

Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 97 (1979)
Heft: 17

Artikel: Verbesserung des Energiehaushalts von Gebäuden durch Verminderung der Wärmeabstrahlung von Fenstern und Fassaden
Autor: Finger, G. / Kneubühl, F. / Thiébaud, F.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-85454>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 01.04.2025

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

Verbesserung des Energiehaushalts von Gebäuden durch Verminderung der Wärmeabstrahlung von Fenstern und Fassaden

Von G. Finger, F. Kneubühl, F. Thiébaud, Ch. Zürcher und Th. Frank, Zürich

Die Wärmeabstrahlung von Gebäuden wird studiert im Hinblick auf Energieeinsparung durch Infrarotverspiegelung von Fenstern und Fassaden. Rechnungen der Transmission und Messungen der Gegenstrahlung der Erdatmosphäre im Infrarot zeigen, dass der Wärmeaustausch an Gebäudehüllen durch Infrarotstrahlung vergleichbare Intensitäten aufweist wie die Sonneneinstrahlung. Ausgehend von den Strahlungseigenschaften der Atmosphäre werden Fassadenprofile richtungsabhängiger Strahlungscharakteristik vorgeschlagen, die Heizenergie sparen. Ebenso wird die Verbesserung der Infrarotreflexion von Metallfassaden und Fenstern experimentell untersucht. Vielversprechende Ergebnisse sind für Aluminiumfassaden zu verzeichnen.

Bis spätestens Mitte der achtziger Jahre rechnen Experten mit einer weltweiten Ölverknappung[1]. Es ist somit an der Zeit, nicht nur *neue Energiequellen* mit kostspieligen Methoden zu erschliessen, sondern auch *die Möglichkeiten des Energiesparens voll auszuschöpfen*. Rund die Hälfte bis zwei Drittel des gesamten Einsatzes an Rohenergie bleiben derzeit ungenutzt. Erste Verluste entstehen bei der Umwandlung der Primärenergie in die Endenergie, z. B. bei der Erzeugung elektrischen Stroms aus Kohle oder Öl[2]. Beim Endverbraucher, z. B. in den Haushalten, gehen grosse Mengen an Wärme durch *schlechte Isolation* verloren. Eine bessere Wärmedämmung bringt hier eine wesentliche Verbesserung der Energiebilanz. Aus diesem Grund untersuchen wir im Rahmen des *Nationalen Forschungsprogramms «Energie»* des Schweizerischen Nationalfonds den *Einfluss der Wärmeabstrahlung auf den Energiehaushalt von Gebäuden*. Wie im folgenden gezeigt wird, können Energieverluste durch die *Wärmeabstrahlung von Gebäuden durch geeignete Infrarot(IR)-Verspiegelung der Gebäudehülle merklich vermindert werden*.

Um einen Eindruck über die Wirksamkeit der Infrarotverspiegelung von Hausfassaden zu erhalten, ist es aufschlussreich, die *Energiebilanz der Aussenhaut einer Hauswand* aufzustellen. Im stationären Fall gilt nach *Kälin* und *Kneubühl*[3], dass die je Zeiteinheit der Aussenhaut zufließende Energiemenge

gleich der im IR abgestrahlten Energiemenge sein muss:

$$1) \varepsilon \sigma T_w^4 = k' (T_i - T_w) + \alpha_K (T_L - T_w) + \varepsilon I + \alpha_s I_s$$

Dabei bedeuten:

- T_i = Innenraumlufttemperatur (K)
- T_w = Temperatur der äusseren Wandoberfläche (K)
- T_L = Aussenlufttemperatur (K)
- k' = Wärmedurchgangskoeffizient der Wand ohne äusseren Wärmeübergangskoeffizient ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)
- α_K = Wärmeübergangskoeffizient der Konvektion ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)
- ε = Emissionsvermögen der Hauswand (nach *Kirchhoff* gilt: $\varepsilon = \alpha$ Absorptionsvermögen für infrarote Strahlung)
- α_s = Absorptionsvermögen für globale Sonneneinstrahlung
- I = Intensität der infraroten Einstrahlung; Atmosphäre und Erdoberfläche; $\lambda > 3\mu\text{m}$ (W m^{-2})
- I_s = Intensität der globalen Sonneneinstrahlung (W m^{-2})
- σ = Stefan-Boltzmann-Konstante ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$)

Die linke Seite der Gleichung stellt die abgestrahlte Energie dar. Die rechte Seite, welche die der Aussenhaut zufließende Energiemenge je Zeit darstellt, setzt sich aus folgenden vier Anteilen zusammen: Wärmestrom aus dem Inneren des Gebäudes, konvektiver Wärmeübergang an der äusseren Wandoberfläche, absorbierte infrarote Einstrahlung (atmosphärische Gegenstrahlung I_A und Abstrahlung der Erd-

oberfläche) und absorbierte globale Sonnenstrahlung.

Der massgebende Wärmeverlust Q

$$Q = k' (T_i - T_w), (\text{W m}^{-2})$$

lässt sich durch Infrarotverspiegelung drastisch verringern, wie das nächste Beispiel zeigt. Es werden folgende Annahmen gemacht:

$$k' = 0,8 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

$$\alpha_K = 8 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

$$T_i = 20^\circ \text{C}, T_L = 0^\circ \text{C}, I_A = 250 \text{ W m}^{-2}, I_s = 0$$

Das entspricht einer gemäss SIA Empfehlung 180/1 gerade noch zulässig isolierten Hauswand in einer windstillen Winternacht. Anhand von Gleichung (1) ist für verschiedene Emissionsvermögen der Fassade die Temperatur der äusseren Wandoberfläche T_w , der Wärmeverlust Q und die gegenüber einer unverspiegelten Wand mögliche Einsparung von Heizenergie G berechnet und in Tabelle 1 dargestellt. Der relative Gewinn G an Heizenergie pro m^2 Wandoberfläche ist definiert durch:

$$2) G = \frac{Q(\varepsilon = 1) - Q(\varepsilon)}{Q(\varepsilon = 1)}$$

Aus Tabelle 1 ergibt sich, dass eine Verminderung der Transmissionsverluste bis zu 23% möglich ist. Für den gesam-

Tabelle 1. Einfluss der IR-Verspiegelung auf den Wärmeverlust pro m^2 Wandfläche. Die Aussenwandtemperatur T_w ($^\circ\text{C}$), der Wärmeverlust Q (W m^{-2}) und die relative Einsparung an Heizenergie pro m^2 Wandfläche G (%) sind für verschiedene Emissivitäten ε der Fassadenoberfläche angegeben. Die Tabelle gilt für folgende Bedingungen: $k' = 0,8 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, $\alpha_K = 8 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, $T_i = 20^\circ\text{C}$, $T_L = 0^\circ\text{C}$, $I_A = 250 \text{ W m}^{-2}$, $I_s = 0$

ε	T_w ($^\circ\text{C}$)	$Q(\varepsilon)$ (W m^{-2})	G (%)
1,	-3,73	18,98	0
0,9	-3,35	18,68	2
0,8	-2,94	18,35	3
0,7	-2,50	18,00	5
0,6	-2,30	17,62	7
0,5	-1,52	17,22	9
0,4	-0,97	16,78	12
0,3	-0,36	16,29	14
0,2	-0,29	15,77	17
0,15	-0,65	15,48	18
0,10	1,02	15,18	20
0,05	1,41	14,87	22
0,00	1,82	14,54	23

ten Heizenergiebedarf, der neben den Transmissions- auch noch die Lüftungsverluste zu decken hat, ist die Einsparung natürlich entsprechend geringer. Bemerkenswert ist auch, dass die durch die Wärmeabstrahlung bedingte Unterkühlung der Hauswand um $3,7^\circ\text{C}$ unter die Aussenlufttemperatur T_L durch Infrarotverspiegelung behoben werden kann.

Im folgenden Kapitel soll die *thermische Gegenstrahlung* I_A der Atmosphäre näher untersucht werden. Eine optimale Infrarotspiegelung muss diesem Strahlungsfeld angepasst sein.

abgestrahlte Leistung der schwarzen Fläche 447 W m^{-2} . Das Defizit der Wärmestrahlung im $8\mu\text{m}-14\mu\text{m}$ -Fenster (Fläche zwischen gestrichelter und ausgezogener Kurve) beträgt 74 W m^{-2} . Eine einfache Rechnung veranschaulicht die *Energieeinsparung durch Infra-*

rotverspiegelung im Vergleich zum *Energiegewinn mit Solarzellen*. Bei Sonnenschein gewinnt man 40 W m^{-2} von Solarzellen mit einem guten Wirkungsgrad von 10%. Der Wärmeverlust einer schwarzen Gebäudehülle beträgt bei klarem Himmel bei Tag und bei Nacht

Vergleich der atmosphärischen Gegenstrahlung mit der Sonneneinstrahlung

Global betrachtet stellt sich auf der Erdoberfläche eine Gleichgewichtstemperatur ein, für welche die Wärmeabstrahlung der Erde gleich der absorbierten Sonneneinstrahlung ist. Die vielfach unterschätzten Strahlungsflüsse im infraroten Spektralbereich, wie z. B. die Wärmeabstrahlung einer schwarzen Fläche oder die atmosphärische Gegenstrahlung, sind also von gleicher Größenordnung wie die Sonneneinstrahlung. Dies wird illustriert durch Bild 1. Dieses zeigt sowohl die Sonneneinstrahlung [4] als auch die atmosphärische Gegenstrahlung [5] auf eine horizontale Fläche auf Meereshöhe. Der spektrale Verlauf der auf der Erdoberfläche auftreffenden Sonnenstrahlung (linke Kurve, ausgezogen) wird durch die Absorptionsbanden von O_3 , O_2 , H_2O und CO_2 geprägt. Die umhüllende Kurve (linke Kurve, gestrichelt) entspricht der einfallenden Sonnenstrahlung ohne Molekülabsorption, aber mit Berücksichtigung der Molekül- und Aerosolstreuung.

Die atmosphärische Gegenstrahlung (rechte Kurve, ausgezogen) entsteht durch Reemission der infrarotaktiven atmosphärischen Gase wie H_2O , CO_2 und O_3 . Im Spektralbereich von $8\mu\text{m}-14\mu\text{m}$ haben diese Gase, abgesehen von O_3 , nur schwache IR-aktive Vibrationsbanden. Sie strahlen wenig zurück, während eine 1 m^2 grosse schwarze Fläche auf Lufttemperatur (25°C) gerade in diesem Bereich maximal abstrahlt (rechte Kurve, gestrichelt). Die von der Hauswand abgestrahlte Energie wird daher nur zum Teil kompensiert. In dieser « $8\mu\text{m}-14\mu\text{m}$ -Lücke» der atmosphärischen Gegenstrahlung wird Heizenergie in den kalten Weltraum verpufft.

Ein Vergleich zwischen Sonneneinstrahlung und atmosphärischer Gegenstrahlung zeigt, wie in Bild 1 dargestellt, dass die Flächen unter beiden Kurven ungefähr gleich gross sind. Das kann auch so erklärt werden: Die Strahlungstemperatur der Sonne ist 5785 K , ihre Strahlung wird jedoch nur aus einem Raumwinkel von $6,8 \cdot 10^{-5} \text{ ster}$ empfangen. Die Atmosphäre ist im Vergleich zur Sonne kalt, z. B. 298 K , dagegen kommt ihre Strahlung aus dem gesamten Halbraum, d. h. $2\pi \text{ ster}$. Die unter 30° Elevationswinkel eingestrahlte Leistung der Sonne beträgt 399 W m^{-2} . Die Leistung der atmosphärischen Gegenstrahlung beträgt 373 W m^{-2} , die

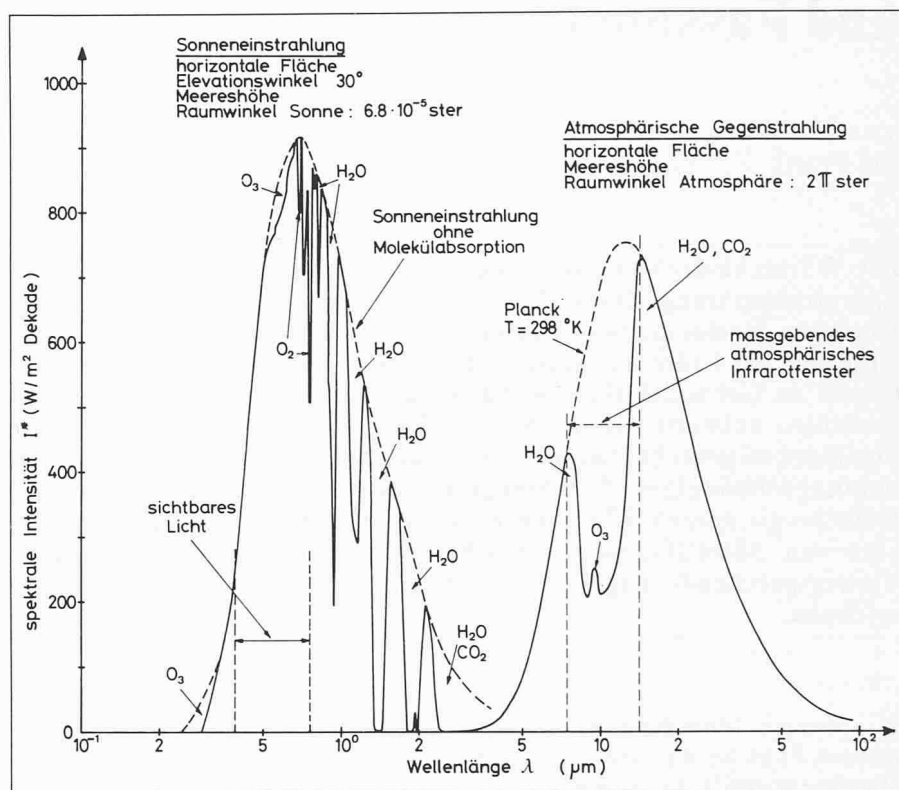


Bild 1. Vergleich der gemessenen spektralen Intensität der Sonneneinstrahlung und der atmosphärischen Gegenstrahlung auf eine horizontale Ebene bei klarem Wetter. Die aufgeführten Spektren gelten für Meereshöhe und eine Lufttemperatur von 25°C . Die gestrichelte Kurve rechts stellt die thermische Emission einer schwarzen Fläche bei $298 \text{ K} = 25^\circ\text{C}$ dar

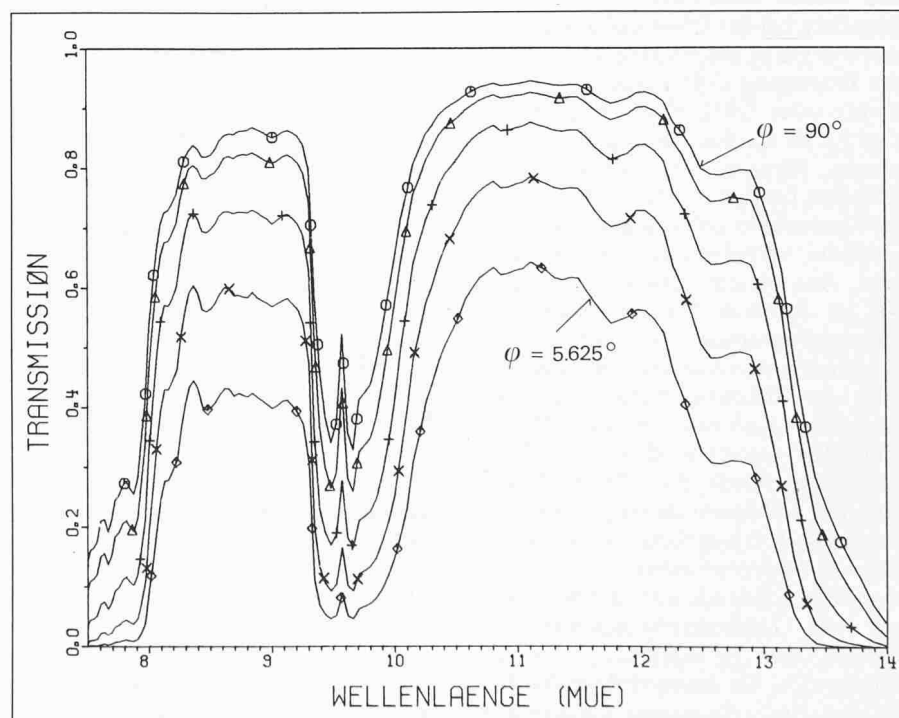


Bild 2. Transmissionsspektrum der Atmosphäre berechnet mit dem Lowtran-Programm für eine Höhe 600 m ü. M. und für verschiedene Elevationswinkel Φ . Die Elevationswinkel betragen der Reihe nach: 90° (o), $45^\circ = 90^\circ/2$ (Δ), $22,5^\circ = 90^\circ/4$ (+), $11,25^\circ = 90^\circ/8$ (x), $5,625^\circ = 90^\circ/16$ (\diamond).

19 W m⁻² gemäss Tabelle 1 für ε = 1. Durch Infrarotverspiegelung, d. h. bei ε = 0, erspart man unter denselben Bedingungen 4,5 W m⁻².

Lowtran-Modell für die Transmission der Atmosphäre

Da das 8 μm-14 μm-Fenster der Atmosphäre für den Wärmehaushalt von Fassaden von ausschlaggebender Bedeutung ist, haben wir Berechnungen der Transmission der Atmosphäre für verschiedene Elevationswinkel durchgeführt (Bild 2) [6]. Das Computermodell Lowtran III B wurde zur Berechnung der Transmissionsspektren verwendet. Die spektrale Auflösung ist Δν = 20 cm⁻¹. Es wurde die Modellatmosphäre «Mittlere Breite Winter» gewählt, die aus 33 horizontalen, übereinandergelagerten Atmosphärenschichten besteht.

Gegen den Horizont ist die Schichtdicke der Atmosphäre so mächtig, dass sie auch im 8 μm-14 μm-Fenster undurchsichtig ist. Nähert man sich dem Zenit, wird der Atmosphärenweg, den man durchblickt, zunehmend kürzer. Das 8 μm-14 μm-Fenster wird durchsichtig. Deutlich ist das O₃-Band bei 9,6 μm zu erkennen. Auf der kurzwelligen Seite wird das Fenster begrenzt durch das ν₂-H₂O-Band, auf der langwelligen Seite durch das intensive ν₂-CO₂-Band.

Radiometermessungen

Will man Aussagen über die *Wirksamkeit* der Infrarotverspiegelung von Hausfassaden unter *realen Umweltbedingungen* machen, dann benötigt man *genaue Messungen der atmosphärischen Gegenstrahlung*. Diese Messungen müssen den *gesamten Spektralbereich der Wärmestrahlung* (3 μm-50 μm) umfassen. Sie sollen sich *über eine oder mehrere Heizperioden* erstrecken. Die verwendete Apparatur muss also für automatische Langzeitmessungen ausgelegt sein. Erste Wärmestrahlungsmessungen der Atmosphäre haben wir bereits durchgeführt. Dazu wurde ein KT 4 Radiometer der Firma Heimann mit einem Bi-Metallschichtbolometer verwendet. Die wichtigsten Daten des Gerätes sind:

- Cassegrainoptik: f = 8 cm
- Spektralbereich: 0,6 μm-40 μm
- Genauigkeit: ΔT = 1°C
- Messwinkel: ΔΦ = 0,6°
- Detektivität: D* = 10⁸ W⁻¹ √Hz cm

Das Radiometer ist vertikal über einem verchromten Umlenkspiegel montiert. Der Spiegel wird von Schrittmotoren um seine vertikale und horizontale Achse gedreht. Damit kann das Strahlungsfeld aus jeder Richtung der Hemisphäre abgetastet werden.

Die Eichung des Radiometers wurde mit einem schwarzen Strahler in einem thermostatisierten Schrank (+40°C bis -45°C) vorgenommen. Für tiefere Temperaturen (Filtermessungen) wurden Kältemischungen mit Trockeneis und Alkohol (-70°C) oder flüssiger Stickstoff (-203°C) verwendet.

Unter den Bedingungen, wie sie für Tabelle 1 angenommen wurden, ist die erforderliche Genauigkeit ΔI_A, mit der die atmosphärische Gegenstrahlung I_A gemessen werden muss:

$$\Delta I_A / \Delta T_w = 13,15 \text{ W m}^{-2} / ^\circ\text{C}.$$

T_w bedeutet die Aussenwandtemperatur. Vorausgesetzt, dass der Fehler der Gegenstrahlungsmessung unter 5% liegt, kann die Einsparung G an Heizenergie pro m² Wandfläche für eine Hauswand mit ε → 0 mit G = (23 ± 3)% genau angegeben werden.

Eine Messung der spektralen Empfindlichkeit des Detektors zeigte, dass diese von λ = 15 μm bis λ = 4 μm um 50% abnimmt. Es werden also durch den Detektor verschiedene Spektralbereiche verschieden gewichtet. Zusammen mit dem nicht idealen Reflexionsverhalten des verchromten Umlenkspiegels ergibt sich daraus ein maximaler Fehler von ΔI_Ω ≈ -6 W m⁻² ster⁻¹ oder ΔT_{eff} ≈ -4°C.

Die Vernachlässigung der thermischen Emission der Luftschicht zwischen Radiometer und Eichstrahler während der Eichung verursacht einen zusätzlichen Fehler von ΔI_Ω = + 3 W m⁻² ster⁻¹ oder

ΔT_{eff} = + 2°C, die diffuse Reflexion des Sonnenlichtes am Umlenkspiegel bei hohem Sonnenstand einen Fehler von ΔI_Ω = -2 W m⁻² ster⁻¹ oder ΔT_{eff} = -1,5°C.

Der Gesamtfehler der Strahlungsmessung ohne Filter ist ΔI_Ω ≈ -5 W m⁻² ster⁻¹ bzw. ΔI_A ≈ 15 W m⁻². Er genügt also knapp der geforderten Genauigkeit.

Gemessen wurde die Richtungsabhängigkeit der atmosphärischen Gegenstrahlung, also die Intensität I_Ω(Φ, Ψ) = dI_A/dΩ in W m⁻² ster⁻¹, wobei Φ den Elevationswinkel und Ψ das Azimut darstellt. Der von einer Fläche mit der Emissivität ε(λ) absorbierten Gegenstrahlung kann durch Vergleich mit der thermischen Abstrahlung derselben Fläche eine effektive Temperatur T_{eff} zugeordnet werden. Dabei ist die effektive Temperatur definitionsgemäss die Temperatur, auf die man eine Fläche der Emissivität ε(λ) abkühlen muss, damit sie sich im Strahlungsgleichgewicht mit der aus dem Raumwinkel dΩ einfallenden atmosphärischen Gegenstrahlung befindet. Die *effektive Temperatur* ist also eine *Gleichgewichtstemperatur*, auf die sich eine Fläche im Wärmestrahlungsfeld der Umgebung abkühlt, wenn man Konvektion und Wärmeleitung unterbindet, d. h. k' = α_K = 0 in Gleichung (1).

In Bild 3 ist das Resultat einer Messung ohne Filter, d. h. mit einer relativen

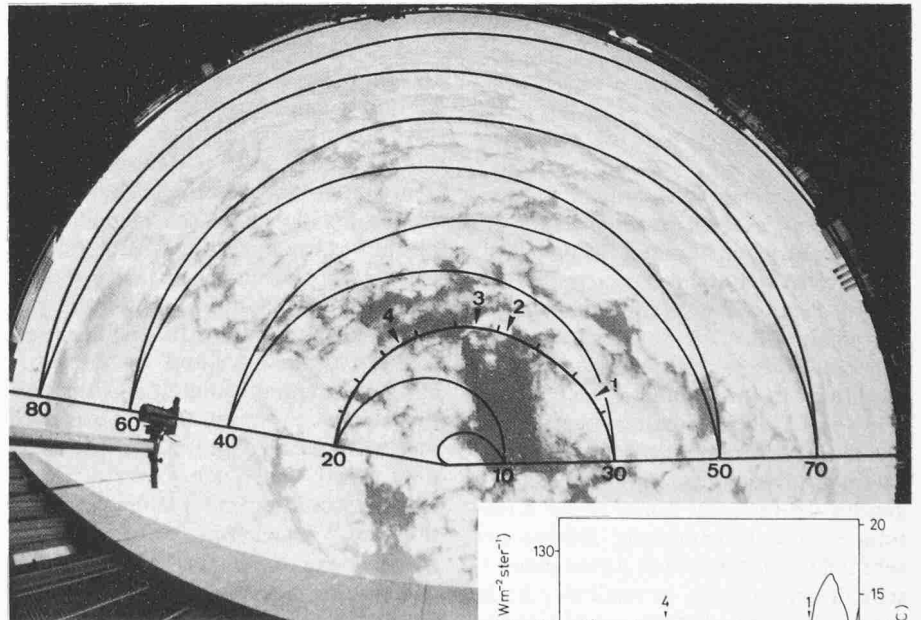


Bild 3. Fischaugenaufnahme der Wolkenbedeckung, Intensität und effektive Temperatur der atmosphärischen Gegenstrahlung für den Teil des eingezeichneten Abtastweges, dessen Zenitwinkel Θ zwischen 20° und 30° liegen. Die mit den Marken 1-4 gekennzeichneten Positionen zeigen, dass die momentane Wolkenbedeckung die Intensität der atmosphärischen Gegenstrahlung bestimmt. Diese Messung wurde in Dübendorf bei Zürich am 18. August 1978 um 18 h durchgeführt

spektralen Empfindlichkeit $\epsilon(\lambda)$ gemäss Kurve I in Bild 7, dargestellt. In der oberen Bildhälfte ist der Abtastweg in eine Fischaugen-Aufnahme eingezeichnet. Darunter ist die Intensität je Raumwinkel I_Ω für den Teil des Abtastweges, dessen Zenitwinkel zwischen 20° und 30° liegen, aufgetragen. Wie man an den Marken 1, 2, 3, 4 erkennen kann, ist die Intensität durch die momentane Wolkenbedeckung bestimmt. In den Wolkenlöchern nimmt I_Ω um $20 \text{ W m}^{-2} \text{ ster}^{-1}$ ab. Die effektive Temperatur sinkt von $+17^\circ\text{C}$ auf -2°C . Dies kann wie folgt erklärt werden: die atmosphärische Gegenstrahlung in den Absorptionsbanden wird unabhängig von der Bewölkung nur von den bodennahen Schichten bestimmt. In den transparenten Spektralbereichen hingegen, d. h. in den atmosphärischen Fenstern, setzt sich die Gegenstrahlung aus den Beiträgen aller Atmosphärenschichten inklu-

tiongsabhängigkeit der atmosphärischen Gegenstrahlung hat zur Folge, dass die Aussentemperatur T_w von horizontalen Gebäudeflächen stärker unter die Lufttemperatur fällt als die Aussenwandtemperatur von vertikalen Gebäudeflächen. Um die von einer horizontalen oder vertikalen Gebäudefläche aus allen Raumwinkeln empfangene Intensität I_Ω der atmosphärischen Gegenstrahlung zu bestimmen, muss I_Ω über den Halbraum integriert werden. Die Flä-

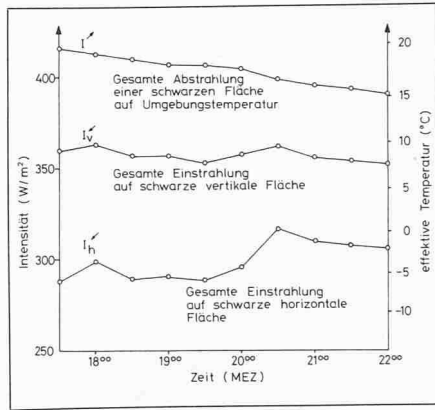


Bild 5. Vergleich der Wärmestrahlungsintensitäten und der entsprechenden effektiven Temperaturen für eine schwarze horizontale und eine schwarze vertikale Ebene, gemessen am 14. Juni 1978 in Dübendorf bei Zürich

che wird dabei als Lambertsch und schwarz angenommen.

Für einen klaren Juniabend wurden aus einer kontinuierlichen Folge von Abtastzyklen, wie in Bild 3 als Beispiel dargestellt, die Intensitäten I_v und I_h bestimmt, die eine schwarze vertikale und eine schwarze horizontale Gebäudefläche durch atmosphärische Gegenstrahlung empfangen.

Das Resultat ist in Bild 5 dargestellt. Für die vertikale Hauswand wurde angenommen, dass die Einstrahlung vom Boden her der eines schwarzen Strahlers auf Lufttemperatur T_L entspricht. I_v ist die Abstrahlung einer schwarzen Fläche auf Umgebungstemperatur. Man beachte den Intensitätsunterschied zwischen I_v und I_h von über 50 W m^{-2} . Daraus folgt, dass Temperaturunterschiede zwischen horizontalen und vertikalen Fassadenelementen von über $3,5^\circ\text{C}$ auftreten. Der effektive Temperaturunterschied ohne Konvektion und Wärmeleitung beträgt 10°C .

Erstaunliche Resultate zeigen Radiometermessungen, welche mit Spektralfiltern durchgeführt wurden, deren Durchlässigkeitsbereich im atmosphärischen Fenster $8 \mu\text{m}-14 \mu\text{m}$ liegen. In Bild 6 ist die Richtungsabhängigkeit von I_Ω und von der entsprechenden effektiven Temperatur dargestellt, wobei Kurve I ohne Filter, Kurve II mit dem $8 \mu\text{m}-14 \mu\text{m}$ -Filter und Kurve III mit dem $10 \mu\text{m}-12 \mu\text{m}$ -Filter gemessen wurde. Kurve I zeigt einen ähnlichen Ver-

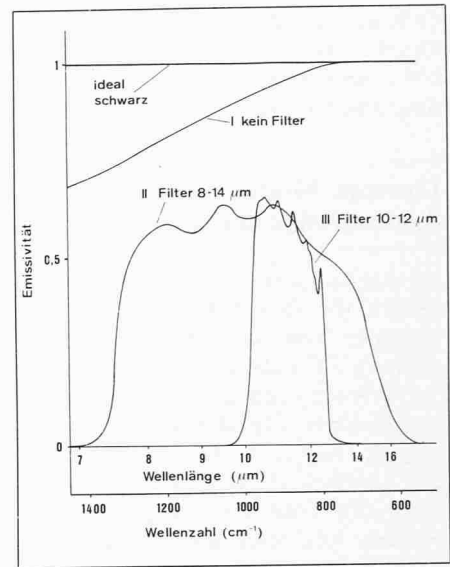


Bild 7. Spektrale relative Empfindlichkeit ϵ des bei den Messungen zu Bild 6 verwendeten Radiometers für die verschiedenen Filterbedingungen I-III. Die effektiven Temperaturen in Bild 6 treten an Oberflächen auf, die spektrale Emissivitäten aufweisen, welche der im vorliegenden Bild dargestellten spektralen relativen Empfindlichkeit ϵ entsprechen

lauf wie die Polardarstellung in Bild 4. Im Zenit sinkt die mit dem $8 \mu\text{m}-14 \mu\text{m}$ -Filter gemessene Intensität I_Ω auf $4,72 \text{ W m}^{-2} \text{ ster}^{-1}$. Mit dem $10 \mu\text{m}-12 \mu\text{m}$ -Filter ist die Intensität im Zenit zu klein, um zuverlässige Absolutmessungen mit dem verwendeten Heilmann-KT 4-Radiometer zu machen.

Die spektrale relative Empfindlichkeit $\epsilon(\lambda)$ des Radiometers in Bild 7 ist gegeben durch das Produkt der relativen spektralen Empfindlichkeit des Detektors $s(\lambda)$ und der spektralen Transmission $\tau(\lambda)$ der verwendeten Filter:

$$(3) \quad \epsilon(\lambda) = s(\lambda) \cdot \tau(\lambda)$$

Diese spektrale relative Empfindlichkeit ist gleich der spektralen Emissivität $\epsilon(\lambda)$ einer Fläche entsprechend der obigen Definition der effektiven Temperatur T_{eff} . Sie ist in Bild 7 dargestellt, wobei Kurve I ohne Filter, Kurve II mit dem $8 \mu\text{m}-14 \mu\text{m}$ und Kurve III mit dem $10 \mu\text{m}-12 \mu\text{m}$ Transmissionsfilter gemessen wurden.

Die Interpretation der gemessenen kleinen Intensitäten mit Hilfe effektiver Temperaturen in Bild 6 zeigt folgendes überraschendes Ergebnis. Eine horizontale Fläche, deren Emissivität $\epsilon(\lambda)$ den spektralen Verlauf der Kurve II ($8 \mu\text{m}-14 \mu\text{m}$ -Filter) bzw. III ($10 \mu\text{m}-12 \mu\text{m}$ -Filter) hat, wird sich auf eine Temperatur von -70°C bzw. eine Temperatur unter -100°C abkühlen, wenn man dafür sorgt, dass durch geeignete Spiegelvorrichtungen nur Strahlungsaustausch in einen Winkelbereich von $\pm 30^\circ$ um den Zenit möglich ist, und wenn der Wärmeaustausch durch Konvektion und Wärmeleitung vernachlässigbar klein gehalten werden kann.

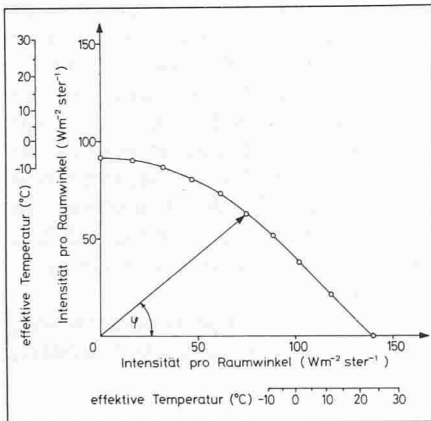


Bild 4. Polardiagramm der atmosphärischen Gegenstrahlung als Funktion des Elevationswinkels Φ . Die Messung wurde im Juni 1978 an einem wolkenlosen Tag bei einer Lufttemperatur von 24° in Dübendorf bei Zürich durchgeführt

sive Stratosphäre zusammen. In den spektralen Fenstern strahlen daher die im IR schwarzen Wolken. In den Wolkenlöchern sieht man dagegen als Hintergrund den kalten Weltraum, d. h., die Intensität fällt.

Misst man die atmosphärische Gegenstrahlung in Abhängigkeit der Elevation bei klarem Schönwetterhimmel, wie sie in Bild 4 in einem Polardiagramm dargestellt ist, so zeigt sich folgendes deutlich. In horizontaler Richtung ist die Einstrahlung infolge der sehr tiefen emittierenden Atmosphärenschicht am grössten, in vertikaler Richtung infolge der dünnen emittierenden Atmosphärenschichten am geringsten. Das ist nach den Lowtran-Berechnungen zu erwarten. Man beachte, dass die effektive Temperatur in horizontaler Richtung 24°C beträgt. Das ist genau die Umgebungstemperatur. In vertikaler Richtung jedoch sinkt die effektive Temperatur auf -6°C , also 30° unter die Umgebungstemperatur! Diese Rich-

Die vielversprechenden Möglichkeiten der Kühlung von Gebäuden im Sommer durch Ausnutzung der Wärmeabstrahlung im $8\mu\text{m}-14\mu\text{m}$ Fenster wird auch von anderen Gruppen untersucht [7, 8]. Anhand von Bild 1 kann die zur Verfügung stehende Kühlleistung abgeschätzt werden. Sie entspricht dem Unterschied zwischen der Abstrahlung einer schwarzen Fläche auf Umgebungstemperatur und der eingestrahelten atmosphärischen Gegenstrahlung.

Bei den Bedingungen für Bild 1 beträgt die Kühlleistung 74 W m^{-2} .

Hauswände mit richtungsabhängigen Strahlungscharakteristiken

Wie dargelegt, können die Energieverluste infolge des Strahlungsaustausches mit der Atmosphäre durch IR-Verspiegelung der Hauswände reduziert wer-

den. Zur Zeit sind praktisch keine Baumaterialien bekannt oder untersucht worden, die entsprechende Eigenschaften besitzen und im Fassadenbau Verwendung finden könnten. IR-reflektierende Metallflächen als Fassadenelemente sind eine mögliche Lösung. Dies wird später am Beispiel von mit Chrom beschichtetem eloxiertem Aluminium erläutert. Eine solche Fassade würde aber auch im sichtbaren Bereich sehr stark reflektieren und könnte daher kaum als ebenes Element verwendet werden. Im Sommer, d. h. in der Jahreszeit, in der man möglichst wenig Energie in Form von Wärme absorbieren will, ist einerseits eine wirksame Verspiegelung im sichtbaren Bereich sicher erwünscht (klimatisierte Gebäude), andererseits sollte man im Winter die Sonnenenergie optimal ausnützen. Anhand dieser Betrachtungen haben wir Hauswandprofile für Südfassaden mit richtungsabhängigem Absorptionsvermögen entworfen (Pat. ang.). Auf technisch komplizierte Lösungen, wie eine Kombination der Hauswand mit Sonnenkollektoren und Belüftungssystem, wurde im Rahmen dieser Arbeit verzichtet.

Die Profile wurden unter folgenden Voraussetzungen konzipiert:

- Die im sichtbaren Bereich absorbierenden Oberflächen zeigen ebenfalls im IR-Bereich ein grosses Absorptionsvermögen. Sie verhalten sich also wie schwarze Strahler.
- Während der kalten Jahreszeit steigt die Sonne in mittleren Breiten bis zu 45° über den Horizont, wie aus dem Bild 8 ersichtlich ist.
- Der Strahlungsaustausch im Winkelbereich um den Zenith muss während der kalten Jahreszeit vermieden werden, um ein Absinken der Oberflächentemperatur unter die Umgebungstemperatur zu verhindern.

Unter diesen Annahmen muss eine Hauswand im Winter, das heisst bei niedrigem Sonnenstand, ein grosses Absorptionsvermögen aufweisen und im Sommer bei grossem Elevationswin-

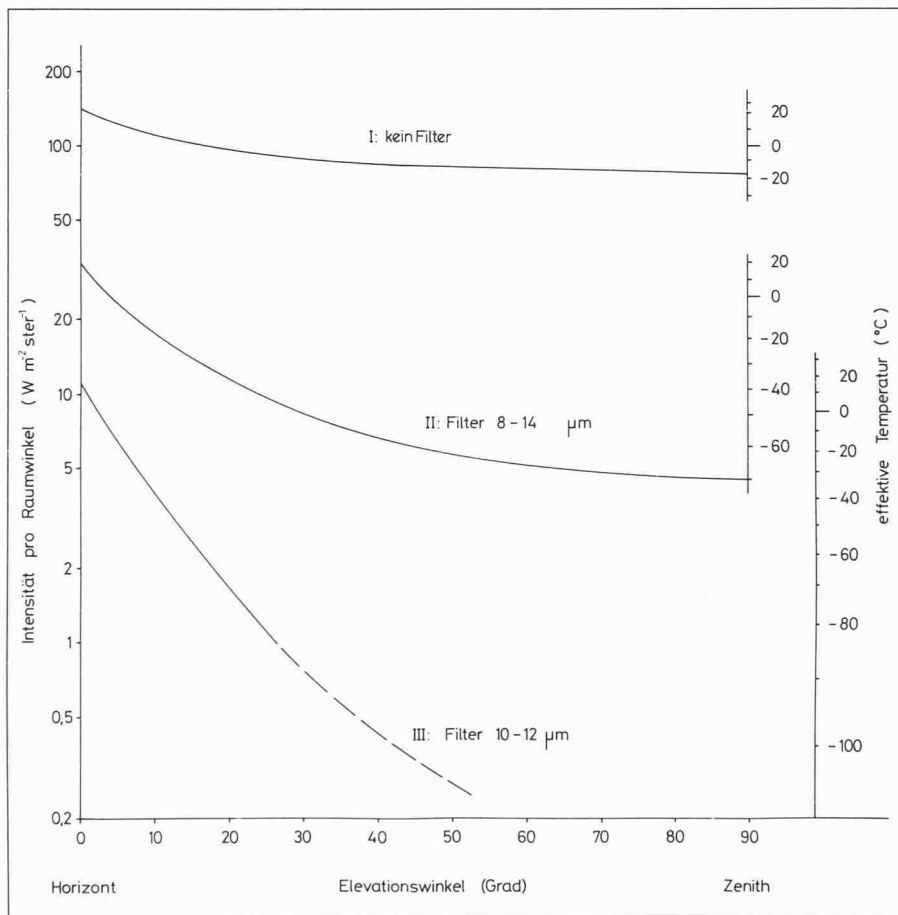


Bild 6. Richtungsabhängigkeit der Intensität und der effektiven Temperatur der atmosphärischen Gegenstrahlung in verschiedenen spektralen Bereichen. Kurve I wurde ohne Filter, Kurve II mit einem $8\mu\text{m}-14\mu\text{m}$ Transmissionsfilter gemessen. Die spektrale relative Empfindlichkeit ϵ des Radiometers ist in Bild 7 für die verschiedenen Kurven I-III dargestellt. Die Kurven I-III wurden am 13. Oktober 1978 um 16.30 h auf dem Höggerberg in Zürich aufgenommen. Die Lufttemperatur war 14°C , die absolute Luftfeuchtigkeit $8,3 \text{ g m}^{-3}$

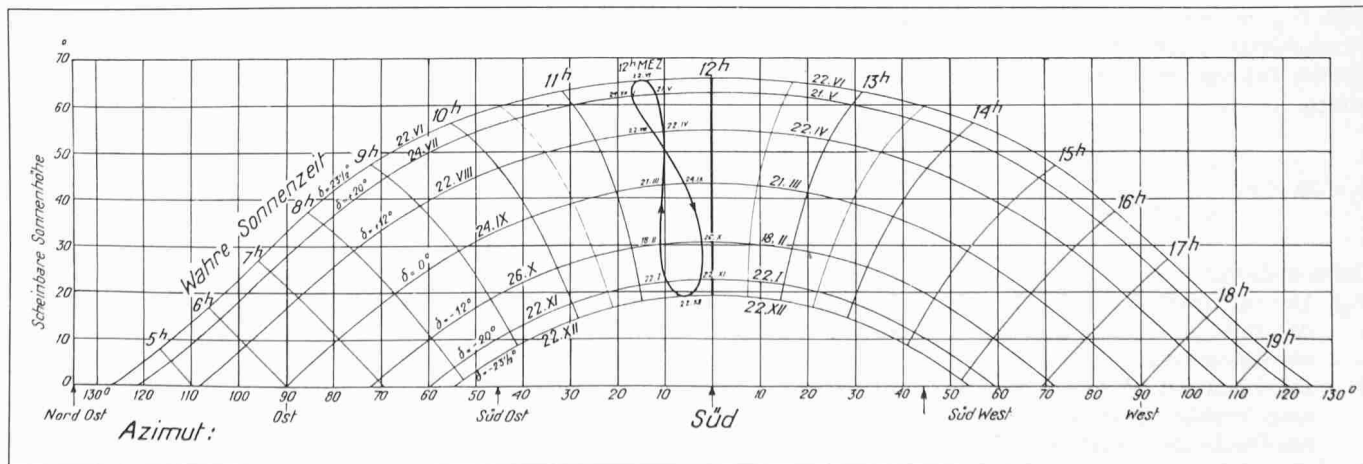


Bild 8. Sonnenstandkurve für Zürich in Abhängigkeit der wahren Sonnenzeit. 12 h mitteleuropäische Zeit ist eingezeichnet (Mitteilung P. Valko, MZA, und R. Salsgorsdorff, EMPA)

kel der Sonne eine möglichst hohe Reflektivität zeigen. Aufgrund der Strahlungseigenschaften der Atmosphäre ist in horizontaler Richtung ein intensiver Strahlungsaustausch anzustreben. Das Emissionsvermögen in vertikaler Richtung dagegen ist aufgrund der hohen Transparenz der Atmosphäre in dieser Richtung möglichst gering zu halten. Zur Vereinfachung der Berechnungen haben wir zwei theoretische Wandprofile mit Teilflächen, deren Absorptionsvermögen entweder 0 oder 1 im ganzen Spektralbereich beträgt, gewählt. Die beiden Wandprofile sind im Bild 9 skizziert.

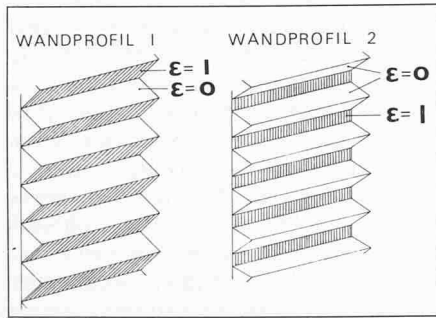


Bild 9. Wandprofile mit richtungsabhängiger Strahlungscharakteristik. Schwarze Flächen durch $\epsilon = \alpha = 1$, ideal spiegelnde Flächen durch $\epsilon = \alpha = 0$ charakterisiert

Profil 1 Es besteht aus langen Streifen, die den Winkel η einschliessen; die oberen absorbieren vollständig ($\alpha = 1$, schwarz), die unteren sind verspiegelt ($\alpha = 0$). Siehe auch Bild 10.

Profil 2 Seine Geometrie ist aus den Bildern 9 und 11 ersichtlich. Die vertikale innere Fläche absorbiert vollständig ($\alpha = 1$, schwarz), die schrägen Flächen sind verspiegelt ($\alpha = 0$).

Die Richtungscharakteristiken beider Wandprofile sind vom Winkel η abhängig und können durch Änderung desselben variiert werden. Bei klarem Wetter hängt die im IR emittierte Strahlung der Atmosphäre nur vom Zenitwinkel Θ ab. Es ist also wichtig, die von den profilierten Wänden absorbierte Intensität I_{vp} zu bestimmen. Dafür ist es zweckmässig, ein über den Azimut integriertes Absorptionsvermögen zu definieren:

$$4) \alpha'(\Theta, \eta) = \frac{d I_{vp}(\Theta)}{d I_v(\Theta)}$$

Dabei bedeuten:

I_{vp} : Die Intensität ($W m^{-2}$), die von der vertikalen profilierten Wand absorbiert wird.

I_v : Die Intensität ($W m^{-2}$), die von einer vertikalen, ebenen, schwarzen Fläche absorbiert wird.

Θ : Den Winkel zwischen der Einfallrichtung und der Vertikalen.

Bild 10 zeigt α' für die Wandprofile 1

mit verschiedenen Werten von η , Bild 11 für die Wandprofile 2 mit $d/l = 0,5$.

Die absorbierte Sonneneinstrahlung $\alpha_s I_s$ bestimmt man mit Hilfe der Sonnenstandskurve (Bild 8) aus der Absorptionscharakteristik. Durch solche Profile können die absorbierte Atmosphärenstrahlung, die absorbierte globale Sonneneinstrahlung und somit auch die Wärmestrombilanz (1) einer Hauswand beeinflusst werden. Der Vergleich von Fassadenprofilen mit ebenen schwarzen und ebenen verspiegelten Fassaden zeigt interessante Resultate.

Für einen wolkenlosen Sommertag mit einer Lufttemperatur von $24^\circ C$, bei Verhältnissen wie sie in Bild 4 dargestellt sind, ergibt sich eine effektive

auch im IR-Bereich nicht optimal ist. Mit einer schwarzen Wand wird während den sonnigen Wintertagen Energie gewonnen. In der Nacht hingegen sind die Verluste der schwarzen Wand am grössten. Ausserdem werden während der schönen Sommertage unerwünscht hohe Wandtemperaturen erreicht. Im Gegensatz dazu reflektieren die profilierten Wände die direkte Sonneneinstrahlung im Sommer; sie erwärmen sich nur wenig über die Lufttemperatur. In den Winternächten werden die durch Strahlungsaustausch verursachten Energieverluste reduziert. Tagsüber kann bei Sonneneinstrahlung der Wärmeverlust durch geeignete Wahl der Wandprofile auf Null gesenkt werden. Die Verwendung eines Baumaterials, das im Sichtbaren stark absorbiert und

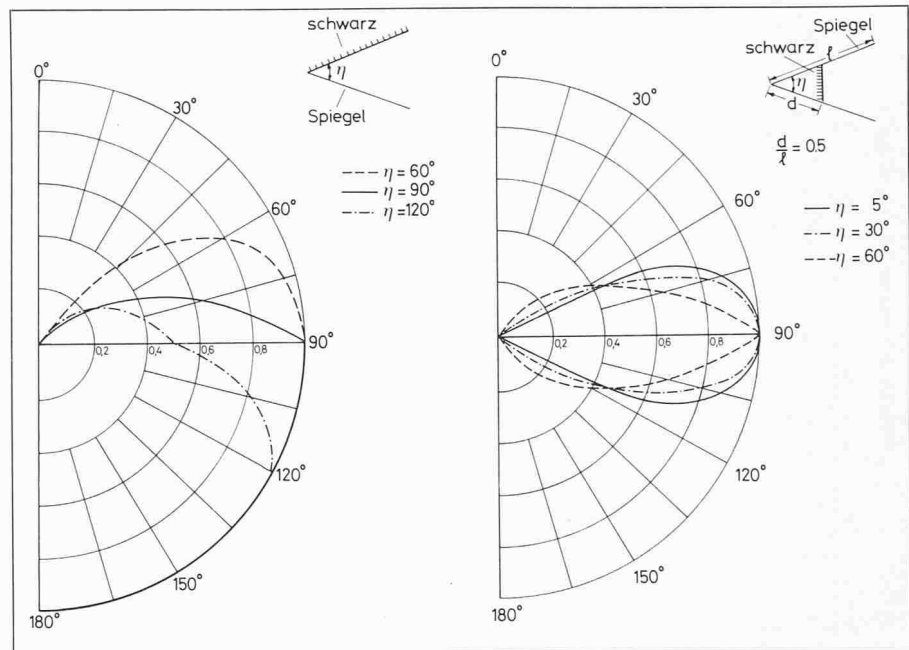


Bild 10. Polardiagramm des über das Azimut integrierten Absorptionsvermögens α' in Funktion des Zenitwinkels für verschiedene Öffnungswinkel η des Wandprofils 1

Bild 11. Polardiagramm des über das Azimut integrierten Absorptionsvermögens α' in Funktion des Zenitwinkels für verschiedene Öffnungswinkel η des Wandprofils 2

Wandtemperatur von $T_{eff} = 11,6^\circ C$, wenn die Wand nicht verspiegelt ist. Vergleichen wir diesen Wert mit dem des Wandprofils 1 mit $\eta = 90^\circ$ und dem des Profils 2 mit $\eta = 30^\circ$ und $d/l = 0,5$, so steigt die effektive Temperatur von $11,6^\circ C$ auf $18,8^\circ C$ bzw. auf $18,6^\circ C$. Dieser Temperaturunterschied zeigt, dass das Strahlungsaustauschdefizit durch diese Methode verringert werden kann.

Die Wandtemperaturen und die Wärmeverluste Q verschiedener Fassaden sind in der Tabelle 2 dargestellt. Diese wurden nach Gleichung (1) unter denselben winterlichen Bedingungen wie in der Tabelle 1 berechnet. Tagsüber absorbieren profilierte Hauswände im Mittel $300 W m^{-2}$ von der Sonneneinstrahlung. Aus der Tabelle 2 sehen wir, dass für Südfassaden eine totale Verspiegelung sowohl im sichtbaren als

Tabelle 2. Vergleich der Wärmeverluste $Q (W m^{-2})$ einer ebenen schwarzen mit einer ebenen verspiegelten Wandoberfläche mit dem Wärmeverlust der Wandprofile 1 und 2. Der Öffnungswinkel für Wandprofil 1 ist $\eta = 90^\circ$. Für das Wandprofil 2 ist der Öffnungswinkel $\eta = 30^\circ$ und das Verhältnis $d/l = 0,5$. Innen- und Aussentemperaturen T_i und T_L , sowie der k -Wert k' der Aussenwand entsprechen den Werten der Tabelle 1. Für diese Tabelle wurde mit einer Sonneneinstrahlung von $600 W m^{-2}$ gerechnet

	klare Winternacht		sonniger Wintertag	
	$T_w(^{\circ}C)$	$Q (W m^{-2})$	$T_w(^{\circ}C)$	$Q (W m^{-2})$
schwarze Fläche	-3,7	19,0	38,0	-14,4
Profil 1	-0,7	16,6	18,4	1,3
Profil 2	-0,2	16,1	13,7	5,5
verspiegelte Fläche	1,8	14,5	1,8	14,5

im IR stark reflektiert, würde eine zusätzliche Verbesserung bringen.

IR-Eigenschaften von Metallfassaden

Im Gegensatz zur weitverbreiteten Meinung hat unsere Untersuchung [9] gezeigt, dass die heute verwendeten Al-Bleche zwar im Sichtbaren gut reflektieren, im IR aber wegen Schutzschichten praktisch schwarz sind. Das Reflexionsvermögen verschiedener Al-Materialien ist in Bild 12 aufgetragen. Hohes Reflexionsvermögen ist gleichbedeutend mit kleiner Emissivität ϵ und umgekehrt. Unbeschichtetes Anticorodal (Ac) weist im Bereich des atmosphärischen Fensters eine Reflexion von ca. 95% auf, ist also strahlungsmässig gesehen ein «energiebewusstes» Baumaterial. Leider ist es aber wegen seiner geringeren Oberflächenhärte und chemischen Unbeständigkeit ungeeignet. Unbeschichtetes Ac erreicht praktisch das gleiche Reflexionsvermögen wie Gold ($\lambda > 2 \mu\text{m}$). Beschichtetes, z. B. eloxiertes Aluminium, zeigt nun ausgerechnet zwischen $8 \mu\text{m}$ - $14 \mu\text{m}$ eine schwache Reflexion, d. h. ein hohes Emissionsvermögen im Bereich der maximalen Wärmeabstrahlung. Der Grund für das schlechte Reflexionsvermögen liegt in der Aluminiumoxidschicht, die beim Eloxieren von Ac entsteht. Al_2O_3 absorbiert praktisch ab $6,5 \mu\text{m}$ vollständig. Aufspütern von Cr, Au oder Ag bringt eine wesentliche Verbesserung. Durch Verspiegelung von eloxiertem Ac mit ca. 2000 \AA Cr erreicht man ein Reflexionsvermögen von ca. 80-85% (Pat. ang.). Durch eine im IR reflektierende Aussenhaut der Gebäudehülle werden auch die Zimmertemperatur-Schwankungen z. B. als Antwort auf eine rasche Änderung der Aussentemperatur verringert. Sind für die Raumtemperatur kleine Schwankungen ($\pm 2^\circ \text{C}$) erlaubt, so werden die Spitzen der Heiz- oder Kühlleistung stark reduziert. Energieeinsparungen sind also möglich. Das Haus mit der grossen Wärmekapazität seiner Wände reagiert dann aber sehr träge auf Änderung der Thermostaten-temperatur wie z. B. bei Nachtabenkung oder Aufheizen am Morgen [10].

IR-Eigenschaften von Fenster und Glasfassaden

Nicht nur Aluminium, sondern auch Glas spielt im modernen Fassadenbau eine wichtige Rolle. Ausgerechnet das Fenster aber ist zum grossen Teil mitverantwortlich für den Wärmefluss durch die Hauswand. Nach Gläser [11] kann der Wärmedurchlasswiderstand einer Zweifach-Isolierglasscheibe ledig-

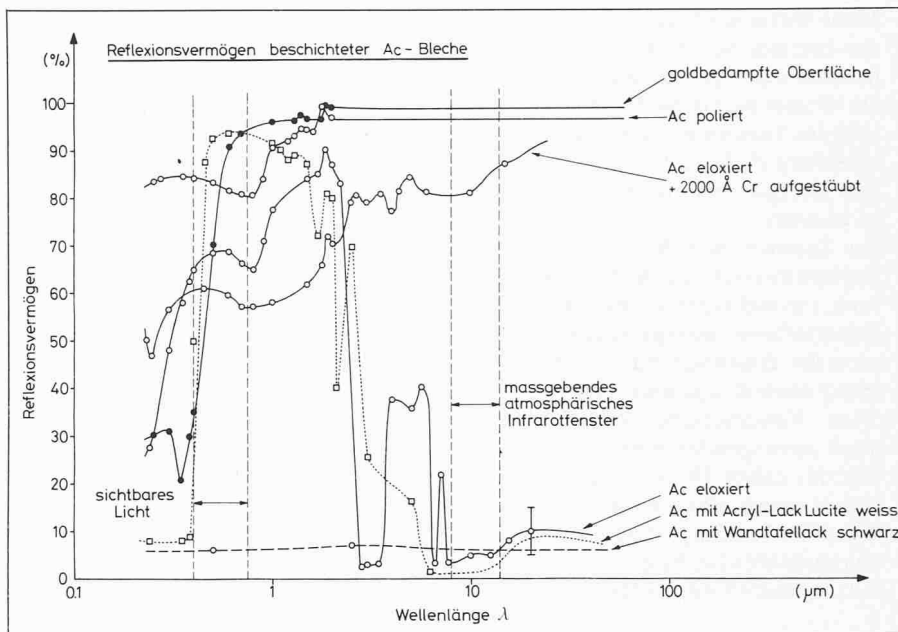


Bild 12. Gesamtes Reflexionsvermögen ρ von Anticorodal-Blechen und von einer goldbedampften Oberfläche. Das Emissionsvermögen ϵ ist bestimmt durch die Beziehung $\epsilon = 1 - \rho$

lich durch Verminderung des Strahlungsaustausches und/oder durch Absenkung des Wärmeaustausches infolge Wärmeleitung und Konvektion des Füllgases vergrössert werden. Im letzteren Fall bringt der Ersatz von Luft im Scheibenzwischenraum ($10-20 \text{ mm}$) durch Gase geringerer Wärmeleitfähigkeit (Argon, SF_6) nach Derner [12] keine entscheidende Verbesserung des k -Wertes. Eine Reduktion des k -Wertes durch Verminderung der Strahlungsverluste scheint daher erfolgversprechender zu sein. Normales Fensterglas reflektiert im ganzen Spektralbereich ($0,3 \mu\text{m}$ - $50 \mu\text{m}$) höchstens 20% der einfallenden Strahlung, wie aus Bild 13 er-

sichtlich ist. Die niedrige Reflektivität wird einerseits durch die hohe Transmission im Spektralbereich des Sonnenlichtes hervorgerufen; andererseits hat das niedrige Reflexionsvermögen im Bereich des atmosphärischen Fensters ($8 \mu\text{m}$ - $14 \mu\text{m}$) seine Ursache in der starken IR-Absorption des Glases. Eine Unterdrückung der Absorption der thermischen IR-Strahlung durch Verminderung des Emissionsvermögens der Glasoberfläche könnte eine merkliche Verbesserung des k -Wertes einbringen.

An ein «energiebewusstes Fenster» werden folgende Anforderungen gestellt:

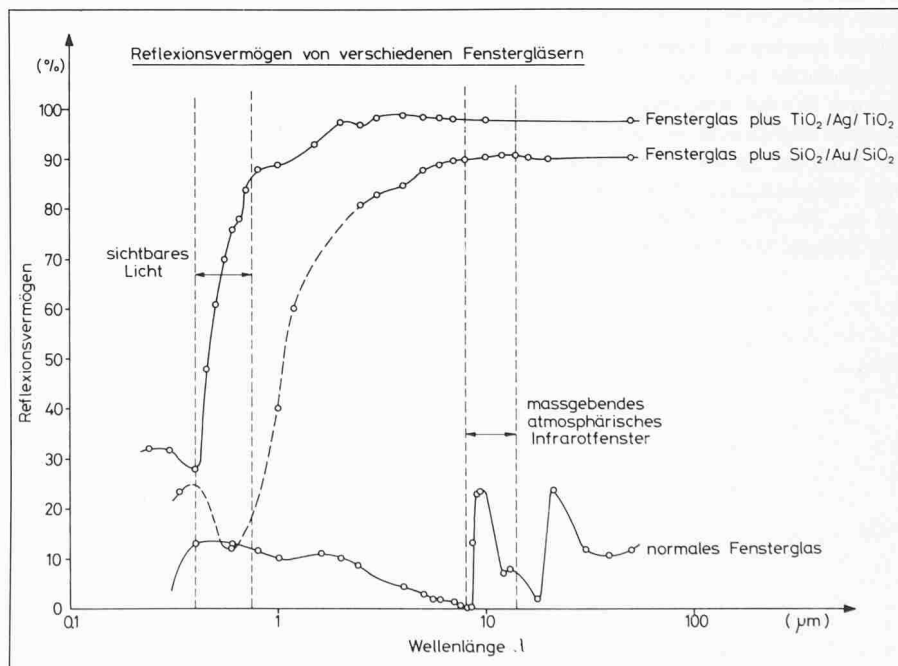


Bild 13. Gesamtes Reflexionsvermögen ρ von Fenstergläsern. Das Emissionsvermögen ϵ von Fenstergläsern im für die Wärmeabstrahlung massgebenden Infrarotfenster ($\lambda = 8 \mu\text{m} - 14 \mu\text{m}$) ist $\epsilon = 1 - \rho$. Dagegen gilt für sichtbares Licht $(\alpha + \tau) = 1 - \rho$, wobei $\alpha = \epsilon$ das Absorptionsvermögen und τ das Transmissionsvermögen darstellen. $(\alpha + \tau)$ bestimmt den Anteil der sichtbaren Sonnenstrahlung, die vom Fenster durch Absorption oder Transmission ins Gebäudeinnere eingefangen wird

- Hohe Infrarotreflektivität im Bereich der thermischen Strahlung, d. h. für Wellenlängen grösser als $3 \mu\text{m}$.
- Im Winter möglichst hohe Transmission im Spektralbereich der Sonnenstrahlung ($0,3 \mu\text{m} < \lambda < 3 \mu\text{m}$), um den Energiefluss maximal auszunutzen zu können.
- Im Sommer variable Reflexion im Spektralbereich der Sonneneinstrahlung, um mit Hilfe der Reduktion des Energieflusses infolge höherer Reflexion der Glasoberfläche die Kühlleistung einer Klimaanlage zu drosseln. Eine Verschiebung des Bereiches stark ansteigender Reflexion ins Gebiet des nahen IR ($\lambda \approx 0,8 \mu\text{m}$) liesse sich sowieso ohne Einfluss auf die Raumbelichtung durchführen, da das menschliche Auge nur zwischen $0,4 \mu\text{m}$ und $0,8 \mu\text{m}$ empfindlich ist.

Eine Verspiegelung der Glasoberfläche mit spektral selektiven Schichten wie z. B. $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ oder $\text{SiO}_2/\text{Au}/\text{SiO}_2$ erhöht das Reflexionsvermögen auf 85–90% ($\lambda > 3 \mu\text{m}$) je nach Zusammensetzung und Schichtdicke gemäss Bild 13. Weitere Möglichkeiten, wie die Bedeckung der Gläser mit JR-reflektierenden Metalloxiden (z. B. In_2O_3 , SnO_2 , $\text{In}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$) werden zurzeit in unserem Labor geprüft. Durch Herabsetzung der Strahlungskomponente der thermischen Verluste lässt sich der Wärmedurchgangskoeffizient (k -Wert) einer Doppelverglasung auf ungefähr die Hälfte reduzieren, wie im Annual Report 1977 des Energy Efficient Buildings Program aus dem Lawrence Berkeley Laboratorium bei San Francisco [13] dargelegt wird. Die reflektierende Schicht für thermische IR-Strahlung befindet sich auf den dem Zwischenraum zugewandten Seiten des doppelverglasten Fensters. Eine Reflexionsschicht für das sichtbare Licht ($0,4 \mu\text{m}$ bis $0,8 \mu\text{m}$) muss auf der Aussenseite angebracht werden. Würde diese Schicht innenseitig aufgedampft oder aufgesputtert, so würde von innen bei ca. 30–40% Reflektivität nur noch das Spiegelbild des beleuchteten Rau-

mes wahrgenommen, nicht aber die Aussenwelt. Ein solcher Spiegeleffekt im Sichtbaren wird bei einer entsprechenden Aussenschicht durch geeignete Glas mit Absorptionseigenschaften im Sichtbaren aufgehoben. Dieses Glas muss ca. 40–50% Absorption pro Lichtdurchgang aufweisen [14].

Ausblick

Die bis heute durchgeführten Abschätzungen möglicher Energieeinsparungen durch IR-Verspiegelung liegen in einer Gössenordnung, welche eine Weiterführung unserer Untersuchungen rechtfertigen.

Zu diesem Zweck sind folgende Arbeiten vorgesehen:

- Ausbau der Messungen und Computermodelle über IR-Strahlung der Atmosphäre

Literatur

- [1] VDI-Zeitung, Nr. 30 (1978)
- [2] Morf, J.-J. et Roux, M.: Bulletin ASE/UCS, t. 67 (1976), No 21a, S. 1199
- [3] Kälin, R.; Kneubühl, F.: Gesundheits-Ingenieur, 98 (1977), S. 244
- [4] Duffie, J.A. und Beckman, W.A.: «Solar Energy, Thermal Process», John Wiley and Sons, New York (1974)
- [5] Bell, E.E.; Eisner, L.; Young, J. and Oetjen, R.A.: J. Opt. Soc. Am. 50 (1960), S. 1313
- [6] Finger, G.; Kneubühl, F.: Helv. Phys. Acta 50 (1977), S. 631
- [7] Martin, M.; Berdahl, P.: Proc. of the Second National Passive Solar Conf., Philadelphia (1978), S. 684
Martin, M.; Berdahl, P.: Proc. of the Second National Passive Solar Conf., Philadelphia (1978), private Mitteilung an Herrn Frank
- [8] Catalanotti, S. et al.: Solar Energy 17 (1975), S. 83
Harrison, A.W. and Walton, M.R.: Solar Energy 20 (1978), S. 185
- [9] Finger, G. et al.: Helv. Phys. Acta 52 (1979), im Druck
- [10] Sonderegger, C.: Energy and Buildings, 1 (1977), S. 3
- [11] Gläser, H.J.: Glastechn. Berichte 50 (1977), S. 248
- [12] Derner, P.: Glastechn. Berichte 48 (1975), S. 84
- [13] Berman, S. et al.: Energy and Environment. Annual Report, Energy Efficient Buildings Program, Lawrence Berkeley Lab. 7842 (1977), S. 77
- [14] King, W.J.: Report on High Performance Solar Control Office Windows, Lawrence Berkeley Lab. 7825 (1977)

- Erfassung der IR-Eigenschaften von Baumaterialien, auch der nichtmetallischen Gebäudeoberflächen
- Verbesserung der Modelle für Gesamtenergieberechnungen an Gebäuden
- Verifizierung der Berechnungen durch Messungen an Testobjekten.

Verdankungen

Den Herren dipl. Ing. ETH R. Sageldorff, Dr. J. Gass und Dr. P. Hartmann von der EMPA Dübendorf sind wir für wertvolle Unterstützung, Diskussionen und Anregungen zu grossem Dank verpflichtet. Ebenso danken möchten wir den Herren Dr. P. Zimmerli, EMPA St. Gallen, und W. Herrmann, ETHZ, für spektroskopische Messungen und Probenbeschichtung sowie den Herren dipl. Ing. W. Borer, dipl. Ing. K. Leutwyler, ETHZ, und T. Kunz, MZA Zürich, für Entwicklung und Bau des Abtastgerätes zum Radiometer. An dieser Stelle sei ebenfalls noch den Herren dipl. Chem. ETH H. Vetsch für seine Beratung bei chemisch-physikalischen Problemen und dipl. Ing. EPF E. Aguet für die Unterstützung des Projektes und seine Verbesserungsvorläge und wertvollen Korrekturen an dieser Arbeit gedankt.

Diese Arbeit wurde vom Schweizerischen Nationalfonds im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms Energie, von der GRD des EMD und von der ETHZ unterstützt.

Adresse der Verfasser: G. Finger, F. Kneubühl, F. Thiébaud und Ch. Zürcher, Gruppe Infrarotphysik, Laboratorium für Festkörperphysik, ETH-Hönggerberg, 8093 Zürich; Th. Frank, Abt. Bauphysik, EMPA, Überlandstr. 129, 8600 Zürich