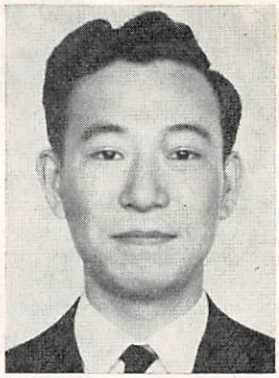
Bestimmung von Kühllasten mit Hilfe einer drehbaren Meßstation

Von **T. Tanaka***



Eine der wichtigsten Aufgaben bei der Planung einer Klimaanlage ist die Bestimmung der Heiz- und Kühllast. Ein wesentlicher Faktor ist dabei die Sonnenstrahlung, die besonders bei der Hochhausbauweise mit großflächigen Glasfronten Probleme aufwirft. Hierbei ist noch zu bemerken, daß die Sonnenstrahlung durch die Fenster sich nicht sofort in Raumluftwärme umsetzt, sondern daß infolge der Erwärmung des Fußbodens, der Wände und des Mobiliars immer eine gewisse Verzögerung und Verringerung eintritt. Um die Sonnenstrahlung sowie die Verzögerung und die Verringerung praktisch zu messen, wurde eine drehbare Meßstation im Laboratorium Ohbayashi-Gumi gebaut.

Der Zweck der vorliegenden Arbeit ist es, den Bedarf an Heiz- und Kühlleistung für jeden Fall im Verlauf eines Jahres zu ermitteln. Die Änderung des Wärmeeinfalls durch Sonnenstrahlung und der Wärmedurchgang wird theoretisch, z. B. mit Hilfe eines elektrischen Analogiemodells, bestimmt. Die theoretische Methode hat immer bestimmte idealisierte Voraussetzungen. Um diese Probleme näher zu analysieren, wurden experimentelle Messungen an Modellen vorgenommen[1]).

Drehbare Meßstation

Die drehbare Meßstation *(Bild 1)* ist das Modell eines Raumes mit einseitiger Glaswand und fünfseitiger Abschirmung gegen Wärme durch einen 75 cm breiten Isolierraum. Die Meßstation liegt auf dem Dach eines eingeschossigen Laboratoriums in einem Vorort Tokios. Hier gibt es wenige Häuser, und der Himmel ist verhältnismäßig klar.

Konstruktiv ist das Gebäude ein Stahlbetonbau, dessen tragende Elemente lamellenartige Scheiben sind, die sich durch das ganze Haus ziehen. Die Grundfläche des Raumes beträgt 4 m × 4 m und seine Höhe 2 m.

Die Meßstation hat den Vorteil, daß sie drehbar ist und daher Versuche bei verschiedenen Himmelsrichtungen ermöglicht. Man kann die Glaswand austauschen und somit auch Versuche mit verschiedenen Glassorten durchführen. Somit kann die Heiz- und Kühllast von der Meßstation unter dem Einfluß wirklicher meteorologischer Faktoren gemessen werden.

In der Meßstation gibt es zwei und im Isolierraum drei Heiz- und Kühlaggregate. Eine gewünschte Raumlufttemperatur in der Meßstation kann mit Hilfe eines PID-Reglers konstant gehalten werden. Während der Meßtage wurde auch den ganzen Tag über die Temperatur konstant gehalten. Die Raumlufttemperatur des Isolierraumes wird mittels eines Dreiwegeventils der Raumlufttemperatur der Meßstation angepaßt. Die Temperaturen wurden an vielen Stellen mit Thermoelementen gemessen. Die Abnehmer waren mit einem automatischen 12-Kurven-Kompensations-Bandschreiber gekoppelt. In *Bild 2* ist die drehbare Meßstation, in *Bild 3* das Schaltbild der Heiz- und Kühlungsanlagen der drehbaren Meßstation dargestellt.

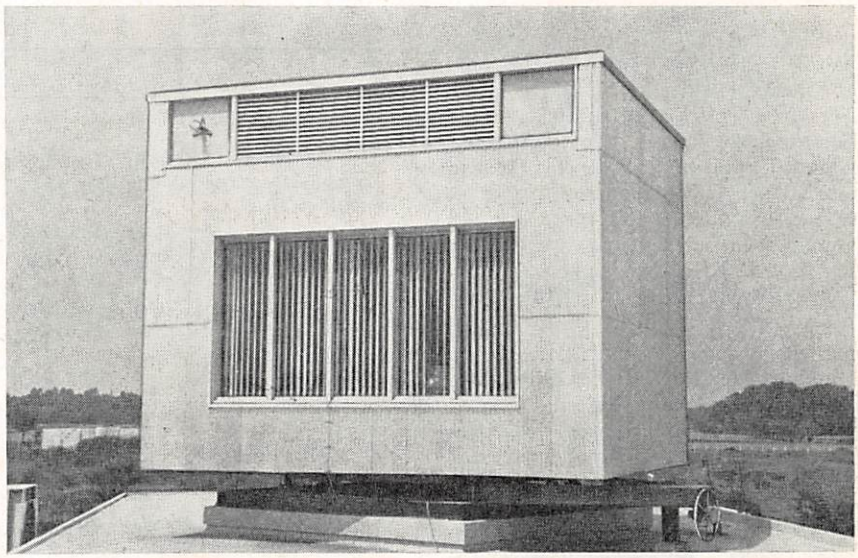


Bild 1: Drehbare Meßstation

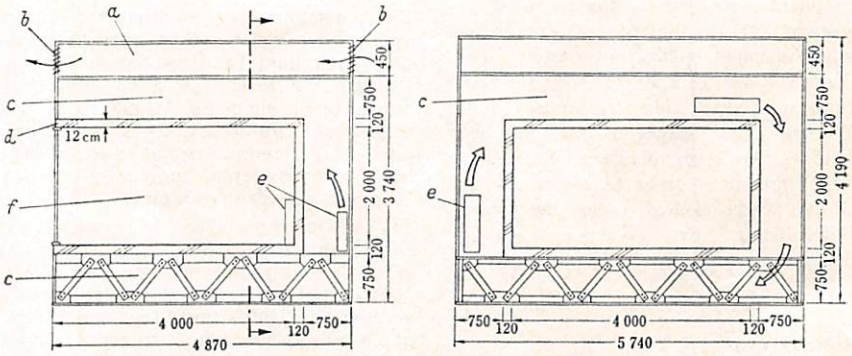


Bild 2: Schnittbild der drehbaren Meßstation
a belüfteter Raum zwischen Dach und Isolierraum b Lüftungsgitter c Isolierraum d 12 cm dicke Betonplatte e Heiz- und Kühlaggregat f Meßraum

---

* Dipl.-Ing. *Tatsuaki Tanaka* ist im Laboratorium der Firma Ohbayashi-Gumi in Tokio tätig.

[1]) Herrn Professor Dr. *Uichi Inoue*, Herrn Dr. *Ken-ichi Kimura* und Herrn Ing. *Shiro Tanabe* danke ich für die Anregung zu diesem Thema sowie besonders für ihr stetes Interesse und die wissenschaftliche Förderung der Arbeit.

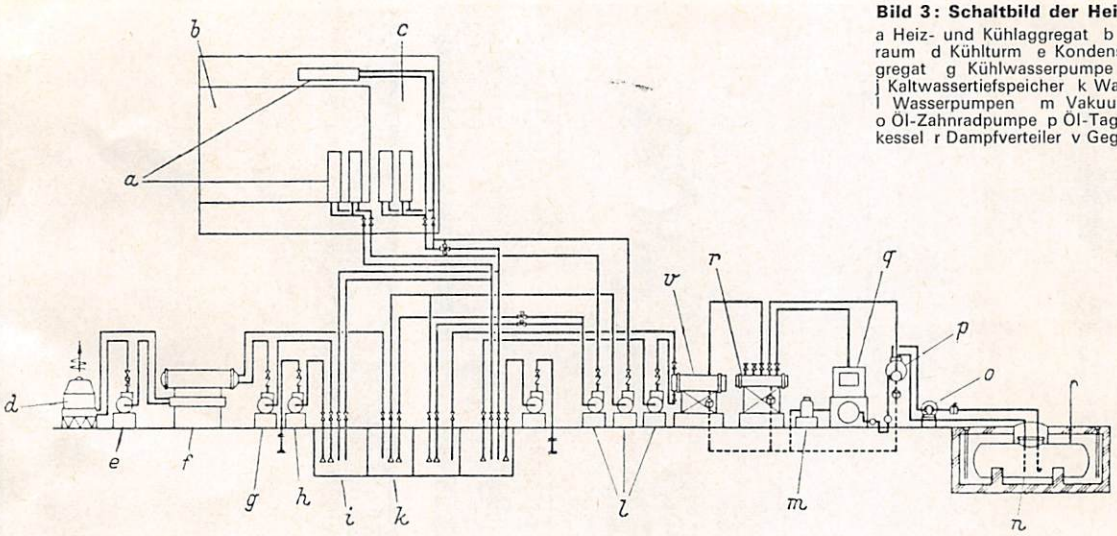


Bild 3: Schaltbild der Heiz- und Kühlanlage
a Heiz- und Kühlaggregat b Meßraum c Isolierraum d Kühlturm e Kondensatpumpe f Kühlaggregat g Kühlwasserpumpe h Abwasserpumpe j Kaltwassertiefspeicher k Warmwassertiefspeicher l Wasserpumpen m Vakuumpumpe n Öltank o Öl-Zahnradpumpe p Öl-Tagesbehälter q Dampfkessel r Dampfverteiler v Gegenstromapparat

Sonnenstrahlung

In der Klimatechnik ist die Sonnenstrahlung von sehr großer Bedeutung, da sie bei der Kühlung von Räumen einen wesentlichen Teil des Kühlbedarfs, meistens den größten Teil, ausmacht. Die Sonnenstrahlung kann z. B. mit Hilfe von Tafeln berechnet werden, welche die durch Fenster eingestrahlte Wärmemenge für die verschiedenen Monate und für alle Richtungen angeben. Das Ergebnis wäre brauchbar, aber für die Bestimmung der notwendigen Kälteleistung der Klimaanlage grundsätzlich ungenau, in der Regel zu hoch.

Die Sonnenstrahlung wurde mit drei Eppley-Sonnenstrahlungsmessern *(Bild 4)* ermittelt (Thermoelemente), und zwar auf dem Flachdach, auf der senkrechten Wandfläche und auf der senkrechten Fläche durch das Fensterglas.

Gemessene Sonnenstrahlung

Die *Bilder 5 bis 7* zeigen gemessene Sonnenstrahlung. Die Ziffern links auf dem Meßstreifen geben die Tageszeiten an, die Linie 1 die Sonnenstrahlung auf dem Flachdach, die Linie 2 die auf der senkrechten Fläche und die Linie 3 die auf der senkrechten Fläche durch das Einfachglasfenster. Die Linie 4 zeigt die Sonnenstrahlung durch die Innenjalousie, mit einem Beckman-Strahlungsmesser erfaßt. Dieses Meßgerät hatte eine andere Empfindlichkeit als der Eppley-Strahlungsmesser.

Das *Bild 5* zeigt die Ergebnisse der Sonnenstrahlungsmessung am 17. Mai 1967 in Tokio (35.69 nördl. Breite) bei wolkenlosem Himmel. Linie 2 entspricht der Strahlung auf der Ostwand. Zu dieser Jahreszeit wurde festgestellt, daß die Sonnenstrahlung auf dem Flachdach um 12 Uhr mit 700 kcal/m² h größer war als die Einstrahlung auf die senkrechte Wand oder durch das Fenster.

In *Bild 6* wird die Sonnenstrahlung von Winter (links) und Sommer (rechts) verglichen. Im Süden ist die Einstrahlung mit 750 kcal/m² h im Winter am größten, während für reine Westlage das Maximum an Sonnenstrahlung im August um 16 Uhr 500 kcal/m² h beträgt.

In *Bild 7* ist die diffuse Sonnenstrahlung bei bewölktem Himmel dargestellt. Das Verhältnis von Linie 1 und 2 ist immer 2:1. Somit ist die Sonnenstrahlung auf dem Flachdach immer zweimal so groß wie auf der senkrechten Fläche.

Außer den Messungen wurde mit elektronischen Rechenmaschinen und mit den folgenden Formeln die Sonnenstrahlung auf den verschiedensten Flächen berechnet.

Die Summe von direkter und diffuser Sonnenstrahlung ist die Gesamtstrahlung. Die direkte Sonnenstrahlung läßt sich genau berechnen nach *Bouguer*:

auf Normalfläche

$$J_n = J_0\, P^{\operatorname{cosec}\beta},$$

auf horizontale Fläche

$$J_H = J_0\, P^{\operatorname{cosec}\beta} \sin\beta,$$

auf senkrechte Fläche

$$J_v = J_0\, P^{\operatorname{cosec}\beta} \cos\beta \cdot \cos\gamma.$$

Die diffuse Sonnenstrahlung ist annähernd gegeben nach *Berlage* und *Matsuo*:

auf horizontale Fläche

$$J_{HS} = 1{,}2\, J_0 \sin\beta \frac{1 - P^{\operatorname{cosec}\beta}}{1 - 1{,}4 \log_e P}(1 - P)$$

auf senkrechte Fläche

$$J_{vd} = 1/2\, J_{HS}.$$

Solarhöhe und der Sonnenazimut sind:

$$\sin\beta = \sin l \sin\delta + \cos l \cos\delta \cos\frac{\pi t}{12},$$

$$\sin\Phi \cos\beta = \sin\frac{\pi t}{12} \cos\delta;$$

hierin bedeuten

J_0 Solarkonstante,
P Trübungsfaktor,
β Solarhöhe (der Winkel zur Sonne),
Φ der Sonnenazimut,
l die Breite eines Ortes,
δ Sonnendeklination,
t Sonnenzeit in Stunden,
γ der Solarwandazimut.

Nach diesen Gleichungen wurde die Sonnenstrahlung für die verschiedensten

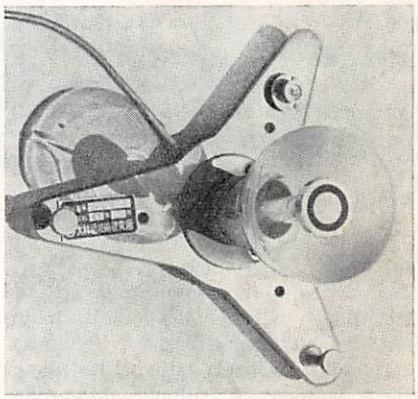


Bild 4: Eppley-Sonnenstrahlungsmesser

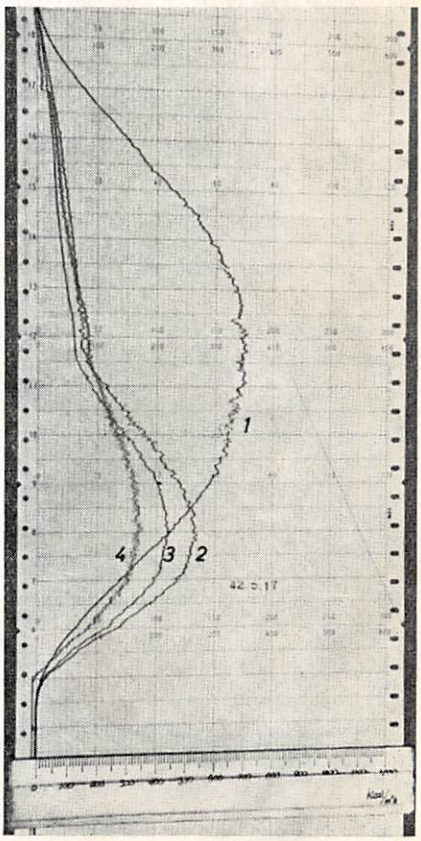


Bild 5: Sonnenstrahlung am 17. Mai 1967 in Tokio
Erläuterung der einzelnen Kurven siehe Text

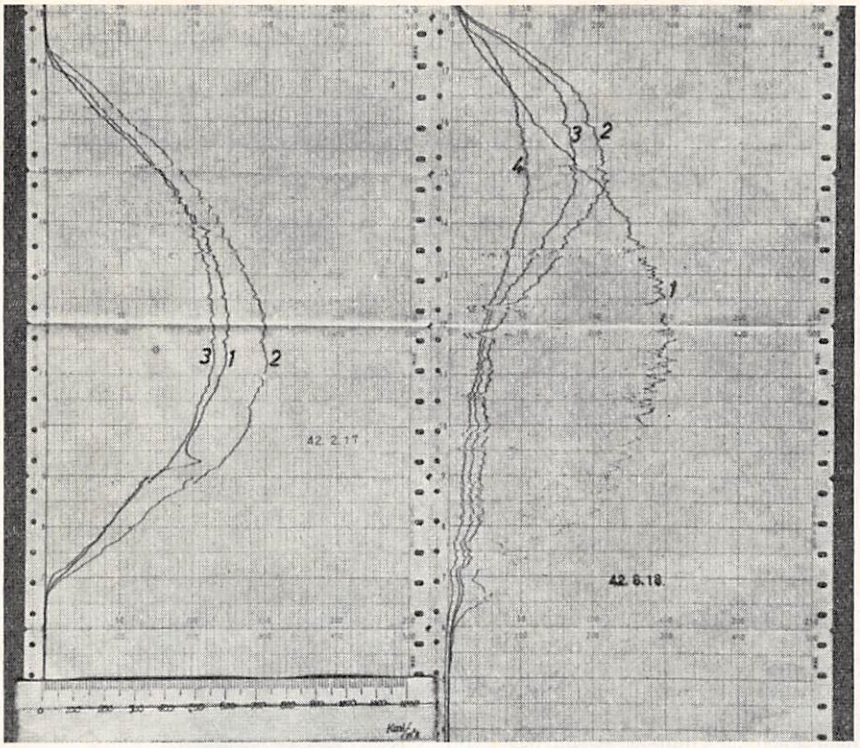


Bild 6: Vergleich der Sonnenstrahlung im Winter (links) und im Sommer

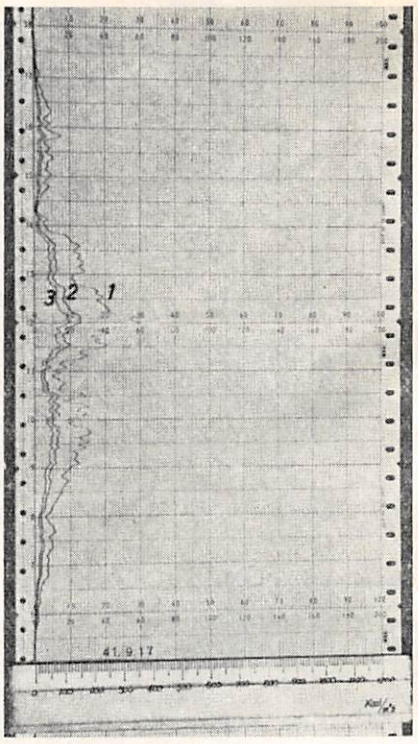


Bild 7: Sonnenstrahlung bei bewölktem Himmel

Tageszeiten, Jahreszeiten und für alle Richtungen in Tokio (35.69 nördl. Breite) mit den unterschiedlichsten Trübungsfaktoren berechnet. Mit Hilfe dieser Werte wurden die Trübungsfaktoren der gemessenen Sonnenstrahlung auf die horizontale Fläche berechnet und mit diesen Trübungsfaktoren wiederum die Sonnenstrahlung für alle Himmelsrichtungen ermittelt.

Nur die gemessene Sonnenstrahlung auf die horizontale Fläche ist ein genauer Wert, denn die in der Vertikalen berechnete Sonnenstrahlung ist ein ungenauer Wert, der doch die Strahlung der Umgebung (Häuser, Straßen usw.) verfälscht. So ist also nur der „horizontale" Wert verwendbar.

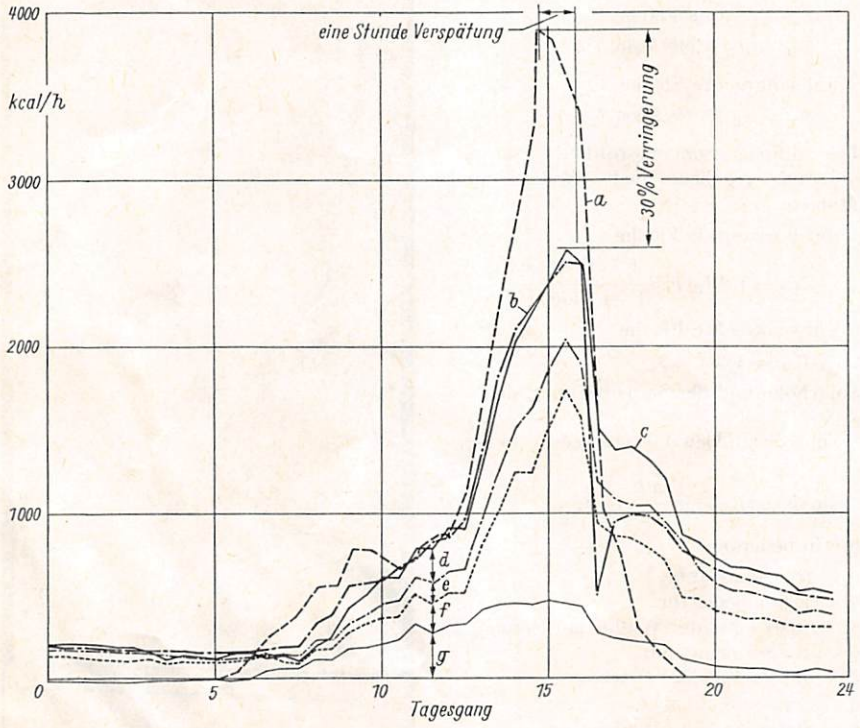


Bild 8: Charakteristik der Kühllast der drehbaren Meßstation mit Einfachglasfenster ohne Jalousie Westrichtung, Meßtag 26. Juli 1967, k = 8 kcal/m h grd

a Sonnenstrahlung durch 8 m² große Fenster b Kühllast des Kühllastaggregates c totale Wärmeabgabe durch Konvektion (d + e + f + g = c) d Wärmeabgabe durch Konvektion von den Umgebungswänden e von der Decke f von dem Fußboden und g von dem Fensterglas

Charakteristik der Kühllast der drehbaren Meßstation mit Einfachfensterglas

Die Sonnenstrahlung dringt durch das Fenster z. T. in den Raum ein, ein Teil wird absorbiert, ein anderer Teil reflektiert. Die anfallende Strahlung kann die Luft nur unwesentlich erwärmen. Erst wenn durch auftretende Strahlung Stoffe, wie Möbel, Wände, Fußboden, Decke und Jalousie, erwärmt wurden, geben diese Massen durch freie Konvektion Wärme an die Raumluft ab und erhöhen somit die Raumtemperatur.

Die Umwandlung der Sonnenstrahlung in Wärmeenergie innerhalb eines Raumes ist auf die sog. Wärmeeinfallwirkung des Fensterglases zurückzuführen. Der sichtbare Teil der Sonnenstrahlung verwandelt sich beim Auftreffen auf die Umschließungsflächen des Raumes in langwellige Wärmestrahlung, für die Glas so gut wie undurchlässig ist, wobei die Art der Verglasung Einfachglas oder Thermopane bedeutungslos ist. Es wird also keine Strahlungsenergie vom Raum an die Außenluft abgegeben, und somit geben die Umgebungsflächen (Wände, Fußboden usw.) die gesamte Strahlungsenergie an den Raum ab.

Wesentlich ist hierbei Amplitudendämpfung und Phasenverschiebung zwischen dem Maximum der Sonnenstrahlung und dem Maximum der Kühllast. *Bild 8* zeigt die Charakteristik der Kühllast der drehbaren Meßstation mit Einfachfen-

sterglas am 26. Juli 1967 (Westrichtung). Im Sommer wurde die Raumlufttemperatur auf 24°C gehalten. Linie a zeigt die eingestrahlte Sonnenstrahlung durch 8 m² große Einfachfenster. Bisher benutzte man diesen Wert zur Berechnung von Kühllasten, was jedoch infolge von Phasenverschiebung usw., wie vorher erwähnt, nicht zutrifft. Linie b zeigt die Wärmemenge, welche das Heiz- und Kühlaggregat im Meßraum aufgenommen hat. Dies ist also die wirkliche Kühllast. Linie c zeigt die totale Wärmeabgabe durch Konvektion von den Umgebungswänden, der Decke, dem Fußboden und dem Fensterglas. Dazu waren umfangreiche Messungen von Oberflächentemperaturen nötig, denn die Wärmeabgabe durch Konvektion ist das Produkt von Oberfläche und Temperaturdifferenz und Wärmeübergangszahl. Im Sommer wurden in jedem Fall Wärmeübergangszahlen von 8 kcal/m² h grd vorausgesetzt, dann gab es eine Übereinstimmung zwischen Linie b und c. Im Winter, wenn man heizt, wurde die Wärmeübergangszahl mit 4 kcal/m² h grd und beim Kühlen mit 6 kcal/m² h grd vorausgesetzt. Erst dann gab es zwischen Linie b und c eine Übereinstimmung. *Bild 9* zeigt den Verlauf der mittleren Temperaturen von mehreren Meßstellen am 26. Juli 1967.

Bild 10 zeigt die Charakteristik der Heiz- und Kühllast der drehbaren Meßstation mit Einfachfensterglas am 3. Februar 1968. Somit ergibt sich eine Übereinstimmung der Charakteristik der Kurven sowie der Meßergebnisse im Winter und Sommer, wenn im Winter eine Wärmeübergangszahl von 6 kcal/m² h grd und im Sommer von 8 kcal/m² h grd vorausgesetzt wird. *Bild 11* zeigt den Verlauf der mittleren Temperaturen von mehreren Meßstellen am 3. Februar 1968.

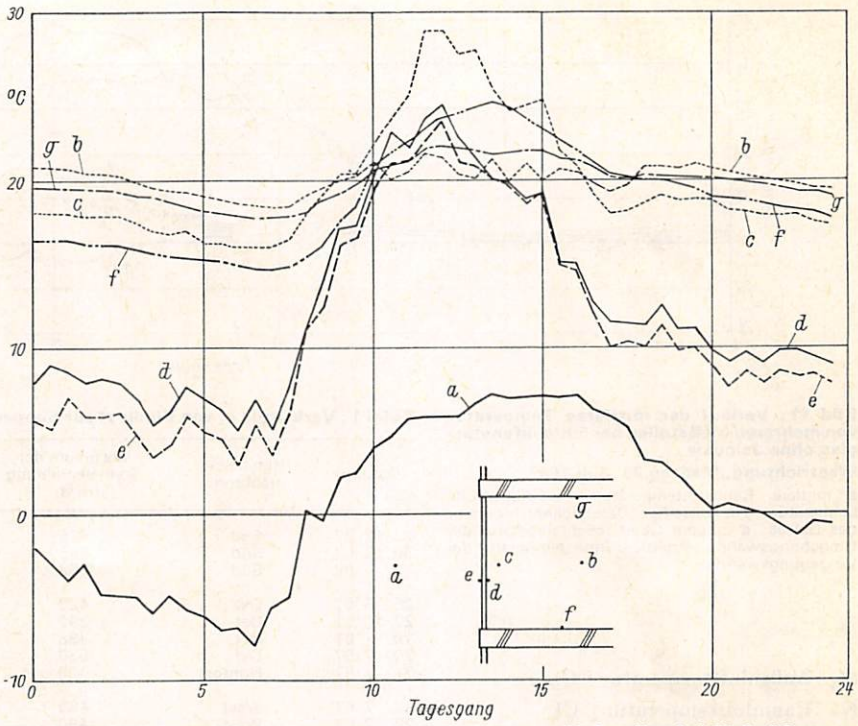


Bild 9: Verlauf der mittleren Temperaturen von mehreren Meßstellen bei Einfachfensterglas ohne Jalousie **Südrichtung, Meßtag 3. Februar 1968**

a Außenlufttemperatur b mittlere Raumlufttemperatur c Raumlufttemperatur nahe dem Fenster d innenseitige Oberflächentemperatur des Glases e außenseitige Oberflächentemperatur des Glases f mittlere Oberflächentemperatur des Fußbodens g mittlere Oberflächentemperatur der Decke

Charakteristik der Kühllast der drehbaren Meßstation mit Innenjalousie

Der Sonnenschutz war lange Zeit das ungelöste Problem der modernen Architektur. Grundsätzlich hält eine Außenjalousie mehr Strahlung ab als ein Innenschutz. Wie schon beschrieben, gibt es eine Amplitudendämpfung und Phasenverschiebung zwischen dem Maximum der Sonnenstrahlung und dem Maximum der Kühllast. Wir nannten das Verhältnis Kühllast zur Sonnenstrahlung durch das Fenster „k_s".

Diese Werte sind annähernd aufgrund folgender Formel errechnet worden:

$$q_t = I \cdot A_g \cdot k_s + k \cdot A_g \cdot (\Theta_a - \Theta_r)$$

$$k_s = \frac{q_t - k \cdot A_g \cdot (\Theta_a - \Theta_r)}{I \cdot A_g};$$

hierin bedeuten:

I Sonnenstrahlung durch das Fenster [kcal/m² h],

A_g Glasfläche [m²],

k Wärmedurchgangszahl des Fensters [kcal/m² h grd],

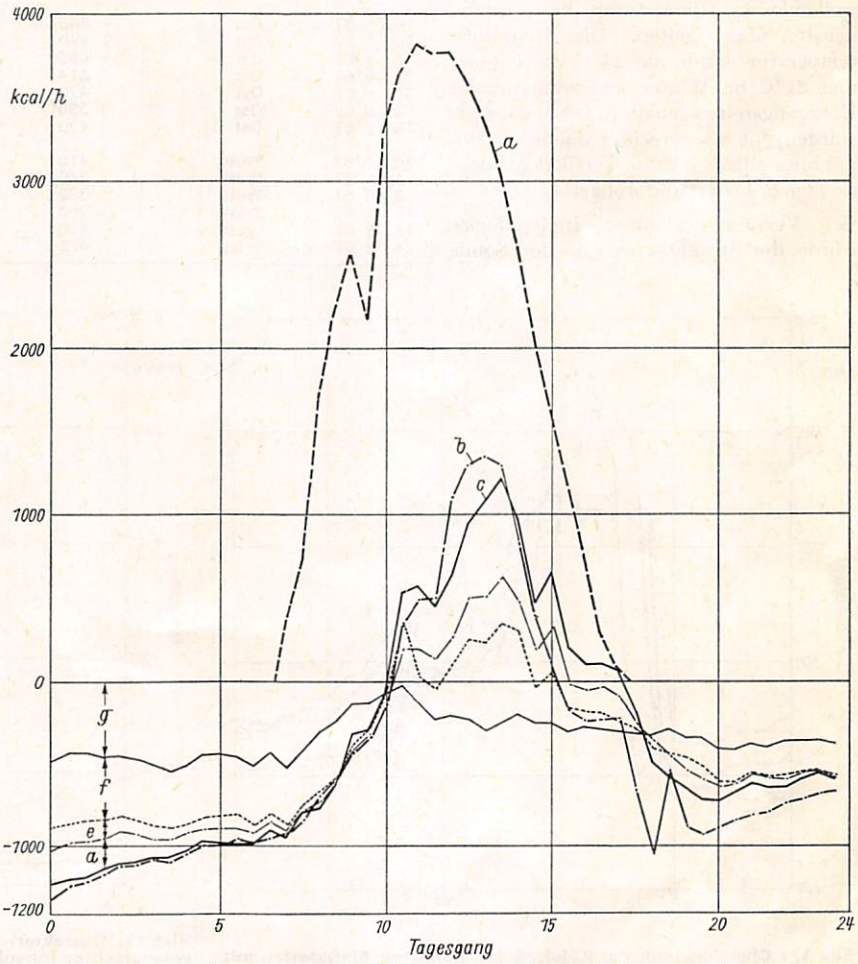


Bild 10: Charakteristik der Heiz- und Kühllast der drehbaren Meßstation mit Einfachglasfenster ohne Jalousie **Südrichtung, Meßtag 3. Februar 1968**

a Sonnenstrahlung für das Einfachfenster b Heiz-und Kühllast des Heiz- und Kühlaggregates c totale Wärmeabgabe durch Konvektion (d + e + f + g = c) d Wärmeabgabe durch Konvektion von den Umgebungswänden e von der Decke f von dem Fußboden g von dem Fensterglas

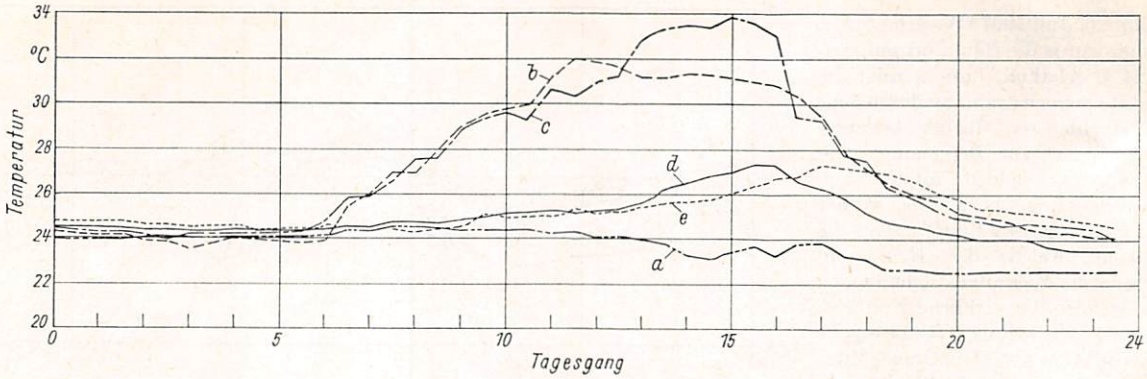


Bild 11: Verlauf der mittleren Temperatur von mehreren Meßstellen bei Einfachfensterglas ohne Jalousie
Westrichtung, Meßtag 26. Juli 1967
a mittlere Raumlufttemperatur b Außenlufttemperatur c innenseitige Oberflächentemperatur des Glases d mittlere Oberflächentemperatur der Umgebungswände e mittlere Innentemperatur der Umgebungswände

Θ_a Außenlufttemperatur [°C],

Θ_r Raumlufttemperatur [°C],

q_t Kühllast der drehbaren Meßstation.

Die *Tafel 1* enthält die berechneten k_s-Werte für die verschiedensten Jahreszeiten und Richtungen. Die *Bilder 12 bis 15* zeigen die gemessenen Kühllasten bei wolkenlosem Himmel für die verschiedensten Jahreszeiten. Die Raumlufttemperatur wurde auf 24°C im Sommer und 21°C im Winter und während der Übergangszeiten gehalten. Die Messungen wurden mit waagerechter Jalousie (Aluminium, elfenbein) und vertikaler Jalousie (Tuch, hellgrau) durchgeführt.

Bei Verwendung einer Innenjalousie wurde die Strahlungsenergie der Sonne

Tafel 1: Verhältnis k_s von Kühllast zur Sonnenstrahlung durch das Fenster

Datum	Himmelsrichtung	Maximum der Sonnenstrahlung (kcal/m² h)	k_s	Zustand der Jalousie
23. 12. 67	Süd	475	0,336	ohne Jalousie
30. 12. 67	Süd	565	0,403	ohne Jalousie
3. 2. 68	Süd	468	0,406	ohne Jalousie
25. 5. 67	Ost	420	0,328	ohne Jalousie
22. 10. 67	Ost	390	0,218	ohne Jalousie
19. 7. 67	Ost	398	0,332	ohne Jalousie
20. 7. 67	Ost	530	0,271	ohne Jalousie
21. 7. 67	Nordost	400	0,468	ohne Jalousie
25. 7. 67	West	460	0,655	ohne Jalousie
26. 7. 67	West	490	0,638	ohne Jalousie
7. 8. 67	West	475	0,660	ohne Jalousie
9. 8. 67	West	445	0,680	ohne Jalousie
17. 12. 67	Süd	430	0,742	vertikal halb geöffnet
25. 1. 68	Süd	540	0,675	waagerecht ganz geschlossen
8. 2. 68	Süd	535	0,865	waagerecht halb geöffnet
9. 2. 68	Süd	405	0,770	waagerecht halb geöffnet
14. 2. 68	Süd	452	0,747	waagerecht ganz geöffnet
16. 5. 67	Ost	540	0,497	waagerecht halb geöffnet
17. 5. 67	Ost	440	0,510	waagerecht halb geöffnet
18. 5. 67	Ost	450	0,470	waagerecht ganz geschlossen
23. 5. 67	Ost	414	0,620	waagerecht ganz geöffnet
31. 5. 67	Ost	470	0,654	vertikal halb geöffnet
3. 6. 67	Ost	390	0,510	vertikal ganz geöffnet
15. 6. 67	Ost	420	0,380	vertikal ganz geschlossen
28. 7. 67	West	410	0,732	vertikal halb geöffnet
4. 8. 67	West	340	0,882	vertikal ganz geöffnet
5. 8. 67	West	382	0,773	vertikal ganz geschlossen
17. 8. 67	West	360	0,946	waagerecht halb geöffnet
18. 8. 67	West	410	0,716	waagerecht halb geöffnet
24. 8. 67	West	425	0,700	waagerecht ganz geschlossen

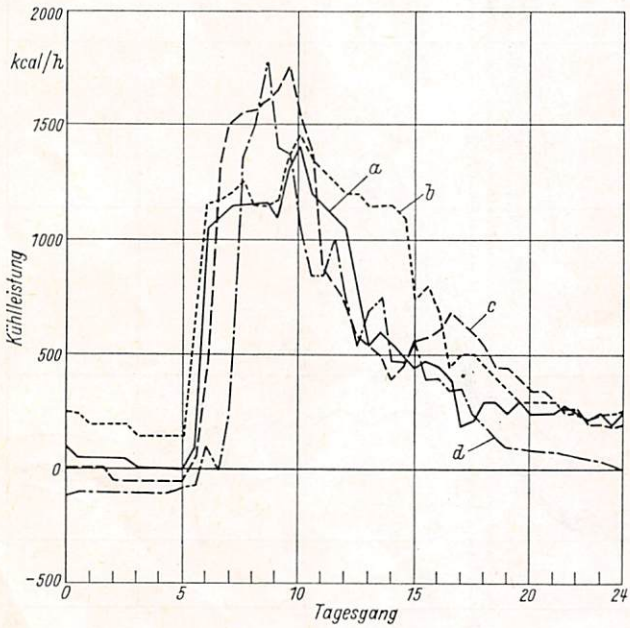


Bild 12: Charakteristik der Kühllast der drehbaren Meßstation mit waagerechter Innenjalousie Ostrichtung, Übergangszeit
a 17. Mai 1967, Jalousie halb geöffnet
b 18. Mai 1967, Jalousie ganz geschlossen
c 23. Mai 1967, Jalousie ganz geöffnet
d 25. Mai 1967, ohne Jalousie

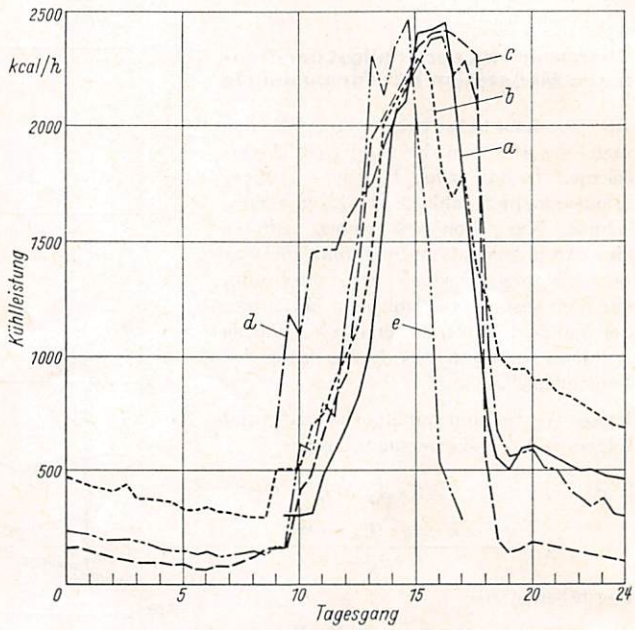


Bild 13: Charakteristik der Kühllast der drehbaren Meßstation mit waagerechter Innenjalousie Westrichtung, Sommer
a 9. August 1967, ohne Jalousie
b 10. August 1967, ohne Jalousie
c 18. August 1967, Jalousie halb geöffnet
d 24. August 1967, Jalousie ganz geöffnet
e Jalousie ganz geschlossen

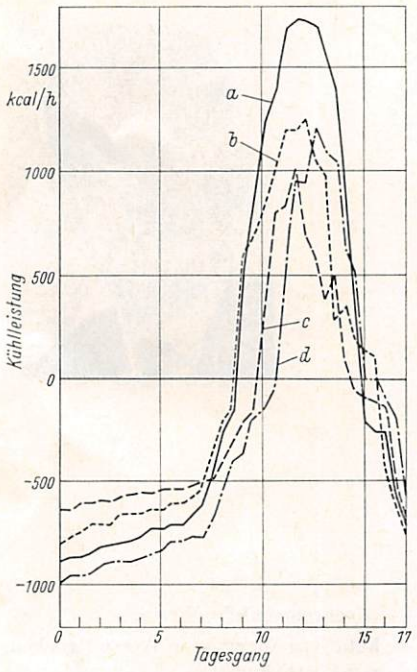


Bild 14: Charakteristik der Kühllast der drehbaren Meßstation mit vertikaler Innenjalousie
Südrichtung, Winter
a 17. Dezember 1967, Jalousie halb geöffnet
b 18. Dezember 1967, Jalousie ganz geschlossen
c 21. Dezember 1967, Jalousie ganz geschlossen
d 30. Dezember 1967, ohne Jalousie

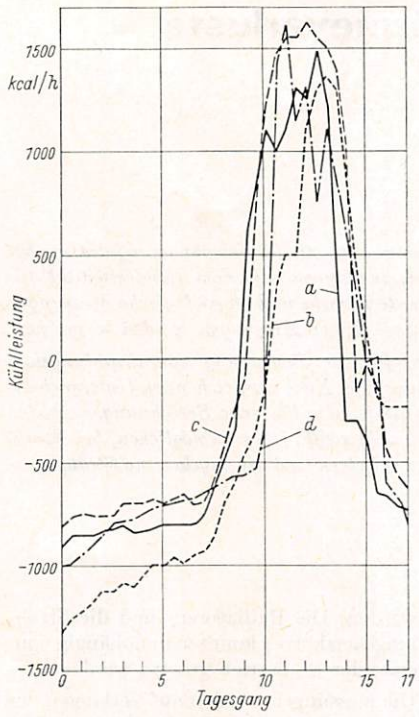


Bild 15: Charakteristik der drehbaren Meßstation mit waagerechter Innenjalousie
Südrichtung, Winter
a 26. Januar 1968, Jalousie ganz geschlossen
b 3. Februar 1968, ohne Jalousie
c 7. Februar 1968, Jalousie halb geöffnet
d 9. Februar 1968, Jalousie halb geöffnet

von der Jalousie aufgenommen, aber aufgrund dessen, daß die Jalousie kein Wärmespeichervermögen hat, sofort wieder durch Konvektion an die Raumluft abgegeben.

Zur Zeit werden vom Verf. die Messungen bei Benutzung von Außenjalousien durchgeführt.

Schlußbemerkung

— Im Sommer wurde bei Ermittlung der Kühllast der drehbaren Meßstation (Westrichtung mit Einfachfensterglas ohne Jalousie) eine zeitliche Verzögerung von 1 h und 30% Verringerung zwischen dem Maximum der Sonnenstrahlung und dem Maximum der Kühllast festgestellt (siehe *Bild 8*).

Am Vormittag war die eingestrahlte Energie größer als die wirkliche Kühllast, aber nach 16 Uhr war die wirkliche Kühllast größer als die eingestrahlte Energie, und zwar weil die im Beton gespeicherte Wärme durch freie Konvektion allmählich in Luftwärme umgesetzt wurde.

— Auch im Winter war Kühlung nötig, um die Raumlufttemperatur auf 20°C zu halten (bei Südrichtung der drehbaren Meßstation), weil die eingestrahlte Sonnenstrahlung zu stark war. 1 h Verzögerung und 70% Verringerung zwischen dem Maximum der eingestrahlten Sonnenstrahlung und dem Maximum der Kühllast wurde ermittelt (siehe *Bild 10*).

— Mit der Innenjalousie gab es keine Phasenverschiebung zwischen dem Maximum der Sonnenstrahlung und dem Maximum der Kühllast, wobei die Art der Innenjalousie, senkrechte Jalousie oder waagerechte Jalousie, bedeutungslos war.

— Wenn eine Innenjalousie benutzt wurde, bestand die Kühllast aus der Wärmeabgabe der Jalousie (siehe schwarze Fläche *Bilder 16 bis 17*).

— Keine wesentlichen Ersparnisse an Kühlleistung lassen sich durch Verwendung von Innenjalousien erreichen, sie verhindern nur den Strahlendurchgang. [H 8345]

DK 551.521.1:697.132.3:697.971

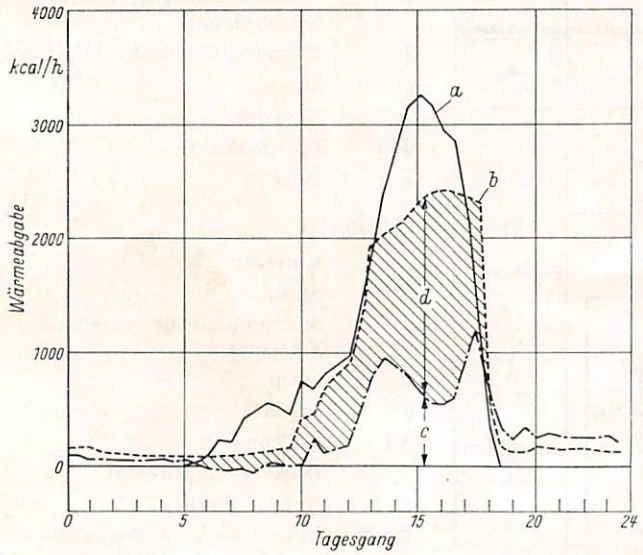


Bild 16: Wärmeabgabe durch Konvektion von der Innenjalousie
Meßtag 18. August 1967, waagerechte Jalousie halb geöffnet
a Sonnenstrahlungswärme durch das 8 m² große Fenster b aufgenommene Wärmemenge von Heiz- und Kühlaggregat im Meßraum c totale Wärmemenge durch Konvektion von den Umgebungswänden, der Decke, dem Fußboden und dem Fensterglas d Wärmeabgabe durch Konvektion von der Jalousie

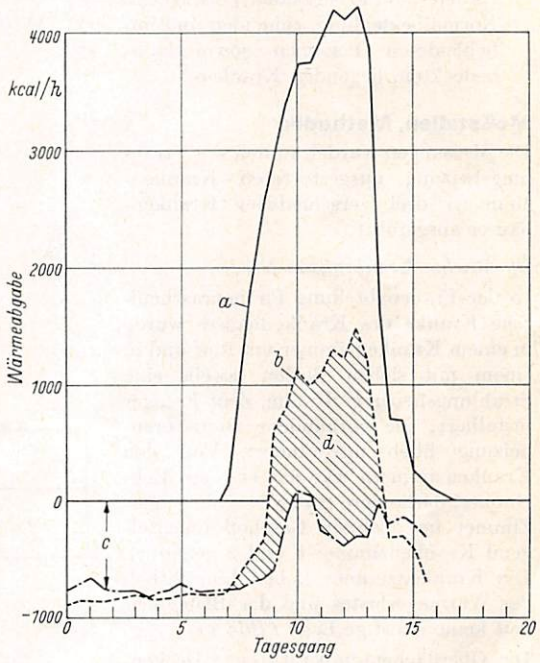


Bild 17: Wärmeabgabe durch Konvektion von der Innenjalousie
Meßtag 26. Januar 1968, waagerechte Jalousie ganz geschlossen
Legende siehe Bild 16