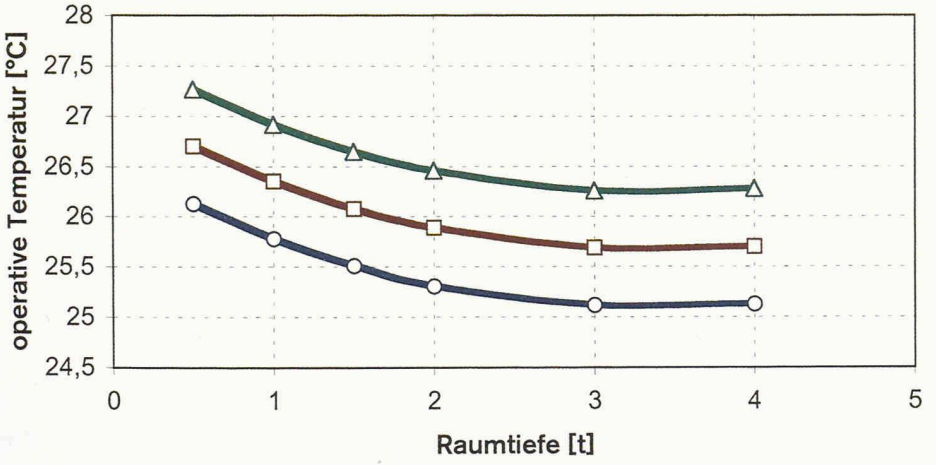
Selbstverständlich gelten diese Zahlen nur unter den oben genannten Voraussetzungen. Die instationäre Reaktion wird durch eine Abschätzung der Oberflächentemperaturen vorweggenommen. Dies ist natürlich ein Trick, um den Rechenaufwand zu begrenzen,



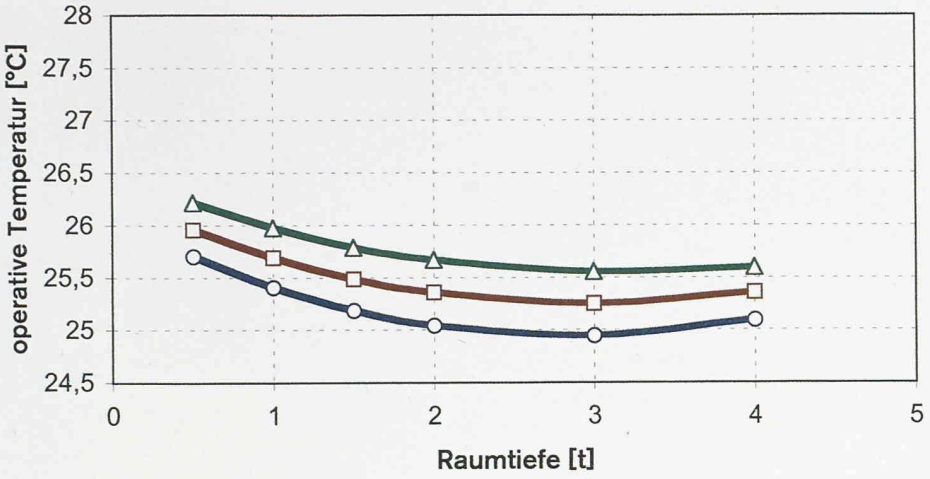
8
Einfluss der Einstrahlung bezogen auf den Grundfall, Berechnung mit 40 (blau), 60 (rot) und 80 W/m² (grün)



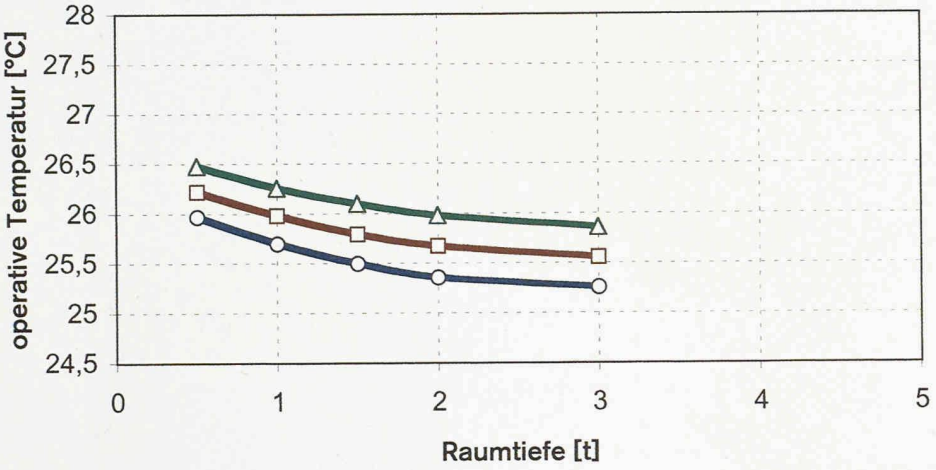
9
Einfluss der Glasoberflächentemperatur bezogen auf den Grundfall, Berechnung mit 30 (blau), 32 (rot) und 34 °C (grün)



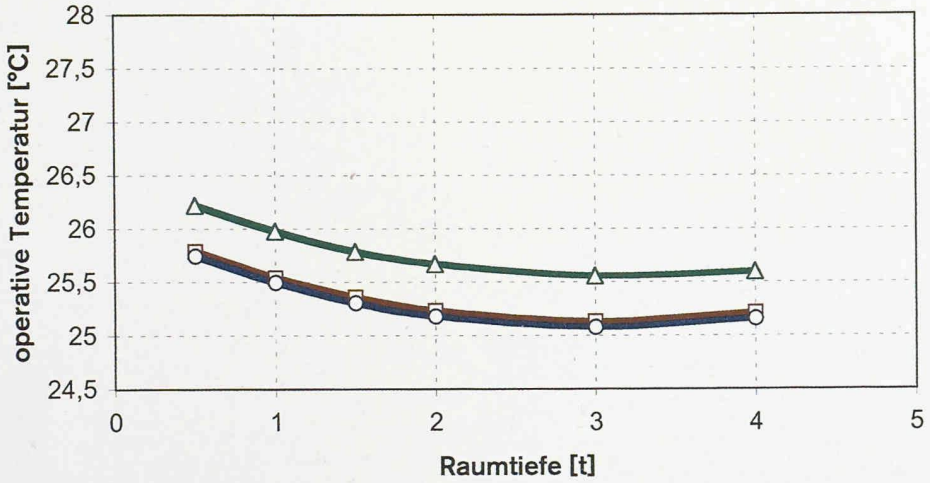
10
Einfluss der Lufttemperatur bezogen auf den Grundfall, Berechnung mit 20 (blau), 22 (rot) und 24 °C (grün)



11
Einfluss der Deckentemperatur bezogen auf den Grundfall, Berechnung mit 20 (blau), 22 (rot) und 24 °C (grün)



12
Einfluss der Bodentemperatur bezogen auf den Grundfall, Berechnung mit 20 (blau), 22 (rot) und 24 °C (grün)



13
Einfluss der Absorption, bezogen auf den Grundfall: Decke 0,2 und Boden 0,4 (grün), Decke 0,6 und Boden 0,4 (rot), Decke 0,2 und Boden 0,8 (blau)

und ist in der Praxis durchaus vertretbar – geht es doch vor allem darum, Extremzustände abzuschätzen. Den konkreten Fall kann man deshalb in der Praxis näherungsweise folgendermassen behandeln: die Abweichungen zu den Kurven (Bilder 8–13) werden festgestellt und dann mit Hilfe der obgenannten Beziehungen die Temperaturauswirkungen berechnet (Bild 14).

Um einen Bezug zu üblicherweise verwendeten Simulationsprogrammen herzustellen, wurde die operative Temperatur über die Raumtiefe gemittelt, durch Flächenmittelung über die Oberflächen mit Hinzuzug der Einstrahlung berechnet (Näherung 1) und durch Flächenmittelung der Strahlungsintensitäten mit Hinzuzug der Einstrahlung (Näherung 2). Die Abweichungen der Näherung 1 liegen zwischen 0,17 und 1,46 °C, die der Näherung 2 zwischen –1,38 und +1,28 °C. Die Näherung 1 ist damit immer etwas zu niedrig. Der räumliche Verlauf wird durch diese Näherungen allerdings nicht berücksichtigt, was insbesondere bei erhöhter Oberflächentemperatur wesentlich wäre.

Optimale Planung

Die seriöse Planung von Allglas-Bauten erfordert also ein systematisches Vorgehen:

1. Winterbedingungen: Auslegungstemperatur und Verglasungshöhe bestimmen den U-Wert und damit bereits innerhalb gewisser Grenzen die Verglasungsqualität (Bild 2).
2. Klima und Ausrichtung bestimmen die maximal zu berücksichtigenden Aussentemperaturen und Einstrahlungsintensitäten für den Sommer.
3. Die Wahl der Verglasung bestimmen g, $\tau_{E\,Glas}$ und $q_{i\,Glas}$, die Wahl der Sonnenschutzeinrichtung g_{Ss}, $\tau_{E\,Ss}$ und $q_{i\,Ss}$. Damit können im Prinzip $\Delta\vartheta_{Glas}$ und $\Delta\vartheta_{Glas-U}$ bestimmt werden (Gleichungen 4, 5, 7 und 8).
4. Mit Hilfe der Wetter- und der Glasdaten wird die verbleibende Einstrahlungsintensität abgeschätzt.
5. Es muss eine Annahme betreffend der Oberflächentemperatur von Decke und Boden entsprechend der vorgesehenen Vorlauftemperatur getroffen werden. Für Decke und Boden kann sie abgeschätzt werden. Für Seitenwände und Rückwand wird man sie meist der Komfortgrenztemperatur gleichsetzen, was auch einem richtig geregelten Grossraumbüro entspricht (virtuelle Wände).
6. Es empfielt sich, entweder eine Berechnung der gemittelten Strahlungstemperatur in Funktion des Abstandes von der Verglasung oder den Vergleich des aktuellen Falles mit dem hier vorgestellten Grundfall vorzunehmen und die operative Temperatur mit Hilfe der Gleichungen 10–17 anzupassen.
7. Falls die Komfortbedingungen erfüllt werden, braucht es keine Reaktion. Falls nicht, sind ein Absenken der Lufttemperatur, eine Reduktion des g-Werts der Verglasung, eine Verbesserung des Sonnenschutzes und – falls der Taupunkt der Luft es ermöglicht – eine weitere Absenkung der Vorlauf- und damit der Oberflächentemperatur von Decke beziehungsweise Boden nötig.

Glasbauten können durchaus mit hoher Behaglichkeit und geringem Energiebedarf für Heizen und Kühlen realisiert werden. Allerdings ist das Planungsprozedere aufwändiger. Mit den vorliegenden Überlegungen und quantitativen Angaben soll dieses Prozedere unterstützt und in die richtigen Bahnen geleitet werden. Ganz allgemein lässt sich sagen, dass man mit der Wahl von Wärmeschutzverglasungen mit $U < 1\,W/m^2K$ und einem guten äusseren Sonnenschutz meist schon auf dem richtigen Weg ist. Mit genügend grosser Raumtiefe, einer thermisch gesteuerten Massiv- oder Kühldecke und einer Quelllüftung wird der Sonnenschutz sinnvoll ergänzt. Für spezielle Einrichtungen – Abluftfenster mit Sonnenschutz oder ein im Verglasungspaket eingebauter Sonnenschutz – sind zusätzliche Überlegungen notwendig, um Angaben über die komfortrelevante Oberflächentemperatur zu bekommen. Diese würden aber den Rahmen dieses Artikels sprengen.

Die gebräuchlichen Simulationsprogramme berücksichtigen diese Zusammenhänge nicht oder nur ungenügend. Zudem sind für viele Sonnenschutzeinrichtungen nicht alle notwendigen Angaben verfügbar. Das Institut Krochmann in Berlin und neuerdings die Abteilung Bauphysik der Empa sind in der Lage, solche Angaben zu liefern. Die Sonnenschutzhersteller sind aufgefordert, entsprechende Angaben bereitzustellen. Ein Tabellenprogramm zur Berechnung weiterer Grundfälle ist beim Autor erhältlich.

Bruno Keller, Professor für Bauphysik. Institut für Hochbautechnik, ETH Zürich
www.bph.hbt.arch.ethz.ch, bkeller@hbt.arch.ethz.ch

Ort			0,5 m	1 m	2 m	3 m	4 m
Ausgangswert aus Grafik [°C]			**26,5**	**26,0**	**25,7**	**25,6**	**25,65**
Intensität	+10 W/m²	10·0,037	+0,37	+0,37	+0,37	+0,37	+0,37
Glastemperatur	–3 K	–3·0,24	–0,72	–0,60	–0,45	–0,21	–0,21
Deckentemperatur	–1 K	–1·0,13	–0,13	–0,13	–0,13	–0,13	–0,13
Bodentemperatur	+1 K	+1·0,13	+0,13	+0,13	+0,13	+0,13	+0,13
Deckenabsorption	+0,2	0,2·(–1,1)	–0,22	–0,22	–0,22	–0,22	–0,22
Resultat [°C]			**25,93**	**25,55**	**25,4**	**25,54**	**25,59**

14

Die Ausgangslage entspricht dem Grundfall, wie er im Text erwähnt ist: eingestrahlte Intensität 40 W/m², Glasoberflächentemperatur 32 °C, Deckentemperatur 24 °C, Bodentemperatur 22 °C, Absorption der Decke und der Wände 0,2, Absorption des Bodens 0,4. Von diesem Grundfall aus lassen sich beliebige andere Fälle berechnen (neues Rechenbeispiel in der Tabelle: Intensität 50 W/m²: +10 W/m², Glasoberflächentemperatur 29 °C: –3 K, Deckentemperatur 23 °C: –1K, Bodentemperatur 23 °C: +1 K, Absorption der Decke 0,4: +0,2)

Literatur

1 Norm SIA 180, Ausgabe 1999
2 Brechbühl, B.: Schwarzbuch über die Systemmängel im Glashaus. ZZMK Universität Zürich
3 Keller, B.: Vorlesung «Spezialfragen der Bauphysik» Wintersemester 2000
4 Keller, B.: Vorlesung Bautechnologie III, Dept. Architektur ETHZ
5 Skaret, E. 1982: Klimasistemer: Er kaldrassikring nodvendig? (Norwegisch). TH Trondheim
6 Keller, B.: Wirklich nachhaltiges Bauen. SI+A Heft 22(2000), S. 10-14.
7 Keller, B.: Klimagerechtes Bauen. B.G.Teubner 1997
8 Siegel, R., Howell, J. R.: Thermal Radiation Heat Transfer. Hemisphere Publishing Corp. 1992
9 Ashrae Fundamentals, Ashrae 1999