Zeitschrift: IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH Kongressbericht

Band: 11 (1980)

Artikel: Einfluss der Strahlungsvorgänge an der Gebäudehülle auf den Energieverbrauch

Autor: Sagelsdorff, R. / Frank, Th, / Finger, G.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-11305

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: 08.01.2026

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

VI

Einfluss der Strahlungsvorgänge an der Gebäudehülle auf den Energieverbrauch

Influence of Radiation Processes at the Building Envelope on the Energy Consumption

Influence des processus de radiation de la surface du bâtiment sur la consommation énergétique

R. SAGELSDORFF, TH. FRANK
Swiss Federal Institute for Material Testing
EMPA
Dübendorf, Switzerland

G. FINGER, F. KNEUBUEHL
F. THIEBAUD, CH. ZUERCHER
Solid State Physics Laboratory
Swiss Federal Institute of Technology
Zurich, Switzerland

ZUSAMMENFASSUNG
Untersuchung der physikalischen Effekte, welche den Energiehaushalt eines Gebäudes entscheidend beeinflussen: Sonneneinstrahlung und atmosphärische Gegenstrahlung; messtechnische Erfassung der meteorologischen Einflussparameter; spektrale Eigenschaften von Gebäudeoberflächen; Einfluss von selektiven Beschichtungen auf den Wärmebedarf von Häusern; Vergleich der Energiebedarfsberechnungen mit Messergebnissen des thermischen Verhaltens von Experimentiergebäuden.

SUMMARY
Discussion of physical effects which can be decisive for energy savings in buildings: solar radiation and atmospheric counterradiation; experimental evaluation of meteorological data bases, spectral properties of building materials; effect of selective coatings to heat losses; comparison of heat load calculations with measurements of the thermal behavior of real test houses.

RESUME
Discussion des processus physiques qui peuvent être décisifs pour l'économie d'énergie: radiation solaire et irradiation atmosphérique; évaluation expérimentale des valeurs météorologiques; propriétés spectrales des matériaux de construction; influence de couches superficielles sélectives sur les pertes de chaleur; comparaison entre les calculs et les mesures du comportement thermique de bâtiments réels.

EINLEITUNG

Verschiedene Einflussgrössen wie Aussenklima, Innenklima, Bautechnik und Heizungssystem bestimmen den Wärmehaushalt eines Gebäudes. Der vorliegende Beitrag untersucht die Wärmetransportvorgänge an der Gebäudehülle, insbesondere die daran beteiligten Strahlungsgrössen, und zeigt deren Einfluss auf den Gesamtwärmebedarf des Gebäudes unter Berücksichtigung der übrigen Parameter auf.

Der erste Teil ist den meteorologischen Strahlungsgrössen gewidmet und setzt sich mit den charakteristischen Eigenschaften der Atmosphäre auseinander. Der zweite Teil befasst sich mit der Berechnung des Wärmehaushaltes von Gebäuden und beleuchtet den Einfluss der spektralen Oberflächeneigenschaften auf die Transmissionsverluste. Diesen Berechnungen werden abschliessend die Messresultate von Versuchsbauten gegenübergestellt.

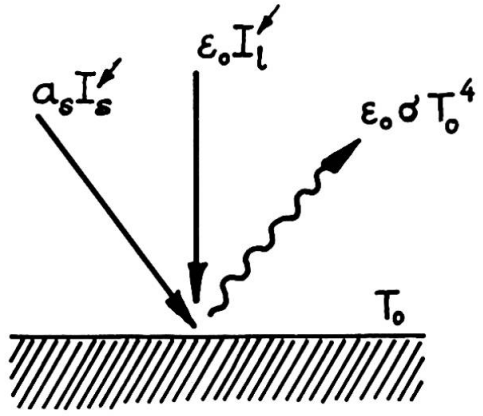
Die vorliegenden Arbeiten wurden im Rahmen eines mehrjährigen Forschungsprojektes des Schweizerischen Nationalfonds, Nationales Programm "Energie", gemeinsam von der Eidg. Materialprüfungsanstalt EMPA in Dübendorf und der Eidg. Technischen Hochschule ETH in Zürich, durchgeführt. Das Projekt wird ebenfalls unterstützt von der ETH-Z, der EMPA Dübendorf und der GRD des EMD.

1. TEIL: STRAHLUNGSAUSTAUSCH ZWISCHEN GEBAEUDEHUELLE UND ATMOSPHAERE

Ch. Zürcher, G. Finger, F. Kneubühl und F. Thiébaud

1.1 Wärmetransport durch die Gebäudehülle

Die verschiedenen Anteile an Strahlungsenergie, welche den Wärmetransport von und zu einer terrestrischen Oberfläche mit der Temperatur T_o mitbestimmen, sind in der untenstehenden Skizze schematisch dargestellt. Einer Wand z.B. wird einerseits durch Sonneneinstrahlung (sowohl direkt wie diffus, Wellenlänge $\lambda \sim 0.3\mu m - 3\mu m$) und andererseits durch die Infrarotrückstrahlung der Atmosphäre ($\lambda \sim 3\mu m - 40\mu m$) Wärme zugeführt. Die Oberfläche ihrerseits hingegen strahlt gemäss dem Planck'schen Strahlungsgesetz proportional zur vierten Potenz ihrer Oberflächentemperatur T_o Energie ab.



T_o : Oberflächentemperatur (K)
a_s : kurzwelliges Absorptionsvermögen (Sonnenstrahlung)
I_s : Strahlungsintentsität der Sonne
I_l : langwellige Strahlungsintensität, Atmosphäre und Umgebung
ε_o : langwelliges Emissionsvermögen der Gebäudeoberfläche = langwelliges Absorptionsvermögen der Gebäudeoberfläche (Kirchhoff'sches Gesetz)

Abbildung 1: Strahlungsvorgänge an einer Gebäudefläche

Diese Strahlungsflüsse werden nun in der Praxis bei der Ermittlung der Wärmestrombilanz einer Wandkonstruktion durch verschiedene Näherungsansätze berücksichtigt.
Eine mögliche Form liegt in der Definition einer fiktiven Strahlungstemperatur [6]:

$$\theta^*_{Luft} = \theta_{Luft} + \underbrace{\frac{a_s I_s}{\alpha_a}}_{\text{kurzwelliger Strahlungseinfluss}} - \underbrace{\frac{\varepsilon_o \Delta R}{\alpha_a}}_{\text{langwelliger Strahlungseinfluss}}$$

θ_{Luft}: Aussenlufttemperatur (°C)
α_a : Wärmeübergangskoeffizient: Gebäudehülle - Aussenluft
ΔR : langwellige Strahlungsverlustdichte: Gebäudeoberfläche - Aussenluft

Der Wärmetransmissionsverlust q berechnet sich dann wie folgt:

$$q = k\,(\theta_i - \theta^*_{Luft})$$

$$k = \frac{1}{1/\alpha_i + \Sigma d/\lambda + 1/\alpha_a} = \text{Wärmedurchgangskoeffizient}$$

Erst eine klare, physikalische Auftrennung aber in die einzelnen Energietransportprozesse (Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung) erlaubt genaue Aussagen über den Einfluss der Strahlungsvorgänge auf den Energiehaushalt eines Bauwerkes [1,2]. Eine unter dieser Voraussetzung berechnete Wärmestrombilanz (siehe auch Abschnitt 2.1.1) liefert bei winterlichen Klimabedingungen im Gleichgewichtszustand für die Aussenhaut einer Gebäudehülle Wandoberflächentemperaturen θ_{oa}, die mehrere Grade unter der Aussenlufttemperatur liegen. Die Unterkühlung nimmt zudem mit wachsendem Emissionsvermögen der Gebäudeoberfläche zu. Dieses Absinken der Oberflächentemperatur unter die Umgebungstemperatur führt primär zu einer Vergrösserung der Temperaturdifferenz $\theta_i - \theta_{oa}$ und somit auch zu einem erhöhten Wärmestrom aus dem Gebäudeinnern an die Wandoberfläche. Verspiegelung, d.h. Vergrösserung des Reflexionsvermögens der äusseren Gebäudeoberfläche reduzieren diese Temperaturdifferenz und führen zu einer Ersparnis an Heizenergie von ca. 10 - 12 %, wenn der Energiebedarf eines infrarot schwarzen Hauses als Bezugsreferenz benützt wird [3].

1.2 Sonne und Atmosphäre

Aus der folgenden Figur wird klar ersichtlich, dass die im Winter von einer 1 m^2 grossen schwarzen Fläche in die Umgebung abgestrahlte Energie (Kurve 3) ungefähr von der gleichen Grössenordnung wie die von der Sonne eingestrahlte Wärmemenge (Kurve 2) ist. Die atmosphärische Gegenstrahlung (Kurve 4) basiert auf der Emission von IR-aktiven Gasen wie H_2O, CO_2 und O_3 und zeigt im Bereich schwacher Aktivität dieser Gase, im sogenannten atmosphärischen Fenster von 8µm - 14µm, eine reduzierte Rückstrahlung. Auf Grund dieses Rückstrahlungsdefizits von gegen 90 W/m^2 geht ein beträchtlicher Betrag an Wärmeenergie durch thermische Abstrahlung von der Gebäudehülle in den "kalten Weltraum" verloren. Sowohl Berechnungen wie Messungen zeigen, dass die Emission im atmosphärischen Fenster nicht nur wellenlängen- sondern auch richtungsabhängig ist, d.h. je nach Elevationswinkel des Transmissionsweges durch die Atmosphäre ändert sich der Betrag der eingestrahlten Energie. Aus dieser Richtungsabhängigkeit -

grösste einfallende Intensität in horizontaler Richtung, kleinster Energiezufluss aus Richtung Zenit - folgt, dass die Oberflächentemperatur einer horizontalen Gebäudefläche stärker unter die Lufttemperatur absinkt als die entsprechende Temperatur an der vertikalen Hauswand.
Diese Tatsache lässt sich unter bestimmten konstruktiven Bedingungen, d.h. bei grossem Emissionsvermögen der Gebäudehülle gegen den Zenit im Bereich zwischen 10µm bis 14µm und möglichst geringem Strahlungsaustausch im restlichen Wellenlängenbereich der atmosphärischen Gegenstrahlung zur Kühlung von Gebäuden (radiative cooling) ausnützen [4,5].

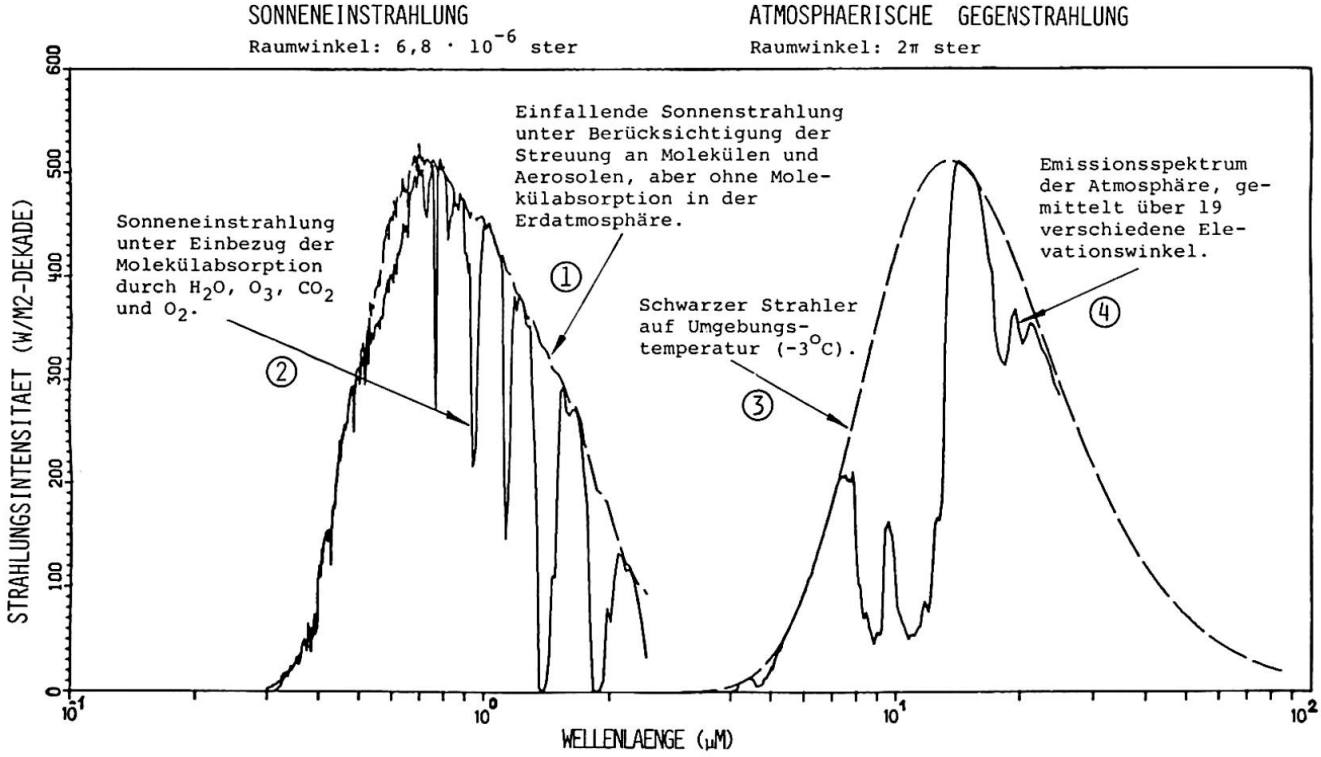


Abbildung 2: Vergleich zwischen den Intensitäten der Sonneneinstrahlung und der atmosphärischen Gegenstrahlung auf eine horizontale Ebene (Mittlere Breite, Winter, 600 m über Meer). Eine schwarze Fläche auf Umgebungstemperatur (-3°C) strahlt ca. 300 W/m2 ab, wogegen die Atmosphäre an einem klaren Wintertag nur ungefähr 210 W/m2 zurückstrahlt. Ein bedeckter Himmel seinerseits verhält sich annähernd wie ein schwarzer Strahler mit einem Emissionsvermögen von ungefähr 1. Die Sonneneinstrahlung auf eine horizontale Fläche beträgt in dieser Jahreszeit ca. 240 - 340 W/m2 bei einem Elevationswinkel von 20° - 30° (Januar/Februar).

1.3 Erfassung meteorologischer Daten und Messung der atmosphärischen Gegenstrahlung; typische Tagesgänge bei verschiedenen Wetterzuständen

Eine automatische Wetterstation, die gemäss nachfolgendem Blockdiagramm neben den üblichen Meteodaten wie Temperatur, Windgeschwindigkeit, Luftfeuchtigkeit, direkte und diffuse Sonneneinstrahlung (λ = 0.2µm - 3 µm) noch die Wärmestrahlung der Atmosphäre (λ = 2µm - 40µm) winkelabhängig über den ganzen Himmelshalbraum misst, liefert uns die für die Wärmestrombilanzberechnungen notwendigen

aufintegrierten Energieflüsse: Sonneneinstrahlung, atm. Gegenstrahlung, auf horizontale und vertikale Flächen. Neben einem primären Ziel - Vorbereitung von charakteristischen Wetterdaten für Perioden mehrerer Tage während den einzelnen Jahreszeiten, hauptsächlich Sommer und Winter - geht es bei diesen Messungen sekundär auch darum, eine eventuelle Korrelation zwischen den IR-Daten der Atmosphäre und den üblichen, bereits langzeitig erfassten Meteodaten aufzudecken, z.B. den Zusammenhang zwischen dem Emissionsvermögen der Atmosphäre und der Lufttemperatur und des Bewölkungsgrades.

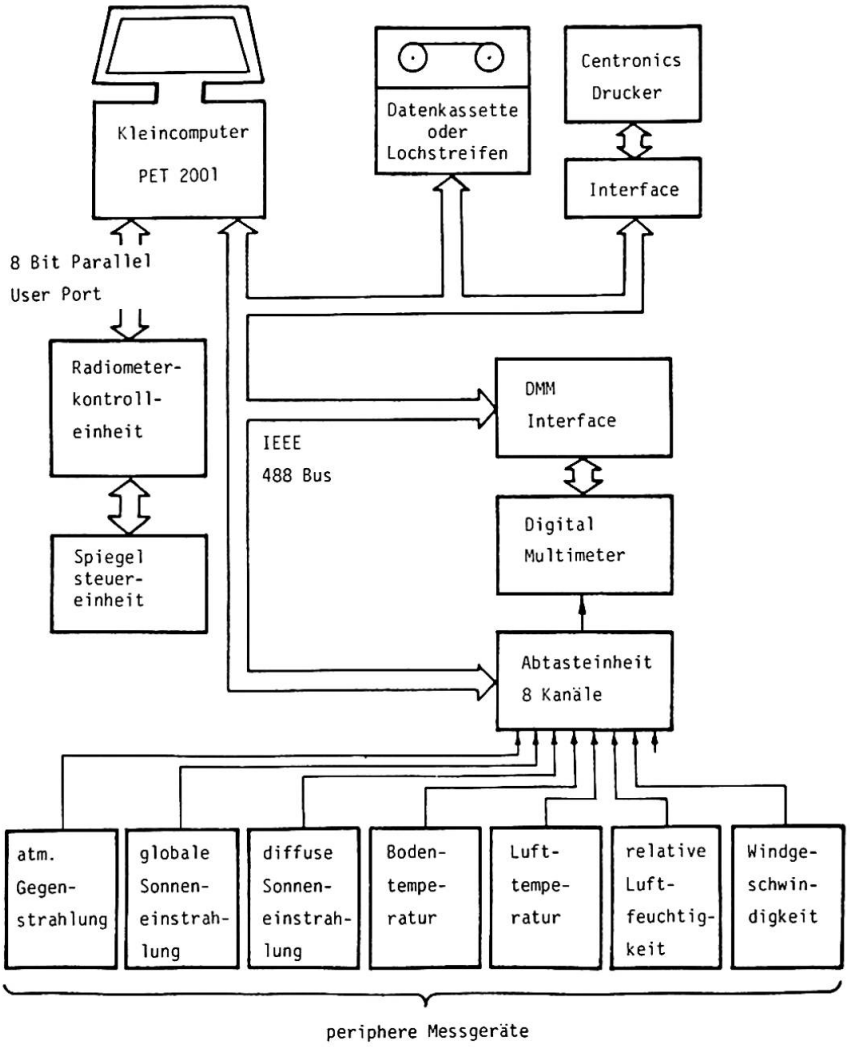


Abbildung 3: Blockdiagramm der automatischen Wetterstation

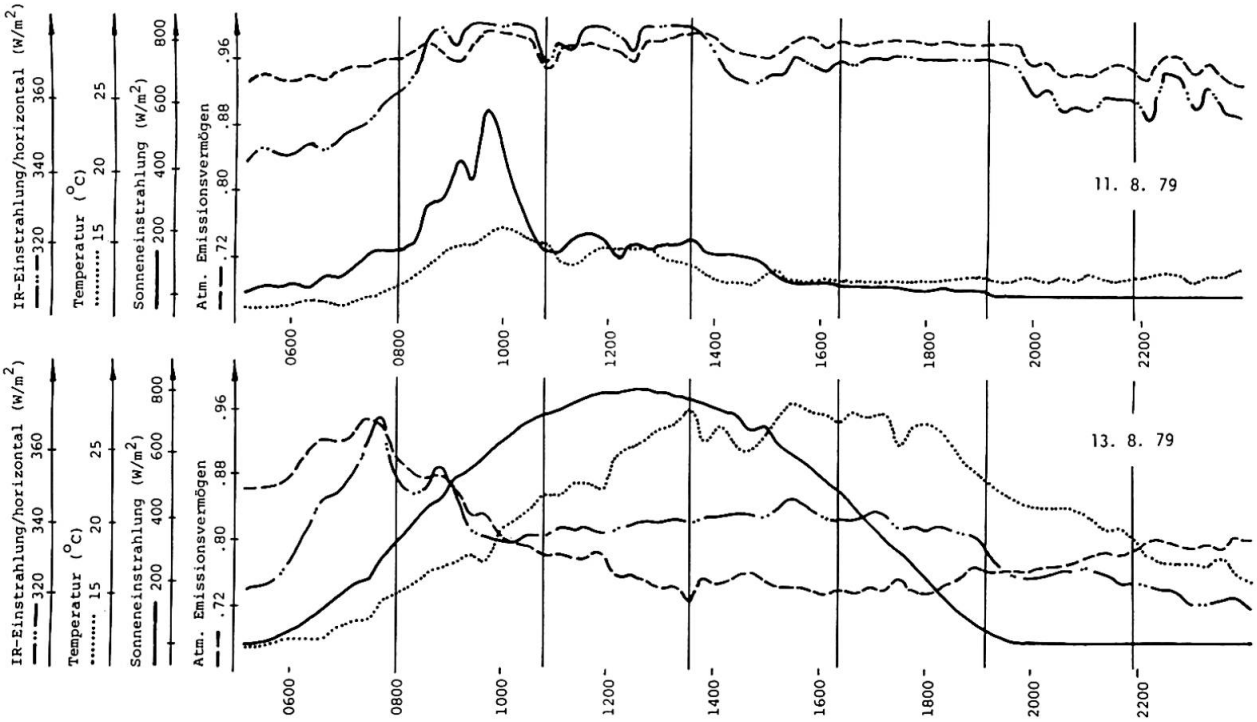


Abbildung 4: Auszug aus Datenstreifen der autom. Wetterstation in Zürich für einen klaren (untere Kurve) rsp. bewölkten (obere Kurve) Sommertag

Aus den in Abbildung 4 aufgezeichneten Daten zeigt sich deutlich ein Unterschied im Emissionsvermögen der Atmosphäre bei starker Besonnung (13.8.79) bzw. bei schwacher Sonnenintensität (11.8.79). Bei klarem Wetter erreicht die Sonneneinstrahlung ihr Maximum von 800 W/m2 kurz nach Mittag. Die Emissivität der Atmosphäre fällt aber mit zunehmender Tagestemperatur von ihrem Maximalwert 0.92 frühmorgens auf ein Minimum von 0.7 zum Zeitpunkt maximaler Lufttemperatur am frühen Nachmittag. Die Ursache dieses Verhaltens, insbesondere der Einfluss von Wassermehrfachmolekülen und deren Bindungsenergie auf die atm. Strahlungscharakteristiken, bilden gegenwärtig Ausgangspunkt zu weiteren Untersuchungen. Im Gegensatz dazu bleibt das atm. Emissionsvermögen bei stark bewölktem bis bedecktem Himmel nahezu konstant auf einem Wert von 0.95, d.h. mit zunehmender Bewölkung wird unsere Atmosphäre zu einem schwarzen Strahler.

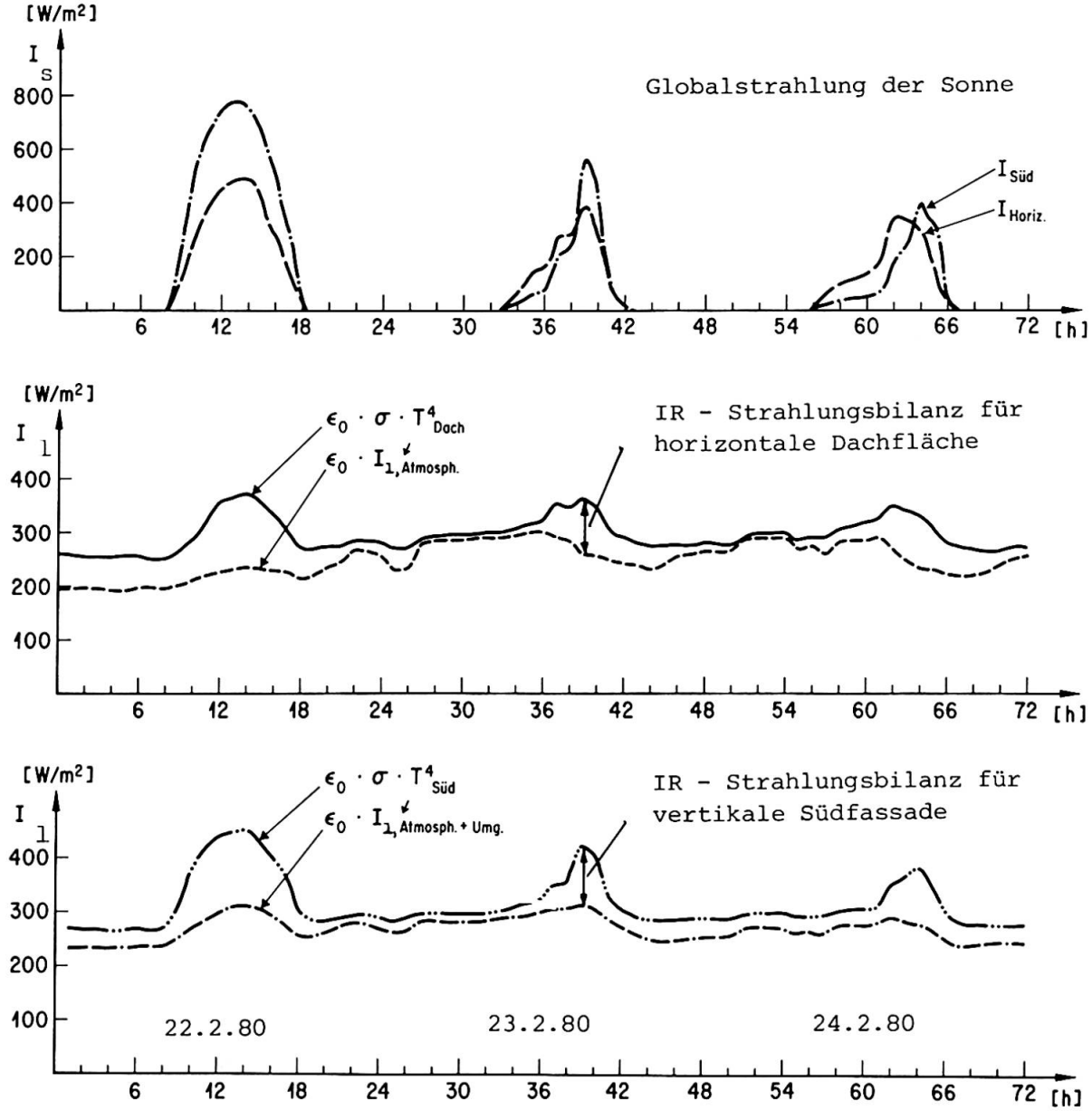


Abbildung 5: Messungen von typischen Strahlungstagesgängen im Winter (Messstation Maugwil (SG), 600 m über Meer, Schweiz)

2. TEIL: SPEKTRALE EIGENSCHAFTEN VON BAUMATERIALIEN UND DEREN EINFLUSS AUF DEN ENERGIEHAUSHALT VON GEBAEUDEN

R. Sagelsdorff, Th. Frank

2.1 Ermittlung der Transmissionsverluste

2.1.1 Wärmetransportvorgänge an der Gebäudehülle

Ueblicherweise werden die zwischen Gebäudehülle und Aussenluft stattfindenden Wärmetransporte mit Hilfe eines kombinierten Wärmeübergangskoeffizienten α_a ermittelt. Dies stellt eine grobe Näherung der wirklichen Verhältnisse dar und ist deshalb nur für Mittelwerts-Betrachtungen über grössere Zeiträume anwendbar, z.B. für stationäre Berechnungsverfahren anhand von Heizgradtag-Zahlen. Bei der Ermittlung des thermischen Verhaltens eines Gebäudes in Stundenschritten haben sich heute verschiedene Rechenansätze in Form einer fiktiven Sonnenlufttemperatur zur Berücksichtigung der Strahlungseinflüsse eingebürgert. Mehrere Autoren haben dabei auch Korrekturfaktoren für den langwelligen Strahlungsaustausch des Gebäudes mit seiner Umgebung eingeführt [6], [7], [8], [9].

Das nachfolgend verwendete Rechenmodell verzichtet bewusst auf die Definition einer fiktiven Strahlungslufttemperatur; es beruht auf einer expliziten Berechnung der in Abbildung 6 dargestellten Wärmeströme.

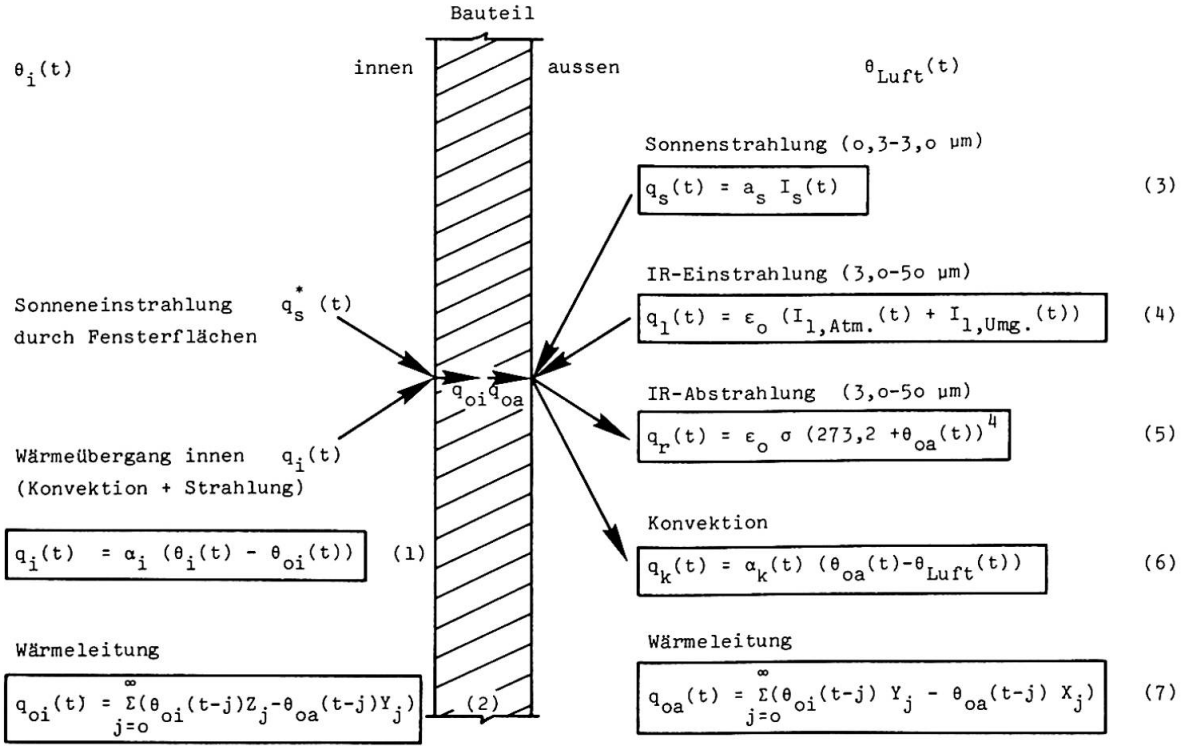


Abbildung 6: Darstellung der an der Gebäudehülle auftretenden Wärmeströme

Zu den einzelnen Formeln in Abbildung 6 gelten noch die folgenden Angaben:

- Wandinnenseite: Der Wärmeübergang an der Innenseite, Gleichung (1), wird mit Hilfe eines kombinierten Wärmeübergangskoeffizienten, α_i (Konvektion und Strahlung) ermittelt.

- Konvektion aussen: Beim konvektiven Uebergangskoeffizient α_k (t) gemäss Gleichung (6) können folgende zwei Anteile unterschieden werden:

$$\alpha_k(t) = \underbrace{\alpha_k(\Delta\theta, l)}_{\text{freie Konvektion}} + \underbrace{\alpha_k(V_w, l)}_{\text{erzwungene Konvektion}} \qquad (8)$$

$\Delta\theta$: Temperaturdifferenz Oberfläche zu Umgebungsluft
l : charakteristische Länge
V_w: Windgeschwindigkeit

Die im Modell verwendeten Zahlenwerte stützen sich vorwiegend auf Angaben in der Literatur [10], [11].

- IR-Strahlungsaustausch der Aussenflächen: Die IR-Ein- bzw. Abstrahlungsgrössen (4) und (5) können nach Beckmann [12] wie folgt in einer resultierenden Strahlungsverlustgrösse zusammengefasst werden:

$$q_l(t) - q_r(t) = \sum_{j=1}^{N} \varepsilon_o \varepsilon_j \sigma \hat{F}_{oj} (T_j(t)^4 - T_o(t)^4) \qquad (9)$$

N: Anzahl Umgebungsflächen
$\hat{F}_{oj}$: Gesamtformfaktor zwischen der Gebäudefläche A_o und der Umgebungsfläche A_j
ε_o, ε_j: Emissionszahlen der Gebäude- und Umgebungsflächen
T_o, T_j: Absolute Temperaturen der Oberflächen A_o und A_j

- Wärmetransport durch Leitung: Der instationäre Wärmedurchgang durch die Baukonstruktion wird nach der Methode des "Response-Factors" berechnet [13].

2.1.2 Möglichkeiten zur Beeinflussung der äusseren Wärmeübergangsvorgänge

Aus den in Abbildung 6 dargestellten Wärmeströmen an den Aussenflächen lassen sich folgende Anforderungen an eine ideale Gebäudeoberfläche für winterliche Verhältnisse ableiten:

- Hohes Absorptionsvermögen a_s im kurzwelligen Spektralbereich zur Erzielung eines möglichst grossen Sonnenenergiegewinnes.
- Kleines Emissionsvermögen ε_o im langwelligen Bereich zur Reduktion der Strahlungsverluste. Aus Gleichung (9) geht im weiteren hervor, dass die IR-Strahlungsverluste auch mit gestalterischen Massnahmen an der Gebäudehülle selbst vermindert werden können: Die Gesamtformfaktoren zwischen den einzelnen Gebäudeflächen und den kalten Umgebungsflächen (insbesondere der Zenitbereich des Himmels) sollten möglichst klein sein.
- Reduktion der Konvektionsverluste: Schutz der Oberflächen vor direkter Windeinwirkung (Reduktion des erzwungenen Konvektionsanteils) und Verwendung von glatten Oberflächen, d.h. mit geringer Rauhigkeit (Reduktion der freien Konvektion).

2.2 Spektrale Oberflächeneigenschaften von Baumaterialien

Für eine Serie von typischen Baumaterialien wurden im Labor die spektralen Oberflächeneigenschaften ausgemessen. Folgende Strahlungskennwerte wurden einzeln ermittelt und in Gesamtwerte umgerechnet:

- Spiegelnde Reflexion im kurzwelligen Bereich (0,25 - 2,5 µm) } ρ (6000 K)
- Diffuse Reflexion im kurzwelligen Bereich (0,25 - 2,5 µm) } a_s (6000 K)
- Spiegelnde Reflexion im IR-Bereich (2,5 - 25 µm) } ε_o (300 K)
- Diffuse Reflexion im IR-Bereich (2,5 - 25 µm) } ε_o (300 K)

In Tabelle 1 sind die Reflexionskurven sowie die rechnerisch ermittelten Strahlungskennwerte zusammengestellt.

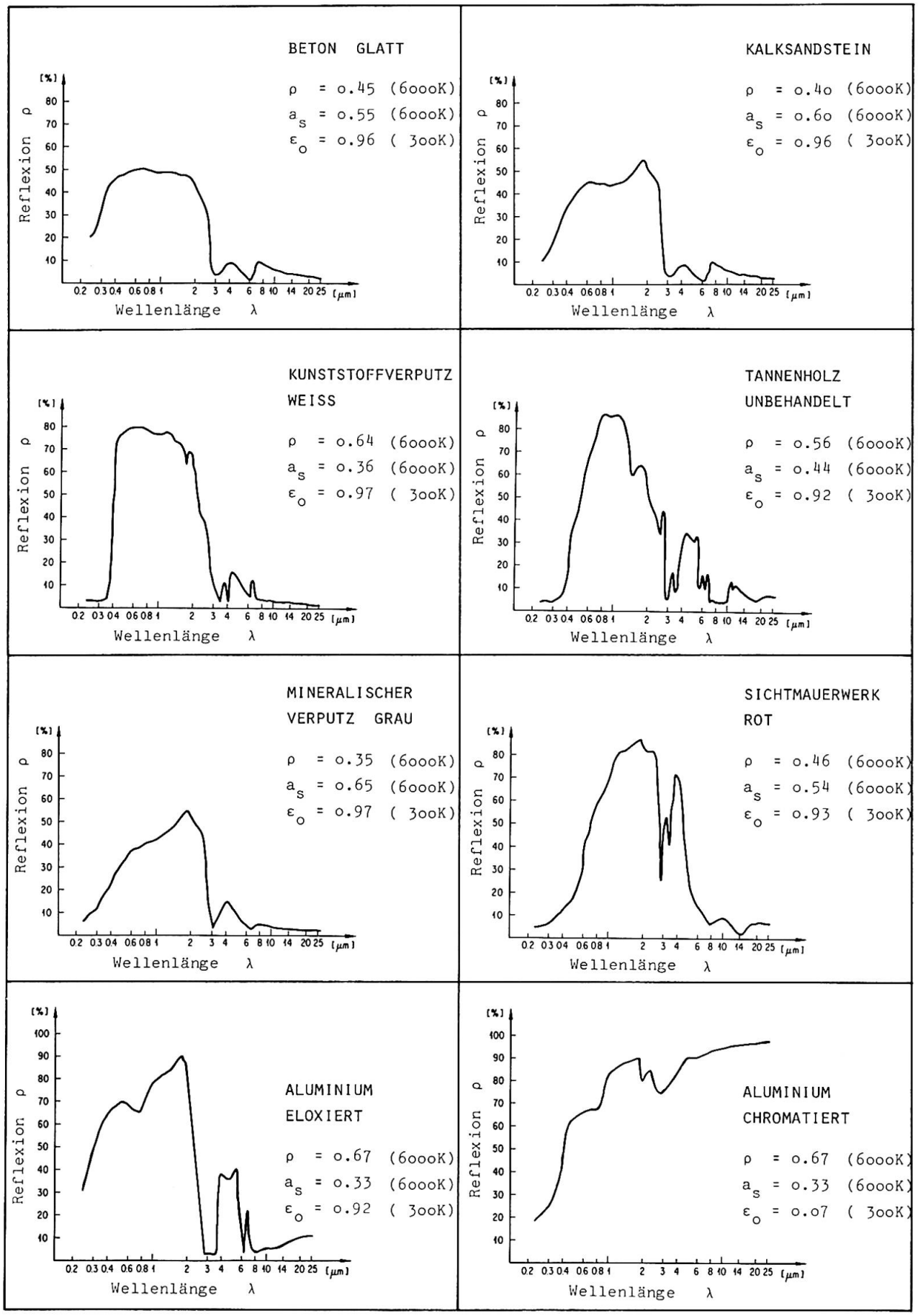


Tabelle 1: Spektrale Oberflächeneigenschaften von Baumaterialien

2.3 Simulationsmodell zur Ermittlung des Wärmebedarfes von Gebäuden

2.3.1 Randbedingungen

Bei allen Modellrechnungen haben die Randbedingungen einen starken Einfluss auf die Ergebnisse. Sie sind deshalb besonders sorgfältig festzulegen und auf die Praxis abzustimmen. Für die vorliegende Arbeit gelten folgende Bedingungen:

- Thermische Modellabgrenzung: Das Gebäude wird durch seine Gebäudehülle allein, die beliebig aus opaken und transparenten Bauteilen zusammengesetzt werden kann, beschrieben. Eine Unterteilung des Gebäudeinnern in Einzelräume findet nicht statt. Hingegen kann die Speichermasse der Innenbauteile näherungsweise mit in die Simulation einbezogen werden, indem sie als gleichmässig auf die Bodenfläche verteilt angenommen wird. Interne Lasten und Luftwechselraten können in Stundenschritten variiert werden. Die durch Fensterflächen eingestrahlte Sonnenenergie q_s* (vgl. Abbildung 6) wird nach folgendem Ansatz aufgeteilt:
  50 % der eindringenden Strahlung verteilt auf die Bodenfläche.
  50 % der eindringenden Strahlung verteilt auf die Wandflächen.
  Die Wärmespeicherfähigkeit der Innenluft wird vernachlässigt.
- Klimadaten: Das Rechenprogramm benötigt neben der Aussenlufttemperatur, der Windgeschwindigkeit und Windrichtung sämtliche relevanten Strahlungsdaten (kurz- und langwellig) gemäss Abbildung 6.
- Bilanzierung: Ueber jede Gebäudeoberfläche, aussen und innen, wird die Wärmestrombilanzgleichung aufgestellt. Der Strahlungsterm 4. Ordnung wird dabei mit einer Taylor-Reihenentwicklung linearisiert. Ueber das gesamte Innenraumvolumen wird schlussendlich die Raumbilanz aufgestellt und das resultierende Gleichungssystem durch Matrix-Inversion aufgelöst.
- Heizungsregelung: Die Heizleistung wird unter Einhaltung von vorgegebenen stündlichen Innenlufttemperaturgrenzen θ_{imax} und θ_{imin} ermittelt. Es wird also ein Schwankungsbereich $\Delta\theta_i = \theta_{imax} - \theta_{imin}$ zugelassen; dadurch können beliebige Innentemperaturverhältnisse (z.B. Nachtabsenkungen etc.) berücksichtigt werden.
- Berechnungsgrössen: Mit Hilfe des Simulationsprogrammes können sämtliche Oberflächentemperaturen, die Wärmeströme an den Oberflächen, die Raumlufttemperatur und die Heizleistung ermittelt werden. Die Gesamtwärmeverluste sowie die Wärmegewinne werden zudem in einer Detailbilanz nach ihren Anteilen analysiert. Eine ausführliche Beschreibung des Simulationsprogrammes kann dem Bericht [14] entnommen werden.

2.3.2 Variantenstudie über den Einfluss der spektralen Oberflächeneigenschaften auf den Gesamtenergiebedarf eines Gebäudes

Die nachfolgenden Vergleichsberechnungen an einem Ein- und Mehrfamilienhaus sollen einerseits den Einfluss der spektralen Oberflächeneigenschaften als auch der Wandkonstruktionsarten auf den Wärmebedarf eines Gebäudes aufzeigen. Für die Klimadaten wurde ein Datensatz aus vorhandenen Messungen der Winterperiode 79/80 verwendet; die gewählte Heizperiode Oktober-April wurde dabei so zusammengestellt, dass die monatlichen Durchschnittswerte bezüglich Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung annähernd den langjährigen Mittelwerten für Zürich entsprechen.

- Gebäudespezifikationen: Tabelle 3 gibt einen Ueberblick der verwendeten Gebäudedaten. Sie wurden aufgrund statistischer Angaben über schweizerische Wohnbauten ausgewählt (EFH=Einfamilienhaus, MFH=Mehrfamilienhaus). Alle Varianten weisen dieselben Dach- und Bodenkonstruktionen gemäss Tabelle 2 auf. Bei den Wandkonstruktionen wurden sowohl bezüglich Speichermasse als auch Wärmedämmung verschiedene Kombinationen zusammengestellt. Die Isolationsstärken der schweren Konstruktion (Wand 1) und der leichten Konstruktion (Wand 3) wurden so ge-

wählt, dass beide genau dieselben Wärmedämmeigenschaften erreichen. Der Wärmedurchgangskoeffizient der Fensterflächen beträgt $k = 3{,}1\ W/m^2K$, die Gesamtstrahlungsdurchlasszahl $\tau = 0{,}4$.

- Heizungsregelung: Für alle Rechenvarianten wurde dasselbe Heizungsregime verwendet: Tagesbetrieb von 7h - 22h bei $\theta_{imax} = 21^oC$ und $\theta_{imin} = 19^oC$. Nachts von 22h - 6h wurde ein freier Temperaturverlauf ohne Heizungsleistung bis zu einer unteren Grenze von $\theta_{imin} = 15^oC$ zugelassen. Start der Heizungsanlage um 6h mit einer von der Aussenlufttemperatur abhängigen Maximalleistung.

BAUTEIL	KONSTRUKTION	d cm	λ W/mK	ρ kg/m³	c Wh/kgK	Λ W/m²K	CR	HCR h
DACH	Kies	6	0,70	1800	0,22			
	Wärmedämmung	8	0,04	30	0,39	0,46	0,85	8
	Beton	20	1,80	2400	0,30			
BODEN	Unterlagsboden	5	1,50	2100	0,30			
	Wärmedämmung	4	0,04	30	0,39	0,47	0,75	6
	Beton	15	1,80	2400	0,30			
1 SCHWERE WAND	Verputz	1	0,70	1400	0,26			
	Mauerwerk	15	0,44	1100	0,26			
	Wärmedämmung	4,7	0,04	100	0,39	0,54	0,85	15
	Mauerwerk	12,5	0,44	1100	0,26			
	Verputz	2	0,87	1800	0,30			
2.1 SICHT-MAUERWERK	Verputz	1	0,70	1400	0,26			
	Mauerwerk	14	0,47	1200	0,26			
	Wärmedämmung	2	0,04	30	0,39	0,80	0,84	13
	Luftspalt	2	1/Λ =	0,17				
	Mauerwerk	14	0,52	1400	0,26			
2.2 SICHT-MAUERWERK	Verputz	1	0,70	1400	0,26			
	Mauerwerk	14	0,47	1200	0,26			
	Wärmedämmung	8	0,04	30	0,39	0,36	0,84	15
	Luftspalt	2	1/Λ =	0,17				
	Mauerwerk	14	0,52	1400	0,26			
3 LEICHTE WAND	Holzspanplatte	1,8	0,17	800	0,58			
	Wärmedämmung	5,8	0,04	100	0,39	0,54	0,21	5
	Luftspalt	2	1/Λ =	0,17				
	Holzspanplatte	1,8	0,17	800	0,58			
4 HOMOGENE WAND	Verputz	1	0,70	1400	0,26			
	Gasbeton	30,5	0,17	600	0,44	0,54	0,94	23
	Verputz	2	0,87	1800	0,26			

Tabelle 2: Aufbau der Wand-, Dach- und Bodenkonstruktionen.
CR und HCR sind Kennwerte aus der "Response-Factor" Theorie (vgl. [13]): CR: "Common Ratio"
HCR: Anzahl Stunden bis "Common Ratio" erreicht.

HAUS-TYP	VOLUMEN V [m³]	OBER-FLAECHE A [m²]	A/V [m⁻¹]	BODEN-FLAECHE [m²]	DACH-FLAECHE [m²]	WAND-FLAECHE [m²]	FENSTER-FLAECHE [m²]	FENSTER-ANTEIL [%]	LUFT-WECHSEL n_l [h⁻¹]	INTERNE LASTEN $Q_{int.}$ [W]
E F H	48o	376	o,78	8o	8o	Nord 56 Ost 4o Süd 44 West 4o	Nord 4 Ost 8 Süd 16 West 8	16,7	o,5	4oo
M F H	5775	215o	o,37	385	385	Nord 425 Ost 125 Süd 425 West 125	Nord 1oo Ost 4o Süd 1oo West 4o	2o,3	o,7	42oo

Tabelle 3: Gebäudespezifikationen für die Variantenstudie

- Spektrale Oberflächeneigenschaften: Die Eigenschaften der gesamten opaken Aussenhülle (exkl. Bodenfläche) des Gebäudes wurden mit den in Tabelle 1 ermittelten Strahlungskennwerten variiert. Zur Gegenüberstellung wurde zudem eine im IR-Bereich verspiegelte Oberfläche (ε_o = 0,1o) berücksichtigt.

HAUSTYP	OBERFLAECHEN-EIGENSCHAFTEN		W A N D K O N S T R U K T I O N E N				
	a_s	ε_o	Wand 1 k=o.5o W/m²K (schwer)	Wand 2.1 k=o.7o W/m²K (schwer)	Wand 2.2 k=o.34 W/m²K (schwer)	Wand 3 k=o.5o W/m²K (leicht)	Wand 4 k=o.5o W/m²K (homogen)
E F H	o,36	o,97	2o,1 (18,9)	x	x	2o,2 (18,5)	2o,2 (18,6)
	o,54	o,93	x	22,2 (18,8)	17,5 (19,o)	x	x
	o,65	o,97	19,1 (19,o)	x	x	19,3 (18,5)	x
	o,65	o,1o	15,9 (19,2)	x	x	15,9 (18,8)	x
M F H	o,36	o,97	193,4 (18,7)	x	x	x	197,5 (18,6)
	o,54	o,93	x	2o7,2 (18,7)	179,7 (18,8)	x	x
	o,65	o,97	189,3 (18,7)	x	x	x	x
	o,65	o,1o	168,7 (18,8)	x	x	x	x

Tabelle 4: Zusammenstellung des Heizenergiebedarfes über eine Heizperiode (Oktober-April) ohne Berücksichtigung eines Wirkungsgrades der Heizungsanlage in 10^3·KWh. In Klammern die über die Gesamtperiode gemittelte Raumlufttemperatur.

Interpretation der Rechenresultate:

- Die Masse der Aussenwand hat nur einen geringen Einfluss auf den Gesamtwärmebedarf.
- Die Verbesserung des k-Wertes der Aussenwände von 0,70 auf 0,34 W/m^2K brachte eine Einsparung von 21 % beim Einfamilienhaus und 13 % beim Mehrfamilienhaus.
- Ein hohes Absorptionsvermögen im sichtbaren Wellenlängenbereich (a_S = 0,65 gegenüber a_S = 0,36) allein verbesserte die Wärmebilanz des EFH um 5 %, diejenige des MFH um 2 %.
- Zusammen mit der Reduktion des IR-Emissionsvermögens der Gebäudehülle auf ε_O = 0,10 können Energieeinsparungen in der Grössenordnung von 21 % bei EFH und 13 % bei MFH erzielt werden.
- Die Ausnutzung der Sonneneinstrahlung ist bei gleichbleibendem Heizungsregime allein vom Absorptionsvermögen und den Wärmeübergangsbedingungen an der Gebäudehülle abhängig.

2.4 Messungen an Versuchsbauten

2.4.1 Messanordnung

Um die Richtigkeit der verwendeten Rechenmodelle zur Erfassung der Strahlungsvorgänge an der Gebäudehülle überprüfen zu können, wurden zwei in ihren Infrarot-Eigenschaften unterschiedlichen Messkabinen (Breite/Höhe/Länge = 3,0/3,0/4,5 m) aufgestellt. Diese weisen eine fensterlose, in Leichtbauweise erstellte Aussenhülle mit identischen Wärmedämmeigenschaften (k-Wert = 0,50 W/m^2K) auf. Sie unterscheiden sich allein in ihrem IR-Reflexionsverhalten: Die erste Kabine ist aus eloxierten Aluminiumpanels aufgebaut (ε_O = 0,92), die zweite aus chromatiertem Aluminium (ε_O = 0,07) (vgl. Tabelle 1). Im kurzwelligen Bereich weisen beide Oberflächen ein Absorptionsvermögen von a_S = 0,33 auf. Zusammen mit einer Wetterstation sind beide Kabinen an einer 140-Kanal Datenerfassungsanlage angeschlossen. Ermittelt werden sowohl die zur Aufrechterhaltung eines konstanten Innenklimas erforderlichen Heizleistungen als auch sämtliche Oberflächen- und Lufttemperaturen. Die Datenerfassungsanlage übernimmt gleichzeitig die Heizungsregelung der beiden Kabinen.

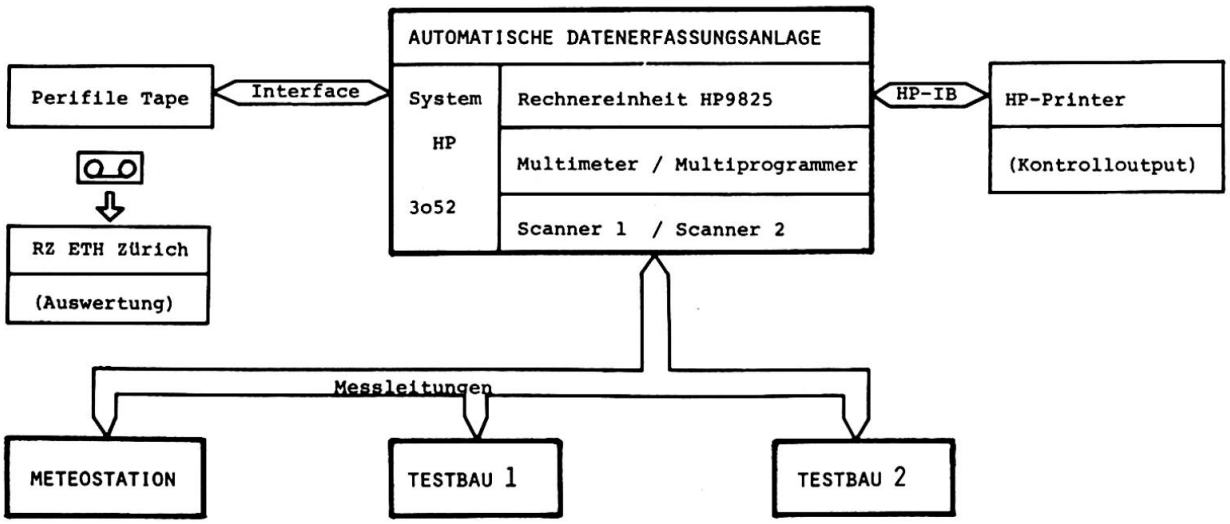


Abbildung 7: Messanordnung zur Bestimmung des thermischen Verhaltens von zwei Testbauten.

2.4.2 Messresultate

Erste Messserien wurden im Februar 1980 durchgeführt. Die Temperaturverläufe der beiden Dachoberflächen über eine typische 3-Tagesperiode sind in Abbildung 8 dargestellt:

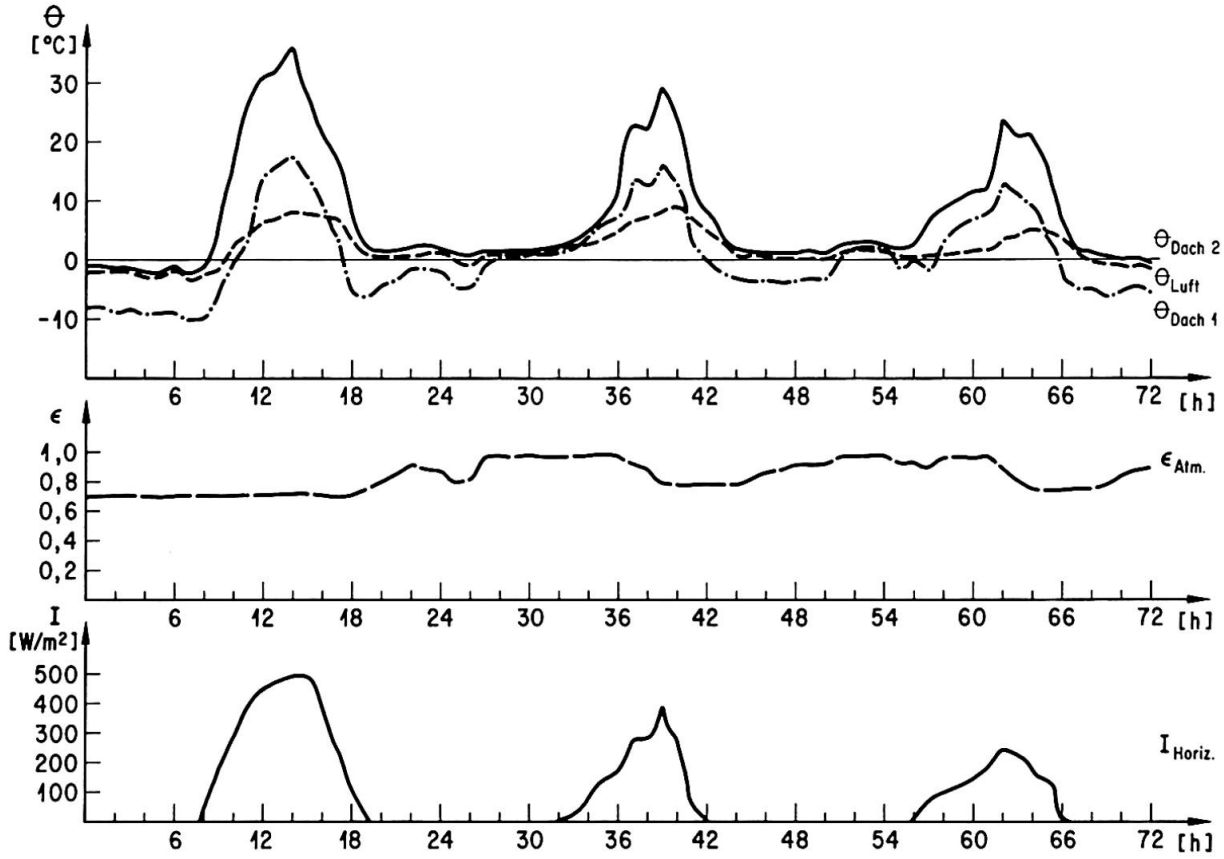


Abbildung 8: Zusammenstellung der Messergebnisse
- Temperaturverläufe $\theta_{Dach\ 1}$ (IR-schwarz), $\theta_{Dach\ 2}$ (IR-reflektierend), θ_{Luft}
- Emissivität der Atmosphäre $\varepsilon_{Atm} = \frac{I_{l,atm}}{\sigma T_L^4}$
- Sonneneinstrahlung I_{Horiz}

Bei klarem Himmel, d.h. bei kleinem ε_{Atm}, unterkühlt sich die IR-schwarze Dachfläche 1 erheblich; ihre Oberflächentemperatur sinkt bis zu 9°C unter die Aussenlufttemperatur ab. Die IR-reflektierende Dachfläche 2 hingegen weist über die ganze Beobachtungsperiode eine über der Aussenluft liegende Temperatur auf. Bei den IR-schwarzen Wandoberflächen wurde eine Unterkühlung von 2,5°C beobachtet. Bei Sonneneinstrahlung erwärmt sich die IR-reflektierende Oberfläche 2 (bei identischem Absorptionskoeffizient a_S) wesentlich stärker, bedingt durch die starke Reduktion der Strahlungsverluste. Die Messungen zeigen deutlich, dass die Wirkung der IR-Verspiegelung für winterliche Verhältnisse positiv ausfällt, im Sommer jedoch zu Kühllastproblemen führen muss. Die ideale Gebäudehülle sollte deshalb zwei Betriebsarten zulassen, um allen wärmetechnischen Anforderungen gerecht zu werden (winterlicher und sommerlicher Wärmeschutz).

2.4.3 Ueberprüfung des Rechenmodells

Mit Hilfe von Einzelmessungen wurde der konvektive Wärmeübergangskoeffizient an Wand- und Dachflächen ermittelt. Die Rechenergebnisse des Simulationsmodelles sind in Abbildung 9 den gemessenen Werten gegenübergestellt.

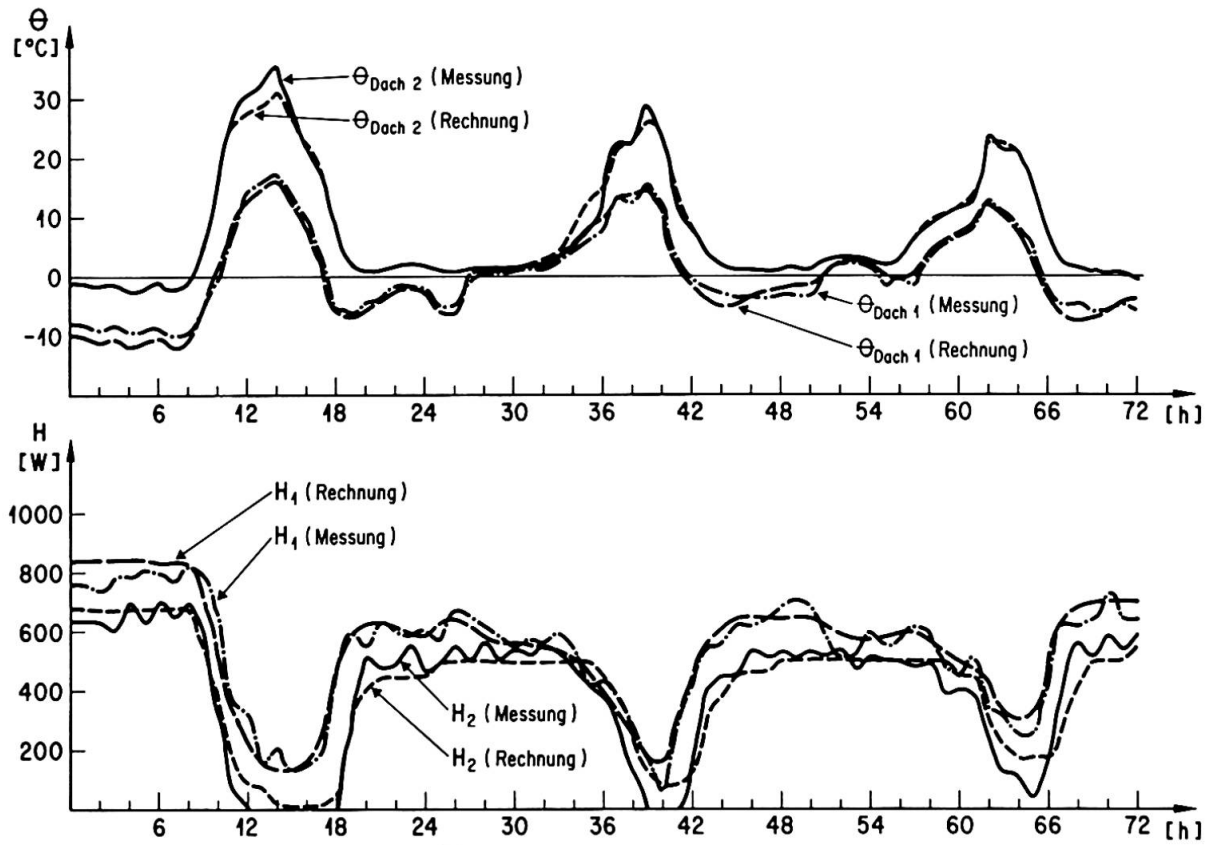


Abbildung 9: Korrelationsverhalten zwischen Messungen und Rechenmodell

Die berechneten Temperaturverläufe zeigen generell eine gute Uebereinstimmung. Die Unstimmigkeiten bei den Temperaturspitzen sind immer noch auf Unzulänglichkeiten im Rechenansatz zur Berücksichtigung des konvektiven Wärmetransportes zurückzuführen (die Temperaturabhängigkeit von α_k wurde nur stark vereinfacht berücksichtigt). Die ermittelten Heizleistungen weisen eine zufriedenstellende Genauigkeit auf. Das IR-verspiegelte Testgebäude erzielte über die 3 Tagesperiode eine Heizenergieeinsparung von 25 % gegenüber der IR-schwarzen Testkabine. Diese Resultate lassen sich nicht direkt auf die Baupraxis übertragen, da die heute üblichen Baumaterialien rauhere Oberflächen und dadurch auch wesentlich höhere konvektive Wärmeübergangskoeffizienten aufweisen.

2.5 Schlussfolgerungen

Die vorliegenden Rechen- und Messergebnisse zeigen, dass die Beeinflussung der Strahlungsvorgänge an der Gebäudehülle, insbesondere des IR-Anteiles, einen nicht zu vernachlässigenden Aspekt bei der Verbesserung des Wärmehaushaltes eines Gebäudes darstellen kann. Die Gebäudehülle muss dabei allen Anforderungen, sowohl bezüglich winterlichem als auch sommerlichem Wärmeschutz genügen. Einer guten Ausnutzung der Sonneneinstrahlung im Winter durch Verwendung von selektiven Oberflächenschichten hat im Sommer ein ausreichender Sonnenschutz gegenüberzustehen. Dies bedeutet, dass eine energiegerechte Fassade in Zukunft ein aktives System darstellen muss, um den wechselnden Randbedingungen (Sommer-Winterbetrieb, Tag- Nachtbetrieb) gerecht zu werden. Die weiteren Arbeiten im Rahmen des vorliegenden Projektes werden vermehrt auf diese Problemstellung ausgerichtet sein.

Literatur:

[1] Kälin, R. und Kneubühl, F.: Die Verminderung des Wärmeverbrauchs von Gebäuden durch Infrarotverspiegelung von Fenstern, Fassaden und Dächern. Gesundheitsingenieur 98 (1977), 244

[2] Finger, G. et al: Verbesserung des Energiehaushalts von Gebäuden durch Verminderung der Wärmeabstrahlung von Fenstern und Fassaden. Schweizer Ingenieur und Architekt 17 (1979), 287

[3] Kneubühl, F.K. et al.: Thermal radiation and buildings envelopes. Proceedings 2nd Int. CIB Symposium on energy conservation in the built environment, Copenhagen, Vol. 2 (1979), 173

[4] Martin, M. Berdal, P.: Passive Cooling. Proceedings of the National Passive Solar Conf., Philadelphia (1978)

[5] Lazzarin, R.: On Natural Radiative Cooling, Termotechnika 6 (1979), 345

[6] Parmelee, G., Aubele, W.W.: Radiant Energy Emission of Atmosphere and Ground. ASHRAE Transactions 1442 (1952)

[7] Bliss, R.: Atmospheric Radiation Near the Surface of the Ground: A Summary for Engineers. Solar Energy 513 (1961)

[8] Cole, R.J.: The Longwave Radiative Environment around Buildings. Building and Environment 11 (1976)

[9] Kimura, K.: Scientific Basis of Air Conditioning. Applied Science Publishers (1977)

[10] Goldstein, R.J.: Application of aerial Infrared Thermography to the Measurement of Building Heat Loss. ASHRAE Transactions 2482 (1978)

[11] Ito, N. et al.: A Field Experiment Study on the Convective Heat Transfer Coefficient on Exterior Surfaces of a Building. ASHRAE Transactions 2225 (1972)

[12] Beckmann, W.A.: The Solution of Heat Transfer Problems on a Digital Computer. Solar Energy 13 (1971)

[13] Stephenson, D.G., Mitalas, G.P.: Calculation of Heat Conduction Transfer Functions for Multilayer Slabs. ASHRAE Transactions 2108 (1969)

[14] Frank, Th., Sagelsdorff, R.: Simulationsmodell zur Ermittlung des thermischen Verhaltens eines Raumes. EMPA-Bericht (August 1980)