Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 105 (1987)
Heft: 35

Artikel: Oberflächentemperaturen von besonnten Fensterglasscheiben
Autor: Frank, Thomas / Püntener, Toni W.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-76687

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: 17.07.2025

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

Oberflächentemperaturen von besonnten Fensterglasscheiben

Von Thomas Frank und Toni W. Püntener, Dübendorf

Verglasungen sind heute komplexe Bauelemente, müssen doch eine Vielzahl von Wechselbeziehungen erfasst und beurteilt werden. Im Rahmen eines Forschungsprojektes bearbeitete die Abteilung Bauphysik der EMPA die messtechnische und rechnerische Bestimmung der Oberflächentemperaturen besonnter Glasscheiben. Es werden hierzu Hilfsmittel wie Diagramme und EDV-gerechte Lösungen in Form von BASIC-Programmen bereitgestellt [1].

Einleitung

Die Bestimmung des Temperaturprofils von Verglasungen kann aus verschiedenen Gründen notwendig sein:

- um die thermische Behaglichkeit zu beurteilen
- um Eingaben für die Kühllastberechnung zu erhalten
- um die Bildung von Kondenswasser im Winter zu kontrollieren
- um die thermischen Spannungen im Randverbund von Isolierscheiben beurteilen zu können.

Die Ermittlung der Obenflächentemperaturen kann auf messtechnischem oder rechnerischem Wege erfolgen. Beide Verfahren wurden eingehender untersucht. Der Anwendung von Kontaktfühlern wurde der Einsatz einer berührungsfreien Temperaturmessung mit Hilfe der Infrarot-Messtechnik gegenübergestellt. Für die rechnerische Bestimmung der Oberflächentemperaturen einer Mehrfachverglasung unter Einbezug von variablen Randbedingungen (Lufttemperatur, Wind, Sonneneinstrahlung sowie Infrarotabstrahlung an den klaren Himmel) wurde ein BASIC-Rechenprogramm erstellt. Sonnen- und Wärmeschutzgläser absorbieren die einfallende Sonnenstrahlung sehr unterschiedlich. Eine einheitliche Angabe der Strahlungskenngrössen der Verglasung ist deshalb unerlässlich und erfolgt heute auf der Basis der DIN-Norm 67 507, welche auch international anerkannt wird (eine entsprechende ISO-Norm ist in Vorbereitung).

Temperaturmessungen an Gläsern

Messungen an besonnten Glasscheiben sind bei Verwendung von Kontaktfühlern immer mit einem Messfehler behaftet, da die Messfühler selbst auch Sonnenstrahlen absorbieren. Die Abteilung Bauphysik hat sich deshalb intensiv mit der Messmethodik und den Messfehlern auseinandergesetzt. Neben Versuchen an der EMPA in Dübendorf bot der Neubau des Restaurants auf dem Jungfraujoch die Gelegenheit, Messungen unter extremen Klimasituationen durchzuführen. Die absorbierte Sonnenstrahlung in den Glasscheiben führt zu einer Temperaturerhöhung, welche je nach Strahlungsintensität und Absorptionsgrad eine bedeutende Grössenordnung annehmen kann. Bei der Verwendung von Kontaktfühlern müssen beachtet werden:

- Eigenabsorption des Fühlers
- Störung der grenznahen Luftschicht (Konvektion)
- Montageart des Fühlers, d. h. Güte des Kontaktes mit der Glasoberfläche

Sechs verschiedene Kontaktfühlerarten (Pt 100 und Thermoelementdrähte Typ T mit unterschiedlichem Drahtdurchmesser) wurden verglichen mit einem IR-Fühler zur berührungsfreien Temperaturmessung.

Ein IR-Thermometer muss dabei folgende Kriterien erfüllen:

- die spektrale Empfindlichkeit des Fühlers muss bekannt sein und mit Vorteil im Bereich 8–14 µm liegen
- das spektrale Emissionsverhalten der auszumessenden Oberfläche muss bekannt sein
- Störstrahlungsquellen aus der Umgebung müssen bei der Messung berücksichtigt werden können (elektronische Kompensation)
- Der IR-Fühler muss über eine Kalibrierungsvorrichtung verfügen (mit Hilfe eines schwarzen Körpers).

Unter realen Aussenklimabedingungen wurde das Temperaturverhalten von 7 Gläsern (1 Normalglas, 4 Sonnenschutzgläser und 2 Wärmeschutzgläser) messtechnisch untersucht. Der Messfehler der verschiedenen Fühlertypen kann aufgrund dieser Feldmessungen wie folgt beurteilt werden:

□ IR-Messfühler weisen die geringsten Fehler auf ($\Delta T = \pm 0{,}2$ K).

□ Widerstandsfühler (Pt 100) absorbieren ihrer Grösse wegen relativ viel Sonnenstrahlung und weisen deshalb hohe Messfehler auf ($\Delta T = 0{,}5$–10 K je nach Strahlungsintensität). Folienwiderstandsfühler mit geringen Abmessungen (8×8 mm) liefern in dieser Gruppe die besten Resultate.

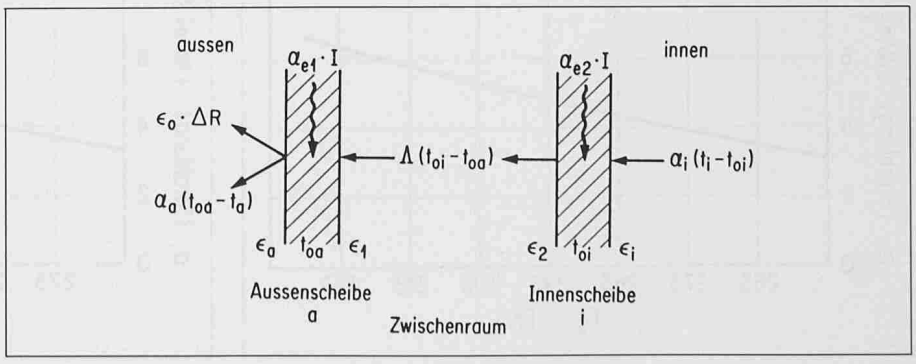
□ Thermoelemente weisen mit Abnahme des Drahtdurchmessers kleinere Messfehler auf (bei Durchmesser 0,2 mm: $\Delta T = 0{,}2$–$2{,}5$ K). Die Handhabung der sehr dünnen Drähte muss in der Praxis als kritisch bezeichnet werden, da eine erhöhte Bruchgefahr der Drähte vorliegt.

Berechnungsmodell

Das verwendete Rechenverfahren zum kombinierten Wärme- und Strahlungsdurchgang durch eine Verglasung stützt sich auf die Arbeiten von Rubin [2] und die Angaben im Ashrae Handbuch «Fundamentals» [3] sowie auf Untersuchungen zum Wärmeübergang an Aus-

Bild 1. Wärmeströme an einer Verglasung

t_{oa} = Aussenscheibentemperatur [°C]
t_{oi} = Innenscheibentemperatur [°C]
t_a = Aussenlufttemperatur [°C]
t_i = Raumlufttemperatur [°C]
α_a = Wärmeübergangskoeffizient aussen (W/m² K)
α_i = Wärmeübergangskoeffizient innen [W/m² K]
Λ Wärmedurchlasskoeffizient des Spaltes [W/m² K]
α_{e1} = Absorptionsgrad der Aussenscheibe
α_{e2} = Absorptionsgrad der Innenscheibe
I = Globalstrahlung in Fensterebene [W/m²]
$\varepsilon_a, \varepsilon_i$ = Emissionsvermögen der Aussen- und Innenscheibenoberfläche
$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ = Emissionsvermögen der spaltseitigen Scheibenoberflächen
ΔR = Langwelliger Zusatzverlust infolge Abstrahlung an den klaren Himmel (d. h. Differenz zwischen ermittierter Strahlung eines schwarzen Körpers mit Lufttemperatur und der effektiven Einstrahlung des klaren Himmels) [W/m²]



Wärmeübergang aussen:

$\alpha_a = \alpha_a$ (Strahlung) + α_a (Konvektion)

α_a (Strahlung) $= \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_m^3$

$\Delta R = F_{sky} \sigma \cdot (1-\varepsilon_{sky}) \cdot T_a^4$

$\varepsilon_{sky}(c) = (1-0{,}84 \cdot c) \cdot \varepsilon_{sky}(0) + 0{,}84 \cdot c$

α_a (Konvektion) $= 8{,}1 \cdot (v_{wind})^{0,6}$ Luvseite

α_a (Konvektion) $= 3{,}5 + 1{,}4 \cdot v_{wind}$ Leeseite

Wärmedurchgang im Spalt:

$\Lambda = \Lambda$ (Strahlung) + Λ (Konvektion)

Λ (Strahlung) $= 4 \cdot \sigma \cdot T_m^3 \cdot (1/(1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1))$

Λ (Konvektion) $= Nu \cdot \lambda / s$

$$Nu = \begin{cases} 1 & \text{für } Ra \leq 5000 \\ 0{,}0429 \cdot (Ra)^{0,37} & \text{für } 5000 < Ra \leq 60000 \\ 0{,}43 \cdot (Ra)^{0,16} & \text{für } 60000 < Ra \leq 150000 \\ 0{,}0354 \cdot (Ra)^{0,37} & \text{für } Ra > 150000 \end{cases}$$

$Ra = \mathrm{Gr} \cdot \mathrm{Pr}$

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \varrho^2 \cdot s^3 \cdot \Delta t}{\mu^2}$$

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda}$$

Wärmeübergang innen:

$\alpha_i = \alpha_i$ (Strahlung) + α_i (Konvektion)

α_i (Strahlung) $= 0{,}80 \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_m^3$

α_i (Konvektion) $= 1{,}77 \cdot (\Delta t)^{0,25}$ turbulente Strömung

Legende:

α_a, α_i	Wärmeübergangskoeffizient aussen, innen	[W/m² K]
β	thermischer Ausdehnungskoeffizient des Gases	[1/K]
ε_1	Emissionsvermögen der Spaltseite 1	
ε_2	Emissionsvermögen der Spaltseite 2	
ε_a	Emissionsvermögen der Scheibenaussenoberfläche	
ε_i	Emissionsvermögen der Scheibeninnenoberfläche	
ε_{sky}	Emissionsvermögen des Himmels	
λ	Wärmeleitfähigkeit des Gases	[W/mK]
Λ	Wärmedurchlasskoeffizient	[W/m² K]
μ	dynamische Viskosität des Gases	[kg/ms]
ϱ	Dichte des Gases	[kg/m³]
σ	Stephan Boltzmann-Konstante: 5,67E-8	[W/m² K⁴]
F_{sky}	Formfaktor zwischen Fenster und Himmel	
Gr	Grashoffzahl	
Nu	Nusseltzahl	
Pr	Prandtlzahl	
Ra	Rayleighzahl	
ΔR	Langwelliger Zusatzverlust infolge Abstrahlung	[W/m²]
T_a	Aussenlufttemperatur	[K]
T_m	mittlere Strahlungstemperatur	[K]
c	Bewölkungsgrad des Himmels	[1/10]
g	Gravitationstante	[m/s²]
s	Spaltbreite	[m]
Δt	Temperaturdifferenz im Spalt	[K]
v_{wind}	Windgeschwindigkeit	[m/s]

Tabelle 1. Formeln zur Berechnung des Wärmedurchgangs durch eine Verglasung

senoberflächen, welche im Rahmen eines NF-Projektes an der EMPA und der ETHZ durchgeführt worden sind [4]. Das Rechenmodell beschränkt sich auf 1–4fach-Verglasungen, welche sich aus IR-undurchlässigen Schichten zusammensetzten. Es erlaubt sowohl die Eingabe von normierten Wärmeübergangsbedingungen als auch die explizite Berechnung der einzelnen Wärmetransportvorgänge, wobei ein Iterationsverfahren zur Anwendung gelangt.

In Bild 1 sind am Beispiel der 2fach-Verglasung die verschiedenen Wärmeströme dargestellt:

Die an den Scheiben absorbierte Sonnenstrahlung I kann als eine Wärmequelle betrachtet werden, während der

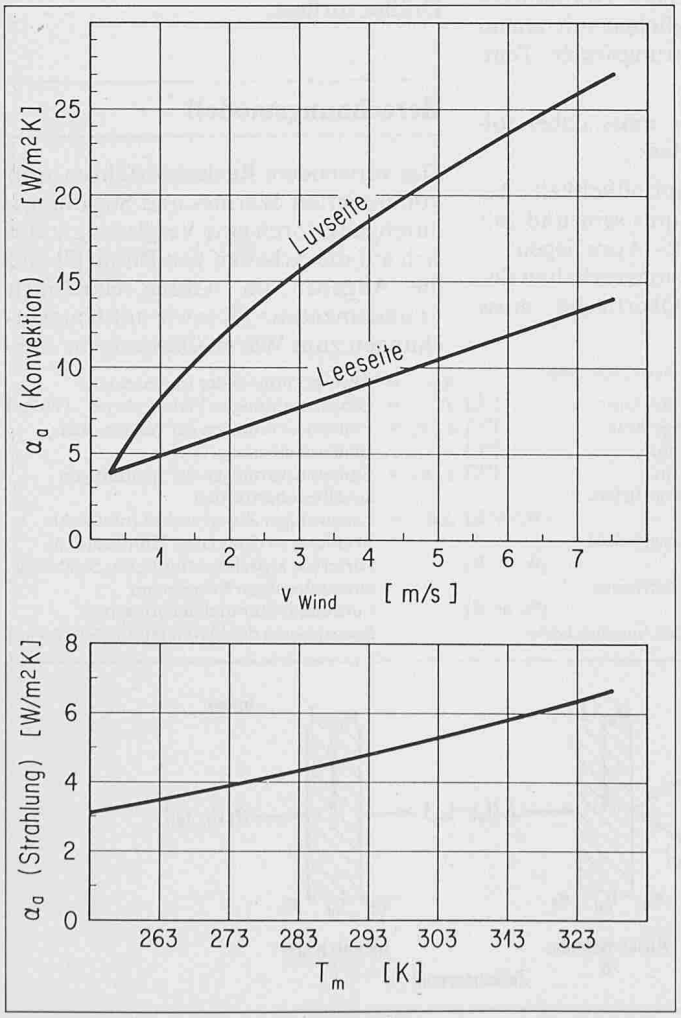


Bild 2. Wärmeübergang α_a an der Aussenoberfläche (Konvektion und Strahlung)

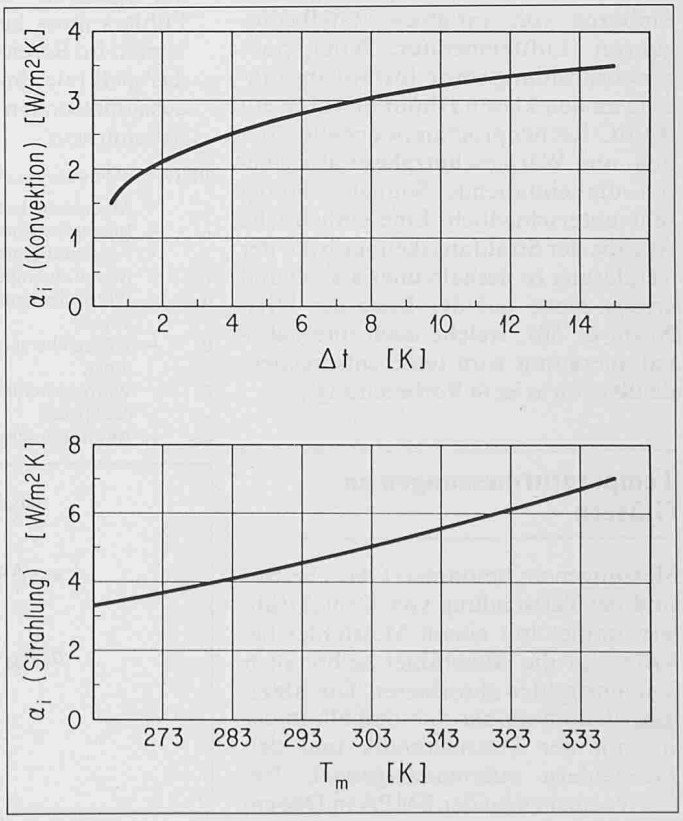


Bild 3. Wärmeübergang α_i an der Innenoberfläche (Konvektion und Strahlung)

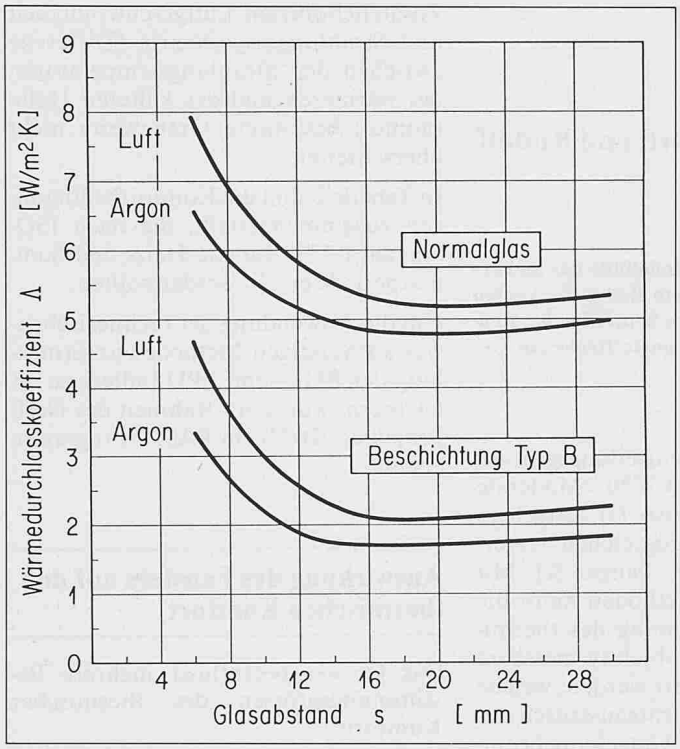


Bild 4. Wärmedurchlasskoeffizient Λ des Glasspaltes für ein Normalglas (ε = 0,84) und für ein Wärmeschutzglas Typ B ($\varepsilon_1 = 0{,}84$, $\varepsilon_2 = 0{,}10$)

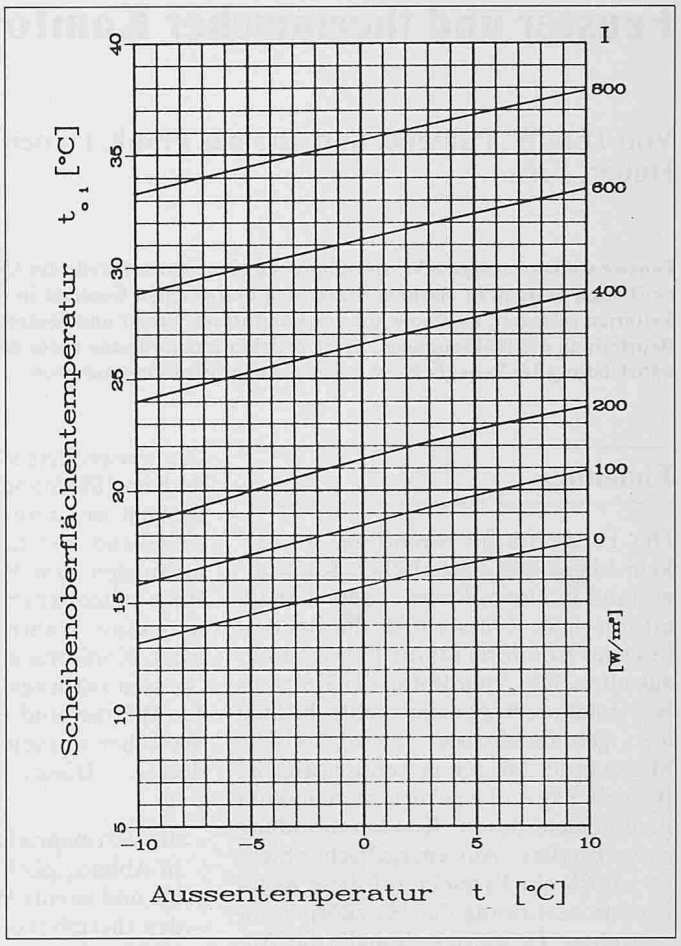


Bild 5. Diagramm zur Bestimmung der Scheibeninnenoberflächentemperatur eines Wärmeschutzglases: 2-IV Comfort (4 / 15 / 4), gültig für t_i = 20 °C

Infrarot-Zusatzverlust ΔR an der Aussenscheibe als eine Wärmesenke aufgefasst werden kann. Beide Vorgänge können das Temperaturprofil der Verglasung wesentlich beeinflussen. Als Richtwert für den langwelligen Zusatzverlust bei klarem Himmel kann bei vertikalen Flächen ein Bereich von 30–60 W/m² angenommen werden, bei horizontaler Fläche liegt er wesentlich höher zwischen 70–130 W/m² [4]. In Tabelle 1 sind die Formeln für die Berechnung der einzelnen Wärmeströme angegeben.

In den Bildern 2 und 3 sind die Wärmeübergänge infolge Konvektion und Strahlung für die Aussen- und Innenoberfläche der Verglasung angegeben. Bild 4 zeigt die Abhängigkeit des Wärmedurchlasskoeffizienten Λ des Glasspaltes von der Spaltbreite, dem Glastyp (Emissionsvermögen) sowie der Gasfüllung. Für das verwendete Rechenmodell wurde im Rahmen des Neff-Projektes 266 ein BASIC-Programm erstellt und dokumentiert [1]. Die Anwendung des Rechenmodelles soll im folgenden an 2 Beispielen illustriert werden:

Beispiel 1: Wärmequelle infolge Sonneneinstrahlung I

Ein Sonnenschutzglas 2-IV (5 / 12 / 5) erhält an der Westfassade eine maximale Strahlungsintensität von 600 W/m² im Sommer. Welche Oberflächentemperatur stellt sich an den Scheiben ein und wie gross ist der sekundäre Wärmegewinn q_i, falls die Aussenlufttemperatur 30 °C und die Raumlufttemperatur 26 °C beträgt?

Gegeben:

t_a = 30 [°C] t_i = 26 [°C]
v_{Wind} = 2 [m/s] ΔR = 30 [W/m²]
α_{e1} = 47 [%] α_{e2} = 1 [%]
I = 600 [W/m²]

t_{oa} = 42,3 [°C] t_{oi} = 30,6 [°C]
α_a = 18,3 [W/m²K] α_i = 7,9 [W/m²K]
$q_i = \alpha_i\ (t_{oi} - t_i)$ = 36,3 [W/m²]

Beispiel 2: Wärmesenke infolge langwelliger Abstrahlung ΔR

Es soll die Scheibenoberflächentemperatur eines parkierten Autos in einer klaren Nacht ermittelt werden:

Gegeben:

$t_a = t_i$ = 4 [°C]
v_{Wind} = 0,1 [m/s] (Windstille)
ΔR = 70 [W/m²] (für geneigte Scheibenoberfläche)

$t_{Scheibe}$ = -0,3 [°C]
α_a = 7,9 [W/m² K]
α_i = 6,6 [W/m² K]

Die Autoscheibe wird sich vereisen, falls der Taupunkt der Aussenluft höher als -0,3 °C liegt (was bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von etwa 74% erfüllt sein wird).

Als Hilfsmittel zur Bestimmung der Innenoberflächentemperaturen besonnter Gläser wurden Diagramme erstellt, welche es erlauben, die Scheibentemperatur in Abhängigkeit der Aussenlufttemperatur und der Globalstrahlungsintensität bei einer konstanten Raumlufttemperatur (Winter t_i = 20 °C) zu ermitteln [1]. Bild 5 zeigt das Beispiel eines Wärmeschutzglases.

Literatur

[1] Neff-Bericht Nr. 266: «Oberflächentemperaturen von besonnten Fensterglasscheiben und ihre Auswirkungen auf Raumklima und Komfort», EMPA Dübendorf, 1986
[2] *Rubin, M.*: «Calculating heat transfer through windows», Energy Research Vol 6, 1982
[3] Ashrae Handbook of Fundamentals, 1985
[4] NF-Projekt Strahlungsvorgänge an Gebäudeoberflächen, EMPA + ETHZ
- Messbericht Testkabinen Maugwil, 1982
- Programmbeschrieb Helios 1, 1982
- Meteo-Daten Maugwil, 1981

Adresse der Verfasser: *Th. Frank*, dipl. Ing. ETH, und *T.W. Püntener*, Ing. HTL/HLK, EMPA Abteilung Bauphysik, 8600 Dübendorf.