

Einige experimentelle Beobachtungen über die Wärmeübergangszahlen der Jalousien klimatisierter Räume

Tatsuaki Tanaka

日射を受ける室内側ブラインドの熱伝達率測定

田中辰明

概要

空調されている部屋の、日射のあたるガラス窓の内側ブラインドの熱伝達率を、ブラインドに通電することによって、その加熱量、測定された温度などより実験的に求めた。ブラインドの電気加熱量は仮定した日射量より、直達日射のガラス窓への入射角度別に電算機で計算された。この実験研究は筆者がベルリン工科大学ヘルマンリーチェル研究所に留学中、1973年5月から9月の間に所長エスドルン教授指導のもとに行なったものである。

Kurzfassung

Eine der wichtigsten Aufgaben bei der Planung einer Klimaanlage ist die Bestimmung der Heiz- und Kühllast. Für die Kühllastberechnung war der Sonnenschutz lange Zeit ein ungelöstes Problem. Die Wärmeübergangszahlen von Jalousien wurden in dieser Arbeit experimentell ermittelt. Die experimentellen Ergebnisse dieser Arbeit entstanden im Zeitraum vom Anfang Mai bis Ende September 1973 im Prüfraum 4 des Hermann Rietschel Institutes der TU Berlin unter der Leitung von Herrn Professor Dr.-Ing. Esdorn.

1. EINLEITUNG

Eine der wichtigsten Aufgaben bei der Planung einer Klimaanlage ist die Bestimmung der Heiz- und Kühllast. Für die Kühllastberechnung war der Sonnenschutz lange Zeit ein ungelöstes Problem. So wird bei Verwendung z. B. einer Innenjalousie die Strahlungsenergie der Sonne von der Jalousie aufgenommen, und da die Jalousie kein Wärmespeichervermögen hat, sofort wieder durch Konvektion an die Raumluft und Strahlung an die Umschließungsflächen abgegeben. Die Kenntnis des thermischen Verhaltens klimatisierter Räume, d.h. des Wärmeübergangs durch Strahlung und Konvektion zwischen Jalousie, Innenwänden und Raumluft ist notwendig, um die Heiz- und Kühllast derartiger Räume zu berechnen. Die Wärmeübergangszahlen von Jalousien wurden in dieser Arbeit experimentell ermittelt.

2. THEORETISCHE GRUNDLAGEN UND BERECHNUNGEN

2.1. Bestimmung der aufgeprägten Heizleistung von Glasscheibe und Jalousie

Um die pro Zeiteinheit von einer Glasscheibe oder Jalousie an den Raum abgegebene Wärmeenergie (Heizleistung der Glasscheibe, der Jalousie) zu bestimmen, ist die Berechnung ihrer Wärmeabsorptionsindizes notwendig.

Die von einer Glasscheibe absorbierte Wärmeenergie ist proportional dem durch Absorption verursachten Intensitätsverlust der Sonnenstrahlung. Gleiches gilt für die reflektierte und durchgelassene Strahlung.

Durch Normierung der Intensität der einfallenden Sonnenstrahlung auf den Wert 1 erhält man die Gleichung

$$R + A + T = 1 \tag{1}$$

- R: Intensität der reflektierten Strahlung
- A: Intensität der absorbierten Strahlung
- T: Intensität der durchgelassenen Strahlung

2.2.1. Einfachfenster

Die Berechnung der einzelnen Intensitäten erfolgte mit Hilfe des Snelliusschen Berechnungsgesetzes

$$\frac{\sin \theta}{\sin \theta'} = n \tag{2}$$

- θ : Einfallswinkel der Sonnenstrahlung
- θ' : Brechungswinkel
- n : Brechungsindex des Glases (z. B. Normalglas 1,52)

für das Einfachfenster nach folgendem Schema (Bild-1), wobei hier Oberflächenreflexionsindex r entsprechend dem Fresnelschen Gesetz ausgedrückt wird durch

$$r = \frac{1}{2} \left(\frac{\tan^2 (\theta - \theta')}{\tan^2 (\theta + \theta')} + \frac{\sin^2 (\theta - \theta')}{\sin^2 (\theta + \theta')} \right) \tag{3}$$

Die von der Glasscheibe zwischen den Punkten "A" und "B" absorbierte Intensität ist

$$(1 - r)a$$

und die auf den Punkt "B" fallende Intensität

$$(1 - r)(1 - a)$$

mit

$$a = 1 - \exp \left(-\frac{kd}{\cos \theta'} \right) \tag{4}$$

Die einfallende Strahlung wird durch das Einfachfenster wie in Bild-1 dargestellt zerlegt.

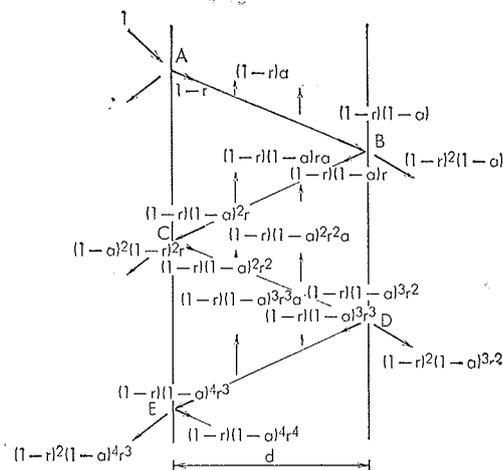


Bild-1

- k : Absorptionskoeffizient des Stoffes
(z. B. normales Fensterglas: 0,02/mm)
- d : Dicke des Glases (mm)

Durch Summation einander entsprechender Teilstrahlen erhält man den Absorptionsindex A , Reflexionsindex R , Transmissionsindex T der Glasscheibe

$$A = a(1 - r) \left(1 + r(1 - a) + r^2(1 - a)^2 + \dots \right) \\ = \frac{a(1 - r)}{1 - r(1 - a)} \quad (5)$$

$$R = r \left(1 + (1 - a)^2(1 - r)^2 \left(1 + (1 - a)^2 r^2 + \dots \right) \right) \\ = r \left(1 + \frac{(1 - a)^2(1 - r)^2}{1 - r^2(1 - a)^2} \right) \quad (6)$$

$$T = (1 - r)^2(1 - a) \left(1 + r^2(1 - a)^2 + \dots \right) \\ = \frac{(1 - r)^2(1 - a)}{1 - r^2(1 - a)^2} \quad (7)$$

2.2.2. Doppelfenster

Bei einem Doppelfenster wird die einfallende Strahlung wie in Bild-2 dargestellt zerlegt.

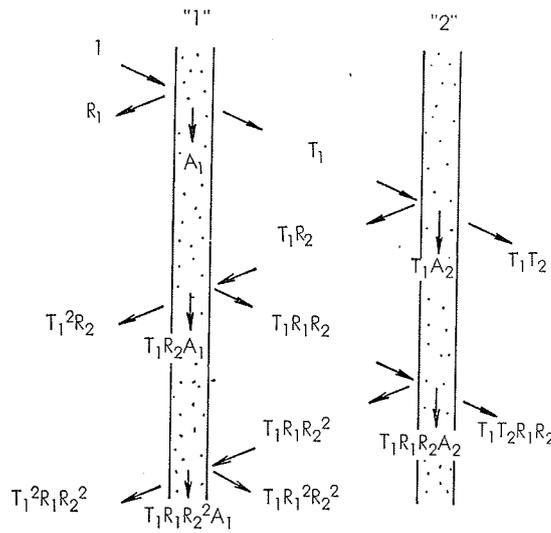


Bild-2

Für den Absorptionsindex, Reflexionsindex und Transmissionsindex der Doppelglasscheibe erhält man

T_{12} : Totaltransmissionsindex

$$T_{12} = T_1 T_2 + T_1 T_2 R_1 R_2 + T_1 T_2 R_1^2 R_2^2 + \dots \\ = \frac{T_1 T_2}{1 - R_1 R_2} \quad (8)$$

A_{12} : Totalabsorptionsindex

$$A_{12} = A_{12} + A_{12} \quad (9)$$

mit A_{12} Absorptionsindex der Glasscheibe "1"

$$A_{12} = A_1 \left(1 + \frac{T_1 R_2}{1 - R_1 R_2} \right) \quad (10)$$

$$A_{12} = \frac{T_1 A_2}{1 - R_1 R_2} \quad (11)$$

R_{12} : Totalreflexionsindex

$$R_{12} = R_1 + \frac{T_1^2 R_2}{1 - R_1 R_2} \quad (12)$$

2.2.3. Mehrschichtige Glasscheibe

Bei mehrschichtigen Glasscheiben muß man zuerst den totalen Absorptionsindex, totalen Reflexionsindex und totalen Transmissionsindex der beiden Glasscheiben "1" und "2" bestimmen.

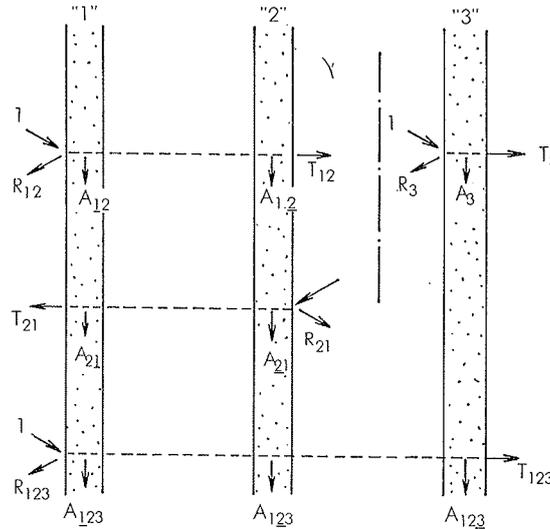


Bild-3

Gewöhnlich ist R_{12} nicht gleich R_{21}

$$R_{21} = R_2 + \frac{T_2^2 R_1}{1 - R_1 R_2} \quad (13)$$

T_{123} : Totaltransmissionsindex

$$T_{123} = \frac{T_{12} T_3}{1 - R_{21} R_3} \quad (14)$$

R_{123} : Totalreflexionsindex

$$R_{123} = R_{12} + \frac{T_{12}^2 R_3}{1 - R_{21} R_3} \quad (15)$$

2.3. Berechnung der Transmissions-Absorptions-und Reflexionsindizes

2.3.1. Einfachfenster mit Innenjalousie

Bei der Berechnung wurden für Glas die folgenden Absorptions-koeffizienten vorausgesetzt.

Wärmeabsorptionsglas (Farbe: Blau)	0,0106	1,52
Wärmeabsorptionsglas (Farbe: Grau)	0,0665	1,52
Wärmeabsorptionsglas (Farbe: Bronze)	0,0665	1,52
Normalglas	0.02	1,52

(Von der technischen Information der japanischen
Glasfirma Central Glas AG)

Als Absorptions-Transmissions- und Reflexionsindizes der Jalousie wurden für die Rechnung folgende Werte vorausgesetzt.

	Absorptionsindex	Transmissionsindex	Reflexionsindex
Jalousie (Dunkel)	0,72	0,01	0,27
Jalousie (Medium)	0,58	0,03	0,39
Jalousie (Hell)	0,37	0,12	0,57

(Nach: Carrier Handbook for Air Conditioning System Design,
Mc Graw-Hill 1965)

Bei der Berechnung der Transmissions-Absorptions- und Reflexionsindizes des Einfachfensters mit Innenjalousie wurden die Formeln für Doppelfenster verwendet. (Formeln 8-12)

An Stelle der Werte des zweiten Glases wurden die der Jalousie eingesetzt.

Die Berechnung wurde mit Hilfe des Computers CDC 6600 des Recheninstitutes der TU Berlin durchgeführt.

Die Rechnungsergebnisse wurden mit Hilfe des Unterprogramms "J-577" als Diagramme gezeichnet. Bilder 4-5 zeigen die Beispiele der Ergebnisse.

In den Diagrammen wurden der Totaltransmissionsindex mit dicken Linie, der Absorptionsindex der Glasscheibe mit mittleren Linie, der Absorptionsindex der Jalousie mit dünnen Linie, die Summe der Absorptionsindizes von Jalousie und Glasscheibe mit gebrochenen Linie, und der Totalreflexionsindex mit punktierten Linie gezeichnet.

Diese Indizes wurden für Einfallswinkel von 5 bis 90 Grad berechnet.

3. VERSUCHSAUFBAU UND MESSUNGEN

3.1. Temperaturverteilung eines klimatisierten Raumes und Meßanordnung

Die Wärmebilanz einer sonnendurchstrahlten Glasscheibe mit halb geöffneter Innenjalousie ist in Bild-6 dargestellt. Im Prüfraum wurde dieses Schema wie es Bilder 7 und 8 zeigen verwirklicht. Glasscheibe und die Jalousie wurden elektrisch geheizt.

Eine gewünschte Raumlufttemperatur konnte im Prüfraum mit Hilfe einer Klimaanlage konstant gehalten.

Die Raumgröße ist aus Bild-9 zu entnehmen.

Das Fenster war 170 cm breit und 140 cm hoch (Fläche 2,38 m²). Zwischen zwei Eternitplatten wurde eine Heizfolie gelegt und vor die Innenseite des Fensters eine 7 mm Dicke Glasscheibe gestellt. Fenster und sonnendurchstrahlte Glasscheibe waren in ihrer Größe identisch. Die Lamellen der Jalousie wurden mit Hilfe von Kontaktklammern und vier Drähten (ϕ 4 mm) aus Kupfer in Reihe geschaltet und elektrisch geheizt. Der gesamte elektrische Widerstand der Jalousie betrug 55 Ω (der der Cu-Drahte war vernachlässigbar) für die Lamellentemperatur 30°C. Die Jalousie hatte 72 Lamellen. Eine Lamelle war 25 mm breit und 1,8 m lang.

Bei der Messung wurde die Sonnenstrahlung mit 800 kcal/m²h und 400 kcal/m²h vorausgesetzt, für die Dicke der einzelnen Glasscheiben des Doppelfensters 10 mm.

Die Wärmedurchgangszahl der Glasscheibe beträgt nach Katalog der Glasfirma ca. 2,8 kcal/m²hgrad.

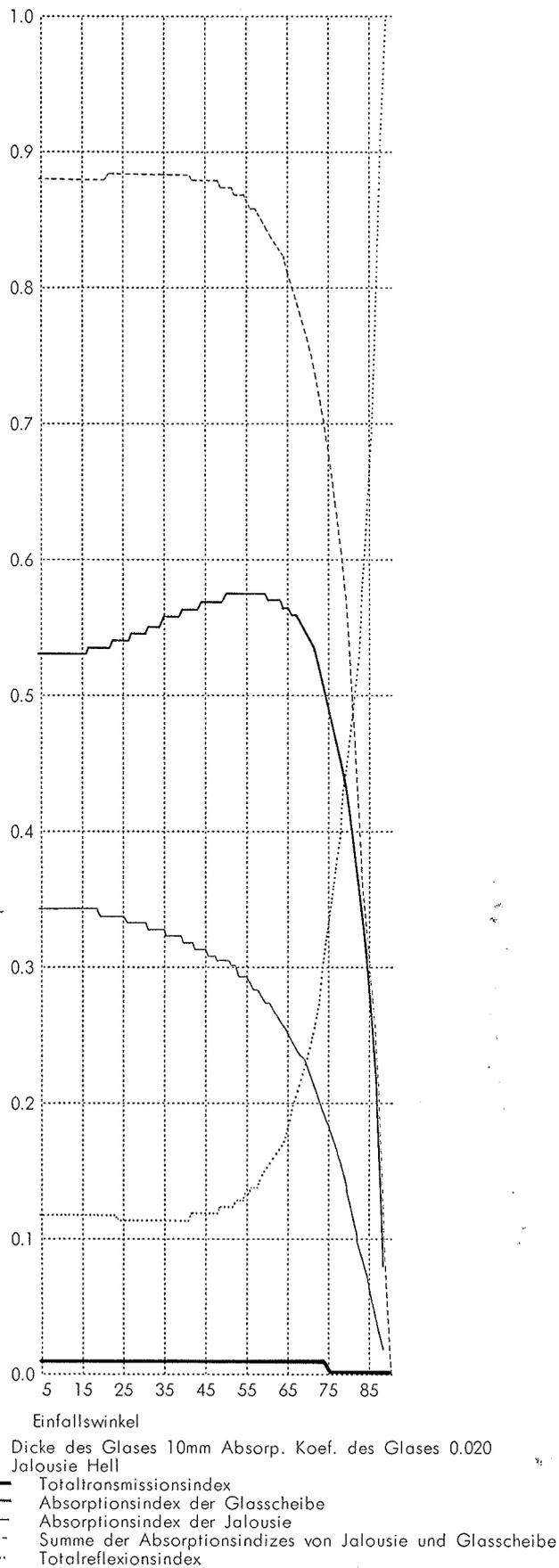


Bild-4

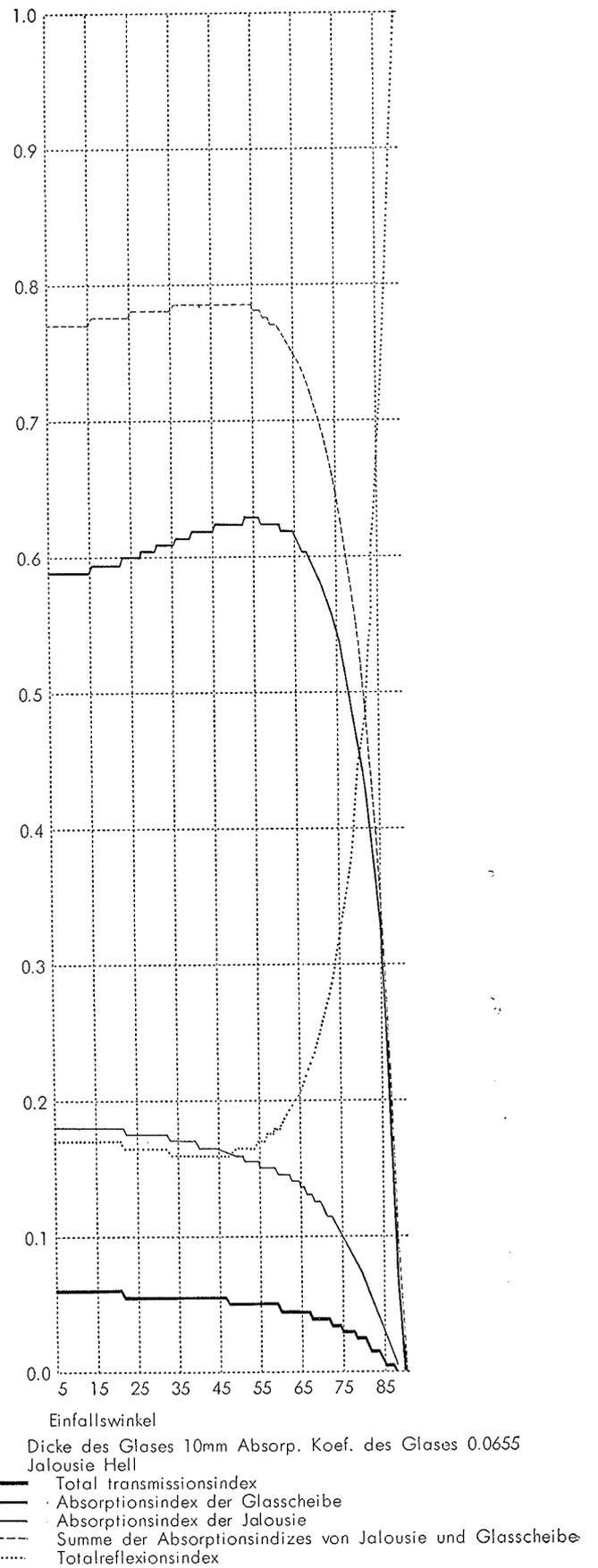


Bild-5

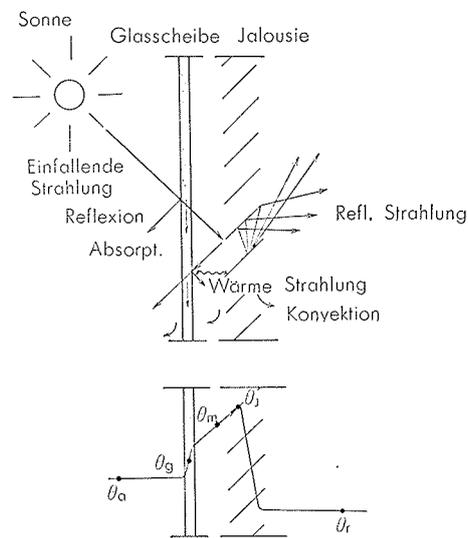


Bild-6 Temperaturverteilung eines klimatisierten Raumes mit halbgeöffneter Innenjalousie für konstante Raum- und Außenlufttemperatur

Kurve der Temperaturverteilung

- θ_a : Konst. Außenlufttemperatur
- θ_g : Temperatur der Glasscheibe
- θ_m : Temperatur der Luft zwischen Glas und Jalousie
- θ_j : Temperatur der Jalousie
- θ_r : konst. Raumlufttemperatur

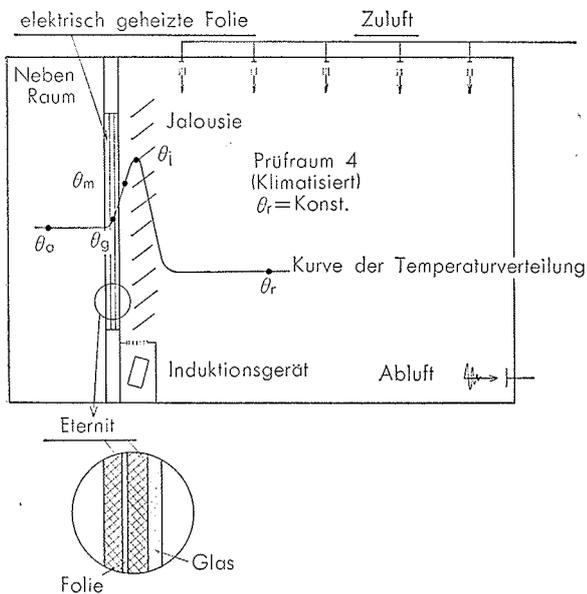


Bild-7 Prinzipieller Aufbau der Versuchsanordnung

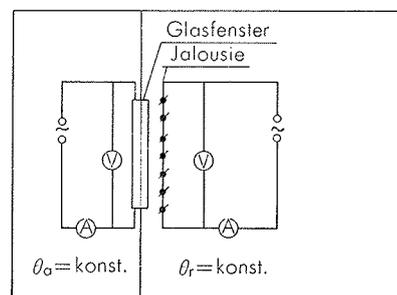


Bild-8 Prinzipielle Aufbau der Versuchsanordnung

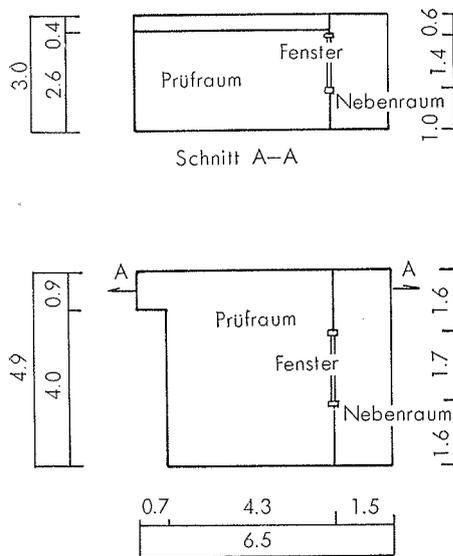


Bild-9 Grundriß des Prüfraumes

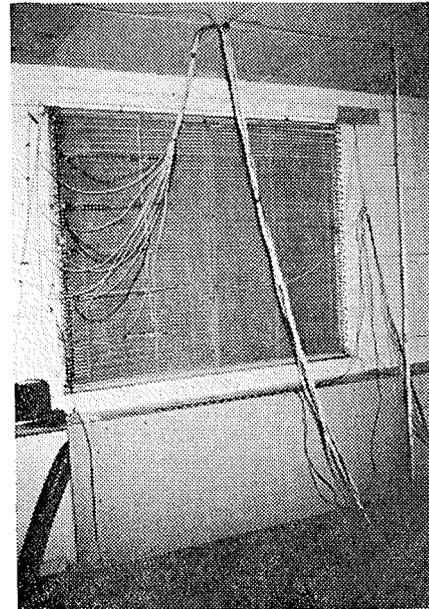


Bild-10

3.2. Messung der Wärmeübergangszahl der Jalousie

Die Messungen wurden mit und ohne Induktionsgerät durchgeführt. Der Wärmeaustauscher des Induktionsgerätes wurde nicht geheizt oder gekühlt. Durch das Induktionsgerät wurde nur Primärluft zugeführt. Die Luftmenge wurde mit Hilfe des Anemometers (Sekundärluft und Primärluft) und Manometers (Primärluft) gemessen. Die Gesamtluftmenge betrug ca. 850 m³/h und Primärluftmenge ca. 160 m³/h.

Raumtemperaturen, Wandoberflächentemperaturen, Jalousieoberflächentemperaturen, Glasscheibentemperaturen usw. wurden mit Hilfe von Thermoelementen (Fe-Ko) gemessen.

Die Heizleistung (Strahlungsabsorption) der Glasscheibe sowie der Jalousie wurde mit Hilfe von Transformatoren eingestellt und mit Hilfe eines Wattmeters gemessen. Die Messungen wurden für die Einfallswinkel 5, 45 und 85 Grad der Sonnenstrahlung durchgeführt.

Die Wärmeübergangszahl der Jalousie wurde mit folgender Zahlenwertgleichung berechnet.

$$\alpha = \frac{H}{1,162} \frac{F}{BT - RT}$$

α : Wärmeübergangszahl der Jalousie in kcal/m² hk

H : Heizleistung der Jalousie in Watt

F : Jalousiefläche in m² (4,37 m² beide Seiten zusammen)

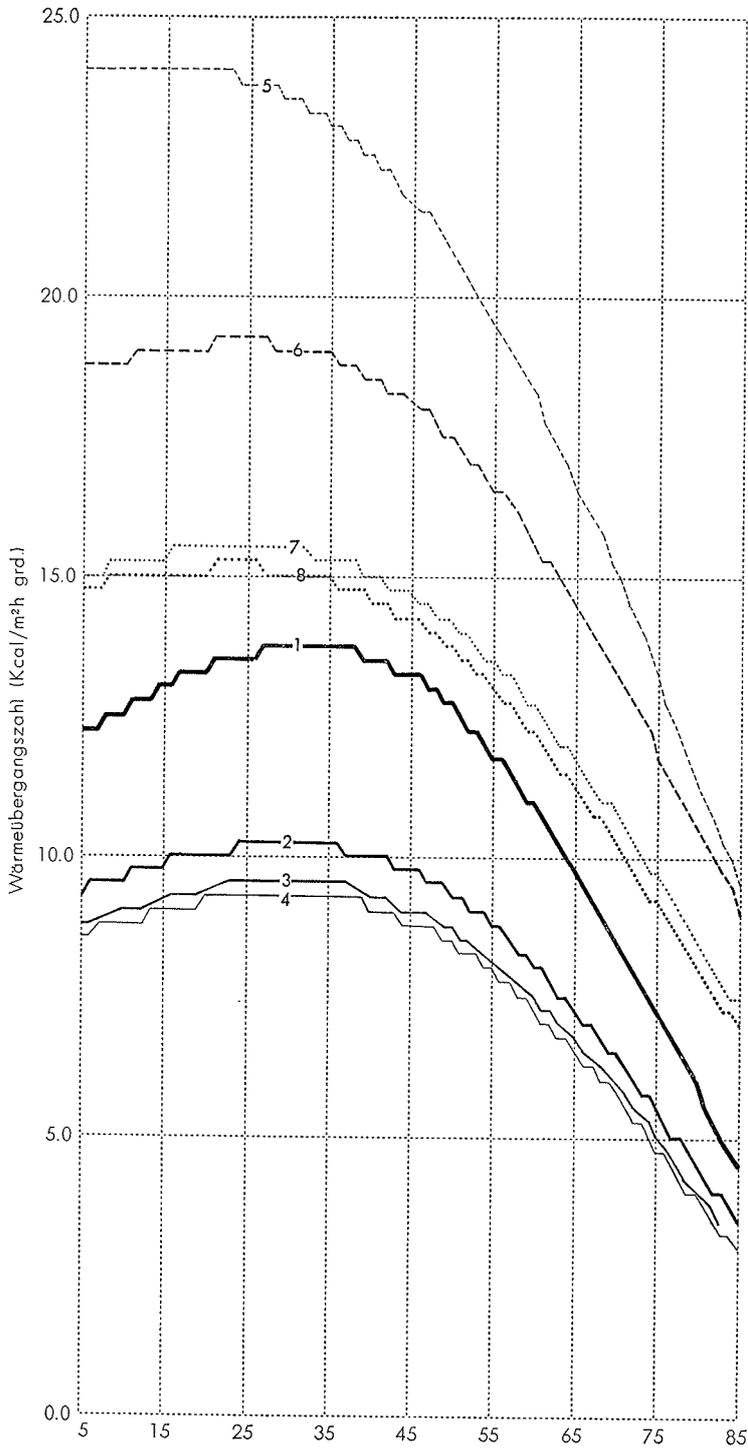
BT : Jalousietemperatur in °C

RT : Raumlufthtemperatur in °C

Die Raumlufthtemperaturen wurden an 4 Punkten gemessen, die 150 cm hoch über dem Fußboden und 5, 30, 100 sowie 130 cm von der Jalousie entfernt waren.

Die Meßwerte der Temperaturen, Heizleistungen usw. wurden auf Computerkarten gelocht. Die Umrechnung der elektrischen Thermospannung in Temperaturwerte und weitere Rechnungen wurden ebenfalls mit Hilfe des Computers durchgeführt. Bilder 11-12 zeigen die Beispiele der Ergebnisse.

Die Punkte zwischen den Einfallswinkeln 5, 45 und 85 Grad wurden mit Hilfe des Unterprogramms "E-155" ergänzt und mit Hilfe des Unterprogramms "J-577" als Diagramme gezeichnet.

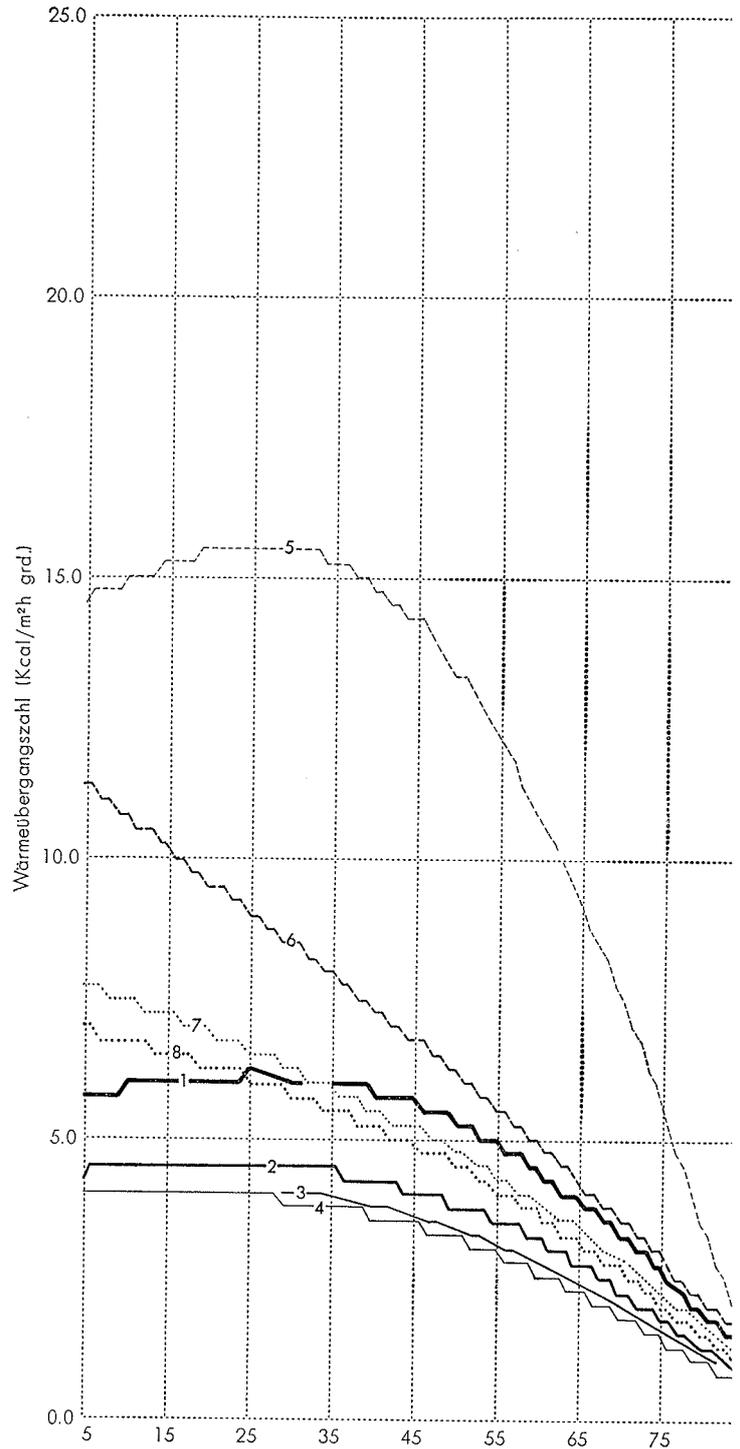


Einfallswinkel der Sonnenstrahlung

- 1+5 Entfernung von der Jalousie 5 cm
- 2+6 30 cm
- 3+7 100 cm
- 4+8 130 cm
- 1+2+3+4 ohne Lüftung (Induktionsgerät)
- 5+6+7+8 mit Lüftung (Induktionsgerät)

Absorp. Koef. des Glases : 0.0200
 Sonnenstrahlung 800 kcal/m²h Jalousie : Dunkel

Bild-11



Einfallswinkel der Sonnenstrahlung

- 1+5 Entfernung von der Jalousie 5 cm
- 2+6 30 cm
- 3+7 100 cm
- 4+8 130 cm
- 1+2+3+4 ohne Lüftung (Induktionsgerät)
- 5+6+7+8 mit Lüftung (Induktionsgerät)

Absorp. Koef. des Glases : 0.0200
 Sonnenstrahlung 800 kcal/m²h Jalousie : Dunkel

Bild-12

3.3. Interpretation der Meßergebnisse

Wie man aus den Bildern 11-12 erkennt sind die Wärmeübergangszahlen der Jalousie, bei Einfallswinkeln zwischen 85-45 Grad der Sonnenstrahlung am größten und bei 5 Grad am kleinsten. Bei Normalglas (Absorptionskoeffizient 0,0200) und dunkler Jalousiefarbe ist die Wärmeübergangszahl am größten, weil für die Sonneneinstrahlung von 800 Kcal/m²h die Jalousietemperatur am höchsten ist. (39,6°C) In diesem Fall wurde das Induktionsgerät benutzt.

Die Wärmeübergangszahl ist in der Raummitte (Entfernung von der Jalousie 1,3 m) ca. 14,8 Kcal/m²hk.

Unter den gleichen Bedingungen und ohne Induktionsgerät ist die Wärmeübergangszahl ca. 8 Kcal/m²hk.

Auch für die übrigen Darstellungen ist die Wärmeübergangszahl gemessen mit Induktionsgerät etwa doppelt so groß wie die ohne Induktionsgerät.

Die experimentellen Ergebnisse dieser Arbeit entstanden im Zeitraum von Anfang Mai bis Ende September 1973 im Prüfraum 4 des Hermann Rietschel Institutes der TU Berlin unter der Leitung von Herrn Professor Dr.-Ing. Esdorn.

Ich danke allen Mitarbeitern für die freundliche Unterstützung meiner Arbeit.

Tokio, den 25. 2. 1974

Literaturverzeichnis

K. Kimura: Kenchiku Setsubi Kisoriron (Japanisch)

Achim Willing: Berechnung von Signalleuchten