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

Band: 11 (1980)

Rubrik: VI. Building physics

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: 15.08.2025

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

SEMINAR

VI

Building Physics

Physique du bâtiment

Bauphysik

Co-chairmen: F. Leonhardt, FRG
H.J. Cowan, Australia

Introductory Papers:
"Energieeinsparung in Gebäuden"
E. Panzhauser, Austria
"Gebäudelüftung"
V. Stehno, Austria
"Non-Steady State Heat and Moisture Problems in Building Physics"
K. Gertis, FRG
"Sound Insulation in Buildings and Control of Traffic Noise"
J. Lang, Austria

Coordinator: K. Gertis, FRG

(The Introductory Papers are published in the Introductory Report of IABSE 11th Congress in Vienna 1980)

Leere Seite
Blank page
Page vide

Building Physics

Physique du bâtiment

Bauphysik

F. LEONHARDT
Prof. Dr. Ing.
Stuttgart, Bundesrepublik Deutschland

Einführung

Bauphysik wurde schon vor 50 Jahren als Wissenschaftszweig gegründet und hat viele wertvolle Forschungsergebnisse zur Verfügung gestellt. Dennoch ist Bauphysik in der Praxis noch wenig anerkannt und in der Lehre in schädlicher Weise vernachlässigt. Es ist höchste Zeit, daß Bauphysik von den planenden und konstruierenden Bauingenieuren ernst genommen wird und daß die bauphysikalischen Kenntnisse gelehrt und beachtet werden.

Unter dem Begriff Bauphysik faßt man die technisch-physikalischen Phänomene an Bauwerken zusammen, die mit Wärme, Feuchte, Brand, Schall, Lärm und Akustik sowie mit Licht und Beleuchtung zu tun haben. Die Eigenschaften unserer Bauwerke in diesen Gebieten sind für das physische und psychische Wohlbefinden der Menschen, die unsere Bauwerke bewohnen oder benützen, von entscheidender Bedeutung. Sie sind wichtig für das Verhalten der Bauwerke. Etwa 80 % der in den letzten Jahrzehnten häufig vorkommenden Bauschäden an Hochbauten sind auf bauphysikalische Mängel zurückzuführen. Die Verteuerung der Energie, insbesondere der für Heizung erforderlichen Energie, ließ die Möglichkeiten der Wärmedämmung, des Sonnenschutzes und dergleichen bedeutungsvoll werden.

Nun ist es nicht so, daß bauphysikalische Notwendigkeiten beim Entwurf und beim Konstruieren unserer Bauwerke ganz unbeachtet bleiben. Bei allen größeren Bauvorhaben werden in der Regel Spezialisten zugezogen. Die Bauingenieure sind weitgehend der Meinung, daß die Anordnung bauphysikalisch günstiger Maßnahmen in den Verantwortungsbereich des Architekten falle, der Fachingenieure mit bauphysikalischen Kenntnissen zuzieht, ähnlich wie er mit Heizungs- und Lüftungsingenieuren zusammenarbeitet. Die vielen Bauschäden zeigen jedoch, daß dies nicht der richtige Weg ist. Man sollte Architekten die Lösung technischer Aufgaben, die Berechnungen und Bemessungen erfordern, nicht anlasten. Der Beruf des Architekten ist, wenn er ernst genommen wird, schwierig und umfangreich genug. Der Architekt muß natürlich Bauphysik soweit verstehen, daß er bauphysikalische Anforderungen festlegen und Lösungen einigermaßen beurteilen kann.

Es ist jedoch Aufgabe des Bauingenieurs, die rechnerischen Nachweise für die Erfüllung der Anforderungen zu erbringen und in konstruktiver Hinsicht die besten Lösungen zu wählen oder zu entwickeln. Hierfür sind gründliche bauphysikalische Kenntnisse notwendig. Wir Bauingenieure sollten endlich die einseitige Betrachtung unserer Aufgabe mit dem Übergewicht der baustatischen Berechnungen aufgeben und unsere Aufgaben ganzheitlich sehen. Dies ist umso notwendiger, als die optimale Erfüllung bauphysikalischer Anforderungen auf die konstruktive Durchbildung großen Einfluß hat und damit zu den Aufgaben des konstruktiven Ingenieurs gehört.

In der Bundesrepublik Deutschland gehört die Nachprüfung der Erfüllung bauphysikalischer Anforderungen schon seit mehreren Jahren zu den Aufgaben der Prüfingenieure, die Bauingenieure sind. Dies ist eine logische und richtige Lösung. Sie bedingt aber, daß Bauphysik bei der Ausbildung der Bauingenieure in den verschiedenen Schulen mit dem nötigen Gewicht gelehrt wird und daß die praktizierenden Ingenieure sich die notwendigen Kenntnisse aneignen und diese bei ihren Arbeiten beachten.

Unsere Internationale Vereinigung umfaßt die Ingenieure, die sich mit Brücken- und Hochbau beschäftigen. Gute Lösungen im Hochbau bedingen bauphysikalische Entwurfsarbeit. Es ist daher notwendig, daß sich auch diese Vereinigung ernsthaft mit dem neuen Gebiet der Bauphysik beschäftigt. Aus diesem Grunde hat unsere Technische Kommission vor 2 Jahren die Arbeitsgruppe Bauphysik gegründet und als Vorsitzenden Herrn Professor Dr. Gertis bestimmt, der sich mit sehr großem Engagement dieser Wissenschaft widmet und bereits viele wertvolle Forschungsbeiträge geleistet hat. Auch in anderen Ländern sind entsprechende Fachkräfte herangewachsen.

Der Bedeutung der Bauphysik entsprechend haben wir für diesen Kongreß zunächst einen vollen Tag für die Arbeitssitzungen vorgesehen. Leider sind nur verhältnismäßig wenige Beiträge eingegangen, so daß ein halber Tag hierfür genügt.

Es ist jedoch unser dringender Wunsch, daß besonders die im Hochbau tätigen Bauingenieure sich in Zukunft der bauphysikalischen Probleme mehr annehmen und damit einer weiteren Zersplitterung unseres Berufes in kleine, enge Spezialgebiete vorbeugen. Eine solche Zersplitterung und Verengung würde viele Nachteile für unseren Beruf erbringen. Wir müssen uns darüber im klaren sein, daß die Erfüllung der bauphysikalischen Anforderungen für die Nutzer unserer Bauwerke genauso wichtig ist wie die Gewährleistung der Standsicherheit der Tragwerke. Wir sollten also begreifen, daß Bauphysik so wichtig ist wie Baustatik und daß dies auch bei der Arbeit unserer Internationalen Vereinigung zu berücksichtigen ist.

Introduction

Building physics, having been established as a scientific branch 50 years ago, has produced many valuable research results. Nevertheless, building physics has not found much acceptance in practice so far and has been badly neglected in teaching at universities. It is high time for planning and constructing civil engineers to regard building physics as serious and for universities to take notice of and include the subject of building physics into their teaching programme.

The definition of building physics comprises the technical and physical phenomena in structures which have to do with heat, moisture, fire, sound, noise and acoustics as well as with light and lighting. The properties of structures in these respects are of decisive importance for the psychic and physical comfort of people who dwell in or make use of the buildings. The behaviour of structures depends on these properties. In the last few decades, about 80 % of the frequent damage in structures were caused by the phenomena of building physics. Due to the price increase of energy, in particular of heating energy, the possibilities of thermal insulation, sunshading and the like have become more and more important.

It is not true that the necessities of building physics are completely disregarded in the design and construction of buildings. In all large building projects, specialists are consulted as a rule. Civil engineers are generally of the opinion that the architect should be responsible for taking measures favourable with regard to building physics; the architect, however, consults expert engineers with knowledge of building physics, just about the same way as he cooperates with heating and ventilating engineers. Numerous cases of building damage, however, show that this is not the right way. Architects should not be charged with the solution of technical questions requiring calculations and measurements. If taken seriously, the profession of the architect is rather difficult and extensive. Of course, the architect should have as much knowledge of building physics as to be able to set up requirements of building physics and to judge solutions to a certain degree.

However, it is the civil engineer's business to prove by calculations that the requirements can be met and to choose or develop the best solutions possible in construction. For this purpose, profound knowledge of building physics is necessary. Civil engineers should stop looking at their business from one side with preponderance of static calculations and start looking at their business in its entirety. This is the more necessary as optimum realization of requirements in building physics has great influence on structural design, thus being the civil engineer's task.

For quite a number of years, in the Federal Republic of Germany, it has become a task of testing engineers - who are civil engineers - to check whether requirements of building physics are really met. This is a logical and correct solution which, however, necessitates that due emphasis is put on building physics in the training of civil engineers at the different schools and that engineers in practice acquire relevant knowledge and observe it in their work.

Our International Association comprises those engineers dealing with bridge and structural engineering. Good solutions in structural engineering require design development with respect to building physics. Therefore, it is necessary for our Association to seriously deal with the new field of building physics. For this reason, two years ago our Technical Commission has founded the working group building physics under the chairmanship of Professor Dr.-Ing. Gertis devoting himself with great commitment to this science and having already done much valuable research work. In the meantime, experts have come out in other countries, too.

According to the importance of building physics, we had planned a whole day of this Congress for seminars. Unfortunately, only a small number of papers have been received so that half a day is sufficient.

It is, however, our earnest request that in future civil engineers dealing with structural engineering should take more care of problems of building physics in order to prevent further splitting of our profession into small and narrow special scopes. Such splitting and narrowing would be very detrimental to our profession. We must be aware of the fact that, if the requirements of building physics are met, this is of equally high importance both for the users of our buildings as well as for the stability of supporting structures. We should, therefore, realize that building physics is as important as statics and should take this into consideration for the work of our International Association.

Leere Seite
Blank page
Page vide

VI

The Interaction of the Structure and of the Physical Environment within the Building

L'interaction entre la structure d'un bâtiment et son environnement

Die gegenseitige Beeinflussung der Struktur und der Bauklimatik

HENRY J. COWAN
Professor of Architectural Science
University of Sydney
Sydney, Australia

SUMMARY
In an age of more expensive energy, greater advantage could be taken of the environmental potential of the structure. Load-bearing walls can improve the thermal environment both in summer and in winter. Projecting floor slabs, and to a lesser extent projecting columns, can be used for sunshading, particularly in the subtropics. Concrete floor slabs attenuate airborne sound.

RESUME
La crise énergétique rend absolument essentielle une meilleure utilisation des possibilités virtuelles de l'environnement de la structure d'un bâtiment. Les murs porteurs amélioreraient les conditions thermiques en hiver aussi bien qu'en été. Les dalles de plancher et les colonnes en saillie protégeraient contre le soleil. Ceci s'appliquerait surtout aux pays tropicaux. Les dalles en béton atténueraient le bruit.

ZUSAMMENFASSUNG
In einem Zeitalter höherer Energiekosten könnte man mehr Gebrauch von dem bauphysikalischen Potential der Struktur machen. Lasttragende Wände können die Temperierung sowohl im Sommer als auch im Winter verbessern. Vorspringende Deckenplatten, und im geringeren Mass auch vorspringende Säulen, können zur Abschattung benutzt werden, besonders in den Subtropen. Beton-Deckenplatten dämpfen Luftlärm.

1. STRUCTURE AND ENVIRONMENT PRIOR TO THE 19th CENTURY

In the great buildings of the Middle Ages and the Renaissance the walls were load-bearing, and therefore part of the structure.

In summer, solid masonry buildings are pleasantly cool because of the thermal inertia of the masonry walls and roofs: the structure performs a secondary function by acting as a thermal store. In most parts of the world it is only necessary to reduce the temperature by a few degrees below the outside shade temperature to achieve pleasant conditions in summer, so that the thermal inertia is effective without artificial cooling.

Winter heating presents greater problems, because a much larger temperature change may be required for thermal comfort. The thermal inertia is equally helpful in reverse, but not sufficient in cool climates.

2. THE SKELETON FRAME, MODERN ARCHITECTURE, AND THE ENERGY CRISIS

In the late 19th century it became possible to design a skeleton frame to resist the loads acting on the building, and the load-bearing walls became unnecessary. At the same time the invention of the passenger lift increased the height of buildings. The simplistic methods for the design of load-bearing walls used in the late 19th century produced very thick walls, 1.83 m in the case of the 16-storey Monadnock Building erected in Chicago in 1891. Load-bearing walls were thereafter used mainly for low-rise buildings.

When the modern style of architecture came into existence, the scientific basis of environmental design received little attention. The technical emphasis was on the structure and the materials. Le Corbusier, Gropius and Mies van der Rohe were all interested in the lightness of the structure made possible by the skeleton frame, and the use of glass curtain walls to emphasize that lightness.

Energy was cheap and plentiful, and energy conservation was considered only insofar as it affected the overall cost, if it was considered at all. It is no coincidence that articles on Post-Modern Architecture started to appear shortly after the "energy crisis" of 1973.

3. THE STRUCTURAL ENGINEER AND THE INTERIOR ENVIRONMENT

Prior to the 19th century the architect designed both the structure and the interior environment of his buildings. Today these functions are divided between the architect, the structural engineer, and the mechanical/electrical engineer. It is not clear who is responsible for considering the environmental potential of the structure, and the establishment by the IABSE of the Task Group on Building Physics is therefore particularly welcome.

If we consider the life-cycle cost of the building, and allow for the steep increase in the cost of energy which seems highly probable, a return to load-bearing walls is appropriate for many building types.

Even if load-bearing walls cost more than a skeleton frame and curtain walls, this may be a worthwhile solution because of the energy saved. Moreover, modern methods for the design of load-bearing walls [1] which consider the contribution of the cross walls and the floors, produce much thinner walls for tall buildings than would have been possible in 1891. Twenty-storey buildings can today be erected with load-bearing walls 250 mm thick, which is only 14% of the thickness of the walls of the 16-storey Monadnock Building.

The structure can also be utilized for sunshading. A projection of the floor slab can provide completely effective sunshading in the subtropics at very small cost (Figure 1), if the building is suitably oriented and the extent of the projection precisely designed. Projecting columns can provide partial shading from the western sun.

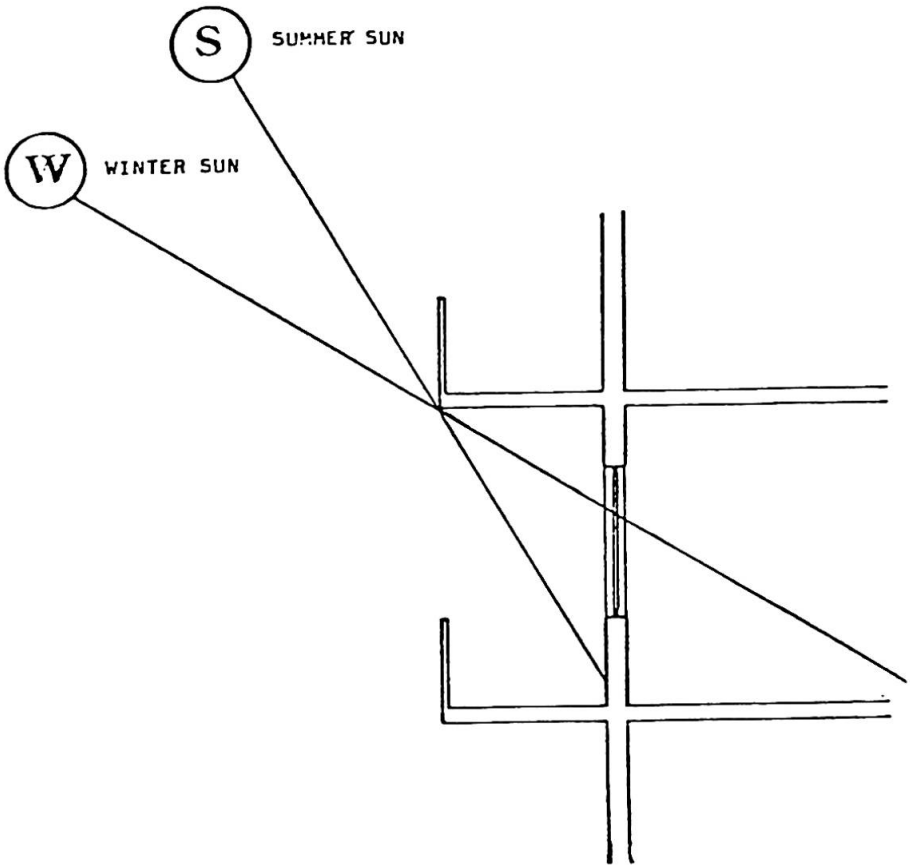


Figure 1

Buildings in or near the subtropics, whose principal facades can be oriented approximately north and south, are suitable for a simple and direct utilization of solar energy. The floor slab is designed to project beyond the southern (northern in the southern hemisphere) facade by a distance which depends on the latitude of the orientation. This allows the sun to shine through the window in winter (W), but excludes it in summer (S).

Sunlight can be wholly excluded for about two months in the year, and fully admitted for about two months during the coldest part of winter. Sunlight penetration can be designed to commence at noon on one equinox, and terminate at noon on the other. An ordinary large window thus acts as an effective and cheap solar collector.

The solar heating can be enhanced by the thermal inertia of the reinforced concrete floor, provided that a hard floor surface is acceptable, such as concrete, tiles or terrazzo. The solar heat is then stored in the concrete slab, and emitted gradually after sunset. The thermal inertia is reduced if wall-to-wall carpet is used which insulates the concrete slab.

As with all solar heating systems, it is necessary to have an alternative heat source for night time and for days when the sun is not shining.

The projection of the floor slab to form a narrow balcony generally *reduced* the maximum bending moment in a continuous reinforced concrete slab.

The ideal sunshading device does its job without interfering with natural ventilation, and without blocking natural light or the view which is one of the attractions of many high-rise buildings. Projecting floor slabs and columns meet these criteria.

In many multi-storey buildings designed in the 1950's and 1960's it has been

necessary to keep the blinds almost permanently drawn in summer because too much solar heat would otherwise have been admitted. As the rooms are too dark with the blinds drawn, the electric lights are in use even on a bright sunny day. Artificial lighting produces a great deal of heat, which has to be removed by the air conditioning plant. Evidently the structure could be used to reduce the size of the air conditioning plant.

A concrete floor slab can also be used for sound attenuation. Concrete is an excellent insulator against airborne sound, and the acoustic environment of some apartment buildings could have been improved at a small cost by using a thicker reinforced concrete floor slab, possibly in conjunction with slightly larger spans. The flat plate structure, which uses thicker slabs because it deletes the beams, thus has particular merit for apartment buildings.

REFERENCE

[1] Design of Masonry Structures. Chapter 13, Volume CB, Monograph on Planning and Design of Tall Buildings. American Society for Civil Engineers, New York, 1978.

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.

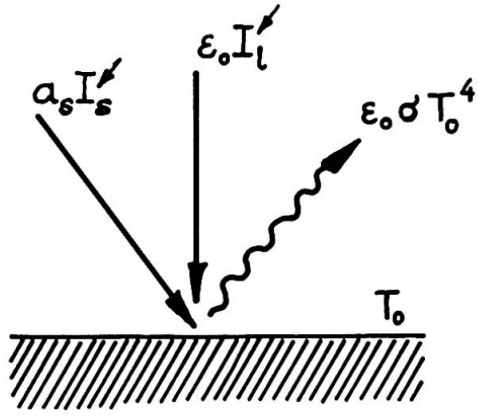
Die vorliegenden Arbeiten wurden im Rahmen eines mehrjährigen Forschungsprojektes des Schweizerischen Nationalfonds, Nationales Programm "Energie", gemeinsam von der Eidg. Materialprüfungsanstalt EMPA in Dübendorf und der Eidg. Technischen Hochschule ETH in Zürich, durchgeführt. Das Projekt wird ebenfalls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

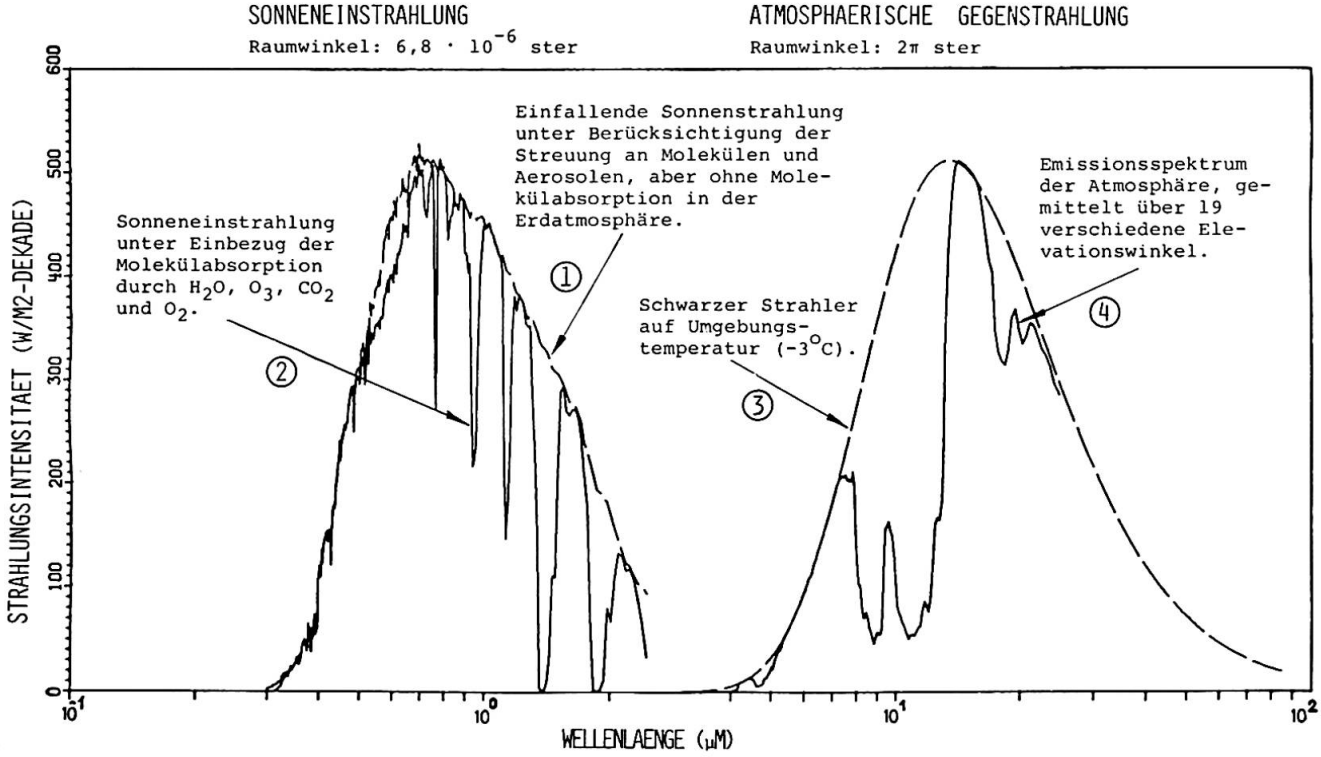


Abbildung 2: Vergleich zwischen den Intensitäten der Sonneneinstrahlung und der atmosphärischen Gegenstrahlung auf eine horizontale Ebene (Mittlere Breite, Winter, 600 m über Meer). Eine schwarze Fläche auf Umgebungstemperatur (-3°C) strahlt ca. 300 W/m2 ab, wogegen die Atmosphäre an einem klaren Wintertag 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.

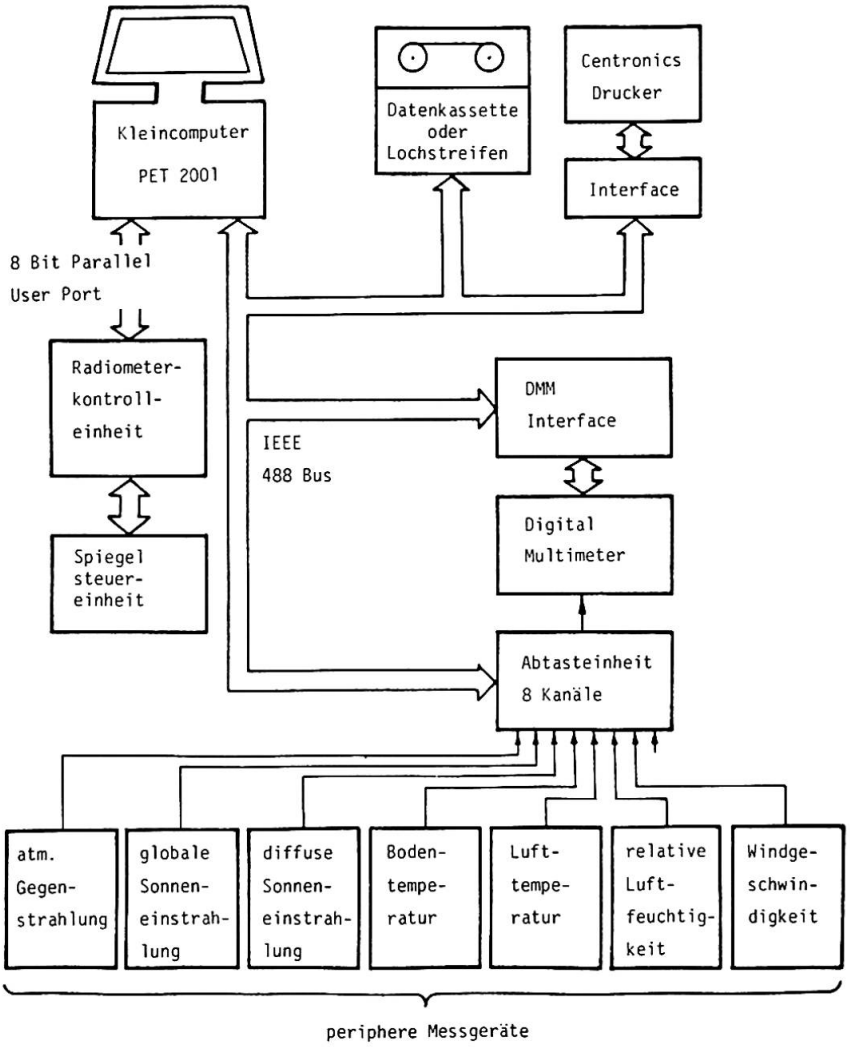


Abbildung 3: Blockdiagramm der automatischen Wetterstation

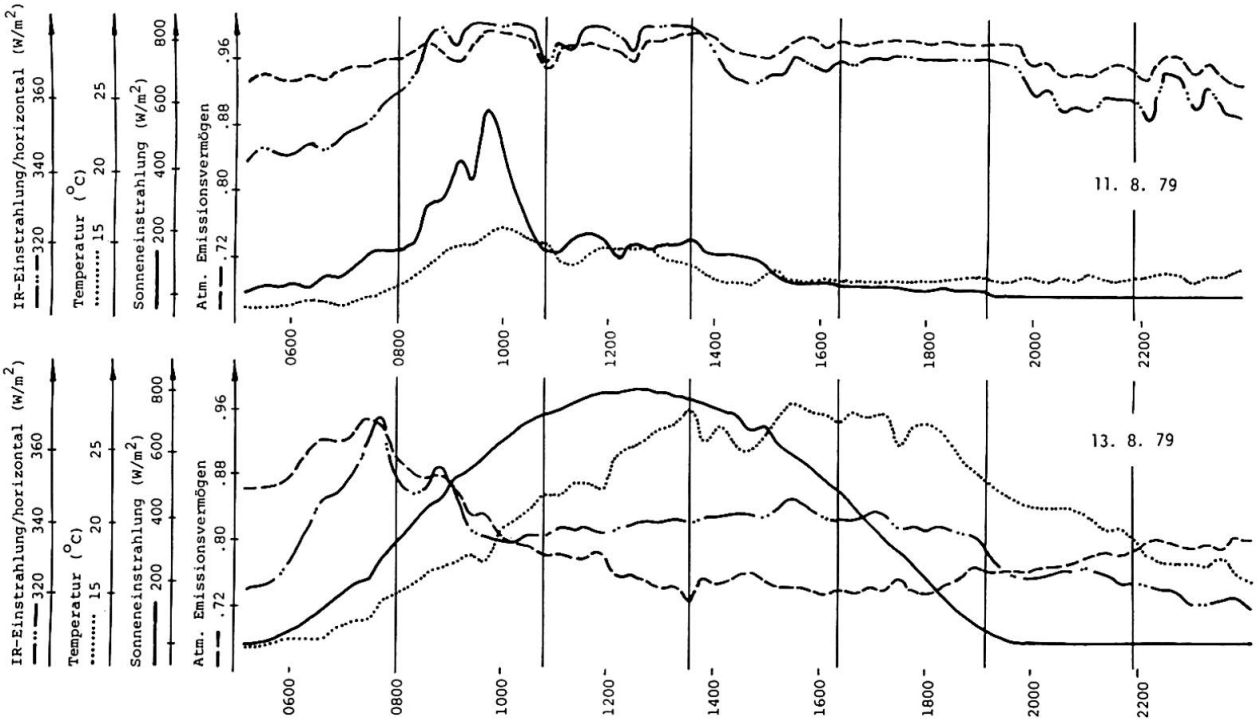


Abbildung 4: Auszug aus Datenstreifen der autom. Wetterstation in Zürich für einen klaren (untere Kurve) rsp. bewölkten (obere Kurve) Sommertag

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.

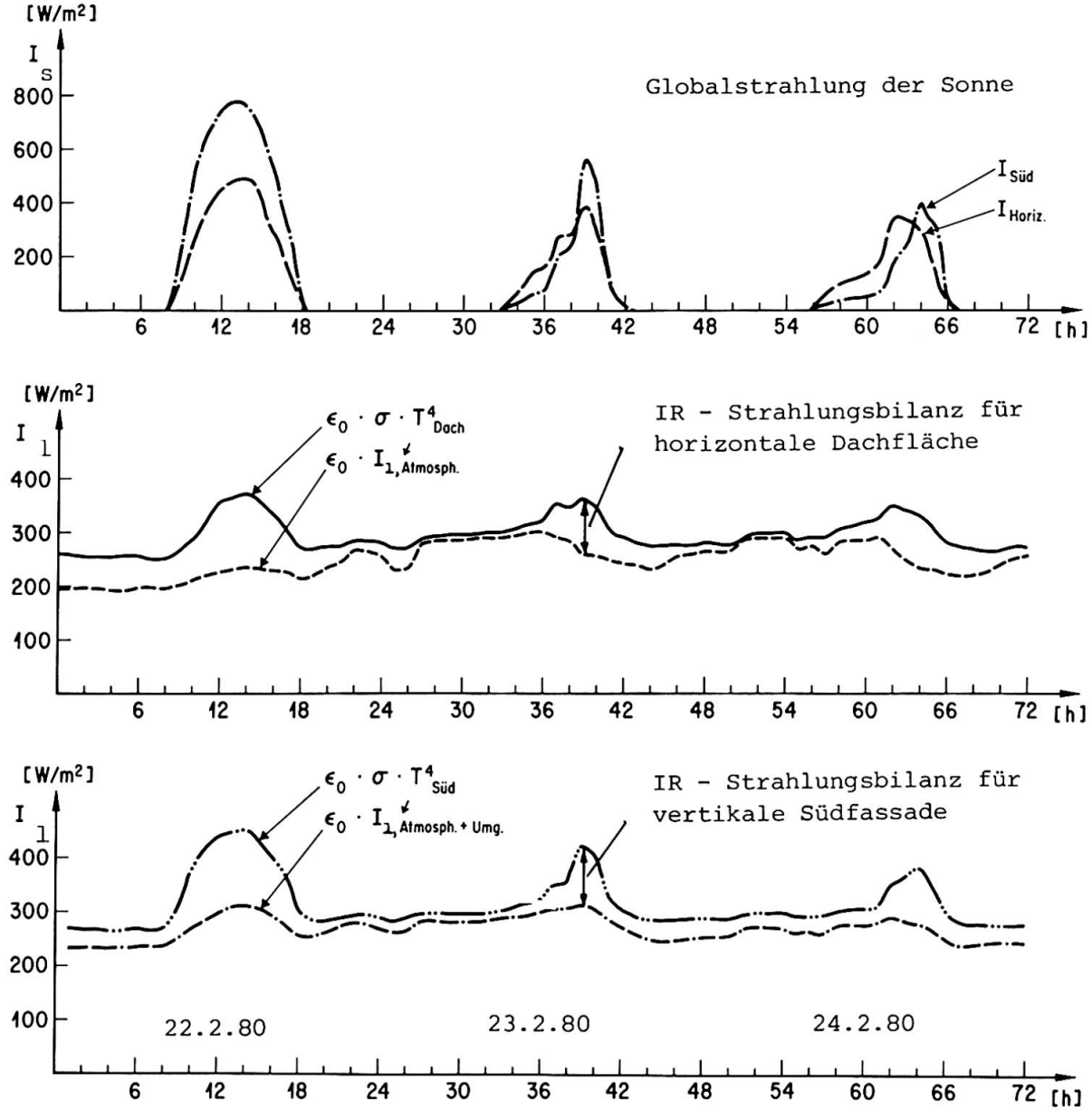


Abbildung 5: Messungen von typischen Strahlungstagesgängen im Winter (Messstation Maugwil (SG), 600 m über Meer, Schweiz)

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.

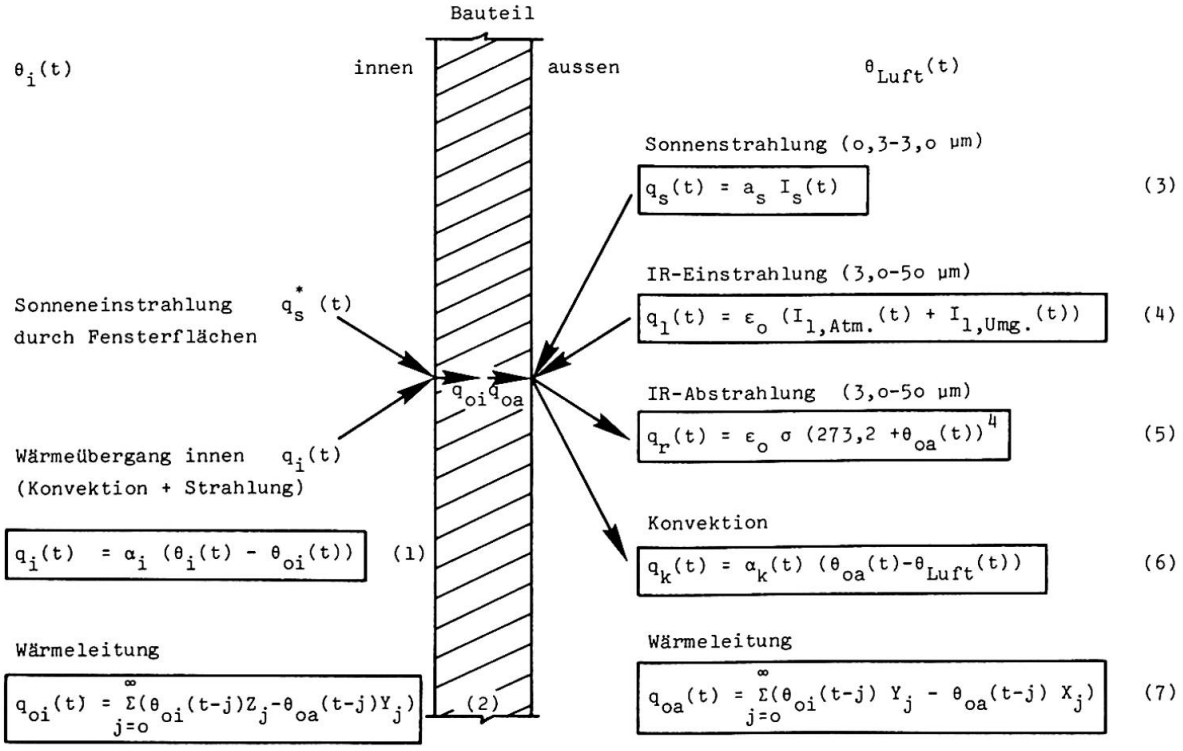


Abbildung 6: Darstellung der an der Gebäudehülle auftretenden Wärmeströme

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.

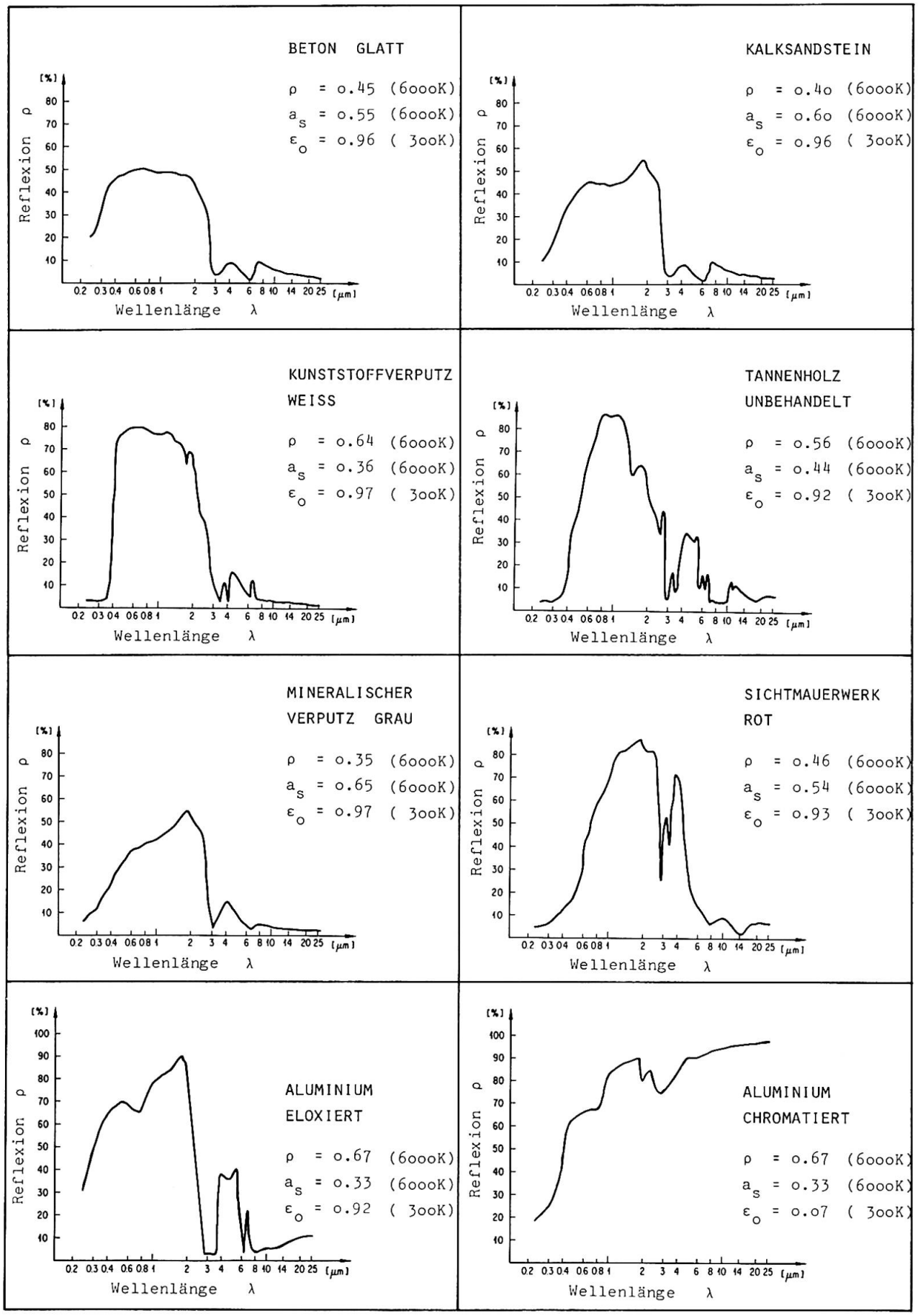


Tabelle 1: Spektrale Oberflächeneigenschaften von Baumaterialien

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.

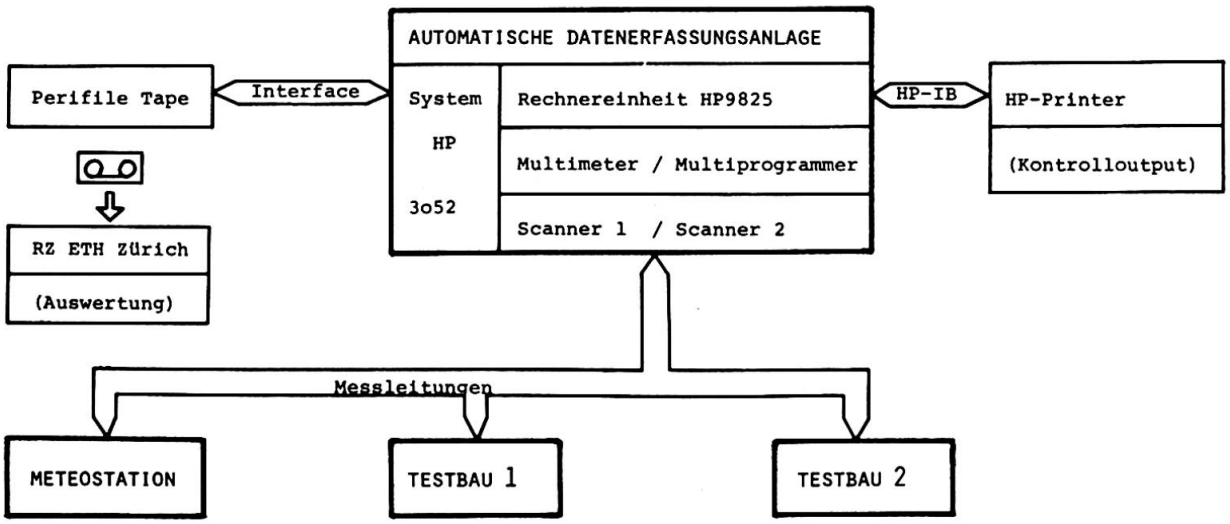


Abbildung 7: Messanordnung zur Bestimmung des thermischen Verhaltens von zwei Testbauten.

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:

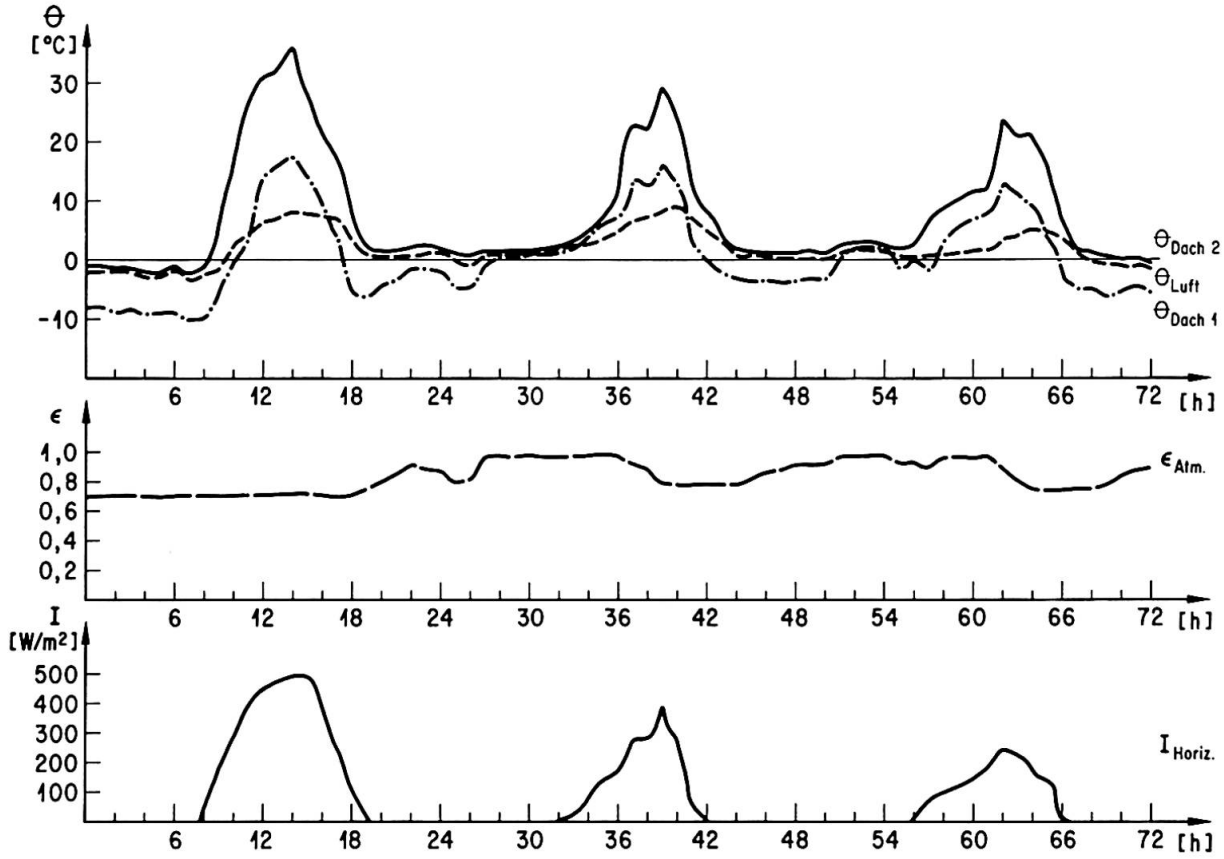


Abbildung 8: Zusammenstellung der Messergebnisse
- Temperaturverläufe $\theta_{Dach\ 1}$ (IR-schwarz), $\theta_{Dach\ 2}$ (IR-reflektierend), θ_{Luft}
- Emissivität der Atmosphäre $\varepsilon_{Atm} = \frac{I_{l,atm}}{\sigma T_L^4}$
- Sonneneinstrahlung I_{Horiz}

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.

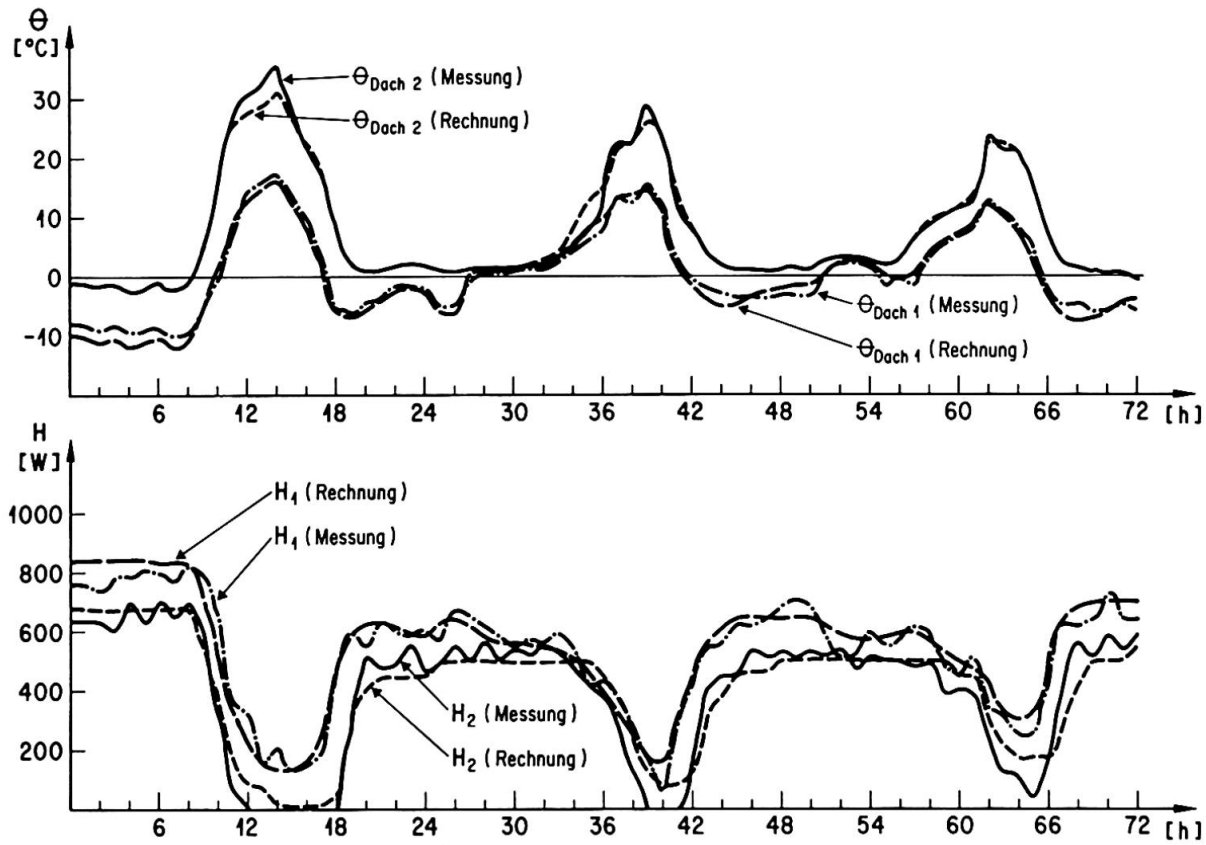


Abbildung 9: Korrelationsverhalten zwischen Messungen und Rechenmodell

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)

VI

Zur Berechnung des Heizenergiebedarfs

On the Calculation of Heating Energy Demand

Calcul du besoin en énergie de chauffage

KARL PETZOLD
Professor Dr. sc. techn.
Technische Universität
Dresden, DDR

ZUSAMMENFASSUNG
Ein einfaches Verfahren zur Berechnung des Heizenergiebedarfs wird angegeben, das den Zusammenhang mit den Parametern des Gebäudes und mit dem Aussenklima deutlich macht. Der Einfluss des Strahlungsgewinns am Fenster wird diskutiert. Ein kritischer Wärmedurchgangskoeffizient wird angegeben, der unterschritten werden muss, damit der Strahlungsgewinn grösser wird als die Verluste.

SUMMARY
A simple procedure of calculating the heating energy demand is presented elucidating the relation between the parameters of the building and the outside conditions. The effect of the gain in radiation at the windows is discussed. A critical coefficient of heat transfer is given which must not be exceeded if the gain in radiation is to be greater than the loss.

RESUME
L'article présente un procédé simple pour calculer le besoin en énergie de chauffage d'un édifice. Ce procédé met en évidence la corrélation avec les paramètres de l'édifice et le climat extérieur. L'influence du gain de radiation à la fenêtre est discutée. Un coefficient critique de transfert de la chaleur est proposé: il représente la limite à ne pas dépasser pour que le gain de radiation soit plus grand que les pertes.

Um durch eine sinnvolle Gestaltung der Gebäude und durch baukonstruktive Maßnahmen gezielt Heizenergie einsparen zu können, um also energiefreundlich bauen zu können, muß der Heizenergiebedarf berechnet werden können. Ein solches Berechnungsverfahren muß hinreichend zuverlässig sein; es muß aber vor allem schnell und unkompliziert den Zusammenhang zwischen den Parametern des Gebäudes, dem Außenklima und dem Heizenergiebedarf erkennen lassen.

1. HEIZENERGIEBEDARF

Unter Heizenergiebedarf wird die Heizenergiemenge verstanden, die (im statistischen Mittel) jährlich aufzuwenden ist, um im Gebäude eine vorgegebene mittlere Raumlufttemperatur ϑ_{Rm} aufrechtzuerhalten.

Die Wärmeverluste des Gebäudes sind bekanntlich proportional dem Wärmewert des Abstromes (bezogen auf die Geschoßfläche A_B), der den Lüftungswärmebedarf und den Transmissionswärmebedarf der n Transmissionsflächen (Dach, Außenwände, Fenster, Kellerdecken und erdanliegende Flächen) erfaßt:

$$w_\infty = \left[\dot{V} \cdot \varrho_L c_L + \sum_n (k \cdot A_T)_n \right] / A_B \qquad (1)$$

($\dot{V}$ Luftdurchsatz durch das Gebäude; ϱ_L Dichte der Luft; c_L spezifische Wärmekapazität der Luft; k Wärmedurchgangskoeffizient der Transmissionsfläche; A_T Größe der Transmissionsfläche; A_B Geschoßfläche). Für die Kellerdecken sind nicht die vollen Wärmedurchgangskoeffizienten k_K anzusetzen, sondern nur etwa $(0{,}5 \cdot k_K)$, für erdanliegende Flächen (unmittelbar an das Erdreich angrenzende Flächen) statt k_E' nur etwa $(0{,}7 \cdot k_E')$. Damit wird berücksichtigt, daß Kellertemperatur und Temperatur des Grundwassers höher liegen als die Außenlufttemperatur, auf die die Wärmeverluste des Gebäudes bezogen sind.

Den Verlusten steht ein Wärmegewinn gegenüber, und zwar durch die sog. innere Wärmelast und durch Strahlungsgewinn. Die über die Heizperiode gemittelte innere Wärmelast $\dot{q}_{Nm}$ setzt sich zusammen aus der Wärmeabgabe der im Gebäude befindlichen Personen, der Beleuchtung und der Maschinen. In Wohnbauten z.B. beträgt

sie etwa $\dot{q}_{Nm} = \dot{Q}_{Nm}/A_B = 4\ W/m^2$ (bezogen auf die Geschoßfläche A_B).

Der Strahlungsgewinn aus der Sonnenstrahlung wird durch den Faktor des Strahlungsgewinnes

$$\phi_S = \phi_{S,F} + \phi_{S,A} + \phi_{S,K} \tag{2}$$

beschrieben. Am Fenster ist der Faktor des Strahlungsgewinns

$$\phi_{S,F} = \delta_m \cdot A_{FG}/A_B \ . \tag{3}$$

A_{FG} ist die Glasfläche des Fensters, A_B die Geschoßfläche und δ_m der über die Heizperiode gemittelte Durchlässigkeitskoeffizient des Glases. Für unverschattete Fenster kann etwa $\delta_m = 0{,}6$, für zeitweilig verschattete Fenster (z.B. durch Bäume) $\delta_m = 0{,}3$ gesetzt werden, für vollverschattete Fenster ist etwa $\delta_m = 0{,}1$ (z.B. in dicht bebauten Altstädten). Diese Durchlässigkeitskoeffizienten gelten für klares Tafelglas. Für Sonnenschutzgläser ergeben sich bedeutend kleinere Werte; z. B. betragen die Durchlässigkeitskoeffizienten bei Absorptionsglas nur etwa 2/3, bei Reflexionsglas sogar nur etwa 1/3 der Werte, die für klares Tafelglas genannt wurden.

Die Außenkonstruktionsflächen (Außenwände, Dach) absorbieren Sonnenstrahlungsenergie, und zwar umso mehr, je dunkler ihre Oberflächen gefärbt sind, und diese Energie wird im Innenraum umso stärker wirksam, je größer der Wärmedurchgangskoeffizient k ist ($\phi_{S,A}$ s. Bild 1).

Sind zur Raumheizung Sonnenkollektoren eingesetzt, so ist

$$\phi_{S,K} = \eta_{K,H} \cdot A_K/A_B \tag{4}$$

A_K/A_B ist die Kollektoroberfläche je m^2 Geschoßfläche, $\eta_{K,H}$ der über die Heizzeit gemittelte Wirkungsgrad der Kollektoranlage (einschließlich des zugehörigen Versorgungssystems). Es ist etwa $\eta_{K,H} \leqq 0{,}2$. Sind die Kollektoren auf dem Dach angeordnet, muß die durch die Kollektoren verschattete Fläche von der Außenkonstruktionsfläche A_T abgezogen werden. Damit wird $\phi_{S,A}$ kleiner, und der Nutzen der Kollektoren verringert sich wesentlich.

Die Klimaelemente, die über den Energieaustausch zwischen Gebäude und Umgebung bestimmen, sind die Außenlufttemperatur ϑ_{em} und die Intensität der Gesamtstrahlung der Sonne G_m. Letzere ist von der Himmelsrichtung stark abhängig. Zwischen den über die Heizdauer Z_H gemittelten Werten $G_{m,H}$ und $\vartheta_{em,H}$ besteht der Zusammenhang [17]:

$$G_{m,H} = a + b \cdot \vartheta_{em,H} \quad (5)$$

Für einige charakteristische Wärmedämmgebiete (WDG) Mitteleuropas sind die Werte a und b in Tafel 1 angegeben.

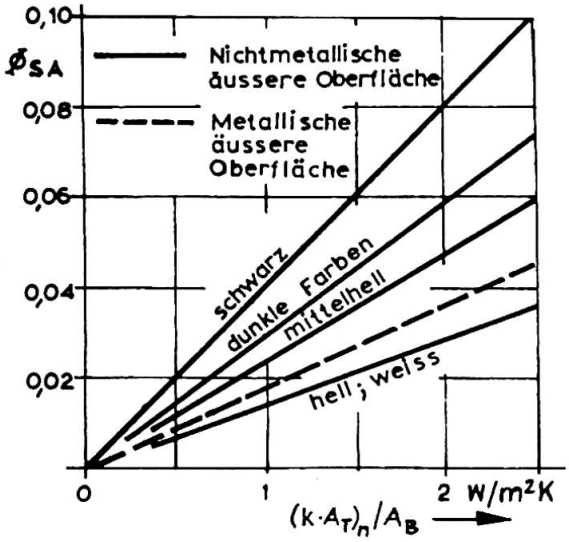


Bild 1 Faktor des Strahlungsgewinns $\phi_{S,A}$ an Außenkonstruktionsflächen (Außenwände, Dach)

Tafel 1

		WDG 1: Mitteleuropa, Tiefland (Werte von Potsdam)				WDG 3: Mitteleuropa, Mittelgebirgslagen > 500 m über NN			
		Horizontal	Nord	Ost West	Süd	Horizontal	Nord	Ost West	Süd
a	W/m^2	35,0	12,8	25,6	38,4	77,6	25,2	50,4	75,6
b	$W/m^2 K$	9,5	2,8	5,5	8,3	13,2	3,5	7,0	10,5
h	W/m^2	59,0	19,0	39,4	59,2	110,0	34,0	68,0	102,0

Liegt die Außenlufttemperatur ϑ_{em} unter der Heizgrenztemperatur ϑ_H, muß geheizt werden. Die Heizgrenztemperatur ergibt sich aus einer Energiebilanz. Wegen der Phasenverschiebung zwischen Außenlufttemperatur ϑ_{em} und mittlerer Gesamtstrahlung G_m [2] liegt sie im Herbst bei einem höheren Wert ($\vartheta_{H,1}$ in Bild 2) als im Frühjahr ($\vartheta_{H,2}$). Für die Berechnung des Heizenergiebedarfs kann diese Phasenverschiebung vernachlässigt werden - wie schon in Gl. (5) geschehen. Die Heizgrenztemperatur ist dann

$$\vartheta_H = \frac{\vartheta_{H,1} + \vartheta_{H,2}}{2} = \frac{w_\infty \cdot \vartheta_{Rm} - \dot{q}_{Nm} - \sum_n (\Phi_S \cdot a)_n}{w_\infty + \sum_n (\Phi_S \cdot b)_n} . \qquad (6)$$

Der Heizenergiebedarf $\dot{q}_{H,a}$, der je m^2 Geschoßfläche auftritt, ergibt sich dann aus einer Energiebilanz nach Bild 2 zu:

$$\dot{q}_{H,a} = Z_H \left[w_\infty (\vartheta_{Rm} - \vartheta_{em,H}) - \dot{q}_{Nm} - \sum_n (\Phi_S \cdot G_{m,H})_n \right] \qquad (7)$$

$$= \left[w_\infty + \sum_n (\Phi_S \; b)_n \right] \cdot Z_H \cdot (\vartheta_H - \vartheta_{em,H}) .$$

Die Außenlufttemperatur $\vartheta_{em,H}$, die sich im Mittel über die Heizperiode einstellt, kann als Funktion der Heizgrenztemperatur ϑ_H geschrieben werden [3], ebenso die Heizdauer Z_H (Bild 2):

$$\vartheta_{em,H} = C_1 \cdot \vartheta_H^{n1} \quad \text{bzw.}$$

$$Z_H = C_2 \cdot \vartheta_H^{n2} \qquad (8)$$

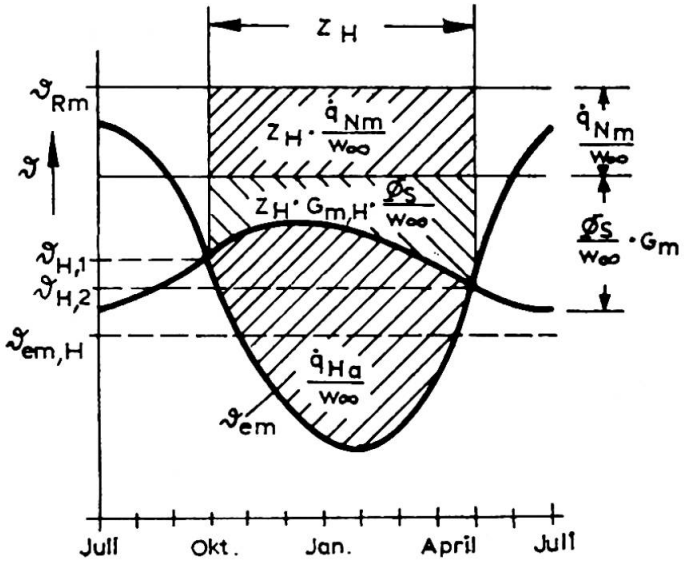


Bild 2 Heizenergiebedarf $\dot{q}_{H,a}$ während eines Jahres (schematisch)

Für Mitteleuropa sind die Werte nach Tafel 2 einzusetzen. Damit erweist sich der auf den 1. Faktor in Gl. (7) bezogene Heizenergiebedarf $\dot{q}_{H,a}$ als eine eindeutige Funktion der Heizgrenztemperatur ϑ_H (Bild 3).

Tafel 2

	C_1	C_2	n_1	n_2	C_K [h/a]	ϑ_0 [°C]
WDG 1	0,118	1315	1,40	0,565	4700	2,6
WDG 3	$2{,}54 \cdot 10^{-6}$	1550	5,65	0,678	8300	2,2

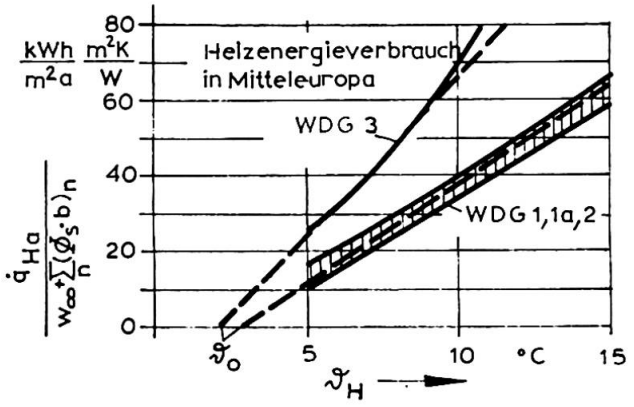


Bild 3 Heizenergiebedarf $\dot{q}_{H,a}$ nach Gl. (7) (ausgezogene Linie) und nach Gl. (9) (strichierte Linie)

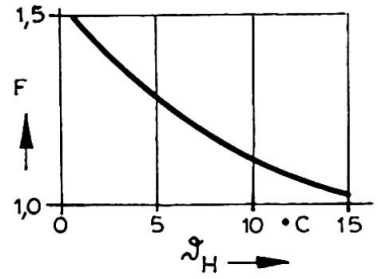


Bild 4 Faktor F, um den sich der Heizenergiebedarf eines leichten Gebäudes (m_B = 100 kg/m²) gegenüber einem schweren (m_B= 800 kg/m²) vergrößert (Heizperiode 1968, WDG 1; w_∞ = 3,0 W/m²K).

Diese Beziehung kann recht gut durch eine Gerade angenähert werden (Bild 3). Mit der Klimagebiets-Konstanten C_K nach Tafel 2 ist der Heizenergiebedarf in guter Näherung

$$\dot{q}_{H,a} = C_K \left[w_\infty \; (\vartheta_{Rm} - \vartheta_O) - g \right] . \qquad (9)$$

Darin ist der Wärmegewinn mit den Werten nach Tafel 1 und 2:

$$g = \dot{q}_{Nm} + \sum_n \; (\Phi_S \cdot h)_n \quad \text{mit } h = a + \vartheta_o \cdot b . \qquad (10)$$

Die Gln. (7) und (9) sind im Bereich $5 < \vartheta_H < 15$ °C (WDG 1) bzw. $5 < \vartheta_H < 12$ °C (WDG 3) gültig. Oberhalb dieses Gültigkeitsbereiches muß das ganze Jahr über geheizt werden. Wird die untere Grenze unterschritten, wird die Heizdauer zu kurz als daß noch mit Monatsmittelwerten gearbeitet werden könnte. Dann ist auch das Wärmebeharrungsvermögen des Gebäudes bzw. seine Bauwerksmasse nicht mehr zu vernachlässigen. Leichtbauten haben unterhalb $\vartheta_H \approx 5$ °C einen deutlich höheren Heizenergiebedarf als schwere Bauwerke (Bild 4).

2. GRADTAGZAHL

Der auf die Einheit des Wärmewertes des Abstromes bezogene Heizenergiebedarf ($\dot{q}_{H,a}/w_\infty$) hat die Dimension einer Gradtagzahl.

Die Gradtagzahl ist also nicht - wie vielfach angenommen - eine vom Gebäude unabhängige Größe, die für jedes Gebäude den Einfluß des lokalen Klimas auf den Heizenergiebedarf kennzeichnet. Sie ist von der Heizgrenztemperatur ϑ_H und damit von den Bauwerksparametern abhängig. Vernachlässigt man das, vergibt man sich die Möglichkeit zum zielgerichteten energiefreundlichen Bauen.

3. EINFLUß DER GEBÄUDEPARAMETER

Durch Vergrößerung der Gebäudetiefe wird die Transmissionsfläche A_T je m^2 Geschoßfläche A_B verringert, damit wird nach Gl. (1) w_∞ kleiner, und der Heizenergiebedarf verringert sich.

Im mehrgeschossigen Wohnungsbau bringt eine Vergrößerung der Gebäudetiefe z.B. von 12,0 auf 14,4 m nach Bild 3 eine Verminderung des Heizenergiebedarfes um 6...12 % (je nach Länge der Wohnblocks, nach der Anzahl der Geschosse, der Gebäudeorientierung u. dgl.). Bei Einfamilienhäusern ist zwar A_T/A_B um ein Mehrfaches größer als bei Reihenhäusern. Trotzdem erhöht sich der Heizenergiebedarf nicht proportional der Oberfläche, weil der Lüftungswärmebedarf ($\dot{V} \cdot \varrho_L \cdot c_L$) etwa der gleiche ist, weil wegen der stärkeren nächtlichen Auskühlung [3] die mittlere Raumlufttemperatur bei Einfamilienhäusern ($\vartheta_{Rm} \approx 17$ °C) niedriger liegt als bei Reihenhäusern ($\vartheta_{Rm} \approx 20$ °C) und weil der Strahlungsgewinn g nach Gl. (10) in der Regel größer ist. Anzustreben ist ein "Gebäude kleinster Oberfläche je Einheit Geschoßfläche".

Von großem Einfluß ist der Strahlungsgewinn durch das Fenster. Dieser kann sogar größer werden als die Wärmeverluste des Fensters, so daß die Wärmebilanz des Fensters im Mittel über die Heizperiode positiv wird (Bild 5). In diesem Falle wird im Mittel über die Heizperiode dem Raum durch Sonnenstrahlung mehr Energie zugeführt als ihm durch Transmission entzogen wird. Das ist zumindest bei Südfenstern (sowie bei Oberlichtern, die etwa die gleichen Werte liefern) möglich; bei nach Osten oder Westen (Bild 5), ganz besonders aber bei nach Norden orientierten Fenstern ist das jedoch praktisch nicht zu erreichen.

Eine positive Energiebilanz ist im allgemeinen nur zu erreichen, wenn die Fenster unverschattet sind und keine Sonnenschutzgläser verwendet werden ($\varepsilon_m = 0{,}6$) und wenn der Wärmedurchgangskoeffizient k_F des Fensters hinreichend klein ist. Aus Gl. (7) ergibt sich der Wärmestrom $\dot{q}_{Ha,F}$, der (im Mittel über die Heizdauer) infolge der Wärmeverluste und des Wärmegewinns durch das Fenster fließt, zu (Bild 5)

$$A_B \cdot \dot{q}_{Ha,F} = Z_H \left[\varepsilon_m \cdot A_{FG} \cdot G_{m,H} - k_F \cdot A_F \, (\vartheta_{Rm} - \vartheta_{em,H}) \right] \quad (11)$$

Darin ist A_{FG} die Glasfläche des Fensters und A_F die Fensterfläche, auf die der Wärmedurchgangskoeffizient k_F bezogen ist. Ist $\dot{q}_{Ha,F} > 0$, überwiegt der Wärmegewinn des Fensters, bei $\dot{q}_{Ha,F} < 0$ überwiegen die Verluste. Der kritische Wärmedurchgangskoeffizient $k_{F,0}$, für den die Wärmebilanz gerade ausgeglichen, d.h. für den $\dot{q}_{Ha,F} = 0$ ist, ergibt sich mit Gl. (5) zu

$$k_{F,0} = \varepsilon_m \cdot \frac{A_{FG}}{A_F} \cdot \frac{(a + b \cdot \vartheta_{em,H})}{(\vartheta_{Rm} - \vartheta_{em,H})} \, . \quad (12)$$

Die Wärmebilanz am Fenster ist also nicht unabhängig vom Gebäude aufzustellen. Außer der mittleren Raumlufttemperatur ϑ_{Rm} nimmt mit Gl. (8) auch die Heizgrenztemperatur ϑ_H darauf Einfluß. Letztere bestimmt die Länge der Heizperiode, und der Strahlungsgewinn ist umso bedeutender, je länger die Heizperiode, d.h. je größer die Heizgrenztemperatur ϑ_H ist. Im Gebirge ist die Heizperiode länger als im Binnentiefland, und folglich muß dort auch in Zeiten geheizt werden, in denen eine außerordentlich intensive Sonnenstrahlung vorhanden ist. Deswegen ist (bei gleicher Heizgrenztemperatur ϑ_H) die Energiebilanz im WDG 3 bereits bei größeren Wärmedurchgangskoeffizienten k_F positiv als im WDG 1 (Bild 5). Ein gleiches ist auch in Nordeuropa und in anderen Zonen mit längeren Heizperioden zu erwarten.

Der Wärmedurchgangskoeffizient k_F des Fensters muß schon sehr klein sein, wenn die Bilanz positiv sein soll. Andere Maßnahmen zum energiefreundlichen Bauen (kleinere äußere Oberfläche, bessere Wärmedämmung usw.) werden in Zukunft offensichtlich dazu führen, daß sich die Heizgrenztemperatur unter die gegenwärtig

üblichen Werte verringert. Das schränkt den Strahlungsgewinn durch das Fenster ein, und es dürfte in Mitteleuropa nur in Ausnahmefällen möglich sein, an den Fenstern eine positive Energiebilanz zu realisieren. Je energiefreundlicher, je wärmedichter ein Gebäude gebaut wird, umso niedriger ist seine Heizgrenztemperatur und umso kürzer ist auch seine Heizdauer Z_H, umso weniger fällt dann auch der Strahlungsgewinn ins Gewicht.

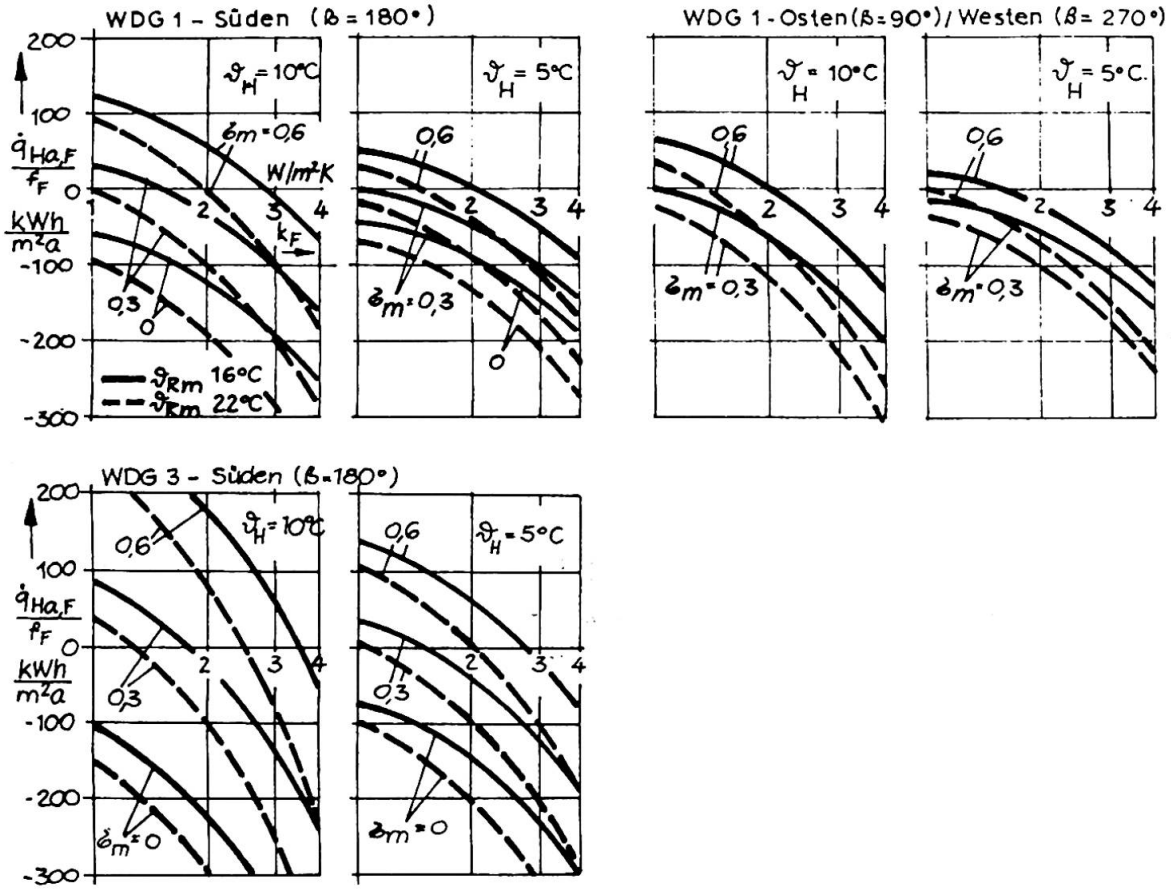


Bild 5 Heizenergiebedarf $\dot{q}_{Ha,F}$, der durch das Fenster entsteht, bezogen auf die Fensterfläche $f_F = A_F/A_B$ (positive Werte: der Strahlungsgewinn ist im Mittel über die Heizperiode größer als die Wärmeverluste; bei negativen Werten überwiegen die Verluste). k_F Wärmedurchgangskoeffizient des Fensters; $A_{FG}/A_F = 0{,}9$.

Deswegen kann nicht für große Fensterflächen plädiert werden. Auch andere Gründe (Diskomfortzonen in Fensternähe, sommerliche Raumlufttemperaturen) sprechen gegen große Fensterflächen. Deswegen gilt wohl nach wie vor die Regel: Die Fenster sollten nicht größer gemacht werden als erforderlich; Räume, die große Fensterflächen benötigen, sollten möglichst auf die Südseite verlegt werden; und im übrigen sollten möglichst wärmedichte Fenster (mit kleinem Wärmedurchgangskoeffizienten k_F) eingesetzt werden, da die Fenster wohl immer eine große Verlustquelle für Heizenergie sind.

Literatur

1. PETZOLD, K.; KUNZE, W.: Eine Verallgemeinerung der Beziehung zur Berechnung des jährlichen Heizenergieaufwandes. Luft- und Kältetechnik 9 (1973) 2, S. 75-77.

2. PETZOLD, K.: Wärmelast. Berlin: Verlag Technik 1975, S. 33 f.

3. PETZOLD, K.: Der Einfluß des Gebäudes auf den Energieverbrauch bei unterbrochenem Betrieb von Heizungsanlagen. Stadt- und Gebäudetechnik 32 (1978) 10, S. 289-293; 11, S. 327-329.

VI

Pauschalanteil der Heizkosten in Wohngebäuden

Individual Share of Heating Expenses in Appartment Houses

Part forfaitaire des frais de chauffage dans les immeubles d'habitation

HEINRICH TRUEMPER
o.Prof. Dipl.-Ing.
Universität Dortmund
Dortmund, BRD

ZUSAMMENFASSUNG
Um den Pauschalanteil der einzelnen Wohnungen nach dem spezifischen Wärmebedarf unter Berücksichtigung des Mittelwertes des Hauses zu verteilen, bedarf es einer Berechnung, die für jedes Haus durchgeführt werden muss. Der optimale Prozentsatz des Pauschalanteils dürfte nach der Charakteristik des Hauses unterschiedlich sein.

SUMMARY
In order to assess the heating cost share for each appartment according to the specific heating needs, a calculation must be carried out for each appartment block. The average value of the appartment block is to be taken into account. The optimal share percentage may differ according to the characteristic of the building.

RESUME
Un calcul doit être fait pour chaque maison afin de déterminer la part forfaitaire des frais de chauffage des différents appartements; ce calcul est effectué à l'aide des besoins spécifiques de chaleur et en tenant compte de la valeur moyenne de la maison. Le pourcentage optimal de la part forfaitaire est fonction des caractéristiques de la maison.

1.0 Allgemeine Ausführungen

Bei Einsatz von Heizkostenverteilern nach Verdunstungsprinzip werden von den Gesamtkosten, die in einer Heizperiode anfallen, Anteile in der Größenordnung von 30 - 70 % der Gesamtkosten als Pauschalanteil nach der beheizten Wohnfläche verrechnet. Der verbleibende Rest wird nach den ablesbaren Werten der Heizkostenverteiler auf die einzelnen Verbraucher verteilt.

Der Pauschalanteil wird begründet mit den Nebenkosten für die Bereitschaft der Wärmeversorgung und zu einem Teil auch mit dem nicht vermeidbaren Wärmeaustausch zwischen benachbarten Wohnungen eines Gebäudes, vielfach auch mit Wärmediebstahl bezeichnet. Die Fehler bei der Ermittlung mit den Verdunstungsgeräten und die mögliche Manipulationsmöglichkeit derselben dürfte ein weiterer Grund der unterschiedlichen Pauschalanteile sein.

Nach den VDI-Richtlinien 2067 werden in der Bundesrepublik Deutschland für die Ermittlung der Jahreskosten folgende Kostengruppen aufgeführt:

a) Verbrauchsgebunde Kosten
b) Kapitalgebundene Kosten
c) Betriebsgebundene Kosten
d) Sonstige Kosten

Nach der Neubaumietenverordnung in der BRD dürfen jedoch kapitalgebundene Kosten nicht in Ansatz gebracht werden. Im folgenden werden die für den Betrieb einer ölgefeuerten zentralen Warmwasserheizung anfallenden Belastungen aufgeführt, die nach der Verordnung zulässig sind:

Brennstoffbedarf, Anlieferung und Lagerverluste
Stromverbrauch für Ölbrenner und Umwälzpumpen und Regelgeräte
Wartungsdienst für die Ölbrenneranlage
Wartungsdienst für die Regelanlagen
Kesselreinigung
Öltankreinigung und Kontrolle im 5-Jahres-Turnus
Kamin- und Rauchgas-Fuchsreinigung
Durchführung der Rauchgasmessungen (Immissionsschutzgesetz)
Bedienung und Überwachung der Gesamtanlage

Zur Vergleichsbetrachtung Brennstoffkosten, Nebenkosten, Pauschalanteil und Verteilung des Pauschalanteils in Abhängigkeit von den spezifischen Wärmebedarfswerten der Wohnung wird ein 3-geschossiges Wohnhaus mit 9 Wohnungen als Referenzobjekt ausgewählt.

Jede Wohnung hat 80 m² Wohnfläche und ist über einen Laubengang erschlossen, somit hat jede Wohnung den gleichen Grundriss,und auch die Fensterflächen auf der Nord- und Südseite gleichen sich.

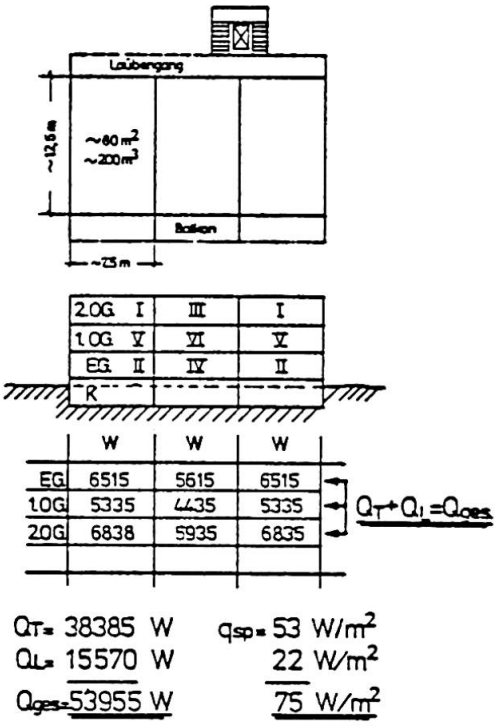


Bild 1

Bild 1 zeigt den schematischen Grundriss und Schnitt des Hauses mit den eingetragenen spezifischen Werten für die Transmissions- und Lüftungswärme nach DIN 4701.
Desweiteren sind der Gesamtwärmebedarf und die spezifischen Werte aufgeführt.

2.0 Ermittlung der Jahresbedarfswerte

2.1 Brennstoffbedarf für Leichtölfeuerung

Nach Recknagel-Sprenger ergibt sich für das betrachtete Gebäude ein Jahresbrennstoffbedarf für L-Öl bei 1.600 Vollbetriebsstunden zu:

B = 182 x 53,96 = 9.820 kg/a bzw. 11.700 ltr./a

Zum Vergleich mit bekannten spezifischen Gebäudewerten von 20 - 30 ltr./m²/a bei Gebäuden aus den 50er und 60er Jahren dürfte der sich hier ergebende Wert mit rd. 16 ltr.m²/a nur bei einer guten Bauausführung, Regelausstattung, verbrauchsorientierter Meßeinrichtung und sparwilligen Bewohnern möglich sein.

Der Recknagel-Sprenger basiert auf einen Heizungsgesamtwirkungsgrad von gesamt rd. 0,73, wobei im einzelnen folgende Werte angesetzt wurden:

Kesselverteilungswirkungsgrad	$\eta k = 0{,}85$
Verteilungswirkungsgrad	$\eta V = 0{,}93$
Stillstandwirkungsgrad	$\eta ST = 0{,}93$

2.2 Elektische Energie für Antriebe

Zur Anlage gehört der Brenner mit einem Antriebsmotor von rd. 0,4 kW Anschlußwert sowie 2 Umwälzpumpen für 2 Regelkreise mit je 0,25 kW Anschlußwert. Die Brenner benötigen für 1.600 Vollbetriebsstunden:

N = 1.600 x 0,4	=	640 kWh/a
Die 2 Umwälzpumpen benötigen für 6.000 Betriebsstunden		
N = 6.000 x 0,5	=	3.000 kWh/a
Jahresstrombedarf	=	3.640 kWh/a

3.0 Ermittlung der Jahresbetriebskosten

3.1 Brennstoffkosten (je ltr. Öl = 0,55 DM)	=	6.435,-- DM
3.2 Elektrischer Strom (0,10 DM/kWh)	=	364,-- DM
Grundgebühr und Zählergebühr	=	84,-- DM
3.3 Ölbrenner- Wartungs- und Kundendienst	=	200,-- DM
3.4 Regelanlage - Wartungs- und Kundendienst	=	100,-- DM
3.5 Jährliche Kesselreinigung	=	100,-- DM
Tankreinigung und Kontrolle (5-Jahresanteil)	=	60,-- DM
3.6 Kaminreinigung	=	80,-- DM
3.7 Rauchgasüberwachung	=	40,-- DM
3.8 Bedienung und Überwachung (VDI 2067) 50 Jahresstunden à DM 20,--	=	1.000,-- DM

Zusammenstellung

3.1 Brennstoff	6.435,-- DM
3.2 bis 3.9 Nebenkosten	2.028,-- DM
Jahresgesamtkosten	8.463,-- DM

4.0 Ermittlung des Pauschalanteils

4.1 Bisheriges Verfahren

In der Praxis wurden bisher zu den nachweisbaren Nebenkosten noch entsprechend dem Anlagenwirkungsgrdd ges. die gesamten zu erwartenden Verluste für Abgas, Verteilung und Stillstand hinzugerechnet, und dabei der Pauschalanteil ermittelt. Im vorliegenden Falle somit

3.2. bis 3.9	DM 2.028,--
Verluste 0,27 x 6.435	DM 1.737,--
Jahreswert-Pauschalanteil	DM 3.765,--

Damit wurden von den Gesamtjahreskosten mit 8.463,-- DM = 100 % ein Pauschalanteil von DM 3.765,-- somit 44 % ermittelt. Es wäre im Rahmen liegend beim vorliegenden Falle mit einer Pauschale von 40 - 50 % und den Restanteil nach einem gebrauchsabhängigen Verfahren zu verteilen.

4.2 Neuer Vorschlag zur Pauschalanteilermittlung

Die Hinzurechnung der gesamten Abgasverluste wie in (4.1) ist unter der Betrachtung, daß zum Zeitpunkt der Wärmeentnahme aus der zentralen Anlage der Nutzer auch den Anteil der Abgasverluste tragen müßte, nicht richtig. Die Abgasverluste können nur für den Bereich der Bereitschaft, der Verteilung und des Stillstandanteils zur Pauschale mit angesetzt werden. Hinsichtlich der Verteilungsverluste durch das Rohrleitungssystem sollte jedoch ein Wert von mindestens 10 - 13 % angesetzt werden; eine Größenordnung, die bereits vor längerer Zeit von "Reiher" bei zentralen Anlagen in Wohnhäusern ermittelt wurde.

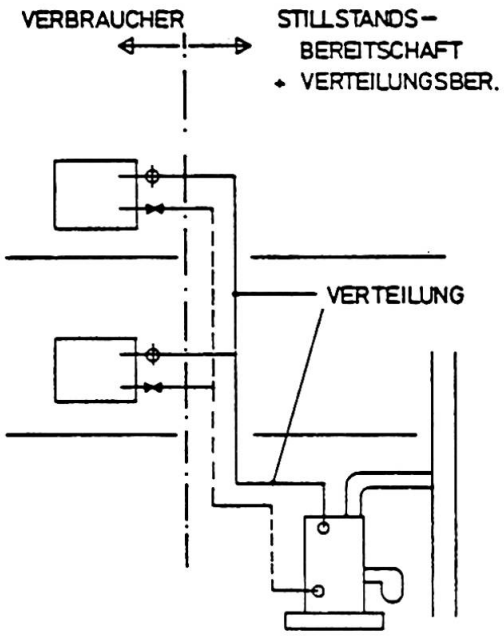


Bild 2

STILLSTANDSVERLUSTE	3%
VERTEILUNGSVERLUSTE	10%
Σ	13%

Bild 2 Schematische Darstellung des Anfallbereiches der Verteilverluste

Nach dem neuen Vorschlag ergeben sich damit für den Pauschalanteil folgende Jahreskosten:

3.2 bis 3.9	Nebenkosten	DM	2.028,--
	Verteilverluste 0,16 x 6.435,--	DM	1.030,--
Jahreskosten für den Pauschalanteil somit		DM	3.058,--

Bezogen auf die Jahresgesamtkosten ergibt sich somit eine Pauschale zu rd. 36 % und im Vergleich zu den Ermittlungen zu 4.1 eine Reduzierung von rd. 8 %.

5.0 Umlegung des Pauschalanteils auf die einzelnen Abnehmer

5.1 Bisheriges Verfahren der Umlegung

Der Pauschalanteil wurde bisher ohne Rücksicht auf die Lage der Wohnung ihrem spezifischen Wärmebedarf und dem möglichen Wärmeübergang zwischen den Wohnungen auf die jeweilige Wohnfläche umgelegt. In Bild 3 wurde zum hier betrachteten Projekt der neuen Wohnungen der spezifische Wärmebedarf für Qges. und getrennt für Q_T und Q_L in Säulenform dargestellt.

Der Lüftungswärmeanteil ist konstant angesetzt worden entsprechend dem notwendigen hygienischen Luftwechsel für Küche, Bad und WC nach DIN 18017 und VDI 2088 insgesamt mit 150 m³/h.

Die Wohnung mit der Spezifikation "I" erscheint zweimal, und setzt man sie zu 100 % als Maximalwert, dann hat der Mittelwert aller Wohnungen 88 % und die günstigste Wohnung mit der Spezifikation VI hat 65 %. Nimmt man jedoch den Lüftungsanteil heraus, dann ergeben sich

Wohnung I	=	100 %
Mittelwert	=	84 %
Wohnung VI	=	52 %

Unter Berücksichtigung desselben Mietpreises aller Wohnungen und der Möglichkeit der zusätzlichen Nutzung der Wohnung VI von den Nachbarwohnungen liegt damit eine Benachteiligung der Wohnung I vor, und auch die Wohnungen II bis IV sind, wenn auch gemindert, ebenfalls benachteiligt.

Die bisherigen hohen Pauschalumlagen mit 60 bis 60 % sollten einen gewisschen Ausgleich schaffen. Die sozial gerechteste Verteilung wäre die 100 %ige Umlegung der Gesamtkosten als Pauschale auf alle Wohnungen, jedoch ist damit der Anreiz zur Energieeinsparung vollends dahin.

5.2 Neuer Vorschlag zur Pauschalverteilung

Der Pauschalanteil mit 40 - 60 % wird nicht mehr als Mittelwert auf die Wohnfläche umgelegt, sondern mit Hilfe der spezifischen Wärmebelastung der verschiedenen Wohnungen werden Faktoren f1 und f2 ermittelt, und zwar:

$$f1 = \frac{qm\ (T + L)}{qsp}$$

$$F\ 2 = \frac{qm\ (T)}{qsp}$$

qm = mittlere spezifische Wärme = $\frac{Qges}{\text{Wohnfläche (des Gesamthauses)}}$

qsp = mittelre spezifische Wärme einer Wohnung
T = Transmissionsanteil
L = Lüftungsanteil

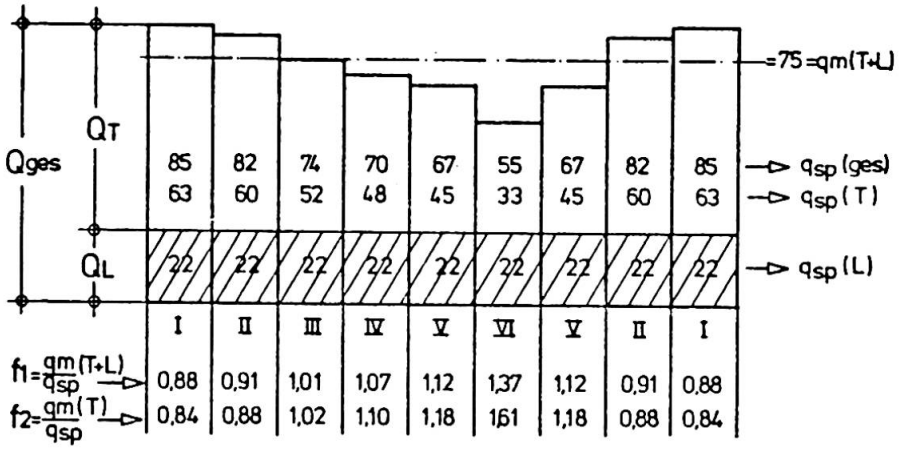


Bild 3

In Bild 3 sind die Säulenwerte der neuen Wohnungen aus dem Projekt nach Bild 1 dargestellt. In den untersten Zeilen sind die errechneten Werte f1 und f2 zu jeder Säule eingetragen. Entsprechend den spezifischen Werten ergeben sich
für f1 Zahlen von 0,88 bis 1,37 und
für f2 " 0,84 bis 1,61.

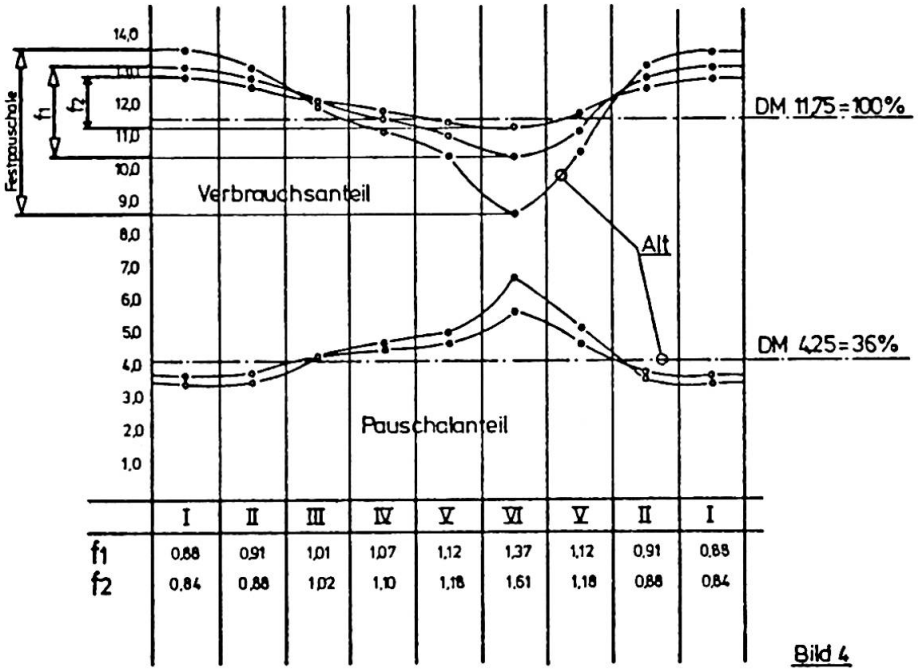


Bild 4

In Bild 4 wird nun die Heizkostenverteilung des Projektes von Bild 1 durchgeführt mit den ermittelten Nebenkostenwerten von 36 %. Bei der Aufteilung nach dem bisherigen Verfahren, ergeben sich für alle Wohnungen ein Pauschalanteil von DM 4,25 je m² Wohnfläche. Unter der Voraussetzung, daß alle Parteien entsprechend ihrem spezifischen Wärmebedarf dem zentralen Netz Wärme entnehmen, ergibt sich eine Gesamtbelastung zwischen 8,80 DM und 13,60 DM.

Unter Anwendung des Vorschlags der Verteilung mit den Faktoren f1 und f2 ändern sich die Werte wie folgt:

mit f1 = 10,50 DM bis 13,30 DM
mit f2 = 11,50 DM bis 12,90 DM

Unter Berücksichtigung des pauschalen Mittelwertes von DM 11,75 DM/m²/a wird mit f2 eine Einengung um 11,75 DM mit ± 3 - 8 % erreicht. Die Sparmaßnahmen der einzelnen Nutzer können hier noch nicht dargestellt werden, jedoch würde sich gegenüber der Festpauschale wohl ein erheblich besseres Bild einstellen.

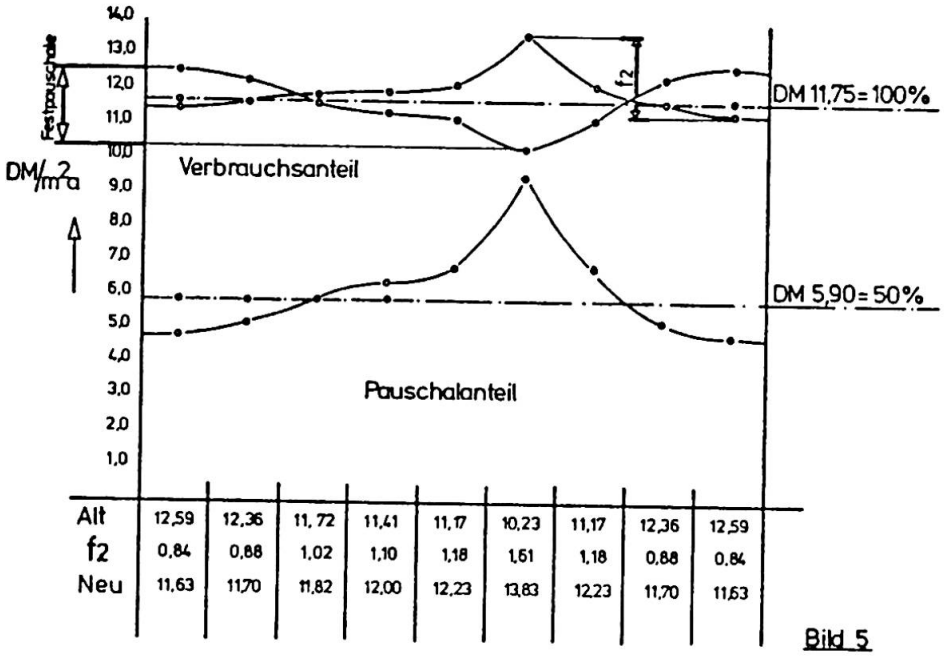


Bild 5

Mit Bild 5 wird ein Pauschalansatz von 50 % der Gesamtkosten eingesetzt, und es zeichnet sich für den Bereich der kleineren spezifischen Werte eine erhebliche Anhebung über dem Mittelwert in der Größenordnung zwischen 11,60 DM und 13,80 DM.

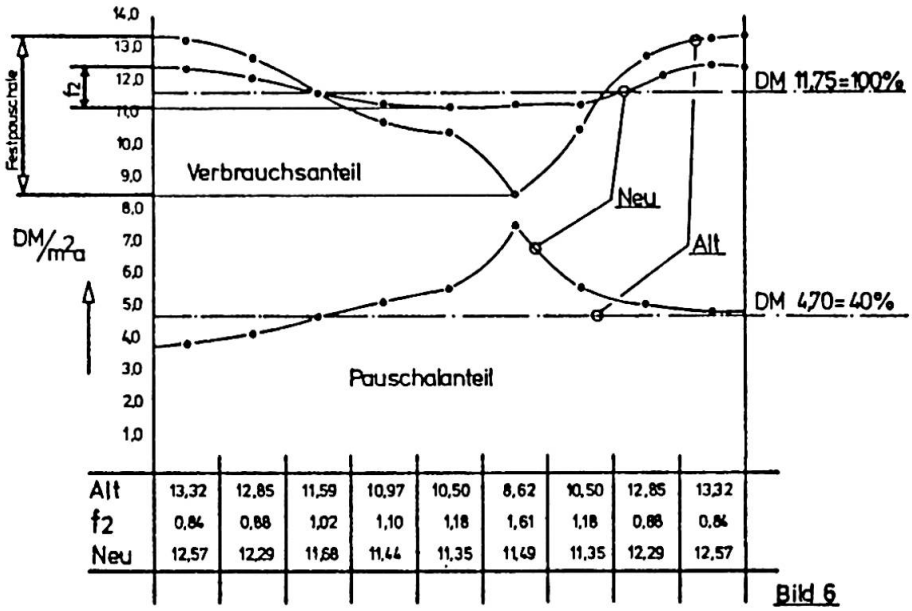


Bild 6

Mit Bild 6 wird eine Pauschalverteilung unter Berücksichtigung der Faktoren mit 40 % der Gesamtkosten angesetzt, und dabei ergibt sich von allen bisherigen Betrachtungen wohl die beste Einengung zwischen 12,57 DM und 11,35 DM und somit um den Mittelwert von 11,75 DM mit + 5 % und mit - 3 %.

Nach diesen Darstellungen von Bild 4 bis Bild 6 dürfte die Verteilung eines Pauschalanteils der Gesamtkosten zwischen 40 - 45 % die beste Verteilung unter Anwendung der ermittelten Faktoren f2 ergeben.

VI

Tests of Heat Transfer through Walls

Essais de transfert de chaleur au travers de murs

Versuche über Wärmeübertragung durch Wände

A.E. FIORATO
Manager
Portland Cement Association
Skokie, IL, USA

W.G. CORLEY
Divisional Director
Portland Cement Association
Skokie, IL, USA

SUMMARY
An investigation of heat transmission characteristics of masonry and wood frame walls is described. Steady-state and dynamic tests were conducted using a Calibrated Hot Box. Steady-state tests were used to obtain average thermal conductance (C) and thermal resistance (R) values. Dynamic tests provided a comparative measure of thermal response under a diurnal outdoor temperature cycle.

RESUME
Une étude des caractéristiques de transmission thermique de murs en maçonnerie et cadres en bois est présentée. Des essais statiques et dynamiques ont été entrepris dans une chambre chaude calibrée. Les essais statiques ont été utilisés pour obtenir les valeurs moyennes de conductance thermique (C) et résistance thermique (R). Les essais dynamiques ont permis une mesure comparative du comportement thermique durant un cycle diurne de température extérieure.

ZUSAMMENFASSUNG
Eine Untersuchung der Wärmenutzungseigenschaften von Mauerwerks- und Holztafelkonstruktionen wird beschrieben. Stationäre und instationäre Messungen werden durchgeführt nach der Heizkostenmethode. Für die Messung der mittleren Wärmeleitfähigkeit und des Wärmedurchlaufswiderstandes werden stationäre Verfahren angewendet. Instationäre Verfahren wurden für Vergleichsmessungen vorgesehen über die thermische Reaktion auf tägliche Aussentemperaturschwankungen.

1. INTRODUCTION

Design of building envelopes for energy efficiency has gained considerable importance as awareness and concern for energy and resource conservation have increased. This paper describes tests conducted to evaluate thermal performance of masonry and wood frame walls.

Primary emphasis of this investigation was to compare performance under steady-state and dynamic temperature conditions. Current designs are based primarily on steady-state thermal transmittance (U) values. It has been shown that steady-state coefficients do not adequately reflect actual performance. Tests in this program provide data to quantify the relationship between dynamic energy requirements and steady-state thermal coefficients.

2. TEST FACILITY

Tests were conducted in the Calibrated Hot Box facility of the Portland Cement Association's Construction Technology Laboratories. This facility is unique in that it is specifically designed to evalute thermal performance of large wall assemblies under dynamic as well as steady-state temperature conditions. Dynamic tests provide a means to realistically evaluate thermal response under laboratory simulated sol-air temperature conditions. A standard test method for the Calibrated Hot Box is being developed by the American Society for Testing and Materials.(1)

The Calibrated Hot Box Test facility, shown in Fig. 1, consists of two highly insulated chambers separated by a test wall. The test wall has nominal overall dimensions of 103x103 in. (2.62x2.62 m). During a test, temperatures in the outdoor chamber can be held constant or cycled between -20 and 120F (-29 and 49C). Temperature cycles can be programmed to simulate desired outdoor sol-air conditions. Indoor chamber air is maintained at constant room temperature between 65 and 80F (18 and 27C). A highly sensitive watt-hour meter is used to measure energy expended for heating and cooling the indoor chamber. This measurement, in combination with temperatures measured on the wall and in the chamber air, is used to determine heat transfer characteristics of the test wall.

Steady-state tests are conducted by maintaining both chambers at constant but different temperature levels. This provides a predetermined temperature differential between chambers. Temperatures are maintained until conditions of equilibrium are established. Under these conditions, heat flow through the test wall is essentially constant. Results of energy and temperature measurements are used to determine average thermal properties such as conductance (C), resistance (R), transmittance (U), and overall resistance (R_u).

Dynamic tests are conducted by maintaining the indoor chamber at constant temperature while outdoor chamber temperatures are cycled. Total energy required to maintain constant indoor temperature is used to evaluate performance of the test wall.

3. EXPERIMENTAL INVESTIGATION

The first major program utilizing the Calibrated Hot Box was jointly sponsored by the Portland Cement Association, the Brick Institute of America, and the National Concrete Masonry Association. Detailed information is reported in Reference 2.

Six wall assemblies were evaluated. These were:

1. 8-in. (200-mm) Hollow Concrete Block Wall
2. 8-in. (200-mm) Hollow Concrete Block Wall Insulated with Perlite Loose Fill
3. 10-in. (250-mm) Concrete Block-Clay Brick Cavity Wall
4. 10-in. (250-mm) Concrete Block-Clay Brick Cavity Wall Insulated with Perlite Loose Fill
5. Wood Frame Wall with 3-1/2-in. (90-mm) Blanket Insulation
6. Wood Frame Wall with 4-in. (100-mm) Clay Brick Veneer

Conditions established for the dynamic test are shown in Fig. 2. The outdoor sol-air temperature cycle is based on a diurnal cycle used by the National Bureau of Standards in their evaluation of a concrete masonry building.[3] The measured energy response curve, shown in Fig. 2(b), represents heating and cooling energy required to maintain an essentially constant indoor chamber temperature.

To compare energy requirements of each test wall for nominally identical test conditions, a measure of total energy demand was selected. This is defined in Fig. 2(b) as the shaded areas of the energy response curve. Results were normalized to represent one 24-hour cycle.

4. EXPERIMENTAL RESULTS

The relationship between steady-state and dynamic test results is summarized in Fig. 3. For each specimen, total energy demand for a 24-hr dynamic test cycle is plotted as a function of overall thermal resistance, R_u, obtained from steady-state tests.

Results indicate that increases in overall thermal resistance beyond an R_u-value of about 8 $hr \cdot ft^2 \cdot F/Btu$ ($1.41 K \cdot m^2/W$) did not result in corresponding decreases in energy demand.*

A significant decrease in energy demand was obtained by addition of loose fill insulation to the hollow block wall. This wall had a relatively low initial R_u-value. In this range, increasing insulation resulted in a considerable reduction in energy requirements.

*Note that experimental results are for an isolated wall subjected to one diurnal temperature cycle.

The reduction in energy demand obtained by addition of insulation to the cavity wall was also significant. However, it was not as large as that for the hollow block wall considering the relative increase in R_u that was obtained by adding loose fill. Thus, energy savings tended to decrease with increasing thermal resistance.

A major finding was that the insulated cavity wall had approximately the same energy demand as the wood frame wall even though the resistance of the frame wall was nearly twice that of the cavity wall.

Addition of brick veneer to the wood frame wall indicated the influence of mass. Reduction in energy demand was substantial considering the small increase in resistance.

Results of dynamic tests were also used to evaluate thermal lag. Lag is defined as the time required for peak cooling or heating load to be reached after maximum or minimum sol-air temperature is reached. Thermal lag is important because it is a measure of heat capacity or thermal inertia. The greater the lag, the greater the potential to "smooth out" and reduce peak heating and cooling energy demands. This can lead to greater efficiencies in equipment operation, smaller equipment, and lower peak utility demands.

Measured thermal lag is plotted as a function of wall weight in Fig. 4. Thermal lag increased significantly with wall weight. This is most apparent in the comparison of results for wood frame and wood frame-brick veneer walls. Addition of brick veneer increased wall weight from 5.2 to 45.1 psf (25 to 220 kg/m^2), and increased thermal lag from 2.0 to 6.5 hr.

It is also evident that loose fill insulation was more effective in increasing lag in the cavity wall than in the hollow block wall. It is probable that absence of thermal bridges in the cavity wall provided a more effective mechanism of insulation between the masses of the block and brick wythes.

5. CONCLUSIONS

The following conclusions are based on results obtained in this program:

1. Dynamic tests indicated that increasing thermal resistance from 2.8 to 8.5 $hr \cdot ft^2 \cdot F/Btu$ (0.49 to 1.50 $K \cdot m^2/W$) resulted in a significant decrease in energy requirements under dynamic conditions. Further increases in resistance were not as effective in reducing energy requirements.

2. Dynamic tests indicated that energy requirements for an insulated block-brick cavity wall with a thermal resistance of 8.5 $hr \cdot ft^2 \cdot F/Btu$ (1.50 $K \cdot m^2W$) were essentially equivalent to that of a wood frame wall with a thermal resistance of 14.8 $hr \cdot ft^2 \cdot F/Btu$ (2.61 $K \cdot m^2W$).

3. Addition of brick veneer to a wood frame wall resulted in a 7% increase in thermal resistance and a 35% decrease in dynamic energy requirements.

4. Thermal lag between cycles of outdoor temperature and energy response increase significantly with wall weight.

Results described in this paper represent an initial effort to experimentally evaluate thermal response of building envelopes under dynamic as well as steady-state conditions. Additional tests should be conducted to evaluate effects of different wall configurations and different temperature cycles.

6. REFERENCES

(1) "Standard Test Method for Thermal Performance of Building Assemblies by Means of a Calibrated Hot Box," Draft No. 5, Committee C-16: Thermal and Cryogenic Insulating Materials, American Society for Testing and Materials (ASTM), May 1979.

(2) Fiorato, A.E. and Cruz, C.R., "Thermal Performance of Masonry Walls," Proc. of the Fifth International Brick Masonry Conference, Washington, D.C., October 1979 (to be published).

(3) Peavy, B.A., Powell, F.J. and Burch, D.M., "Dynamic Thermal Performance of an Experimental Masonry Building," Building Science Series 45, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, July 1973, 98 pp.

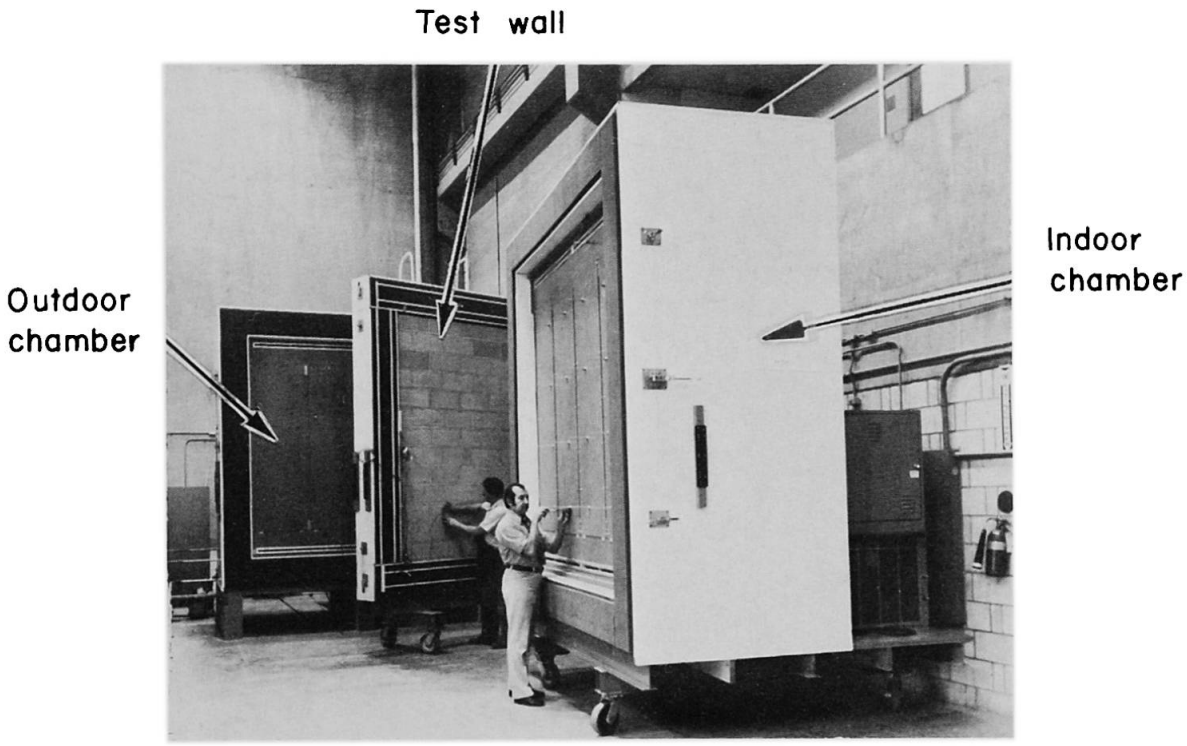
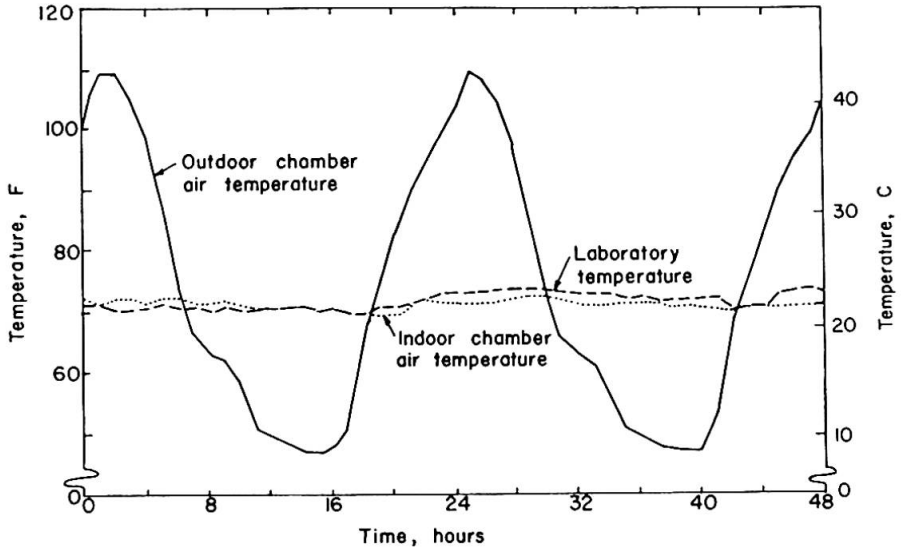
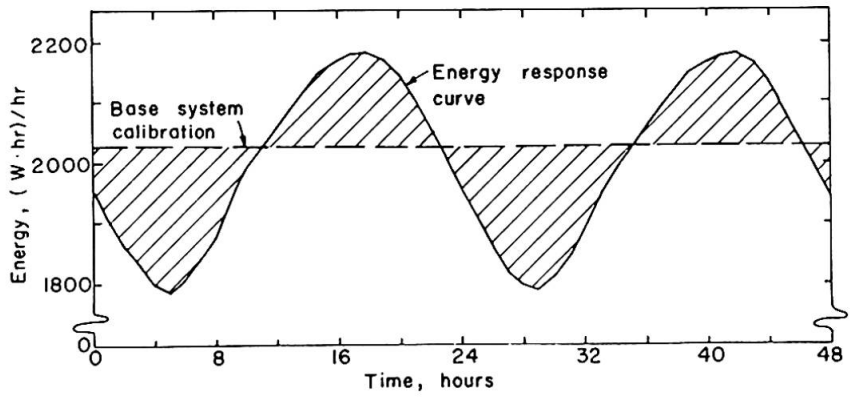


FIG. 1 CALIBRATED HOT BOX TEST FACILITY



(a) Input temperature



(b) Measured energy

FIG. 2 DYNAMIC TEST OF HOLLOW BLOCK WALL

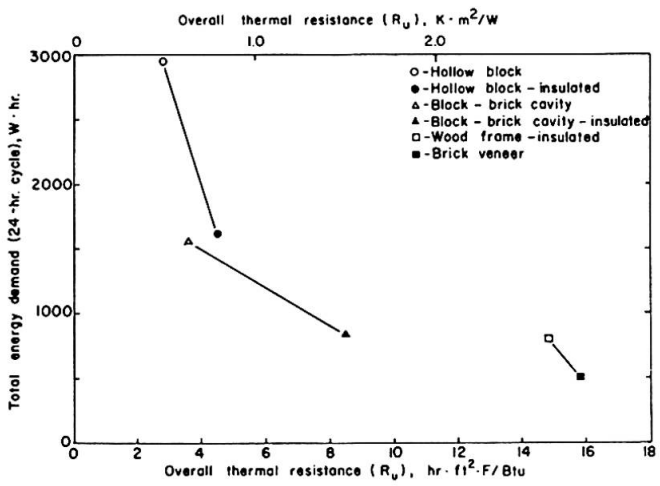


FIG. 3 HEATING AND COOLING ENERGY VS. OVERALL THERMAL RESISTANCE

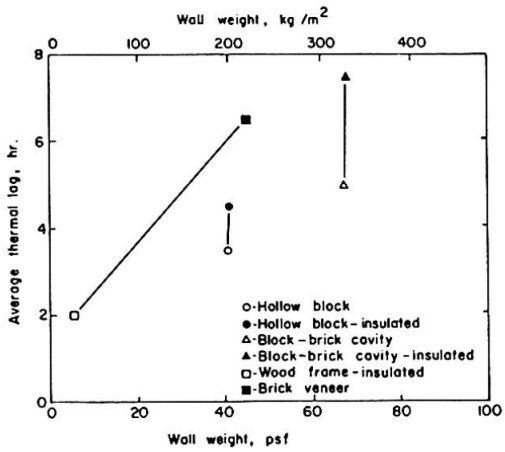


FIG. 4 EFFECT OF WALL WEIGHT ON THERMAL LAG

VI

Thermal Conductivity of the Moist Porous Building Material

La conductivité thermique de matériaux de construction poreux et humides

Wärmeleitfähigkeit feuchter poröser Baumaterialien

S. HOKOI
Assistant
University of Kyoto
Kyoto, Japan

G. HORIE
Prof. Dr. Eng.
University of Kyoto
Kyoto, Japan

T. IKEDA
Assistant, Dr. Eng.
University of Kyoto
Kyoto, Japan

SUMMARY
The implication of the thermal conductivity of a moist porous material was investigated by the equations of the simultaneous transfer of heat and moisture. As typical measuring methods, the steady state method and the periodic method were analysed and the thermal conductivities were measured by the periodic method.

RESUME
La conductivité thermique de matériaux de construction poreux et humides a été étudiée à l'aide des équations du transfert simultané de chaleur et d'humidité. Les méthodes habituelles ont été étudiées c-à-d la méthode statique et la méthode périodique. Les conductivités thermiques ont été mesurées à l'aide de la méthode périodique.

ZUSAMMENFASSUNG
Die Wärmeleitfähigkeit feuchter poröser Stoffe wurde mit Hilfe der Gleichungen der gekoppelten Wärme- und Feuchteübertragung untersucht. Als typische Messmethoden wurden die stationären und instationär-periodischen Verfahren analysiert. Die Wärmeleitfähigkeiten wurden mit dem letztgenannten Verfahren gemessen.

1. INTRODUCTION

Up to the present, many theories of heat and moisture transfer in the porous materials have been proposed in the fields of soil science, dry engineering and building engineering. Moreover these theories have been examined on the adequancy of the models by the comparison with the experimental results. But it has been seen that the theory of heat and moisture transfer had never been established completely because of the complexity of transfer mechanism and the difficulty of determination of transfer coefficients and of performance of detail experiments. Especialy as the process of condensation and evapolation, the theory of heat and moisture transfer in the wide region of moisture content in which vapour and liquid water transfer existed together have been studied in recent years.

Our purpose in this paper is to establish the theory which can predict the process of condensation. So, the experiments performed under the various conditions were considerably exact, and all the transfer coefficient involved in the theory was determined in detail.

2. THEORY

The theory examined in this paper is that arranged by M.Matsumoto in 1967 [1]. It was assumed in the theory that the porous materials were composed of the parts in which vapour transferd (pore parts), and the other parts in which absorbed and capillarily condensed water transfered (substance parts).

Vapour flux in the pore parts is given in Eq.(1).

$$q_v = -k_v \nabla X \tag{1}$$

Absorbed and capillarily condensed water flux in the substance parts is given in Eq.(2).

$$q_\ell = -D_{\theta\ell}\nabla\theta - D_{T\ell}\nabla T \tag{2}$$

Heat flux in the material is given in Eq.(3).

$$q_h = -\lambda\nabla T \tag{3}$$

Then,getting the balance of the heat and moisture, the following equations are obtained;

for vapour transfer,

$$C\gamma\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla\cdot(k_v\nabla X) + \alpha' S(X_i - X) \tag{4}$$

for liquid water transfer,

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \nabla\cdot(D_{\theta\ell}\nabla\theta) + \nabla\cdot(D_{T\ell}\nabla T) + \alpha_i' S(X - X_i) \tag{5}$$

for heat transfer,

$$C'\gamma'\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla\cdot(\lambda\nabla T) + R\,\alpha_i' S(X - X_i) \tag{6}$$

Here, considering $\alpha_i' = \infty$ (local equilibrium), the absorption isotherm is

$$X_i = X = g(\theta, T) \tag{7}$$

Therefore from Eq.(4),(5),(7), the basic differential equation for moisture transfer is expressed in Eq.(8).

$$(1 + C\gamma\frac{\partial g}{\partial\theta})\frac{\partial\theta}{\partial t} + (C\gamma\frac{\partial g}{\partial T})\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla\cdot(D_\theta\nabla\theta) + \nabla\cdot(D_T\nabla T) \tag{8}$$

here,

$$D_\theta = D_{\theta v} + D_{\theta\ell} = k_v\frac{\partial g}{\partial\theta} + D_{\theta\ell}\ ,\quad D_T = D_{Tv} + D_{T\ell} = k_v\frac{\partial g}{\partial T} + D_{T\ell} \tag{9}$$

Similarly from Eq.(4), (6), (7), the basic differential equation for heat transfer is expressed in Eq.(10).

$$(C'\gamma' + RC\gamma\frac{\partial g}{\partial T})\frac{\partial T}{\partial t} + (RC\gamma\frac{\partial g}{\partial\theta})\frac{\partial\theta}{\partial t} = \nabla\cdot(\lambda\nabla T) + R\nabla\cdot(D_{\theta v}\nabla\theta + D_{Tv}\nabla T) \tag{10}$$

Equation (8), (10) are the basic equations which we will examine in this paper. The above basic equations might reduce to Philip and de Vries's equation if getting $C\gamma = 0$, and correspond with Luikov's equation if getting $C\gamma = 0$ and moreover ε and λ as constant [2,3], here

$$\varepsilon = \frac{D_{\theta v}\nabla\theta + D_{Tv}\nabla T}{\frac{\partial\theta}{\partial t}} \tag{11}$$

3. EXPERIMENTS

We used the wood fibre board as the experimental material which was 10 cm square and 8.5 mm depth. Vapour barrier was applied to one end the four sides of this material.

As shown in Fig.1, the experimental apparatus is composed with three parts. The first part is the double walled cover, the second is the plate of the experimental material and the third is the copper box in which the regulated water is circulating to keep the copper surface of the box at the required temperature. At each experiment, these parts were set and sealed tightly. The air temperature in the cover was regulated by setting the experimental apparatus in the constant temperature room. Also the humidity of air in this cover was kept constant by the water solution saturated with some salt. Temperature of the material surface applied with vapour barrier was regulated by the copper surface of the box on which the material put closely. Increase of vapour amount absorbed into the material was obtained by the measurement of weight of the salt solution. Moisture distribution in the material was obtained by cutting the material into small pieces and weighting the mass immediately after the end of the experiment. Changing process of the moisture distribution were obtained by varying the times of experiments under the same condition.

First, all the experimental system was set at the same temperature and the material in equilibrium condition. Next, the temperature of circulating water was lowered to the point at which internal condensation could be attained.

The experimental conditions are shown together with the number of experiments in table 1.

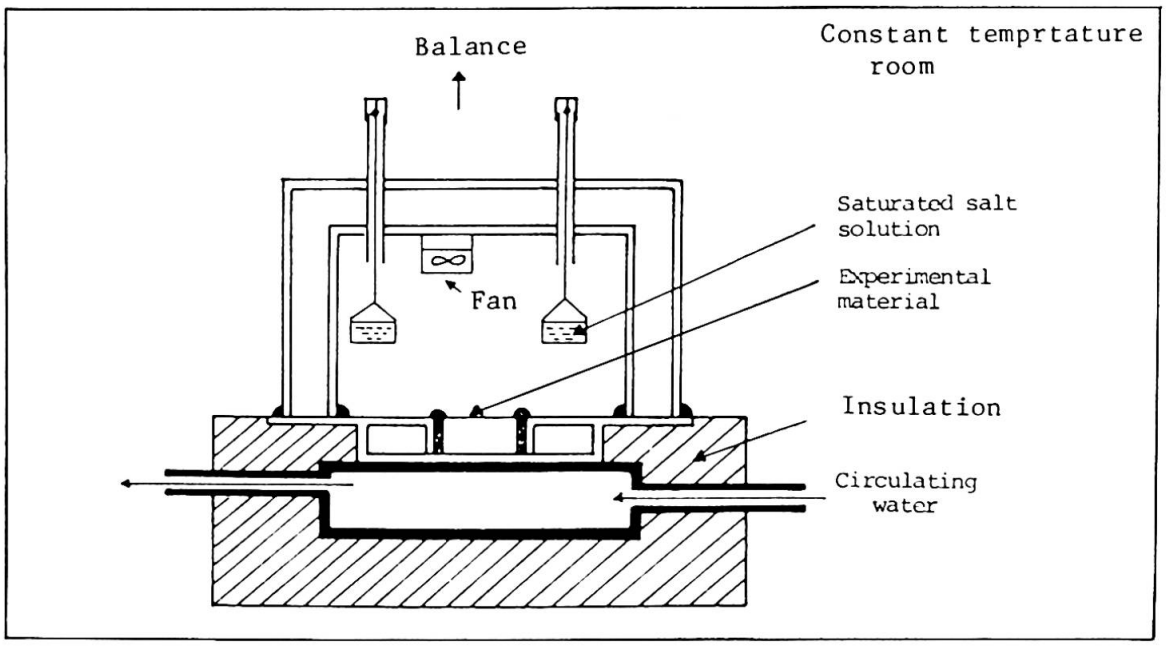


Fig.1. Experimental apparatus

Table 1. Experimental conditions

Experi. con-dition	Experi. No	Temp. in air	Temp. cold face	Humidity in air		Temp. dew point	Experi. times
		°C	°C	RH %	X (kg/kg)	°C	Hour
A	1	18.6	5.4	54.4	7.37×10^{-3}	9.2	92
	2	18.8	5.0	54.4	7.49	9.5	296
B	3	20.8	9.6	75.5	11.78	16.4	28
	4	20.5	9.6	75.5	11.54	16.1	48
	5	20.5	9.6	75.5	11.54	16.1	100
	6	20.3	9.6	75.5	11.40	15.9	165
	7 *	20.8	9.8	75.5	11.78	16.4	165
C	8	28.5	5.2	47.9	11.98	16.7	68

* Measurement of the temperature distribution in the material

4. DETERMINATION OF THE TRANSFER COEFFICIENTS INVOLVED IN THE EQUATION

Transfer coefficients in Eq.(8),(10) are moisture conductivity D_θ, thermal moisture conductivity D_T and heat conductivity λ. Moreover, it is necessary to separate moisture conductivities D_θ, D_T into vapour and liquid components $D_{\theta v}$, $D_{\theta \ell}$; D_{Tv}, $D_{T\ell}$ respectively. We obtained all the transfer coefficients of our experimental material as following.

4.1 Isothermal Moisture Conductivity D_θ related to Moisture Gradients

Various methods of measuring D_θ have been proposed. In our study, D_θ was measured by the steady state method.

One dimensional moisture flow in the assumed local equilibrium is

$$q_w = q_v + q_\ell = -D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} - D_T \frac{\partial T}{\partial x} \qquad (12)$$

Here, under the isothermal state, Eq.(12) becomes

$$q_w = -D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} \qquad (13)$$

Therefore, D_θ is obtained by measurement of moisture flux q_w and moisture gradient $\partial\theta/\partial x$ at steady state. Measurements were performed under four conditions as shown in Table 2. The measuring results is shown in Fig.2.

Table 2. Measuring condition of D_θ

No	Suction	Surrounding air		Moisture flux
	cm	°C	RH %	10^{-3} (g/cm²h)
1	122	22.5	40.0	0.53
2	48	20.0	40.0	17.28
3	85	20.0	40.0	9.82
4	52	9.0	53.0	0.80

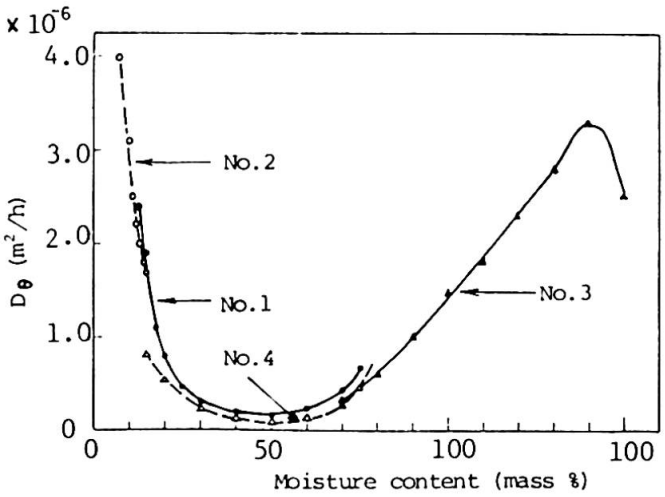


Fig.2. Isothermal moisture conductivity D_θ of wood fibre board

The figure shows that by No 1,2,3, D_θ curve is obtained in the region from 5 to 150% mass moisture contents and that there is distinct difference on D_θ curve of 9°C and 20°C in the region from 10 to 60% mass moisture contents.

4.2 Separation of D_θ into vapour and liquid components $D_{\theta v}$, $D_{\theta \ell}$

Separation of D_θ into vapour and

liquid components is very impotant and necessary in the problem of the simultaneous heat and moisture transfer. So far, some methods of the separation have been tried, but we think that these methods are imcomplete. So, in our study, new method of the separation is considered.

That is, assuming that vapour and liquid transfer respectively in according with Stephan's low and Darcy's low which is extended in unsaturated flow, the equations for vapour flow

$$q_v = -D_{atm}\frac{P}{P-p_v}\beta\nabla\rho_v \qquad (14)$$

for liquid flow

$$q_\ell = -\rho_w K\nabla\Psi \qquad (15)$$

can be obtained.
Here, the following relations exist.

$$p_v = p_{vo}\exp[\frac{\Psi g}{RT}] = \rho_{vo}h \qquad (16)$$

$$\Psi = \frac{2\sigma}{r}\frac{1}{\rho_w g} \qquad (17)$$

$$K = \xi k\frac{\rho_w g}{\eta} \qquad (18)$$

Table 3. Changing ratio due to temperature

Factor	Temperature (°C)				
	9.0	15.0	20.0	23.0	30.0
$f_1(T)$	1.94	2.94	4.11	4.99	7.78
$f_2(T)$	1.31	1.52	1.71	1.82	2.11
$f_3(T)$	1.91	2.90	4.05	4.94	7.80
$f_4(T)$	1.33	1.57	1.78	1.91	2.24

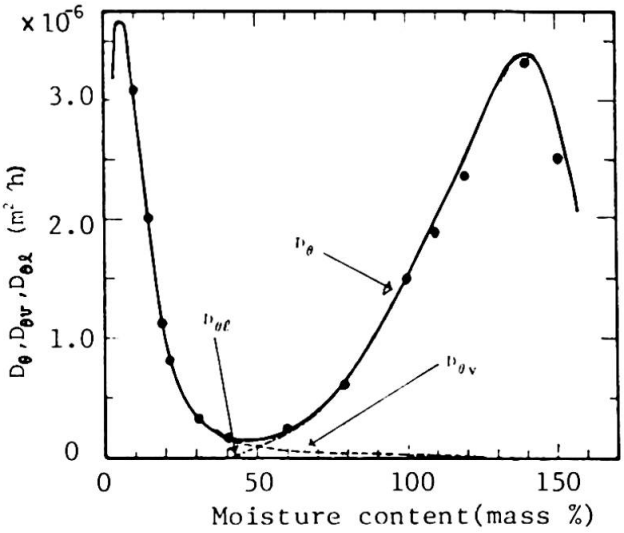


Fig.3. Isothermal moisture conductivity $D_\theta, D_{\theta v}, D_{\theta\ell}$ of wood fibre board (20°C)

Changing these transfer equations into the transfer equations due to temperature and moisture gradients, as it may be considered that ρ_{vo} only depends on temperature, and h only depends on moisture contents, Eq.(14) becomes

$$q_v = -D_{atm}\frac{P}{P-p_v}\beta\frac{h}{RT}\frac{2\sigma}{\rho_w}\frac{d}{d\theta}(\frac{1}{r})\nabla\theta - D_{atm}\frac{P}{P-p_v}\beta\frac{d\rho_{vo}}{dT}h\,\nabla T \qquad (19)$$

and Eq.(15)

$$q_\ell = -\xi k\frac{\rho_w}{\eta}2\sigma\frac{d}{d\theta}(\frac{1}{r})\nabla\theta - \xi k\frac{2\rho_w^2}{\eta r}[\frac{1}{\rho_w}\frac{d\sigma}{dT} + \sigma\frac{d}{dT}(\frac{1}{\rho_w})]\nabla T \qquad (20)$$

each coefficient in the reduced equations respectively correspond to $D_{\theta v}$, D_{Tv}, $D_{\theta\ell}$ and $D_{T\ell}$ in Eq.(9). Some elements involved in these coefficients depend only on temperature, and the other elements depend only on moisture contents. Then, D_θ and D_T are expressed in the next forms.

$$D_\theta = D_{\theta v} + D_{\theta\ell} = D_{\theta v}^\circ f_1(T) + D_{\theta\ell}^\circ f_2(T) \qquad (21)$$

$$D_T = D_{Tv} + D_{T\ell} = D_{Tv}^\circ f_3(T) + D_{T\ell}^\circ f_4(T) \qquad (22)$$

where f_1, f_2, f_3 and f_4 are the factors which change with temperature and $D_{\theta v}^\circ$, $D_{\theta\ell}^\circ$, D_{Tv}° and $D_{T\ell}^\circ$ are the factors which change with moisture contents. The changing rates due to temperature in f_1 – f_4 are calculated and shown in Table 3. Comparing these changing rates with the values of D_θ obtained in the measurements No.1 (22.5 C), No.4 (9.0°C), it was supposed that vapour transfer was dominant in the region less than 45% mass moisture content and liquid transfer was dominant in the region larger than 80% mass moisture contents. Then, it was indicated that vapour and liquid flow existed together in the region from 45 to 80% mass moisture contents. So, the separation of D_θ into $D_{\theta v}$ and $D_{\theta\ell}$ in this region was obtained by means of interporation with smooth curve. The results of the separation is given in Fig.3.

4.3 Thermal Moisture Conductivity D_T related to Temperature Gradients

As thermal moisture conductivity D_T cannot be measured directly, the following method is used. When q_w is zero, Eq.(12) becomes

$$-D_\theta \nabla\theta - D_T \nabla T = 0 \tag{23}$$

also

$$\varepsilon = \frac{D_T}{D_\theta} = -\frac{\nabla\theta}{\nabla T} \tag{24}$$

where we will call ε as the coefficient of temperature gradient. From Eq.(24),

$$D_T = \varepsilon D_\theta \tag{25}$$

Therefore, D_T is obtained by knowing D_θ which can be measured indipendently and ε which can be calculated from the measured values of the temperature and moisture gradients in the equilibrium state ($q_w = 0$).

Measurement of ε have been done under the condition provided with a vapour barrier all along the material surfaces [4,5]. But it was pointed out in some papers [5,6] that theoretical results was not agree with the experimental results in the occasion of using ε which was obtained in this method.

So, in our study, we used the result of the experiment under the condition of condensation occuring in the material of which the vapour barrier was appried on one end. In such condition, moisture transfer becomes finally to zero, and the moisture profile is shown in Fig.8. Temperature profile in the equilibrium state was calculated using the temperatures of both surfaces and thermal conductivity obtained later (see 4.5). Result of ε is given in Fig.4., and D_θ curve calculated from Eq.(25) is given in Fig.5.

4.4 Separation of D_T into vapour and liquid components D_{Tv}, $D_{T\ell}$

From Eq.(9), D_{Tv} is obtained in Eq.(26)

$$D_{Tv} = D_{\theta v} \frac{\frac{\partial g}{\partial T}}{\frac{\partial g}{\partial \theta}} \tag{26}$$

Therefore, D_{Tv} is ditermined by $D_{\theta v}$ and absorption isotherm. By obtaining D_{Tv}, $D_{T\ell}$ can be calculated in Eq.(27)

$$D_{T\ell} = D_T - D_{Tv} \tag{27}$$

Result of separation is given in Fig.5.

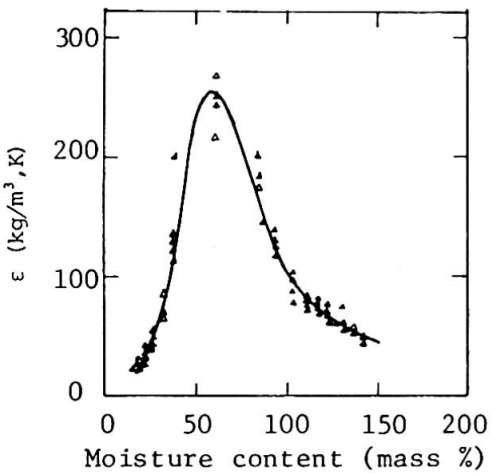


Fig.4. Coefficient of temperature gradient ε obtained by experiment of condensation

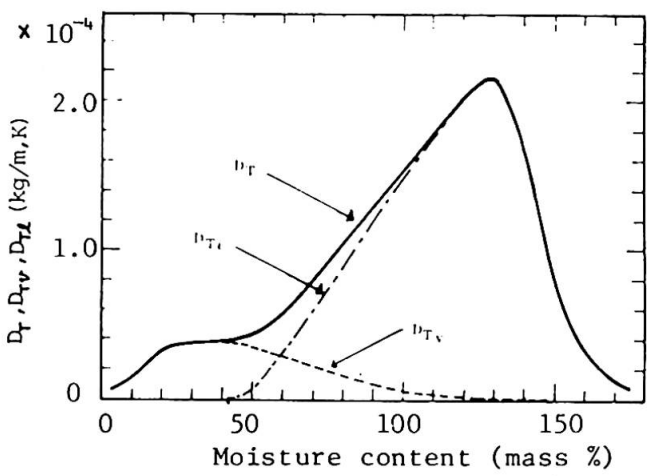


Fig.5. Thermal moisture conductivity D_T, D_{Tv}, $D_{T\ell}$ of wood fibre board (20°C)

4.5 Thermal Conductivity λ

It is well known that thermal conductivity λ would change largely with moisture content. There have been many proposed methods of measuring the thermal conductivity. But these methods have not been analyzed on the base of heat and moisture transfer equations, because these equations have not been completely established up to date.

We have developed the measuring methods of thermal conductivity depending on moisture contents. The detail is given in another paper [7]. In this paper, we used the results obtained by the above methods which can be seen in Fig.6.

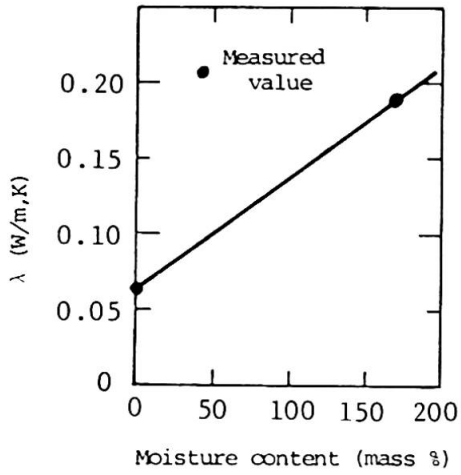


Fig.6. Thermal conductivity λ of wood fibre board

5. RESULT AND DISCUSSION

Experimental results are given in Fig.7,8,9,10,11. The Fig.7 shows that under the experimental condition A, the absorption finally stops and the moisture content approaches the constant value which is less than that of the pores filled completely with water. In the absorption processes of A,B,C, the amount of absorbed moisture increase with the straight line in the early time. The reason seems to be the influence due to the increase of thermal conductivity.
The theoretical results are also given in Fig.7,8,9,10,11. The basic equation of heat and moisture transfer was differenciated with Clank-Nicholson method and calculated with electronic computer.

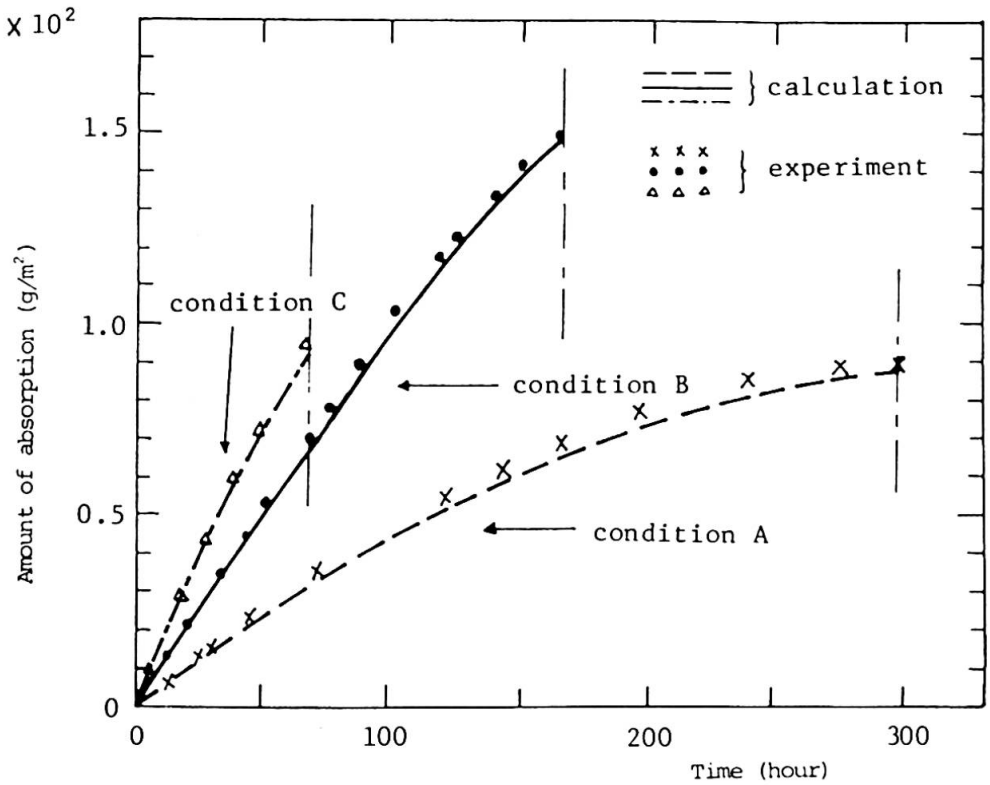


Fig.7. Experimental and theoretical results of amount of absorption under internal condensation (A,B,C)

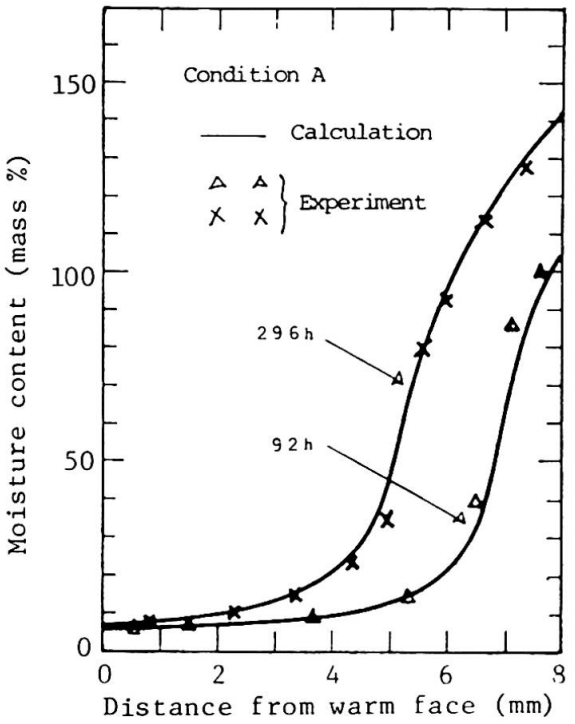


Fig.8. Experimental and theoretical results of moisture content distribution (condition A)

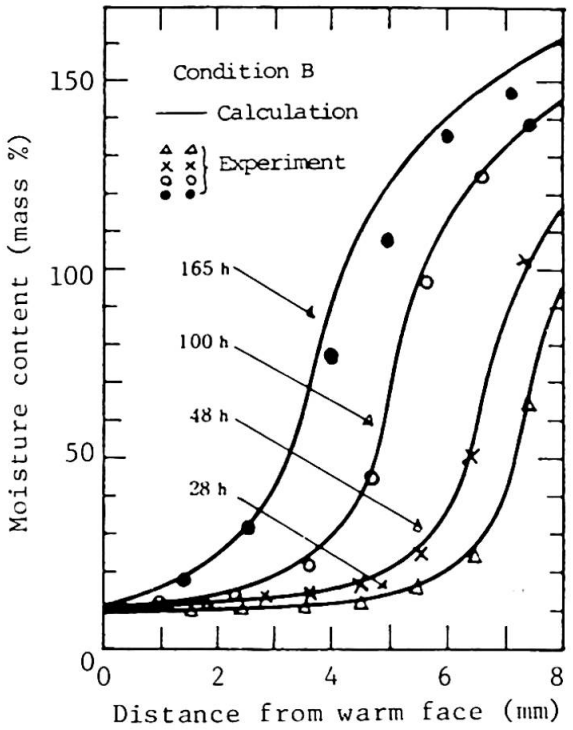


Fig.9. Experimental and theoretical results of moisture content distribution (condition B)

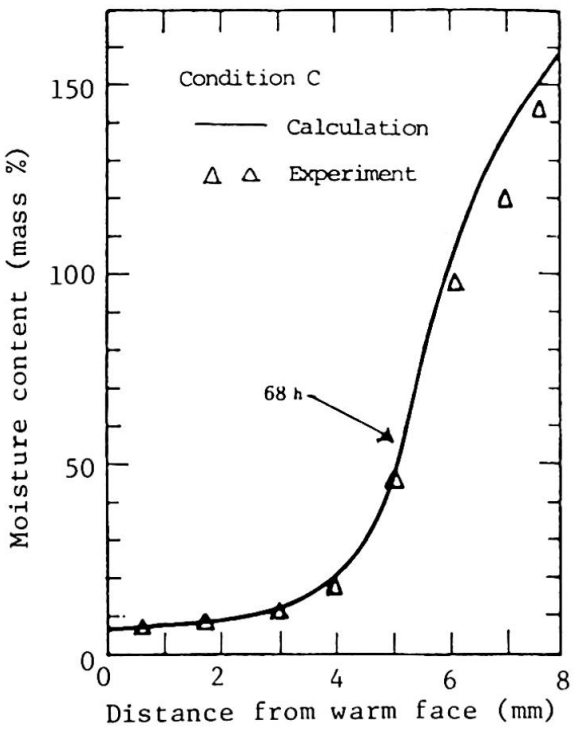


Fig.10. Experimental and theoretical results of moisture content distribution (condition C)

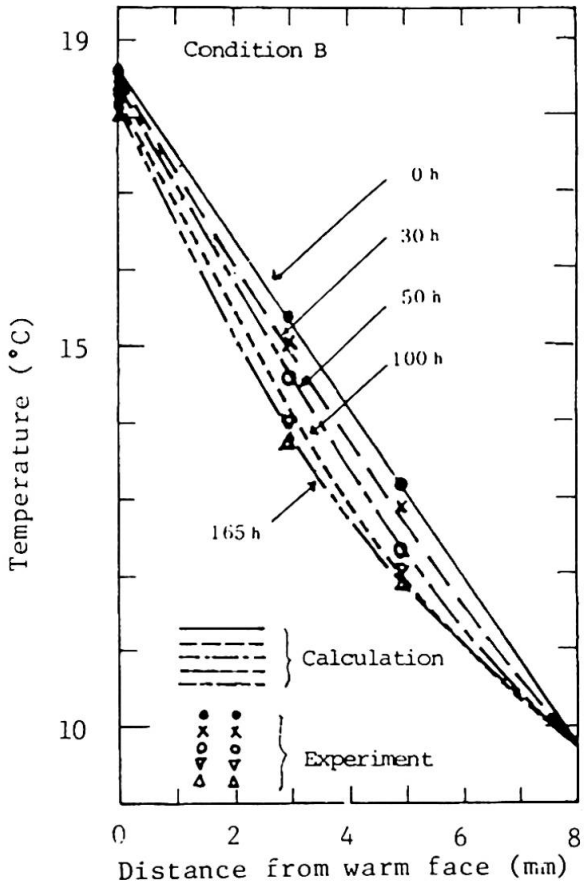


Fig.11. Experimental and theoretical results of temperature distribution (condition B)

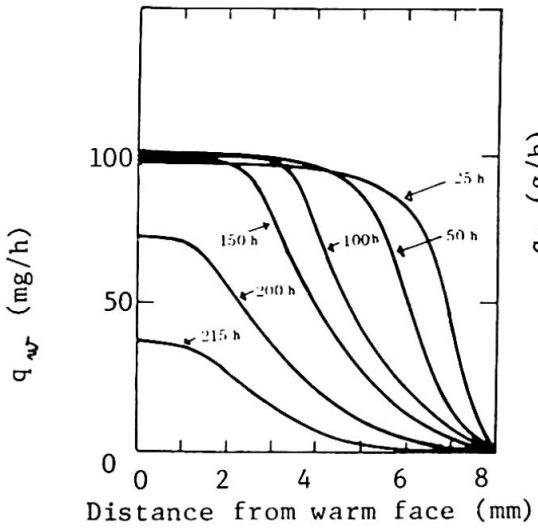


Fig.12. Moisture flux q_w

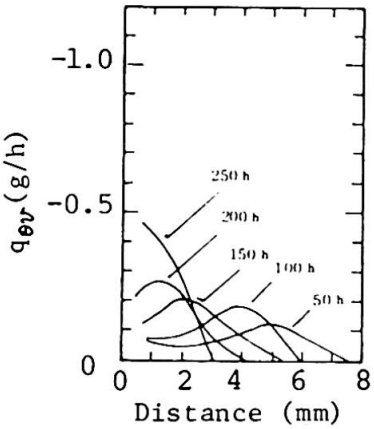


Fig.13. Vapour flux due to moisture content gradient

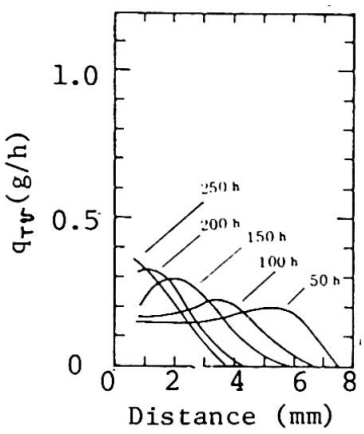


Fig.14. Vapour flux due to temperature gradient

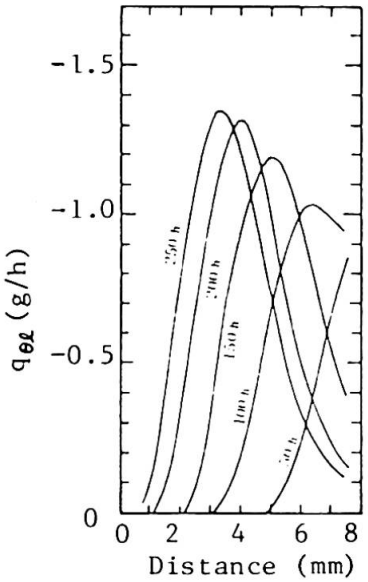


Fig.15. Liquid water flux due to moisture content gradient

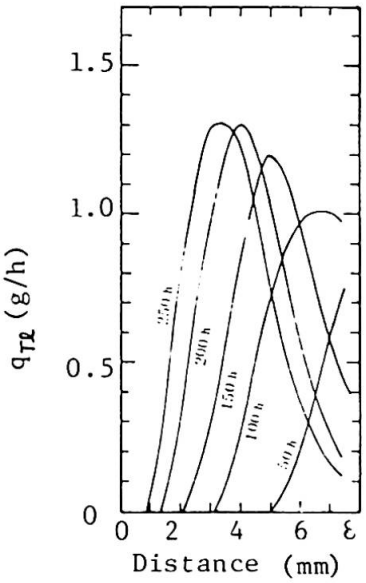


Fig.16. Liquid water flux due to temperature gradient

Figures show the good agreement of the theoretical results with the experimental results. Namely, our tehory can sufficiently estimate the process of condensation in the region over 0°C.

Next, we will analyze in detail the mechanism of heat and moisture transfer in the material on the basis of the theory. The condition of calculation is that of the experiment B. Theoretical results are given in Fig. 12,13,14,15,16.

As shown in Fig.12. the distribution of the moisture flux q_w in the material are made up of two parts; one part in which q_w is constant value, and the other part in which q_w decrease rapidly from constant value to zero. The former is hygroscopic region in which vapour transfer is dominant, and this region decrease with time. In the latter part, vapour and liquid water transfer exist together, and as approaching the cold face, liquid water transfer becomes dominant. These are understood from the figure 13 - 16. As shown in these figures, the liquid water fluxies q ,q are higher than the vapour fluxies $q_{\theta v}$,q_{Tv} . Moreover, $q_{\theta l}$ and q_{Tl} are almost the same order. But, $q_{\theta l}$ and q_{Tl} are cancelled each other because the direction of the temperature gradient and moisture content gradient are opposite in the process of condensation. Therefore the moisture transfer in the material under the condition of condensation depends largely on vapour transfer.

NOTATION

X specific humidity in the pore (kg/kg'),
α_i' effective vapour transfer coefficient at the interface (kg/m,s,kg/kg'),
C porocity (m^3/m^3),
k_v vapour diffusivity (kg/m,s,kg/kg'),
C specific heat of the material (J/kg,K),
γ' density of the material (kg/m^3),
R latent heat of vaporization (J/kg),
q_v vapour flux (kg/m^2,s)
q_l liquid water flux (kg/m^2,s)
q_h heat flux (W/m^2)
$q_{\theta v}$ vapour flux due to moisture content gradient (kg/m^2,s),
$q_{\theta l}$ liquid water flux due to moisture content gradient (kg/m^2,s)
q_{Tv} vapour flux due to temperature gradient (kg/m^2,s)
q_{Tl} liquid water flux due to temperature gradient (kg/m^2,s),
q_w moisture flux (kg/m^2,s)
D_{atm} vapour diffusivity in air (m^2/s)
P total pressure (kg/m^2)
p_v partial pressure of vapour (kg/m^2)
β tortuosity (-)
K unsaturated hydralic conductivity (m/s)
h relative humidity (-)
r radius of capillary (m)
k specific permeability (m^2)
ρ density (kg/m^3)
γ specific weight of dry air (kg/m^3)
S specific surface area inside the material, i.e., ratio of surface area to the pore volume (m^2/m^3),
X_i equilibrium specific humidity with liquid or capillary water at the interface in the material (kg/kg'),
$D_{\theta l}$ liquid water conductivity related to moisture content gradient (m^2/s)
D_{Tl} liquid water conductivity related to temperature gradient (kg/m,s,K)
$D_\theta, D_T, D_{\theta v}, D_{Tv}$ conductivities defined by Eq.(9),
θ moisture content of material (kg/m^3)
T temperature (K)
t time (s)
x coordinate (m)
λ thermal conductivity without moisture movement (W/m,K)
Ψ capillary potential (m)
g acceleration due to gravity (m/s^2)
R gas constant of vapour (N/kg,K)
σ surface tention (N/m)
η viscosity (kg/m,s)
ξ coefficient depends on moistur content (-)
ρ_{vo} density of saturated water vapour (kg/m^3)

ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to thank Professor M.Matsumoto of Kobe University in Japan for his valuable comments.

REFERENCE

[1] Maeda,T. and Matsumoto,M; Soc. of Heating, Ventilating and Sanitary Engineering. Kinki Branch of Environmental Engineering. Report No 11 Nov.,1967 (in Japan)
[2] Philip,J.R. and de Vries,D.A.; Moisture Movement in Porous Material under Temperature Gradients. Trans. American Geophysical Union, Vol.38, 1957
[3] Luikov,A.V.; Transporterschinungen in Kapillarporosen Korpern, Akademie-verlag Berlin, 1958
[4] Van der Kooi.; Moisture Transport in cellular Concrete Roofs, Diss. Eindhofen, Uitgeverij Waltman Delft, 1971
[5] Matsumoto,M; Energy Conservation in Heating, Cooling, and Ventilating Building, Vol.1 edited by C.J.Hoogendoorn, N.M.Afgan Hemisphere Publishing Corpolation pp 45,1978
[6] Ikeda,T. Horie,G.; Proc. of Kinki Branch. Arch. Inst. of Japan pp 5,1979
[7] Hokoi,S. Horie,G. Ikeda,T.; Proc. of Kinki Branch. Arch. Inst. of Japan pp 1, 1979

VI

Heat and Moisture Transfer in Porous Building Material under Condensation

Le transfert thermique et humide dans des matériaux poreux dans un état de condensation

Wärme- und Feuchtetransport in porösen Baumaterialien unter Kondensation

T. IKEDA
Assistant, Dr. Eng
University of Kyoto
Kyoto, Japan

G. HORIE
Prof. Dr. Eng.
University of Kyoto
Kyoto, Japan

S. HOKOI
Assistant
University of Kyoto
Kyoto, Japan

SUMMARY
Theory of heat and moisture transfer which could predict the condensation processes was investigated by comparison with experimental results. Transfer coefficients in the theory which largely changed with moisture content and temperature were measured and determined in detail. It was shown that the theoretical calculation agree well with the experimental results.

RESUME
La théorie du transfert thermique et humide permettant de prévoir le développement de la condensation a été comparée avec les résultats expérimentaux. Les coefficients de transfert dépendant largement du degré d'humidité et de la température ont été mesurés et déterminés en détail. La concordance est bonne entre le calcul théorique et les résultats empérimentaux.

ZUSAMMENFASSUNG
Die Theorie der Wärme- und Feuchteübertragung, welche Kondensationsprobleme vorherzusagen gestattet, wurde durch Vergleich mit experimentellen Ergebnissen untersucht. Die theoretischen Transportkoeffizienten, welche mit dem Feuchtegehalt und der Temperatur stark schwanken, werden gemessen und im Detail bestimmt. Es zeigt sich, dass die theoretischen Rechnungen gut mit den experimentellen Ergebnissen übereinstimmen.

1. Introduction

Up to now, although the thermal conductivity measurements of a moist material have been done in so many fields, such as soil science[1], drying engineering[2], mechanical engineering[3], etc., it seems that they use the measured thermal conductivity without knowing precisely what it means. So far, the major reason might depend on the fact that the mechanism of the heat and mass transfering simultaneously in the porous material has not been known enough. Recently, investigations about the mechanism have been developed[4][5][6] and the measurements of the transfer coefficients have been made[7].

The objectives of this study are as follows,
i) to investigate the implication of the thermal conductivity of a moist porous material
ii) to investigate the influences of the moisture movement on the measured values and to propose the formula which gives the measurement error.

The steady state method and the periodic method are considered as typical measuring methods, and the implication of the thermal conductivities measured by them is analysed. The formula which gives the errors induced by moisture movement is proposed for the periodic method. Based on this formula, temperature conductivities of wood fibre board are measured for several different temperatures and water contents.

2. The implication of the thermal conductivity of a moist porous material

2.1 Fundamental equations

Equations that describe the simultaneous flow of heat and moisture in a moist material are as follows[4].

(vapour balance) $$c\gamma\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}[k_v\frac{\partial X}{\partial x}] + \alpha_i' S(X_i - X) \quad (1)$$

(liquid water balance) $$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}[D_{\theta\ell}\frac{\partial \theta}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial x}[D_{T\ell}\frac{\partial T}{\partial x}] + \alpha_i' S(X - X_i) \quad (2)$$

(heat balance) $$c'\gamma'\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}[\lambda\frac{\partial T}{\partial x}] + R\alpha_i' S(X - X_i) \quad (3)$$

(absorption isotherm) $$X_i = g(\theta, T) \quad (4)$$

where, the sensible heat transported by vapour and liquid is neglected.

Assuming $\alpha_i' = \infty$ (local equilibrium), using eq.(4), eqs.(1)-(3) are transformed as follows.

(mass balance) $$(1 + c\gamma\frac{\partial g}{\partial \theta})\frac{\partial \theta}{\partial t} + (c\gamma\frac{\partial g}{\partial T})\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}[D_\theta\frac{\partial \theta}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial x}[D_T\frac{\partial T}{\partial x}] \quad (5)$$

(heat balance) $$(Rc\gamma\frac{\partial g}{\partial \theta})\frac{\partial \theta}{\partial t} + (Rc\gamma\frac{\partial g}{\partial T} + c'\gamma')\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}[(\lambda + RD_{Tv})\frac{\partial T}{\partial x}] + R\frac{\partial}{\partial x}[D_{\theta v}\frac{\partial \theta}{\partial x}] \quad (6)$$

where, $$D_\theta = D_{\theta v} + D_{\theta\ell} = k_v\frac{\partial g}{\partial \theta} + D_{\theta\ell}, \quad D_T = D_{Tv} + D_{T\ell} = k_v\frac{\partial g}{\partial T} + D_{T\ell} \quad (7)$$

2.2 Thermal conductivities, λ and λ^*

In eq.(3), λ represents the thermal conductivity which is mainly determined by conduction through the constituents(solid skeleton, water, air) in case of no moisture movement, and of course it varies with the water contents. On the other

hand, as it is seen in eq.(6), λ and RD_{Tv} appear always in the conjunct form $\lambda^*=\lambda+RD_{Tv}$, and λ^* exists as a coefficient to the temperature gradient.

As mentioned above, λ and RD_{Tv} never appear separately in the fundamental equations (5) and (6) and also in the boundary conditions. Consequently, D_θ, D_T, $\lambda^*=\lambda+RD_{Tv}$, $D_{\theta v}$ are necessary to calculate the heat and mass transfer, and the respective values of λ and D_{Tv} are not necessary. Because of these properties of the fundamental equations, only λ^*(not λ) is given by any measuring method of thermal conductivity. Thus the methods which minimize the effects of moisture movement could minimize mainly the effect of the term $R\frac{\partial}{\partial x}[D\frac{\partial\theta}{\partial x}]$ and measure λ^* more correctly. This situation is the same as, for example, that of periodic method, which can be made clear in §4. It is concluded from the above mentioned that in order to solve the equations of heat and mass transfer, one must measure and use the value of λ^* not λ.

On the other hand, as λ is defined under the assumption that there is no moisture movement under the temperature gradient, it is a hypothetical one. But it may offer informations about the way of the connection of the constituents and about moisture distribution. D_{Tv} represents the vapour transfer coefficient as the part of D_T. Both λ and D_{Tv} are of importance to know the mechanism of heat and mass transfer in the material. As mentioned above, only λ^* can be measured in this system, so λ can not be measured except the special case, but may be estimated by assuming an appropriate model.

3. Steady state method

Up to now, it has been believed that λ(or λ^*) could be measured accurately by reducing the temperature gradient over the sample material in the steady state method. First, we investigated the case of which the temperature difference over the sample was very small. Next, we examined the case of the temperature difference was larger. We found that there might be a possibility to measure λ rather in the latter case.

3.1 Fundamental equations

In the steady state method, boundary temperatures of the sample T_A, T_B, and heat flux Q are measured, and the thermal conductivity measured by this method λ' is given by

$$\lambda' = \frac{\ell Q}{T_A - T_B} \tag{8}$$

Assuming steady state in eqs.(5)(6),

$$\frac{\partial}{\partial x}[D_\theta\frac{\partial\theta}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial x}[D_T\frac{\partial T}{\partial x}] = 0 \tag{9}$$

$$\frac{\partial}{\partial x}[(\lambda+RD_{Tv})\frac{\partial T}{\partial x}] + R\frac{\partial}{\partial x}[D_{\theta v}\frac{\partial\theta}{\partial x}] = 0 \tag{10}$$

Boundary conditions

$$[-D_\theta\frac{\partial\theta}{\partial x} - D_T\frac{\partial T}{\partial x}]_{S_1, S_2} = 0 \tag{11}$$

$$T|_{S_1} = T_A, \quad T|_{S_2} = T_B \tag{12}$$

and the mean water content is given

$$\theta_m = \frac{1}{\ell}\int_0^\ell \theta dx \tag{13}$$

3.2 The case of the very small temperature difference

In this case, the difference of water content occuring in the sample is small too, so it is possible to treat the transfer coefficients to be constant. Then eqs.(9) and (10) become linear equations and the solutions of these equations subjected to the conditions (11)-(13) are linear functions of x. λ' is given as

$$\lambda' = (\lambda+RD_{Tv})-D_T RD_{\theta v}/D_\theta \tag{14}$$

It is concluded from the eq.(14) that,
i) generally speaking, λ' doesn't equal λ nor $\lambda^*(=\lambda+RD_{Tv})$,
ii) in the liquid dominant region ($D_{\theta v}=0$, $D_{Tv}=0$), $\lambda'=\lambda^*=\lambda$,
iii) in the vapour dominant region ($D_\theta=D_{\theta v}$, $D_T=D_{Tv}$), $\lambda'=\lambda$.

3.3 The case of which the temperature difference is not so small

In this case, the variations of the coefficients with θ and T can not be neglected, and it is difficult to treat the problem analytically. So, we discuss the problem only by numerical method. By solving eqs.(9)-(11), we obtain

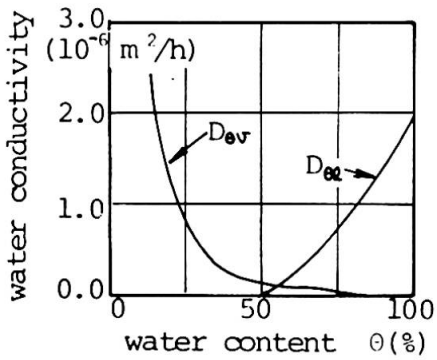
$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{-QD_\theta}{(\lambda+RD_{Tv})D_\theta-RD_T D_{\theta v}} \tag{15}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{QD_T}{(\lambda+RD_{Tv})D_\theta-RD_T D_{\theta v}} \tag{16}$$

(Heat flux Q appears as an integral constant in eq.(10).) In calculation, eqs. (15) and (16) are discretized, assuming $\theta=\theta_1$ at x=0(surface s_1) and Q, we calculate θ_i, T_i at the next mesh point. Continuing this procedure, we obtain θ_M, T_M at $x=\ell$(surface s_2). When $T_M=T_B$ is obtained we stop. If not, we assume new value of Q until the above condition is satisfied.

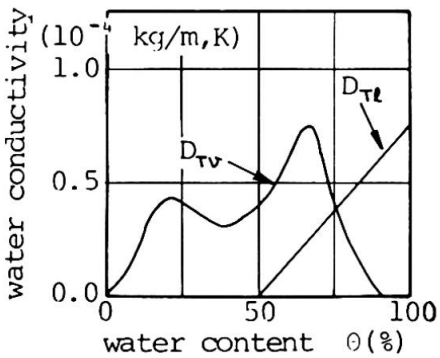
Numerical example
material wood fibre board, 8mm thick
mean temperature = 20 (°C), ΔT = 1.0, 2.0, 3.0 (K) (17)
ΔT = 0.1, 0.2, 0.3 (K) (case §3.2) (18)
transfer coefficients Fig.1($D_{\theta v}$,$D_{\theta \ell}$), Fig.2(D_{Tv},$D_{T\ell}$), Fig.3(λ,λ^*) [6]

The results of water content distribution are shown in Figs.4,5 and λ' is in Fig.3. (in these figures, $\Theta = 100\cdot\theta/\gamma'$%)



Water conductivities related to water content gradient (wood fibre board)

Fig. 1



Water conductivities related to temperature gradient (wood fibre board)

Fig. 2

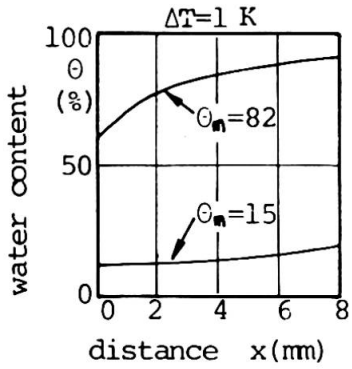


Fig. 4

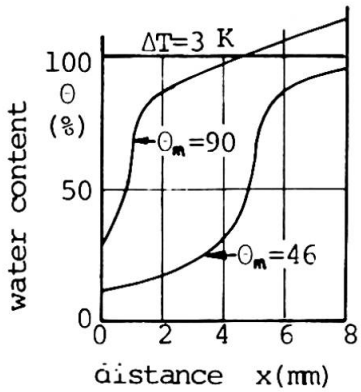
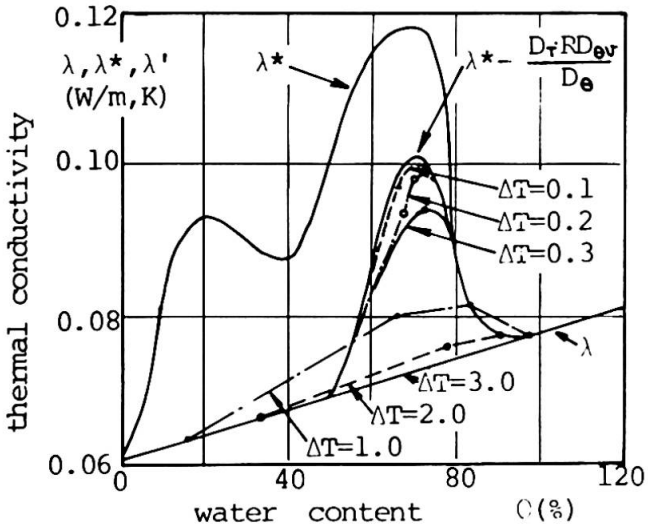


Fig. 5

Water content distribution in the material at the steady state condition

Θ_m= mean water content of the material

Figs. 4,5



Comparison of the thermal conductivities λ, λ^*, λ' (wood fibre board)

Fig. 3

As the temperature difference ΔT falls from 3K to 1K, water content distribution becomes rather uniform (Figs.4,5), and λ' departs from λ and approach $\lambda^*-D_T RD_{\theta v}/D_\theta$ (Fig.3). On the other hand, in the case of $\Delta T=3(K)$, $\Theta_m=46(\%)$, although water content distribution varies rather sharply (Fig.5), λ' is almost equal to λ which corresponds to the mean water content θ_m (Fig.3). From the above results, it is seen that if we choose an appropriate temperature difference in the steady state method, the measured λ' can be almost equal to λ. Fig.3 also shows $\lambda^*-D_T RD_{\theta v}/D_\theta$ values with λ, λ^* and λ' for ΔT=0.1, 0.2, 0.3 (K). It shows that the range of ΔT where the result in §3.2 holds approximately is rather small and there is a wide range of water content in this material where the values of λ, λ^*, $\lambda^*-D_T RD_{\theta v}/D_\theta$ are considerably different.

4. Measurement of temperature conductivity by periodic method

4.1 Objective

It is estimated from the result of §2 that the temperature conductivity corre-

sponding to λ^* can be measured in a non-steady state method minimizing the moisture movement. We consider here the periodic method as a representstive of many methods. The objective of the analysis is to estimate quantitatively a measuring error caused by moisture movement and to derive formula to give the error which is composed of material properties and is applicable to any material.

We analyze this problem by perturbation method, that is, we assume that the transfer coefficients are linear functions of water content and temperature and that the solution is power series of the input surface temperature amplitude. The influences of moisture are those caused by
i) the existence of the moisture movement,
ii) variation of the transfer coefficients with water content and temperature.
It may be considered approximately that the first term of the solution represents i) and the second term represents ii).

4.2 Formulation

Consider that the material is semi-infinite and its surface temperature variations are sinusoidal. Basic equations are eqs.(5) and (6) (neglecting smaller order terms in the left hand side)

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\{D_{\theta\ell}[1+\eta_1(\theta-\theta_0)][1+\eta_2(T-T_0)]\frac{\partial\theta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\{D_{\theta v}[1+\zeta_1(\theta-\theta_0)][1+\zeta_2(T-T_0)]\frac{\partial\theta}{\partial x}\}$$
$$+\frac{\partial}{\partial x}\{D_{T\ell}[1+\beta_1(\theta-\theta_0)][1+\beta_2(T-T_0)]\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\{D_{Tv}[1+\xi_1(\theta-\theta_0)][1+\xi_2(T-T_0)]\frac{\partial T}{\partial x}\} \quad (19)$$

$$c'\gamma'[1+\kappa_1(\theta-\theta_0)]\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\{\lambda[1+\gamma_1(\theta-\theta_0)][1+\gamma_2(T-T_0)]\frac{\partial T}{\partial x} + RD_{Tv}[1+\xi_1(\theta-\theta_0)]$$
$$\cdot[1+\xi_2(T-T_0)]\frac{\partial T}{\partial x}\} + R\frac{\partial}{\partial x}\{D_{\theta v}[1+\zeta_1(\theta-\theta_0)][1+\zeta_2(T-T_0)]\frac{\partial\theta}{\partial x}\} \quad (20)$$

(Initial conditions) $$T = T_0, \quad \theta = \theta_0 \quad (21)$$

(Boundary conditions)

$$\{D_{\theta\ell}[1+\eta_1(\theta-\theta_0)][1+\eta_2(T-T_0)]+D_{\theta v}[1+\zeta_1(\theta-\theta_0)][1+\zeta_2(T-T_0)]\}\frac{\partial\theta}{\partial x}$$
$$+\{D_{T\ell}[1+\beta_1(\theta-\theta_0)][1+\beta_2(T-T_0)]+D_{Tv}[1+\xi_1(\theta-\theta_0)][1+\xi_2(T-T_0)]\}\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (x=0) \quad (22)$$

$$\theta = \text{Finite } (x\to+\infty), \quad T = T_0 + I_0\sin\omega t \ (x=0), \quad T = \text{Finite } (x\to+\infty) \quad (23)(24)(25)$$

Transforming θ, T to θ', T' by the relation,

$$\theta' = \theta - \theta_0, \quad T' = T - T_0 \quad (26)$$

transformed equations have the same form as eqs.(19)-(25) except that θ_0 and T_0 are 0. Hereafter we rewrite θ', T' by θ, T.

4.3 Solution

We assume power series solution as

$$\theta = I_0\theta_1 + I_0^2\theta_2 + I_0^3\theta_3 + \cdots$$
$$T = I_0T_1 + I_0^2T_2 + I_0^3T_3 + \cdots \quad (27)$$

Substituting these equations to transformed eqs.(19)-(25) and equating the coefficients of the same order, we obtain the equations for θ_1, T_1, θ_2, T_2, etc.

i) θ_1, T_1 (periodical solution)

$$\theta_1(t,x) = \alpha_1 E\cdot\exp(-\sqrt{\omega/2}\alpha_1 x)\sin(\omega t-\sqrt{\omega/2}\alpha_1 x) - \alpha_2 E\cdot\exp(-\sqrt{\omega/2}\alpha_2 x)\sin(\omega t-\sqrt{\omega/2}\alpha_2 x) \quad (28)$$

$$T_1(t,x) = \alpha_1 EE_1/B\cdot\exp(-\sqrt{\omega/2}\alpha_1 x)\cdot\sin(\omega t-\sqrt{\omega/2}\alpha_1 x)$$
$$-\alpha_2 EE_2/B\cdot\exp(-\sqrt{\omega/2}\alpha_2 x)\cdot\sin(\omega t-\sqrt{\omega/2}\alpha_2 x) \tag{29}$$

where,

$$E = \frac{B}{(\alpha_1-\alpha_2)\,[C-(CA-BD)\,(\alpha_1^2+\alpha_1\alpha_2+\alpha_2^2)]}$$
$$E_1 = C-(CA-BD)\alpha_1^2,\quad E_2 = C-(CA-BD)\alpha_2^2 \tag{30}$$

α_1, α_2 are positive roots of the quadratic equation ($\alpha_1<\alpha_2$)

$$(AC-BD)\alpha^4 - (A+C)\alpha^2 + 1 = 0 \tag{31}$$

$$A = D_\theta,\quad B = D_T,\quad C = \lambda^*/c'\gamma',\quad D = RD_{\theta v}/c'\gamma' \tag{32}$$

ii) Solution θ_2, T_2 Periodical solutions are

$$\theta_2(t,x) = 2U_3\exp(-\alpha_1\sqrt{\omega}x)\cos(2\omega t-\alpha_1\sqrt{\omega}x) + 2U_7\exp(-\alpha_2\sqrt{\omega}x)\cos(2\omega t-\alpha_2\sqrt{\omega}x)$$
$$+2Q_1\exp(-2\sqrt{\omega/2}\alpha_1 x)\cos(2\omega t-2\sqrt{\omega/2}\alpha_1 x)+2Q_2\exp(-2\sqrt{\omega/2}\alpha_2 x)\cos(2\omega t-2\sqrt{\omega/2}\alpha_2 x)$$
$$+2Q_3\exp[-\sqrt{\omega/2}(\alpha_1+\alpha_2)x]\cos[2\omega t-\sqrt{\omega/2}(\alpha_1+\alpha_2)x] + Q_4\exp(-2\sqrt{\omega/2}\alpha_1 x)$$
$$+Q_5\exp(-2\sqrt{\omega/2}\alpha_2 x) + 2Q_6'\exp[-\sqrt{\omega/2}(\alpha_1+\alpha_2)x]\cos[\sqrt{\omega/2}(\alpha_1-\alpha_2)x]$$
$$+2Q_6''\exp[-\sqrt{\omega/2}(\alpha_1+\alpha_2)x]\sin[\sqrt{\omega/2}(\alpha_1-\alpha_2)x] \tag{33}$$

$$T_2(t,x) = 2\frac{1-A\alpha_1^2}{B\alpha_1^2}U_3\exp(-\alpha_1\sqrt{\omega}x)\cos(2\omega t-\alpha_1\sqrt{\omega}x) + 2\frac{1-A\alpha_2^2}{B\alpha_2^2}U_7\exp(-\alpha_2\sqrt{\omega}x)\cos(2\omega t-\alpha_2\sqrt{\omega}x)$$
$$+2R_1\exp(-2\sqrt{\omega/2}\alpha_1 x)\cos(2\omega t-2\sqrt{\omega/2}\alpha_1 x)+2R_2\exp(-2\sqrt{\omega/2}\alpha_2 x)\cos(2\omega t-2\sqrt{\omega/2}\alpha_2 x)$$
$$+2R_3\exp[-\sqrt{\omega/2}(\alpha_1+\alpha_2)x]\cos[2\omega t-\sqrt{\omega/2}(\alpha_1+\alpha_2)x] + R_4\exp(-2\sqrt{\omega/2}\alpha_1 x)$$
$$+R_5\exp(-2\sqrt{\omega/2}\alpha_2 x) + 2R_6'\exp[-\sqrt{\omega/2}(\alpha_1+\alpha_2)x]\cos[\sqrt{\omega/2}(\alpha_1-\alpha_2)x]$$
$$+2R_6''\exp[-\sqrt{\omega/2}(\alpha_1+\alpha_2)x]\sin[\sqrt{\omega/2}(\alpha_1-\alpha_2)x] + V_{18} \tag{34}$$

4.4 Approximation of the coefficients appearing in the solution

By assuming $A/C<<1$, $BD/AC<1$, etc. (which were derived from the values shown in Figs.1,2,3 and refer to [2]), the following approximate equations are obtained.

$$\alpha_1 \simeq \frac{1}{\sqrt{C}}(1-\frac{BD}{2C^2}),\quad \alpha_2 \simeq \frac{1}{\sqrt{A}}(1+\frac{BD}{2AC}),\quad E \simeq \frac{B}{\sqrt{C}}(1-\frac{\sqrt{A}}{\sqrt{C}}\cdot\frac{BD}{AC})$$
$$E_1 \simeq C(1-\frac{A}{C}),\quad E_2 \simeq -\frac{BD}{C}(1+\frac{A}{C}-\frac{BD}{C^2}),\quad \alpha_1 E_1\frac{E}{B} \simeq 1-\frac{\sqrt{A}}{\sqrt{C}}\cdot\frac{BD}{AC}$$
$$\alpha_2 E_2\frac{E}{B} \simeq -\frac{\sqrt{A}}{\sqrt{C}}\cdot\frac{BD}{AC}(1+\frac{BD}{2AC}),\quad 2\frac{1-A\alpha_1^2}{B\alpha_1^2}U_3 \simeq -2(R_1+R_3) \tag{35}$$

4.5 Observational error

i) The solution of the heat flow without moisture

$$T(t,x) = I_0\exp(-\sqrt{\omega/2a}x)\cdot\sin(\omega t-\sqrt{\omega/2a}x) \tag{36}$$

is the solution, and, for example, the method using phase difference gives the temperature conductivity 'a' as follows

$$a = \frac{1}{\phi_0^2}(\frac{\omega}{2})(x_1-x_2) \tag{37}$$

where, x_1,x_2 are any two points in the material, and ϕ_0 is a phase difference between temperatures at points x_1 and x_2.

ii) The solution of the heat flow with moisture
By using the fact that generally $\alpha_2(\simeq 1/\sqrt{A})$ is larger than $\alpha_1(\simeq 1/\sqrt{C})$, eq.(35) approximately becomes

$$T_1(t,x) \simeq \alpha_1 EE_1/B \cdot \exp(-\alpha_1\sqrt{\omega/2}x)\cdot\sin(\omega t-\alpha_1\sqrt{\omega/2}x) \qquad (38)$$

because of the rapid exponential decay of the second term.

The error of temperature conductivity calculated by using phase difference ϕ measured in this case relative to that of eq.(39) is

$$\frac{\phi_0^2}{\phi^2} - 1 = \frac{1}{C}\cdot\frac{1}{\alpha_1^2} - 1 \simeq \frac{BD}{C^2} \qquad (39)$$

where, an approximation $1/\alpha_1^2 \simeq 1/C(1-BD/C^2)$ (eq.(35)), was used. As expected, eq.(39) represents the influence of the term $R\partial/\partial x(D_{\theta v}\partial\theta/\partial x)$. Similary, T_2 may be utilyzed to determine the amplitude of the input temperature.

5. Experiment (measurement of λ^* by periodic method) [8]

5.1 Measuring conditions pre-examined by calculation and apparatus

Amplitude of the input temperature, the time necessary for achieving stationary state, etc., are referred to [8]. A schematic diagram of the apparatus is given in Fig.6.

5.2 Temperature conductivity and thermal conductivity (wood fibre board)

i) The results of the thermal conductivities obtained are shown in Fig.7. In calculating the thermal conductivity, the volumetric heat capacity of the material was calculated with the following equation

$$c\gamma = (c_s + \theta)\cdot\gamma_s \qquad (40)$$

where, c_s, γ_s are specific heat and density of the solid skeleton, respectively. The mean temperatures of the sample were 8.0,27.5,40.0 (°C).

ii) In these measurements, the maximum theoretical error of the periodical method calculated by eq.(39) is 0.1(%)(at Θ =10%), and is sufficiently small compared with the other errors caused by experimental processes.

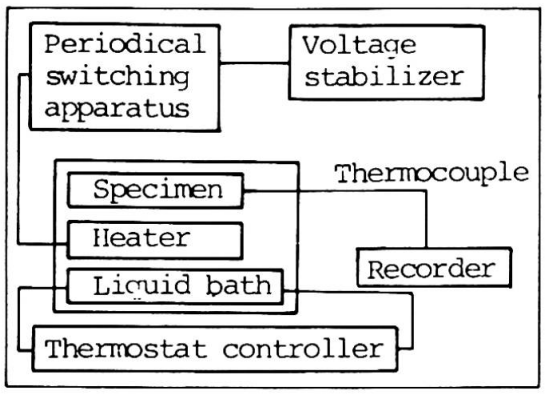
5.3 Discussion

i) The results obtained for a wood fibre board show that thermal conductivity λ^* increases rapidly with water content from 0.06(W/m,K) when air dry, to 0.21 (W/m,K) at 200% of water content (at 25°C). This fact suggests that the variation of the thermal conductivity with water content must be considered.

ii) Thermal conductivity increases with the mean temperature and its change is rather large. This increase is because of the temperature variation of the values of λ and D_{Tv} which are components of λ^*. Making use of this fact, the value of D_{Tv} and λ can be known separately by the results obtained[7].

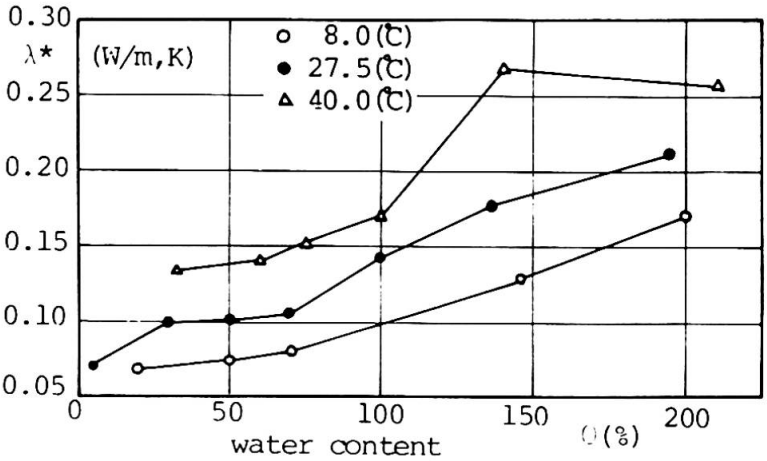
6. Conclusions

i) The implication of the thermal conductivity of a moist porous material was discussed and it was shown that $\lambda^*=\lambda+RD_{Tv}$ was sufficient to solve the simultaneous flow of heat and moisture and that λ was necessary for the elucidation of the mechanism of heat and mass transfer in the material.



Block diagram of measuring equipment for thermal conductivity λ*

Fig. 6



Thermal conductivity λ* of wood fibre board
mean temperature 8.0,27.5,40.0(℃)

Fig. 7

ii) In the steady state method, it was shown analytically that when the temperature difference was very small, the measured value did not generally equal λ nor λ^*, and that the care must be paid to interpret the measured value. Further it was shown numerically that when ΔT was larger, there was a possibility that the measured value almost coincided with λ.

iii) In the periodic method, we obtained the formula which gives the measurement errors in terms of the material properties.

iv) Based on the above analysis, λ^* of the wood fibre board at the mean temperatures 8.0,27.5,40.0(℃) were measured. It seems that the good results were obtained.

Nomenclature

X=specific humidity in the pore (kg/kg'), γ=specific weight of dry air (kg/m^3), α_i'=effective vapour transfer coefficient at the interface (kg/m,s,kg/kg'), S=specific surface area inside the material, i.e., ratio of surface area to the pore volume (m^2/m^3), c=porosity (m^3/m^3), k_v=vapour diffusivity (kg/m,s,kg/kg'), X_i=equilibrium specific humidity with liquid or capillary water at the interface in the material (kg/kg'), C'=specific heat of the material (J/kg,K), γ'=density of the material (kg/m^3), R=latent heat of vaporization (J/kg), $D_{\theta\ell}$=liquid water conductivity related to water content gradient (m^2/s), $D_{T\ell}$=liquid water conductivity related to temperature gradient (kg/m,s,K), θ=water content of material (kg/m^3), θ_0=initial water content (kg/m^3), T=temperature (℃), T_0=initial temperature (℃), t=time (s), x=coordinate (m), ω=angular velocity of the input surface temperature (rad/s), λ=thermal conductivity without moisture movement (W/m,K), λ^*=thermal conductivity defined as $\lambda^*=\lambda+R\cdot D_{Tv}$ (W/m,K), λ'=thermal conductivity measured by steady state method (W/m,K), ℓ=thickness of the sample material (m), A,B,C,D=defined in eq.(32), $D_{\theta v}, D_{Tv}, D_\theta, D_T$=conductivities defined by eq.(7), T_A, T_B=boundary temperatures of the sample in the steady state method (℃), θ_m=the mean water content of the material in the steady state method (kg/m^3),

Q=heat flux in the steady state method (W/m^2), $\Delta T=T_A-T_B$ (K),
$\eta_1,\zeta_1,\beta_1,\xi_1,\kappa_1,\gamma_1$=water content coefficients of $D_{\theta l}, D_{\theta v}, D_{Tl}, D_{Tv}, c'\gamma', \lambda$ (m^3/kg),
$\eta_2,\zeta_2,\beta_2,\xi_2,\gamma_2$=temperature coefficients of $D_{\theta l}, D_{\theta v}, D_{Tl}, D_{Tv}, \lambda$ (1/K),
$T_1,\theta_1,T_2,\theta_2$=the first and second terms of the perturbation solution of the temperature and water content, respectively,
I_0=amplitude of the input surface temperature (K),
α_1,α_2=defined in eq.(31), E,E_1,E_2=defined in eq.(30),
$U_3,U_7,Q_1,Q_2,Q_3,Q_4,Q_5,Q_6',Q_6'',R_1,R_2,R_3,R_4,R_5,R_6',R_6'',V_{18}$=coefficients in θ_2,T_2,
ϕ_1,ψ_1=water content coefficients of D_θ, D_T, respectively (m^3/kg),
ϕ_2,ψ_2=temperature coefficients of D_θ, D_T, respectively (1/K)

Acknowledgement

The authors would like to thank Professor M.Matsumoto of Kobe University in Japan for his valuable comments.

Reference

[1] De Vries,D.A.; Het Warmtegeleidingsvermogen van Grond Landbouwhogeschool Wageningen 52 1952
[2] Krischer,O.; Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. 2 Auf. Springer 1963
[3] Tanasawa,Y.; J.Soc.Mech.Eng.(Japan), vol 35 pp390-399 1932 (in Japanese)
[4] Maeda,T. and Matsumoto,M; Soc. of Heating, Ventilating and Sanitary Eng. Kinki Branch of Environ. Eng. Report No.11 pp1-11 Nov.1967 (in Japanese)
[5] Matsumoto,M.; Energy Conservation in Heating, Cooling, and Ventilating Buildings vol 1 edited by C.J.Hoogendoorn, N.M.Afgan Hemisphere Publishing Corporation pp45-58 1978
[6] Ikeda,T., Horie,G., Hokoi,S.; Proc. of Kinki Branch Arch. Inst. of Japan pp5-8 1979 (in Japanese)
[7] Hokoi,S., Horie,G. and Ikeda,T.; Proc. of Kinki Branch Arch. Inst. of Japan pp73-76 1977 (in Japanese)
[8] Hokoi,S., Horie,G. and Ikeda,T.; Proc. of Kinki Branch Arch. Inst. of Japan pp1-4 June 1979 (in Japanese)

VI

Leichte Aussenwandkonstruktionen unter extremen Beanspruchungen

Lightweight External Wall Constructions under Extreme Conditions

Parois extérieures de construction légère sous des conditions extrêmes

WILHELM SCHAUPP
Professor Dr.-Ing.
Institut für angewandte Baustoffkunde und Baukonstruktion
Grünwald bei München, Bundesrepublik Deutschland

ZUSAMMENFASSUNG
Aus statischen Überlegungen sind bei Hochhäusern, Türmen und Hochgebirgbauten leichte, ausfachende Aussenwände wirtschaftlich. Sie müssen den dort herrschenden extremen Beanspruchungen voll gerecht werden.

SUMMARY
For static reasons, lightweight infilling external walls offer economic advantages in multi-storey buildings, towers and alpine buildings. This type of external walls must fully meet the extreme requirements.

RESUME
Pour des raisons statiques, les parois extérieures légères de remplissage sont économiques pour des bâtiments élevés, tours et bâtiments de haute montage. Ce type de paroi extérieure doit satisfaire entièrement aux conditions extrêmes.

1. EINLEITUNG

Bei herkömmlichen massigen und schweren Gebäuden entsprach die aus einem Baustoff bestehende Außenwand schlecht und recht den an sie gestellten Anforderungen: Sie lastet die Eigengewichte, Nutz- und Verkehrslasten der darüber liegenden Geschosse ab, nahm die Winddruck- und Sogbeanspruchungen und Stoßlasten auf und erreicht ohne zusätzliche Maßnahmen eine gewisse Wärmedämmung. Durch die hohe Masse wurde eine günstige Wärmespeicherung erzielt, aufgrund des großen Wandvolumens war auch eine ausreichende Wasserspeicherung gegen Schlagregen gegeben; damit wurde der Witterungsschutz erfüllt und die Raumluftfeuchtigkeit ergänzt. Die Schalldämmung war noch kein Problem. Die Feuerbeständigkeit der Mauersteine gewährleistete den Brandschutz (1).

Alle diese Eigenschaften muß auch eine leichte Außenwandkonstruktion besitzen.

Eine der ältesten leichten Außenwände ist die hölzerne, mit Ziegeln ausgemauerte Fachwerkwand (Bild 1). Die Gefache zwischen den tragenden Decken und Säulen werden durch Pfosten und Riegel geteilt und mit Füllungen oder Fenstern geschlossen. Der Vorfertigungsgrad solcher Konstruktionen entscheidet über die erreichbare Wirtschaftlichkeit. Werden Pfosten, Riegel, Paneele und Fenster getrennt vorgefertigt und an Ort und Stelle zusammengebaut, so ist der Montageanteil noch sehr hoch. Vorteilhafter ist es, ganze Elemente mit zwei Halbstielen und Kämpfern einschließlich der Füllungen im Werk zusammenzubauen, anzuliefern, hochzuziehen, am Rohbau auf Konsolen aufzusetzen und zusammenzuschieben. Der Rohbauverschluß kann durch Doppelelemente - nebeneinander oder zweigeschossig übereinander - beschleunigt werden. So ist es möglich, bis zu 20 m^2 große Elemente über die Schienen der bereits versetzten einzufahren (Bild 2).

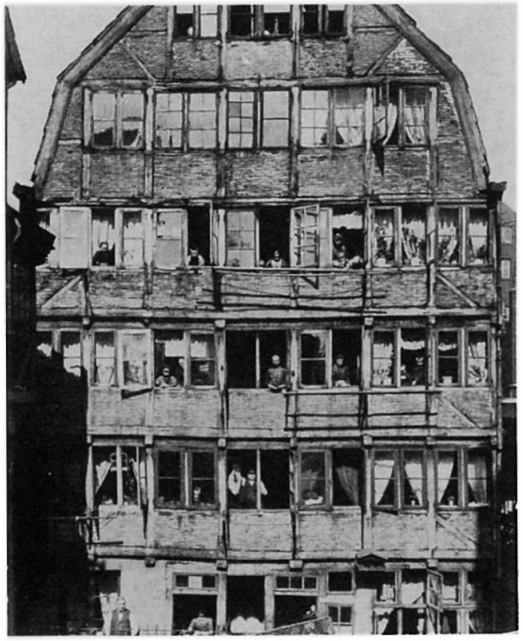


Bild 1 Altes ausgemauertes Holzfachwerk

Bild 2 Aufziehen eines zwei Geschoss hohen Fassadenelements

Der Flugzeugzellenbau hat die Herstellung von ausfachenden Paneelen gefördert. Man hat daraus gelernt, schubsteife Dämmstoffe mit Deckschichten zu verleimen und damit flächenstabile Schalen herzustellen.

Mit der Möglichkeit des Tiefziehens von Blechen oder des Laminierens von Kunststoffschalen werden raumgroße Sandwichelemente ohne Pfosten und Riegel mit den notwendigen Aussparungen für die Fensteröffnungen hergestellt.

Nicht nur für gerasterte Flachbauten und Hochhäuser, sondern auch für die Ausfachung von Kanzeln der Fernmeldetürme und für die Umhüllung von Hochgebirgsbauten, Observatorien, Wetterstationen usw. hat sich diese Vorfertigung bewährt und durchgesetzt (Bild 3).

2. BEANSPRUCHUNGEN DER LEICHTEN AUSSENWANDKONSTRUKTION

Die leichte, nichttragende Außenwand - auch "Curtainwall" genannt - hat nur die auf ihre Fläche von außen und innen treffenden Lasten und nicht die vertikalen Gebäudelasten aufzunehmen; sie hat auch keine aussteifende Funktion. Selbstverständlich muß sie in der Lage sein die Bewegungen der tragenden Rohbaukonstruktion und ihre eigenen aus Temperaturschwankungen entstehenden Längenänderungen ohne Funktionsverlust auszugleichen (2).

2.1 Windlasten

Schäden durch Windsog haben gezeigt, daß die Windlastverteilung an einem umströmten Baukörper genauer erfaßt werden muß. Die Auswertung von Schadensfällen und vergleichenden Windkanalversuchen führten zu einer Überarbeitung der Windlastannahmen in DIN 1055, Blatt 4 (3). Bei den Windlastannahmen in bezug auf die Gebäudehöhe und Windgeschwindigkeit waren keine Ergänzungen nötig. In "Ergänzenden Bestimmungen" (Fassung März 1969) zur DIN 1055, Blatt 4 (4) wurden bereits für Schnittkanten zweier Wandflächen oder von Wand- und Dachflächen erhöhte Beiwerte festgelegt (Bild 4). Die Beiwertsammlung (5) zur DIN 1055,

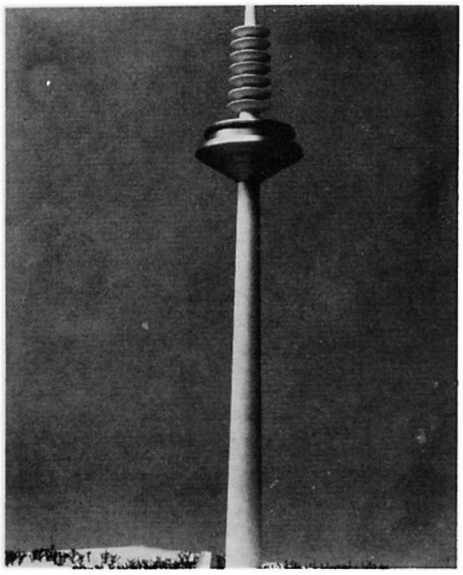


Bild 3 Frankfurter Fernmeldeturm Kanzeldurchmesser 60 m

Tabelle 1. Zusätzlich zu DIN 1055 Blatt 4 anzusetzende Soglasten für flache Dächer

Dachneigungswinkel α	Beiwert c nach Bild 1	
	Im Eckbereich	Im Randbereich
0 – 25 °	2,8	1,4
30 °	1,4	0,7
≥ 35 °	0	0

Beiwerte c für 25 ° < α < 35 ° sind geradlinig einzuschalten

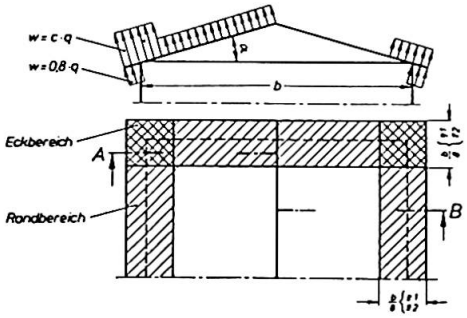


Bild 4 Ergänzende Bestimmungen DIN 1055 Bl.4 Fassung März 1969

Blatt 4 vom Juli 1978 gibt für die kritischen Schnittkanten noch differenziertere Ersatzflächenlasten an (Bild 5). Die Berücksichtigung dieser Werte ist für die richtige Dimensionierung von leichten und elastischen Außenwänden sowie von hinterlüfteten Bekleidungen und Dächern von großer Bedeutung. Versuche an hinterlüfteten Bekleidungen und belüfteten Flachdächern haben bis jetzt noch zu keinen Verminderungen dieser Lastannahmen Anlaß gegeben. So muß die volle Winddruck- und Sogbeanspruchung sowohl von der Bekleidungs- bzw. Dachfläche als auch von der eigentlichen raumumschließenden Wand oder Dachdecke aufgenommen werden. Die angegebenen Beiwerte sind Ersatzflächenlasten, die die Berechnung vereinfachen sollen. Das Lastprofil hat an den Kanten extrem hohe Werte, die sich zur Mitte hin abflachen (Bild 6) und (6). Die dynamische Wirkung des Windes ist noch nicht erfaßt. Die Werte gelten nur für nicht schwingungsanfällige Bauwerksteile.

Abweichungen von den in (3, 4, 5) angegebenen Beiwerten können durch Windkanalversuche und Gutachten einer Prüfstelle begründet werden, z.B. bei ungünstigen Raumformen, Bauwerkslage und Bauzuständen. Die hierbei ermittelten Werte können dann der Bemessung zugrunde gelegt werden (Bild 7).

Der statische Nachweis ist mit diesen Lastflächen und unter Einhaltung der zulässigen Spannungen zu führen. Die Durchbiegung der Einzelflächen unter Last ist nicht festgelegt. In der DIN E 18 516 "Außenwandbekleidungen mit großformatigen Platten" (7) wurde die Durchbiegung nur auf die Gebrauchsfähigkeit der Bekleidung begrenzt. Die Befestigungsmittel müssen bei der Durchbiegung auch auf Schrägzug nachgewiesen werden (siehe die Richtlinien für Fassadenbekleidungen mit und ohne Unterkonstruktion (8) des Instituts für Bautechnik, Berlin, vom Februar 1975) (Bild 8).

Schwingungsanfällige Bauteile sind gesondert zu untersuchen. Balkongeländer, Laufroste, Sonnenschutzlamellen, Attikaverblechungen, Reklameaufbauten usw. dürfen durch Windanblasung nicht zu Schwingungen angeregt werden. Um Resonanzen und damit Geräuschbelästigungen und Beschädigungen zu vermeiden, muß die Eigenfrequenz dieser Bauteile von der kritischen Windfrequenz weit genug entfernt sein.

Bild 5 Entwurf DIN 1055 Teil 45

Geltende Werte für Teilbereiche lotrechter Wandflächen — Beiwerte c_p

1) für Teile, die insgesamt innerhalb des angegebenen Streifens der Breite $b_1 = b/16$ liegen
$c_{p1} = 2{,}5$

2) für alle übrigen Teile innerhalb des angegebenen Streifens der Breite $b_2 = b/8 \leq 6$ m
$c_{p2} = 1{,}5$

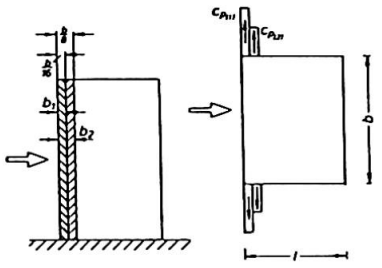
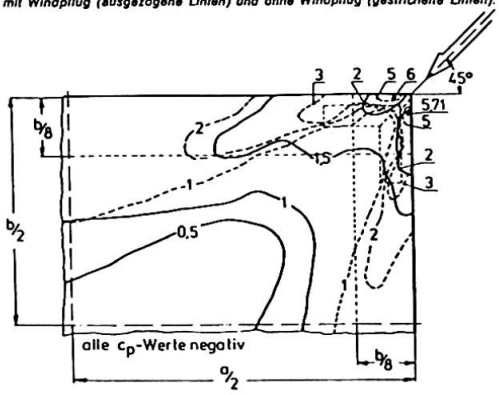


Bild 6 *Linien gleichen Windsoglast-Beiwertes auf einem Flachdach gemessen mit Windpflug (ausgezogene Linien) und ohne Windpflug (gestrichelte Linien).*



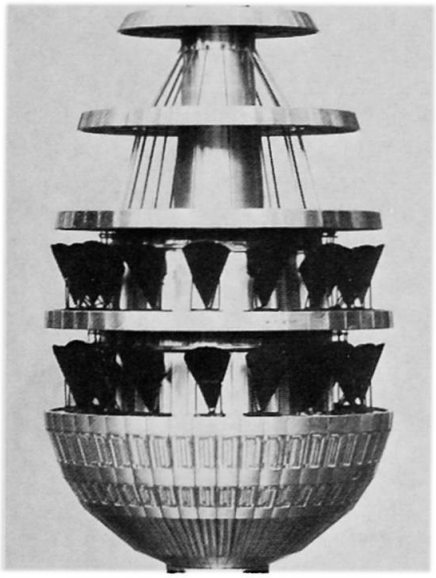


Bild 7 Windkanalmodell des Nürnberger Fernmeldeturmes mit Antennenbelegung

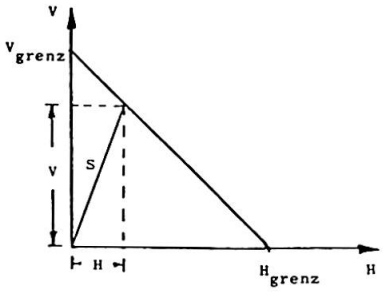


Bild 8 Grenzwerte für Schrägzug

2.2 Anprallasten

Vom Gebäudeinneren her ist mit dem Anprall einer stürzenden Person (weicher Stoß) und mit dem Gegenstoßen von Gerätschaften (harter Stoß) zu rechnen. Die U.E.A.t.c. (9) hat hierfür Prüfmethoden festgelegt, die auch auf leichte Trenn- und Montagewände (DIN 4103) angewendet werden (10). Von außen wirken Anprallasten durch Anlegen von Leitern oder Fahrgerüsten.

Unter diesen Beanspruchungen darf der leichte Raumabschluß nicht unzulässig verformt und beschädigt werden und nicht zum Einsturz kommen. Versammlungsräume, wie Aussichtsterrassen, Restaurants und dergl., müssen auch die horizontalen Lasten aus Menschengedränge aufnehmen können. Hierfür werden eigene Schutzgeländer erforderlich.

Für die Ermittlung der Dicke der Verglasung sind zwar von der Glasindustrie Tabellen und Formeln entwickelt, die seit langem in der Praxis Eingang und in der DIN 18 056 (11) Aufnahme gefunden haben; sie basieren aber nicht auf zulässigen Glasspannungen, wie sie für andere Baustoffe in den Technischen Baubestimmungen und Berechnungsnormen enthalten sind. Erschwerend kommt noch hinzu, daß die Glasherstellung weitgehend vom Zieh-Verfahren zum Floatglas-Verfahren umgestellt wurde. Die erreichbare Biegebruchfestigkeit hängt sehr stark von der Art der Glasabkühlung und vom Zuschneiden des Probekörpers ab - siehe DIN 52 303 (12).

Vorgespannte "Einscheiben-Sicherheitsgläser" (ESG) erreichen andere Verformungen und höhere Biegebruchfestigkeiten als Normalglas. Verbundsicherheitsgläser (VSG) brechen zwar viel früher, geben aber erst nach extremster Verformung die Fläche frei. Für besonders hohe Beanspruchungen werden deshalb Isolierglaseinheiten aus VSG- und ESG-Scheiben verwendet.

Schräg liegende Scheiben oder Brüstungsverglasungen müssen statisch nachgewiesen werden. Durch Biege- und Flächenbelastungsversuche, weichen und harten Stoß sind die tatsächlichen Bruchlasten zu ermitteln und statistisch auszuwerten. In der BRD bestimmt auf Antrag die zuständige Zulassungsbehörde, z.B. mit einer Zulassung im Einzelfall, mit welcher Sicherheit gegen Bruch gerechnet werden darf. Erst wenn die Norm "Glas im Bau" für die verschiedenen Glassorten zulässige Glasbiegespannungen angibt, kann die bei anderen Baustoffen übliche Art der Berechnung nach den Technischen Baubestimmungen durchgeführt werden.

2.3 Wärmedämmung und -speicherung

Bei den zu berücksichtigenden hohen Windgeschwindigkeiten ist die Wärmeableitung der Außenseite besonders kritisch. Aus diesem Grund muß die Wärmedämmung - nicht nur in bezug auf das Energieeinsparungsgesetz - EnEG - (13), sondern auch um erträgliche raumklimatische Verhältnisse zu gewährleisten - erhöht werden.
Die tragenden Profile werden deshalb weitgehend thermisch getrennt. Bei der Sandwich- oder Schalenbauweise ist dies schon vom Aufbau her gewährleistet. Die thermische Trennung bringt aber Probleme in der Statik und beim Brandverhalten mit sich: Die thermischen Kupplungen werden meistens aus Kunststoffen hergestellt, für die es keine zulässigen Spannungen gibt. Besonders kritisch sind Dauerbeanspruchungen und Brandverhalten. Aus Sicherheitsgründen werden zusätzliche statisch nachweisbare metallische Kupplungen unter Inkaufnahme von Kältebrücken angeordnet.

Die hier angesprochenen Gebäude werden meistens mit einer Be- und Entlüftung versehen, so daß die Innenseite der leichten Wand einem ständigen Luftstrom ausgesetzt ist, wodurch der α_i-Wert günstig beeinflußt und die Schwitzwasserbildung verzögert wird. Vorhänge, Einbauten usw. können diesen Luftstrom von der Fassadenfläche ablenken und zu einer vorzeitigen Tauwasserbildung bei stagnierender Luft Anlaß geben.

Leichte Außenwände haben wegen ihres niedrigen Gewichtes nur eine geringfügige Wärmespeicherung, was durch kontinuierliche Heizung und nur geringer Nachtabsenkung ausgeglichen werden muß.

Durch richtigen Aufbau der Paneele muß der unerwünschten Wärmeeinstrahlung entgegengewirkt werden (Temperatur-Amplitudenverhältnis). Tag- und Nachttemperaturschwankungen sind durch den Schichtenaufbau möglichst auszugleichen.

2.4 Wasserdichtigkeit und Dampfdichtigkeit

Leichte Außenwände müssen nicht nur von innen nach außen, sondern auch von Geschoß zu Geschoß und von Raum zu Raum einen dampfdichten Abschluß erbringen. Selbstverständlich muß dies auf der warmen Seite erreicht werden. Ist die Dichtung im kalten Bereich, kommt es zu Schwitzwasser, bei niedrigen Außentemperaturnen sogar zu Eisbildung. Diese Dampfdichtigkeit muß sich über die ganze Fläche erstrecken, d.h. auch an den Stoßfugen von Pfosten und Riegeln sowie an allen anderen Fugen. Es besteht sonst die Gefahr der Eiszapfenbildung (Bild 9).

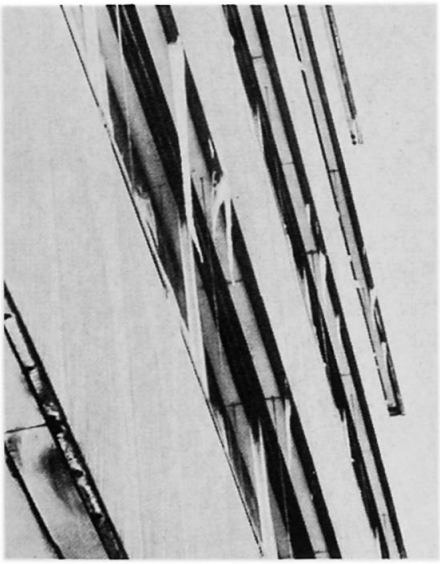


Bild 9 Eiszapfen an einer dampfdurchlässigen Metallfassade

Die leichte Außenwand muß schlagregendicht sein. Die DIN 18 055, Blatt 2 (Ausgabe August 1973) nennt die Beanspruchungsgruppen A - D für die Dichtigkeit von Fenstern (14). Man kann diese Forderungen aber auch auf leichte Außenwände, wie z.B. Fensterwandelemente, übertragen. Im Fensterprüfstand wird die Einhaltung der Dichtigkeitsforderungen überprüft.

2.5 Schallschutz

Der Schallschutz setzt die Winddichtigkeit voraus. Anforderungen an eine Außenwand sind in der DIN 18 005 (15) enthalten ("Schallschutz im Städtebau").

Die Raumakustik kann in Großräumen zu einer Schrägstellung der Fensterscheiben Anlaß geben, um den Klirrfaktor bzw. das Flatterecho zu bekämpfen.

2.6 Sonnenschutz

Die für den Bewohner unerwünschte Sonneneinstrahlung in der warmen Jahreszeit wird am konsequentesten durch einen außen liegenden, verstellbaren Sonnenschutz abgeschirmt. Bei Gebäuden in extremer Lage sind verstellbaren Schutzvorrichtungen Grenzen gesetzt (Geräuschbelästigung und Beschädigung). Sonnenschutz ist auch durch verspiegelte bzw. bedampfte Gläser zu erreichen, die einen Teil des Tageslichteinfalles reflektieren. Die im Sommer erfreuliche Verbesserung verursacht in der dunkleren Jahreszeit eine Verringerung des Tageslichteinfalles und damit einen höheren Bedarf an Kunstlicht. Bei Dunkelheit wird eine gewisse Spiegelung im Raum erzeugt. In der kalten Jahreszeit ist die Sonneneinstrahlung erwünscht; eine örtliche Überwärmung kann durch die Umluftanlagen verteilt werden.

2.7 Brandschutz

Die Forderungen an den Brandschutz sind regional sehr verschieden. Sie hängen selbstverständlich auch von der Nutzung des Gebäudes und der Brandlast ab. Für leichte Außenwände wird die Abschirmung eines Feuerüberschlagweges von einem Geschoß ins andere oder über Eck von Geschoß zu Geschoß gefordert (F 30 - F 180). In diesem Zeitraum muß die leichte Außenwand ohne Verglasung dem Feuer Widerstand leisten. Auf der dem Feuer abgekehrten Seite darf keine Temperatur entstehen, die über Wärmestrahlung zur Entzündung angrenzender Bauteile führen kann. Für die Beanspruchung von außen nach innen gelten die abgeminderten Forderungen W 30 - W 180 (DIN 4102, Teil 3), d.h., daß z.B. eine Wand von innen nach außen F 30 ... und von außen nach innen W 30 ... erfüllen muß (16).

Der Feuerüberschlagsweg wäre durch eine 10 cm dicke Stahlbetonbrüstung von 90 cm Höhe und 25 cm Sturz gedeckt; aber gerade dies steht ja bei der leichten Außenwand nicht zur Debatte. Aus diesem Grund muß das raumabschließende leichte Paneel mit seiner Halterung diese Aufgabe übernehmen.

Es gibt zugelassene Brandschutzplatten, die auf der Raumseite mit zusätzlicher Dampfsperre aufgeklebt werden; in diesem Fall ist aber die Forderung von außen nach innen noch nicht erfüllt. Solche Platten sind nicht wasserfest, sie können deshalb auf der Außenseite nicht verwendet werden. Der übliche Kleber solcher Platten besteht aus Wasserglas, welches im Brandfall eine harte, feuerfeste Schicht ergibt. Im Normalzustand führt eine Durchfeuchtung dieser Platten zu einer Herauslösung des stark alkalischen Wasserglases. Wasserglas schädigt die Oberfläche von Metallteilen und die Feuerpolitur der Glasscheiben. Was für den Brandschutz gut ist, ist für die Wetterbeständigkeit von großem Nachteil. Das "Ei des Columbus" wäre ein flächenstabiles, gut wärmedämmendes, wasserfestes und die Gestaltungsabsichten des Architekten nicht einschränkendes Paneel, welches die geforderten Eigenschaften F und W in sich vereinigt.

3. ABSCHLIESSENDE ZUSAMMENFASSUNG

Es wurden die Beanspruchungen und Anforderungen für eine leichte Außenwandkonstruktion und die hierfür einschlägigen Normen und Bestimmungen aufgezeigt.

LITERATUR

(1) Schaupp, W.: "Die Außenwand" - Bekleidung, Wärmedämmung, Feuchtigkeitsschutz, Verlag Georg D.W. Callwey, München (1962);
"EXTERNAL WALLS" - Cladding, Thermal insulation, Damp-proofing, Crosby Lockwood, London (1967)
"LE MUR EXTERIEUR" - Revêtement, Isolation thermique, Protection contre l'humidité, Editions Eyrolles, Paris (1966)

(2) Schneider, Marten und Schimpfermann (BGS) Standsicherheit und Gebrauchsfähigkeit vorgehängter Hochhausfassaden. Forschungsbericht. Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Bonn

(3) DIN 1055, Blatt 4, Fassung 1965, "Verkehrslasten - Windlasten"

(4) DIN 1055, Ergänzende Bestimmungen, Blatt 4, Fassung März 1969

(5) DIN 1055, Teil 45, Entwurf Mai 1977, "Aerodynamische Formbeiwerte für Baukörper"

(6) Kramer, C., Prof.Dr.-Ing. Mitteilung aus dem Strömungslaboratorium der Fachhochschule Aachen, DDH 16/75

(7) DIN E 18516, Normvorlage Oktober 1979, "Fassadenbekleidung mit großformatigen Platten"

(8) Institut für Bautechnik, Berlin, Fassung März 1975, "Richtlinien für Fassadenbekleidung mit und ohne Unterkonstruktion" und Einsfeld, U., Dr.-Ing. Erfahrungen mit der Anwendung der Richtlinien für Fassadenbekleidungen. Mitteilung Institut für Bautechnik, Berlin, Nr. 2/1979

(9) U.E.A.t.c

(10) DIN 4103, Blatt 2, Entwurf (März 1975), "Leichte Trennwände - Nachweis bei statischer und stoßartiger Belastung"

(11) DIN 18056, (Juni 1966), "Fensterwände - Messung und Ausführung"

(12) DIN 52303, (November 1976), "Prüfung von Glas - Biegeversuche"

(13) EnEG, Energie-Einsparungsgesetz vom 22.07.1976

(14) DIN 18055, Blatt 2, (August 1973), "Fenster - Fugendurchlässigkeit und Schlagregensicherheit - Anforderung und Prüfung"

(15) DIN 18005, (Mai 1971), "Schallschutz im Städtebau"

(16) DIN 4102, Teil 3, (Sept. 1977), "Brandverhalten von nicht tragenden Außenwänden"

Leere Seite
Blank page
Page vide

VI

Protection acoustique dans les bâtiments et au bord des routes

Lärmschutz an Gebäuden und auf Strassen

Noise Protection in Buildings and near Highways

PASCAL BAR
Ingénieur Chargé des Etudes de Bruit
Centre d'Etudes des Transports Urbains (C.E.T.U.R.)
Bagneux, France

RESUME
Un texte de loi sur la protection contre le bruit est actuellement en cours de mise au point. Il est maintenant possible de calculer le niveau de bruit par le Guide du Bruit des Transports Terrestres, des programmes automatiques de calcul, des simulations sur maquette et des mesures directes sur le site. Les nuisances dues au bruit peuvent être réduites par des ouvrages de protection en bordure des infrastructures routières et par l'amélioration de la situation et de l'isolation des façades des bâtiments.

ZUSAMMENFASSUNG
Ein Lärmschutzgesetz ist im Begriff ausgearbeitet zu werden. Es ist heutzutage möglich, den Lärmschutzgrad anhand von Richtlinien „Guide du bruit des transports terrestres" auszurechnen. Der Grad kann aber auch mittels Computerprogrammen, durch Modellsimulatoren oder durch direkte Messungen im Freien ermittelt werden. Die durch Lärm verursachten Beeinträchtigungen können durch Lärmschutzwalle an Strassen oder durch Verbesserung der Fassadenisolationen an Gebäuden verringert werden.

SUMMARY
Noise protection legislation is presently being drafted. It is by now possible to calculate noise levels with the guidelines „Guide du bruit des transports terrestres", automatic computation programs, model simulation and direct in-situ measurements. Noise disturbances are reduced through protection works edging road infrastructures and through improved situation and insulation of building fronts.

1. LA RÉDUCTION DES NIVEAUX SONORES REPOSE SUR UN CONTEXTE REGLEMENTAIRE COMPLET

La règlementation française en matière de bruit des infrastructures de transport a profondément évolué au cours des dernières années. Elle a été précisée et complétée dans les conditions suivantes :

1.1. Projets de nouvelles infrastructures de transport

a) route

Lors de la création de routes nouvelles, ou la modification importante de route ancienne, la circulaire 78-43 du 7 mars 1978 de la Direction des Routes et de la Circulation Routière exige que les niveaux sonores Leq (8 h - 20 h) à 2 m en avant des façades engendrés par le projet ne dépassent pas un seuil fixé à 65 ± 5 dB (A), pour les bâtiments existants avant la Déclaration d'Utilité Publique du projet.

b) voies ferrées

Compte tenu du fait qu'à niveau égal, la gêne engendrée par les voies ferrées est moindre que celle des routes, le seuil recommandé pour ces infrastructures, lors de la création de voies nouvelles est de 70 dB (A) ± 5 dB (A) maximum.

1.2. Construction de bâtiments nouveaux à proximité d'une voie existante

L'arrêté interministériel du 6 octobre 1978 institue la possibilité d'imposer une valeur minimale d'insonorisation acoustique de façade à tout bâtiment construit à moins de 200 m d'une route reconnue comme bruyante.

Toutes les villes françaises vont faire l'objet d'un classement de l'ensemble des voies de circulation qui définira 3 types de routes : type I (très bruyantes), type II (bruyantes), et autres voies (non bruyantes). Ces classements seront soit intégrés dans les Plans d'Occupation des Sols, soit entérinés par un arrêté préfectoral.

Après classement, et à l'occasion de la délivrance de chaque permis de construire, l'Administration prescrira un isolement acoustique de façade.

Les isolements prescrits peuvent aller de l'isolement courant (20-25 dB (A)) à un isolement amélioré : 30, 35, 42 ou 50 dB (A), en fonction de la distance, de la présence d'obstacles, de la hauteur, de l'orientation du bâtiment.

Ces dispositions devraient s'appliquer à environ 10 à 15 % de l'ensemble des bâtiments d'habitations à construire chaque année.

1.3. Cas où l'on peut planifier à la fois la construction des routes et celles des bâtiments.

La loi du 31 décembre 1976 portant réforme de l'Urbanisme, a permis d'introduire de façon formelle les préoccupations d'environnement dans les documents d'urbanisme.

A la suite d'une série de textes d'application, la circulaire du 15 novembre 1978 relative à la « prise en compte du bruit des transports terrestres dans l'urbanisme et la construction » a précisé que :

- sur les zones couvertes par un Plan d'Occupation des Sols (villes de plus de 10 000 habitants), le règlement du Plan d'Occupation des Sols doit contenir le classement des voies bruyantes et indiquer les zones où les constructions nouvelles seront soumises à prescriptions.
- dans les Zones d'Aménagement Concerté des dispositions au moins aussi contraignantes que les précédentes doivent être adoptées.

1.4. Cas où la route et les bâtiments existent.

Il n'existe pas de règlementation traitant du bruit des routes existantes, et de leurs conséquences pour les bâtiments les plus proches, quand leur construction est ancienne.

Cependant, des actions sont entreprises chaque année, pour remédier aux situations dont la gêne est la plus importante, et où les possibilités techniques de traitement existent.

Un programme d'investissement et de réalisation d'ouvrages de protection en région parisienne notamment est actuellement mis en place.

1.5. Perspectives règlementaires

Un texte de loi sur la protection contre le bruit est actuellement en cours de mise au point. Il devrait être discuté prochainement par l'assemblée nationale.

Le texte définitif de cette loi ne sera connu de façon précise que lorsque le Ministre de l'Environnement et du Cadre de Vie la présentera au parlement, et qu'elle sera votée avec ses éventuels amendements.

Cependant, il est d'ores et déjà possible de dire à la date de rédaction du projet rapport,

- qu'elle portera sur l'ensemble des sources sonores : biens d'équipements, engins de chantier, véhicules de transports routiers, ferroviaires, aériens, maritimes, etc.
- son but vise à éliminer les bruits inutiles et à atténuer les bruits nécessaires aux activités, à réparer les dommages et à réprimer les abus.

Il est acquis que cette nouvelle loi reprendra la plupart des nombreuses dispositions réglementaires déjà existantes. Son but est de les organiser en un ensemble cohérent, de les compléter et, pour certaines d'entre elles, de les renforcer.

2. LES ÉTUDES DE BRUIT

2.1. Les outils disponibles

2.1.1. Guide du Bruit des Transports Terrestres - fascicule - Prévision des niveaux sonores

Ce fascicule récent du Guide du Bruit (mars 1980) contient l'ensemble des méthodes utiles pour le calcul des niveaux sonores et l'efficacité des écrans acoustiques.

Il comporte trois parties principales :

- méthode simplifiée pour le calcul du bruit des routes. Par formules analytiques simplifiées ou par lecture directe de 5 abaques, elle permet d'évaluer les niveaux sonores d'une route et l'efficacité de protections simples (écrans et buttes de terre). D'utilisation immédiate, elle est surtout employée pour des études de première approche.
- méthode de calcul du bruit des trains. Même présentation et même domaine d'utilisation que la méthode précédente, mais pour la circulation ferroviaire.
- méthode de calcul détaillée. Cette méthode, à la portée d'ingénieurs spécialisés, permet de résoudre tous les problèmes de calcul de bruit en tous sites, et de tester l'efficacité de protections même complexes comme les couvertures partielles de chaussées.

2.1.2. Programme automatique de calcul

La France a mis au point dès 1975 un programme automatique de calcul des niveaux sonores très complet.

L'algorithme a été conçu par l'Institut de Recherche des Transports (IRT-Cern). Il est actuellement géré par le CETUR et disponible dans les Centres d'Etudes Techniques de l'Equipement de chaque région.

Ce programme permet de simuler un site de grande superficie (1 km^2) et une route ou un ensemble de routes pouvant être très complexe (échangeur par exemple). Il permet d'obtenir une estimation du niveau sonore en tout point du site, et de tester l'efficacité de nos projets de protection. Les coûts d'utilisation ont été largement réduits au fur et à mesure de l'accroissement de notre expérience. Actuellement, il constitue un outil très performant qui permet aussi bien le contrat d'une situation existante que la prévision des situations futures.

Mais il doit être confié à des acousticiens confirmés car les hypothèses simplificatrices ont une grande importance sur la précision des résultats, ce qui en limite l'utilisation à quelques équipes.

2.1.3. Centres des maquettes

Il existe deux centres de simulation sur maquette en France :

- celui du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment de Grenoble, qui depuis 4 ans, a permis de résoudre les problèmes recherche et les problèmes opérationnels les plus difficiles que nous ayons eu à traiter. Ce centre, bien connu des spécialistes, fonctionne dans l'air.

– celui du Laboratoire Central d'Hydraulique de France qui fonctionne dans l'eau, sur les mêmes principes que celui, de Grenoble, en cours de développement.

Ces outils permettent l'étude de la propagation par simulation d'un site à échelle réduite (1/20 à 1/100) sans simplification du site, ce qui permet une grande précision et fiabilité. Ils reconstituent ensuite par calcul le trafic, ce qui permet de calculer la puissance acoustique à l'émission de façon comparable au programme BRUIT. Connaissant la puissance acoustique émise sur une voie et l'atténuation en propagation, il est possible de connaître le niveau sonore perçu en tous points.

Ils constituent d'excellents outils dont l'utilisation devrait être développée dans l'avenir.

2.1.4. Mesures directes sur le site

Elles ont été largement utilisées en France lors des premières études de bruit, parfois à tort, parce qu'on ne disposait pas d'autres outils d'évaluation.

Aujourd'hui les mesures directes montrent leurs limites :

– elles ne permettent pas de différencier les sources. L'effet de l'aménagement d'une route ne peut donc être évalué par la mesure, en présence d'autres routes importantes.

– elles sont très sensibles aux caractères particuliers du site et des conditions dans lesquelles s'effectue la mesure (effets météorologiques, évènements, présence de sources sonores parasites, trafics particuliers pendant la mesure).

– elles ne permettent pas la prévision sur des sites qui doivent être profondément modifiés, soit par la construction de routes nouvelles, soit par la construction de bâtiments.

Pour ces raisons, la mesure directe, qui demeure un outil indispensable à l'acousticien devrait être limitée dans l'avenir à trois types d'utilisation seulement :

– la recherche en vue d'une modélisation des phénomènes acoustiques. Les effets de sol par exemple sont encore mal connus et nécessitent des recherches complémentaires.

– L'aide aux études par calculs sous deux formes :

. vérification par sondage, en quelques points, des estimations faites par calcul.

. complément d'évaluation pour des effets acoustiques complexes : absorption du sol, topographie, diffraction sur les obstacles larges...

– la réception des ouvrages de protection (écrans, buttes de terre, couvertures des chaussées) afin de contrôler les entreprises qui réalisent les travaux.

2.1.5. Différents outils pour cerner une réalité complexe

La finalité des études du bruit de la circulation, qu'il soit d'origine routière ou ferroviaire, est d'éclairer le choix de l'aménageur. En estimant les niveaux sonores, en mesurant leurs effets sur les populations en terme de nuisances (effets sur la santé, inconfort, coûts sociaux, etc.), les études de bruit permettent de fournir des éléments quantifiés de nature à préciser les choix inhérents à la conception d'un projet et leurs conséquences. Elles permettent d'intégrer la préoccupation « bruit » dans l'ensemble des études nécessaires à l'élaboration d'un projet, de mesurer l'intéraction entre cette préoccupation (avec les conséquences techniques qu'elle entraîne), et les autres aspects du projet (sécurité, entretien, paysage, effets de coupure, etc.). Enfin, elles permettent de prendre toutes mesures ou concevoir tous aménagements aptes à réduire les bruits gênants, dans le respect des autres contraintes liées à la conception générale du projet.

L'expérience acquise au cours des dernières années montre qu'il est indispensable d'intégrer la conception des ouvrages de protection contre le bruit dès le début des études de projet de voies de circulation. Plus la *prévision* est faite en *amont* d'un projet, plus le projeteur dispose de libertés (technique ou économique), pour concevoir et intégrer les protections nécessaires, plus la solution peut être élégante et respecter les autres contraintes de l'environnement.

Pour ce faire, nous disposons aujourd'hui d'une gamme complète d'outils d'étude et d'évaluation. Chacun des outils est complémentaire aux autres et c'est souvent par l'utilisation de plusieurs outils qu'il devient possible de mener une étude de bruit.

A titre indicatif, le tableau suivant donne les principaux domaines d'utilisation des différents outils disponibles en France.

Phases d'une étude acoustique \ Outils	Méthodes de calcul du Guide du bruit		Programme de calcul BRUIT	Maquettes		Mesures in situ
	simplifiée	détaillée		simplifiée	précise	
Détection des problèmes	X	–	–	–	–	La mesure vient en complément des autres méthodes
Esquisses de solution (D.P.C.)	X	X	X	X	–	
Bilan acoustique au stade de l'avant-projet (A.P.S.)	–	X	X	X	X	
Mise au point des solutions (A.P.D. - exécution)	–	X	X	–	X	
Mise au point des détails architecturaux au stade du projet	–	–	–	–	X	
Réception des ouvrages anti-bruit	–	–	–	–	–	X

Dans l'avenir, il conviendra de poursuivre l'amélioration des modèles prévisionnels ainsi que celle des techniques de mesure in situ, de façon à rendre ces outils aussi performants que possible dans leur domaine d'utilisation respectif, et bien sûr à faire converger encore les résultats comparables dans une fourchette d'incertitude aussi réduite que possible.

2.2. La gestion du flot : les plans de circulation

Les lois théoriques montrent que les niveaux sonores varient comme $L = k + 10 \log (Q_{VL} + EQ_{PL}) + 20 \log V$

Q_{VL} = débit horaire de véhicules légers

Q_{PL} = débit horaire de véhicules lourds

V = vitesse moyenne du flot de véhicules.

De façon théorique, il est indiscutable qu'une action sur les vitesses et sur les débits peut aboutir à une diminution sensible des niveaux sonores.

L'action au niveau des plans de circulation repose sur les principes suivants :

- amélioration de la fluidité,
- diminution des vitesses élevées,
- diminution éventuelle des débits, en écartant en particulier les véhicules les plus bruyants des zones les plus sensibles, aux périodes d'endormissement et de sommeil.

Cependant quelques difficultés pratiques limitent la portée des actions entreprises.

– *Il est inutile de descendre les vitesses en dessous de 60 km/h*

En effet, la loi théorique ci-dessus ne s'applique que pour les vitesses supérieures à 60 km/h.

A basse vitesse c'est le régime moteur et donc les conditions d'écoulement qui déterminent le niveau de puissance acoustique à l'émission.

Selon que l'on circule sur le 3° ou sur le 4° rapport de boîte, le bruit peut être sensiblement plus élevé à vitesse égale.

De plus l'accélération en aval d'un carrefour ou la sortie d'un stop peut provoquer une augmentation de 3 à 5 dB (A) du niveau sonore.

Il semble beaucoup plus intéressant de fluidifier le trafic, et d'éviter les accélérations brusques, tout en maintenant la vitesse à 60 km/h maximum (création d'ondes vertes) plutôt que de réduire cette vitesse sans autre précaution.

– *Les limitations de vitesses ne touchent qu'une faible partie du flot*

En vitesse libre, tous les véhicules ne roulent pas à la même vitesse. Les Poids Lourds notamment dépassent rarement 80 à 100 km/h sur des voies urbaines.

Pour obtenir une réduction significative des niveaux sonores, il conviendrait de réduire l'ensemble des vitesses. Pour être efficace, c'est une translation de l'ensemble de la courbe des vitesses qu'il faudrait obtenir.

– *La limitation est difficile à faire respecter*

Chacun connaît les difficultés d'application réelle d'une limitation de vitesse.

On peut ajouter que cette difficulté est d'autant plus grande que la voie est largement dimensionnée.

– *Pour l'action sur les débits*

. en divisant par 2 le débit des véhicules légers, on peut s'attendre à une réduction de 3 dB (A), des niveaux sonores.

. le coefficient d'équivalence acoustique E qui existe entre un véhicule léger et un poids lourd est approximativement égal à 10 en milieu urbain. Si le pourcentage poids lourd est, par exemple, égal à 10 %, on constate que les poids lourds équivalent à l'ensemble des véhicules légers.

Toute réduction du nombre de poids lourds aura donc une forte incidence sur l'émission de niveaux sonores, que ce soit en Leq ou en bruit de crête.

3. RÉALISATIONS D'OUVRAGES DE PROTECTION EN BORDURE D'INFRASTRUCTURES ROUTIERES

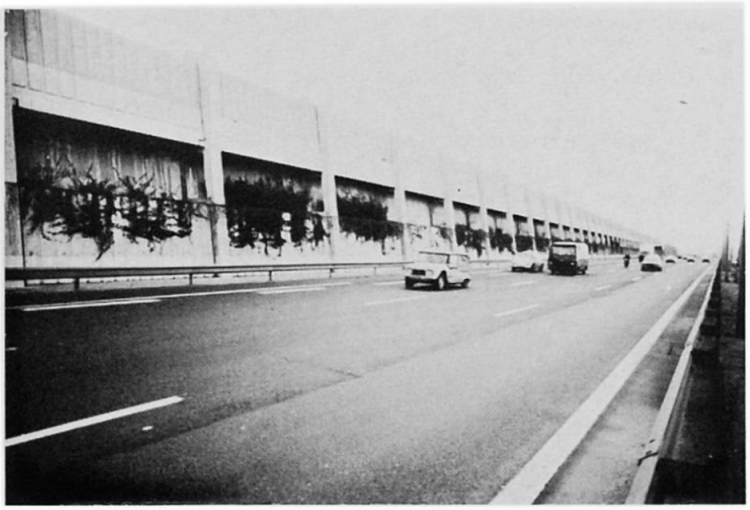
Les ouvrages de protection peuvent être classés selon la typologie suivante :

– les murs verticaux
  écrans de grande hauteur
  écrans courants, réfléchissants ou absorbants
  écrans de faible hauteur
– les buttes de terre et buttes mixtes
– les couvertures partielles ou totales de la chaussée.

3.1. Ecrans verticaux

3.1.1. Ecrans de grande hauteur

Ce sont des écrans de hauteur supérieure à 6 m. Ces écrans doivent demeurer exceptionnels et ne se justifient que dans des sites particulièrement difficiles (autoroutes importantes bordées d'immeubles collectifs élevés et très proches des voies de circulation).



Ecran de grande hauteur de l'Hay-les-Roses.

Conçus comme des ouvrages d'art, ils nécessitent de la part du maître d'œuvre un souci constant d'intégration au site, principal problème à résoudre lorsque la position de l'arête de diffraction a été définie.

L'exemple français le plus connu est celui de l'Hay-les-Roses.

3.1.2. Ecrans courants

a) réfléchissants, compacts ou à parois multiples

Les écrans peuvent être construits en béton, métal, verre, plastique. Leur caractéristique principale est de pouvoir s'opposer à la transmission, donc de présenter un indice d'affaiblissement normalisé « R » du bruit routier égal ou supérieur à 22 dB (A).

Ecran en béton armé réalisé le long de l'autoroute A86, dans la traversée de Colombes.

b) absorbants

Il existe de nombreux écrans absorbants sur le marché. Généralement, leur ossature porteuse est distincte des plaques formant écran. Les matériaux employés sont très divers. Tout élément poreux ou fibreux peut convenir : bois enchevêtrés, mousse d'argile, plastique ou métal perforés, laines minérales, laines de verre. Ils doivent présenter des qualités acoustiques suffisantes. Ces qualités sont actuellement caractérisées par la mesure du facteur d'absorption « Sabine » pour l'ensemble des fréquences du bruit routier (125 hz - 4000 hz). Cependant, cette mesure, si elle permet de choisir entre deux matériaux, est peu représentative des résultats in situ. Des études sont en cours pour la mise au point des méthodes de mesure in situ des qualités absorbantes des matériaux. Elles permettront dans l'avenir de mieux les caractériser et, peut être d'utiliser des matériaux mieux adaptés aux conditions d'utilisation le long des voies de transport.

Ecran absorbant réalisé le long de la déviation de la RN 188 à Champlan (Essonne)

3.1.3. Ecrans de faible hauteur

L'utilisation de ces écrans est réservée à des sites particuliers dont les caractéristiques géométriques sont telles que pour rejeter les bâtiments à protéger dans la zone d'ombre, des écrans de faible hauteur sont suffisants. Ces sites seront généralement des viaducs ou des remblais importants. Cependant, la hauteur de ces écrans ne doit jamais être inférieure à 0,80 m.

3.2. Buttes de terre

Toute butte de terre constitue un type de protection contre le bruit d'efficacité comparable à celle d'un écran de même hauteur.

Cette solution possède des attraits indéniables :

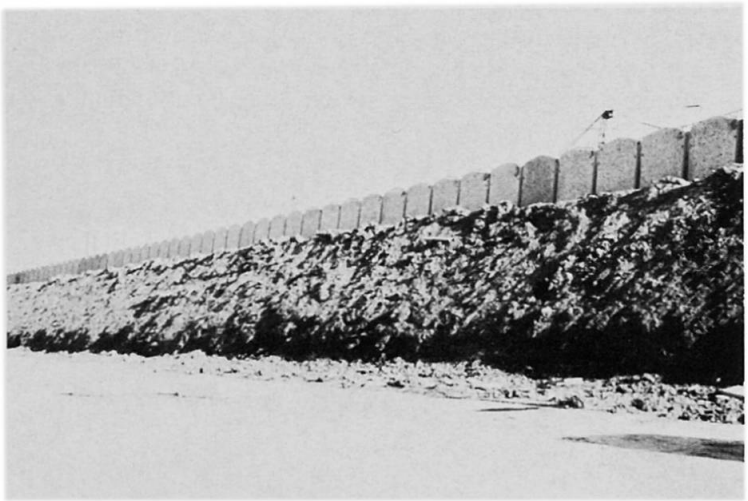
- elle évite les réflexions vers les habitations situées en face puisqu'elle est légèrement absorbante et que sa paroi est généralement inclinée ;
- elle peut être engazonnée et plantée, ce qui améliore souvent l'aspect esthétique des abords de la voie. Cette amélioration est extrêmement importante pour la satisfaction des riverains ;
- elle peut être réalisée avec des excédents de terrassement si elle est construite en même temps que la chaussée. Dans ce cas, elle constitue une solution très peu coûteuse (on peut même, dans certains cas, parler de coût négatif par rapport au coût de construction de la voie quand la réalisation d'une butte évite le transport et la mise en décharge de terres excédentaires).

Cependant, elle possède un inconvénient qui peut être important : elle occupe une emprise au sol de grande dimension. Pour libérer cette emprise le maître d'œuvre peut être conduit à des coûts importants. D'une façon générale, la butte de terre devient une protection onéreuse si elle nécessite une charge foncière spécifique.

De plus, elle peut entraîner des dépenses non négligeables si sa réalisation conduit à déplacer certains réseaux (eaux, gaz...). Son entretien, toujours nécessaire, peut lui aussi conduire à des dépenses sensibles.

Une butte de terre, solution attrayante et efficace, ne saurait donc constituer une panacée.

Des solutions mixtes, utilisant la technique des buttes de terre et des murs écrans, peuvent aboutir à des solutions cumulant les avantages de ces deux procédés. Elles sont, comme les écrans, peu consommatrices d'emprises et, comme les buttes de terre, elles peuvent être plantées, ce qui en améliore l'aspect.



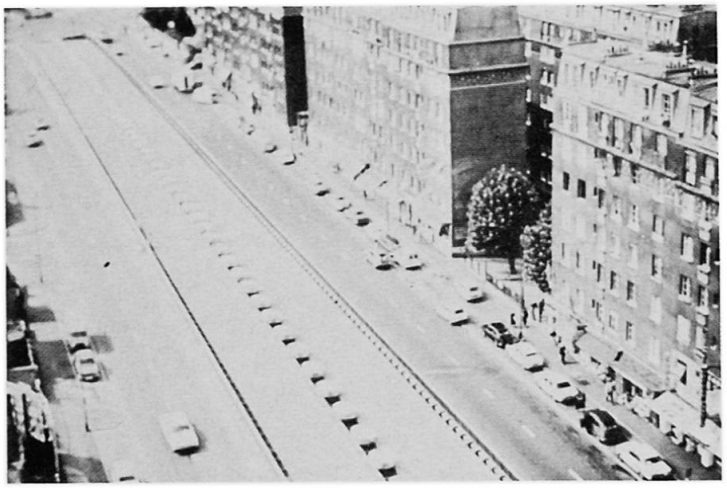
Butte de terre réalisée le long de l'autoroute A86 à Gennevilliers

3.3. Couvertures partielles ou totales

Lorsque la réalisation d'écran conduirait à des dispositifs de hauteur supérieure de 6 à 8 m, on a intérêt à utiliser des protections horizontales couvrant partiellement ou totalement la chaussée. C'est, notamment, le cas où des bâtiments collectifs élevés sont implantés à des distances faibles d'une voie de circulation.

Les couvertures partielles ou totales de la chaussée peuvent être classées en cinq catégories, suivant les surcharges d'utilisation à prendre en compte :

1) Ultra-légère : rôle uniquement acoustique. Il s'agit de rechercher le matériau le plus léger possible, mais assez résistant aux conditions climatiques (neige) ; exemple : B6 dans la traversée du Kremlin-Bicêtre.



Couverture légère réalisée sur l'Autoroute B6 dans la traversée du Kremlin-Bicêtre

2) Légère : rôle uniquement acoustique avec possibilité d'aménagement esthétique (intégration dans le site) sans possibilité d'accès au public.

3) Semi-lourde : l'accès est autorisé au public, mais interdit à tous véhicules. Un léger engazonnement (20 cm de terre végétale) et une chape anti-racines sont admissibles, ou bien un équipement sportif tel que court de tennis.

4) lourde : l'autouroute passe alors dans un souterrain. Il est possible sur une telle couverture de reprendre les échanges de circulation, ainsi qu'un aménagement paysager si cela est nécessaire ;

5) damier phonique : il s'agit d'un procédé, qui devrait permettre d'obtenir des efficacités acoustiques proches de celles d'une couverture tout en évitant, dans certains cas, de mettre en place une ventilation et un éclairage diurne. Cette protection conçue par les services de l'Administration dès 1972, est basée sur l'effet conduit. Mise au point de façon théorique elle a été testée sur maquette. Un chantier expérimental permet actuellement d'en tester l'efficacité in situ.

4. LES ACTIONS AU NIVEAU DU BATIMENT

Pour réduire les niveaux sonores, l'action sur les voies de circulation, existantes ou en projet, ne suffit pas toujours ou n'est pas toujours techniquement possible ; il est nécessaire de la compléter par une adaptation de l'habitat, donc par une action sur l'urbanisme.

Cette action utilisera essentiellement trois volets complémentaires entre eux :
- un « zonage » (ou affectation des sols)
- un « épannelage » (ou adaptation des hauteurs des bâtiments),
- une adaptation des plans-masses de grands ensembles de logements riverains de voies de circulation.

1) Zonage

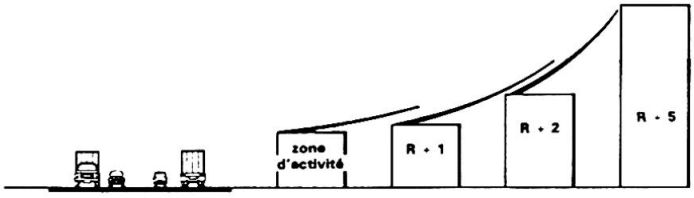
Les différents types d'activités rencontrés en milieu urbain peuvent être classés en fonction de leur sensibilité au bruit, par ordre de sensibilité décroissante :
- habitation ou loisirs,
- équipements,
- activités tertiaires,
- activités industrielles et artisanales, ou commerces.

Le zonage consiste en une affectation judicieuse de ces activités à des zones plus ou moins exposées au bruit, par exemple : les équipements (stades, équipements scolaires) et les habitations sont implantés dans l'espace central ; ils sont ainsi isolés par un cordon de protection, constitué par les bâtiments implantés dans la zone d'activité.

A l'échelle d'une agglomération, l'idée peut être reprise lors de l'établissement des plans d'occupation des sols (POS).

2) Epannelage

A proximité des voies, l'étude de la propagation du son montre que la réalisation d'un écran crée une zone d'ombre, zone dans laquelle le son parvient à des niveaux sensiblement atténués.



Grâce à l'épannelage, les bâtiments se « protègent » entre eux.

L'épannelage consiste, en une adaptation des hauteurs de bâtiments aux conditions de propagation du bruit : les bâtiments sont conçus de façon à demeurer toujours dans la zone d'ombre et leur hauteur croît au fur et à mesure que la distance à la voie augmente.

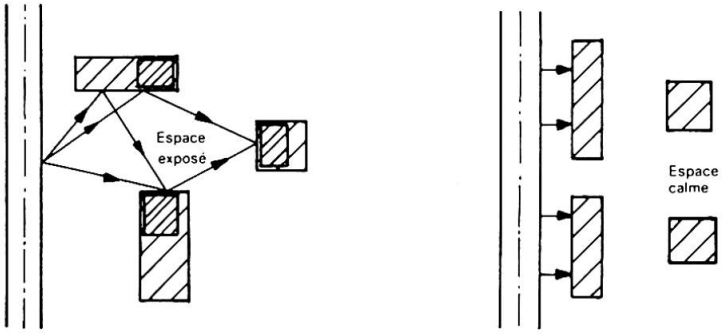
3) Plans-masses

Certaines formes urbaines sont particulièrement perméables au bruit : elles ne s'opposent pas à la propagation du bruit et exposent un nombre considérable de façades.

voie de circulation voie de circulation

L'implantation perpendiculaire d'un bâtiment par rapport à la voie expose les façades principales. Par contre, la disposition parallèle, si elle expose l'une des façades principales, permet aussi de rejeter l'autre en zone calme et d'y localiser les pièces de séjour et de repos.

Ainsi, l'urbanisme moderne, avec des bâtiments élevés, dégageant des espaces larges et ouverts, expose environ 80 % des façades au bruit d'une source telle qu'une route ou une voie ferrée.



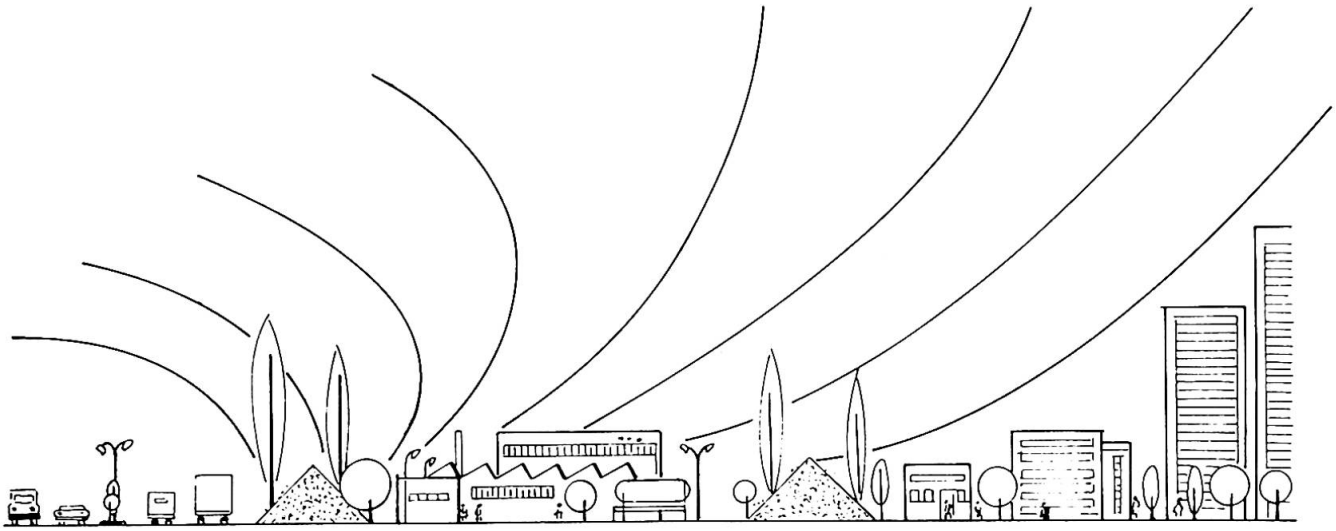
voie de circulation voie de circulation

Une implantation « ouverte » des bâtiments rend le site très perméable au bruit. Une implantation fermée permet de dégager des espaces calmes et expose un nombre de façades réduit.

Le schéma résumé de ces techniques est le suivant :

– une butte de terre implantée le long des voies protège la zone industrielle,

— la zone industrielle (où les activités retenues ont été choisies pour être non polluantes et non bruyantes) protège la zone d'habitation,
— les bâtiments d'habitations ont des hauteurs croissantes au fur et à mesure qu'on s'éloigne des voies.



4.1. Amélioration de l'isolement de façade

Il faut entendre par isolement de façade la différence entre deux niveaux de pression acoustique mesurés simultanément :
— à l'intérieur du local en une position la plus proche possible du centre géométrique de la pièce.
— à l'extérieur, en plaçant un microphone à 2 mètres en avant des parties proéminentes de la section de façade qui correspond au local testé.

Améliorer l'isolement d'une façade proprement dite, c'est agir, par ordre de difficulté et donc l'efficacité croissantes, sur les éléments suivants :
— *la fenêtre*

Une fenêtre ordinaire procure au mieux un isolement d'environ 22 dB (A). Pour améliorer cet isolement, on passera successivement à :

des fenêtres à vitres épaisses,
des fenêtres à double vitrage,
des doubles fenêtres.

Leur efficacité variera ainsi de 22 dB (A) à 40, voire 45 dB (A) dans les meilleurs cas.

Type de fenêtre	ordre de grandeur de l'isolement en dB (A)
— fenêtre ouverte	7
— fenêtre ordinaire fermée	22
— fenêtre ordinaire fermée et calfeutrée	25 à 30
— fenêtre à double vitrage	30 à 35
— fenêtre double	35 à 45

— *les huisseries*

L'amélioration des vitres ne suffit pas. Dès que l'on désire obtenir des atténuations suffisantes, il est nécessaire de supprimer les fentes par lesquelles le son se propage. Le calfeutrement des fentes devient alors nécessaire, il peut être obtenu par mise en place de joints appropriés ou par emploi d'huisseries de haute qualité acoustique.

On peut distinguer 3 types d'huisseries principales :

- les huisseries en bois (très bonnes qualités acoustique, mais d'un entretien coûteux)
- les huisseries en plastique (coût : 1,2 huisserie en bois), excellentes performances acoustiques, thermiques et mécaniques, et absence d'entretien
- les huisseries en profilé d'aluminium (coût : 1,5 fois huisserie en bois). Très bonne performance mécanique. Peu d'entretien. Excellente apparence esthétique.

– *les prises d'air*

Des isolements de façade supérieure à 35 dB (A) n'admettent plus de prise d'air en façade exposée, sans précautions spéciales. Ainsi, pour de tels isolements, il est recommandé d'utiliser des systèmes de silencieux devant les prises d'air (chicanes), ou de modifier totalement la ventilation des appartements en rejetant les prises d'air en façade calme et en utilisant des amenées d'air par gaines et ventilation mécanique.

– *la façade elle-même*

Enfin, certaines cloisons légères limitent l'isolement de façade, même dans le cas de fenêtres, huisseries et prises d'air bien conçues. Pour un bon isolement, il faut que la façade ait une masse surfacique suffisante, ce qui exclu certains procédés de cloisons légères.

BIBLIOGRAPHIE

– Guide du Bruit des Transports Terrestres

Fascicule 1 : Présentation générale (septembre 1976)
Guide méthodologique pour les études

Fascicule 2 : Aspects de la gêne due au bruit de la circulation routière (février 1976)
Synthèse des études de gêne ayant abouti à la fixation des seuils

Fascicule 3 : Catalogue de cas (septembre 1976)
Exemple de réalisations françaises

Fascicule 4 : Recommandations Techniques pour les ouvrages de protection contre le bruit (mai 1978)
Ensembles des Règles Techniques à respecter lors de la conception ou la réalisation d'un écran acoustique.

Fascicule 5 : Prévision des Niveaux sonores (mars 1980)
Ensemble des méthodes de calcul et de prévision des niveaux sonores dûs à la circulation routière et ferroviaire.

Fascicule 6 : (A paraître en 1981) : Amélioration de l'isolement acoustique de façade des bâtiments.

Die Physik der Luft in Räumen mit geringem Luftdurchsatz

C.M. FLECK
Univ. Prof. Dipl. -Ing. Dr.
TU Wien und Österr. Atominstitut
Wien, Österreich

Es wird über Messungen berichtet, die klar erkennen lassen, daß durch allzu rigorose Abdichtmaßnahmen in Steinhäusern die Radonkonzentration in der Raumluft auf ein nicht mehr tolerierbares Maß ansteigt.

Während die Raumluft bisher in geschlossenen Räumen durchschnittliche Konzentrationswerte um 0,5 nCi/m³ Radon enthält, kann die Konzentration in rigoros abgedichteten Räumen je nach Lüftungsgewohnheit zwischen 1 und 30 nCi/m³ Radon betragen. Diese Radonkonzentrationen ergeben unter der Annahme einer linearen Dosis-Wirkungsbeziehung jährlich 500 Lungenkrebsfälle pro einer Million Bewohner.

Eine zweite, nicht minder schädliche Folge der außerordentlich geringen Luftwechselzahlen ist die starke Abreicherung der Luft an Kondensationskernen, die zur Bildung der lungengängigen Luftionen notwendig sind. Wie sich heute allgemein durchsetzt, sind solche Ionen für eine Reihe von physiologischen Funktionen des Menschen wichtig. Das Wirkungsspektrum dieser Ionen reicht von der Beschleunigung der Ziliarfrequenz des Flimmerepithels über die Anhebung der Blutsauerstoffwerte, Normalisierung der Herzfrequenz bis zum Abbau bestimmter Aggressionshormone und greift damit in fundamentale physiologische Funktionen des Menschen ein, so daß ein Mangel dieser lungengängigen Luftionen nicht nur zu erhöhter Infektionsgefahr bei Erkältungskrankheiten und Neigung zu chronischer Bronchitis, sondern auch zu Migräne, Konzentrationsmangel, Unlustgefühlen und Aggressionen führen kann. Allerdings sind die Erkenntnisse auf diesem Gebiet noch nicht abgeschlossen und eine Darstellung der sicherlich sehr komplizierten physiologischen Experimente und Schlußfolgerungen noch nicht allgemeiner Stand der Schulmedizin.

Diese an sich bekannte Tatsache unterstreicht eindringlich die unabdingbare Notwendigkeit der Gewährleistung des hygienischen Luftwechsels von Aufenthaltsräumen, welcher heute durch dichte Fenster oft nicht mehr vorhanden ist.

Auch ein Forschungsvorhaben des Bundesgesundheitsamtes in Berlin weist in bezug auf die Beseitigung von Luftschadstoffen auf die Notwendigkeit des hygienischen Luftwechsels hin. Siehe nachstehender Kurzauszug:

"Bei sehr stark abgedichteten Fenstern entstehen bedenkliche Konzentrationswerte in der Atemluft. Dr.-Ing. Wegner vom Bundesgesundheitsamt in Berlin forderte die Festlegung einer "zulässigen Dichtheit" von Fenstern.

Das Bestreben, Energie zu sparen, setzt so manche Aktivität frei, die vor ein paar Jahren wohl noch müde belächelt worden wäre. So werden Fenster von Aufenthaltsräumen dermaßen stark abgedichtet, daß der natürliche Luftwechsel unter ein der Gesundheit zuträgliches Maß absinkt. Die Beseitigung der Schadstoffe aus der Raumluft, wie CO_2 und Ausdünstungen von Bauteilen, wird in einem Maß vermindert, daß hieraus hygienisch bedenkliche Konzentrationswerte in der Atemluft zu beklagen sind. Da bisher zuverlässige Meßwerte über die bei natürlicher Lüftung vorhandene Luftwechselzahl, das heißt dem stündlich einem Raum zugeführten Luftvolumenstrom, bezogen auf das Raumvolumen, für Räume mit sehr dichten Fenstern fehlten, führte Dr. Wegner im Rahmen eines Forschungsvorhabens diese Luftwechselbestimmung durch. Dazu wurde die Raumluft mit einem Indikatorgas (N_2O) angereichert und die Konzentrationsabnahme dieses Gases mit einem Infrarot-Gasanalysator gemessen.

Die so aus über 120 Einzelluftwechselmessungen in etwa 80 verschiedenen Räumen gewonnenen Ergebnisse zwingen zu einer geradezu bedenklichen Folgerung: In Abhängigkeit von den jeweiligen meteorologischen Gegebenheiten dürfen Räume mit sehr dichten Fensterfugen nur etwa ein Drittel der Personenzahl aufnehmen, die Lokalitäten mit den herkömmlichen Kastendoppelfenstern ohne Dichtung zugebilligt werden können. Entsprechenden Energiemaßnahmen sind also spätestens dort Grenzen zu setzen, wo die hygienischen Bedingungen nicht mehr erfüllt sind.

Und außerdem wurde in letzter Zeit eine Reihe von Todesfällen bekannt."

Free Discussion

Discussion libre

Freie Discussion

Zum Beitrag "Sagelsdorff, R. und Frank, Th.: Spektrale Eigenschaften von Baumaterialien und deren Einfluß auf den Energiehaushalt von Gebäuden".

E. Panzhauser, Wien: Ist bei den Messungen der Feuchtegehalt der Außenluft beobachtet und bei den Rechnungen berücksichtigt worden? Der beobachtete starke Temperaturabfall sollte zu starker Kondensat- oder Reifbildung und die freigesetzte Phasenwandlungswärme zu einem Temperaturhalt der Oberfläche führen.

Zum Beitrag "Trümper, H.: Pauschalanteil bei der Verrechnung der Heizkosten in mehrgeschossigen Gebäuden unter Berücksichtigung des differenzierten spezifischen Wärmebedarfes der Wohnungen nach ihrer Lage im Gebäude."

E. Panzhauser, Wien: Ist bei Veränderung des Flächenverhältnisses Außenwand zu Innenfläche die Energie-Parifizierung zu wiederholen? Ist ein ähnlicher Versuch, auch den Strahlungszustrom (durch Fenster) zu berücksichtigen, möglich oder beabsichtigt?

Zum Beitrag "Fiorato, A.E. und Corley, W.G.: Tests of heat transfer through walls."

E. H. Sidwell, Belfast: Could the author state whether in his measurements the water content of the walls was controlled? We have not done dynamic experiments but with steady state work we found moisture content to be of extreme importance and somewhat difficult to control effectively.

R. Sagelsdorff, Dübendorf: May I point out that at the Swiss Federal Laboratories for Materials Testing (EMPA) at Dübendorf, the influence of the thermal storage capacity of walls and building interior mass on energy demands have been investigated for many years. A calibrated hot and cold box for walls (1.50 x 2.00 m in size) has been in operation for dynamic tests since 1976. In our country, the heating problem is primary. Here - over the whole heating season - the mass of the building envelope is of negligible influence given past and present construction methods in Switzerland. The mass of the interior is, however, indeed very important to use the sun that enters through the windows.

Zum Beitrag "Ikeda, T. et al.: Heat transfer in porous building material under condensation."

K. Gertis, Essen: You have plotted in figure 3 the moisture coefficients under isothermal conditions. Figure 1 showed the measurement device. But a lot of practical moisture problems happen together with temperature influences. Did you make measurements under non-isothermal conditions?

T. Ikeda, Kyoto: We don't measure non-isothermal coefficients D_{Tv}, D_{Tl} separately. But they are obtained by calculation and their sum

$$D_T = D_{Tv} + D_{Tl}$$

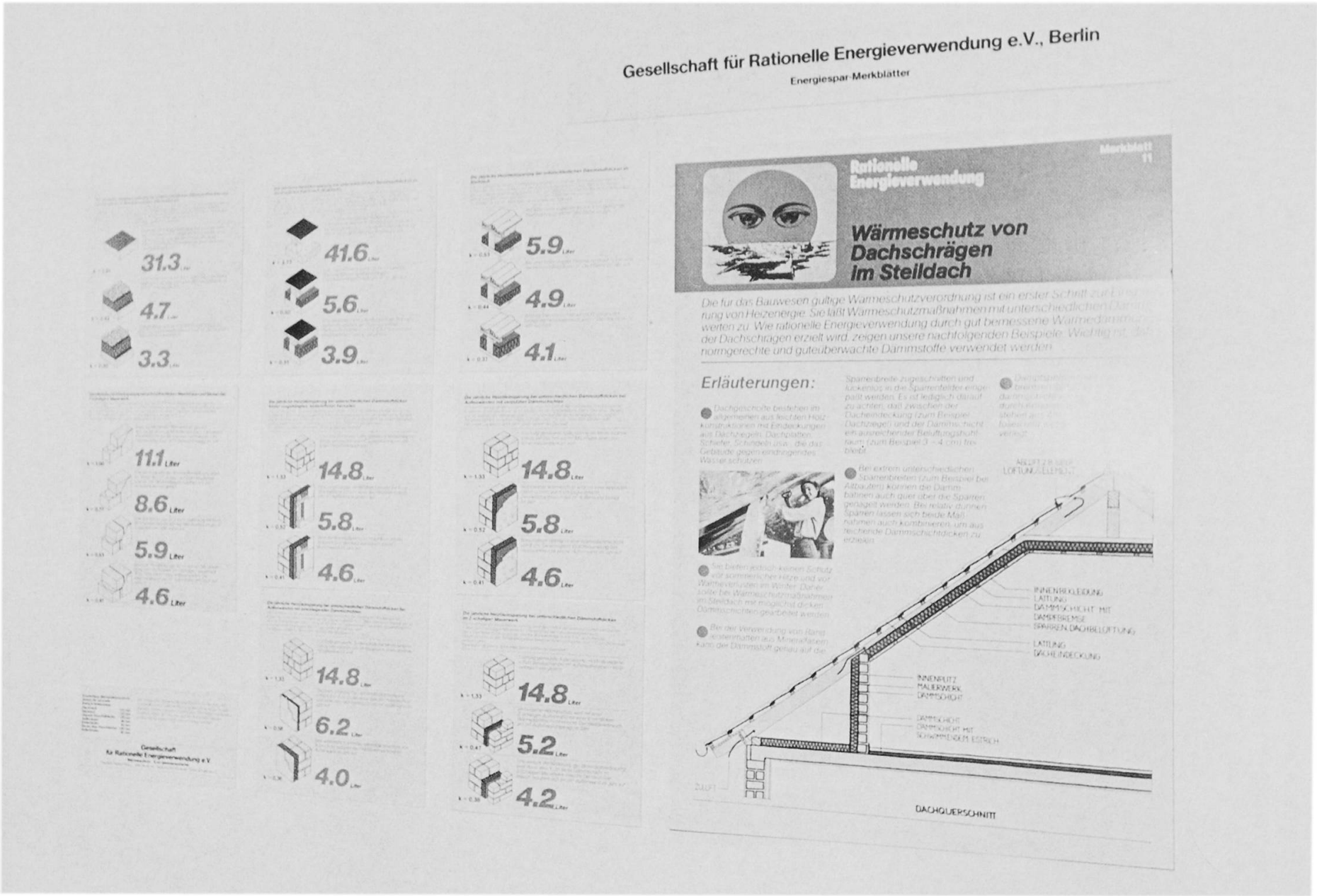
is measured.

Zum Beitrag "Fleck, C.M.: Die Physik der Luft in Räumen mit geringem Luftdurchsatz."

K. Gertis, Essen: Auf Grund jüngst publizierter Ergebnisse von R. Reiter, Garmisch, hat die Lüftung der Räume lediglich unter anderem einen Einfluß auf die Kleinionenkonzentration in Räumen. Durch Diffusion von Radon und Thorium aus den Baustoffen, welche die Raumumschließungsflächen bilden, können unter durchschnittlichen Bedingungen Kleinionenkonzentrationen zwischen 1000 und 2000/cm³ auftreten, wenn die Räume nicht belüftet und nicht benutzt werden. Sobald Personen den Raum betreten, sinkt die Konzentration laufend, weil durch die unvermeidbare Staubbildung Aerosole entstehen, an welche sich die Kleinionen anlagern. Gleiches gilt für den Rauch von Tabakwaren; auch hierdurch sinkt die Konzentration drastisch. Durch Lüftung kann die Konzentration ebenfalls gesenkt werden. Messungen in einer älteren Gaststätte, deren Mauern aus älterem Granitbruchstein mit abnorm hohem Gehalt an natürlicher Radioaktivität (Uranglimmer) bestanden, haben ergeben, daß Kleinionenkonzentrationen bis zu 10000/cm³ vorhanden waren. Die Familien, welche über mehrere Generationen hierin wohnten, haben dieses "unfreiwillige" Experiment seit 200 Jahren ohne körperliche Schäden überstanden. Als Konsequenz ergibt sich hieraus, daß wir zwar unsere Baustoffe und unsere Lüftungsgepflogenheiten in bezug auf Radioaktivität näher verfolgen sollten, daß aber absolut kein Grund zur Panikmache besteht.

E. Panzhauser, Wien: Erhöhte Radon-Konzentration in der Innenluft kann durch Aufrechterhaltung einer Luftwechselzahl von 0,5 bis 0,75 h^{-1} nach Ansicht der schwedischen Forscher auf einem unbedenklichen Niveau gehalten werden. Die Überprüfung der Luftwechselzahlen der Wohnungen ist jedoch neuerdings wünschenswert. Testverfahren sollte abgeklärt werden.

H. Trümper, Dortmund: Eine Permanentlüftung als Ersatz für abgedichtete Fenster ist keine Verbesserung, denn nach der Erfahrung ist die Permanentlüftung nicht so kontrollierbar wie eine Fensterlüftung. Ein Ersatz ist nur die Wohnungslüftung als mechanisch kontrollierte Lüftung mit Wärmerückgewinnung nach den schwedischen Baunormen und der VDI-Richtlinie 2067 in der BRD. Es sollte geklärt werden, welcher minimale Luftwechsel aus hygienischen Gründen erforderlich ist. Bisherige Werte werden mit 0,3 bis 1,0 h^{-1} genannt.


Gesellschaft für Rationelle Energieverwendung e.V., Berlin
Energiespar-Merkblätter
Merkblatt 11
Rationelle Energieverwendung
Wärmeschutz von Dachschrägen im Steildach
Erläuterungen:
DACHQUERSCHNITT

Gesellschaft für Rationelle Energieverwendung e.V.
Wärmeschutz · Energiesparsysteme
1000 Berlin 19

MERKBLÄTTER FÜR DIE ENERGIEBERATUNG

D. BRAMIGK

Die Gesellschaft bearbeitet Fragen rationeller Energieverwendung in fachorientierten Arbeitskreisen innerhalb des Vereins. Diese Tätigkeit kann regional und überregional auch in Zusammenarbeit mit anderen Organisationen und Institutionen bei der Ausrichtung von Seminaren, Ausstellungen und Publikationen erfolgen. Darüber hinaus wollen sich der Verein und seine Mitglieder im Rahmen ihrer Möglichkeiten auch an Forschungsvorhaben zur rationellen Energieverwendung und Nutzung neuer Energiesparsysteme beteiligen.

Arbeitskreis 1 – Wärmeschutztechnik

Die Aufgabe besteht darin, alle Wärmeschutztechniken im Hochbau und Industriesektor baustoff- und bauteilspezifisch darzustellen.

Arbeitskreis 2 – Energiesparsysteme

Dieser Arbeitskreis stellt aktive und passive Energiesparsysteme für Neubau, Altbau und Industriebau dar und überprüft sie auf praktische Realisationsfähigkeit, Wirtschaftlichkeit und ökologische Folgen. Regeltechnische Anlagen, die zu den Systemen gehören, sind eingeschlossen.

Arbeitskreis 3 – Meßtechnik

Hier werden alle Methoden der 'Energiekontrolle' innerhalb des Tätigkeitsbereiches des Vereins dargestellt und auf ihre Eignung zum Nachweis in der Praxis analysiert.

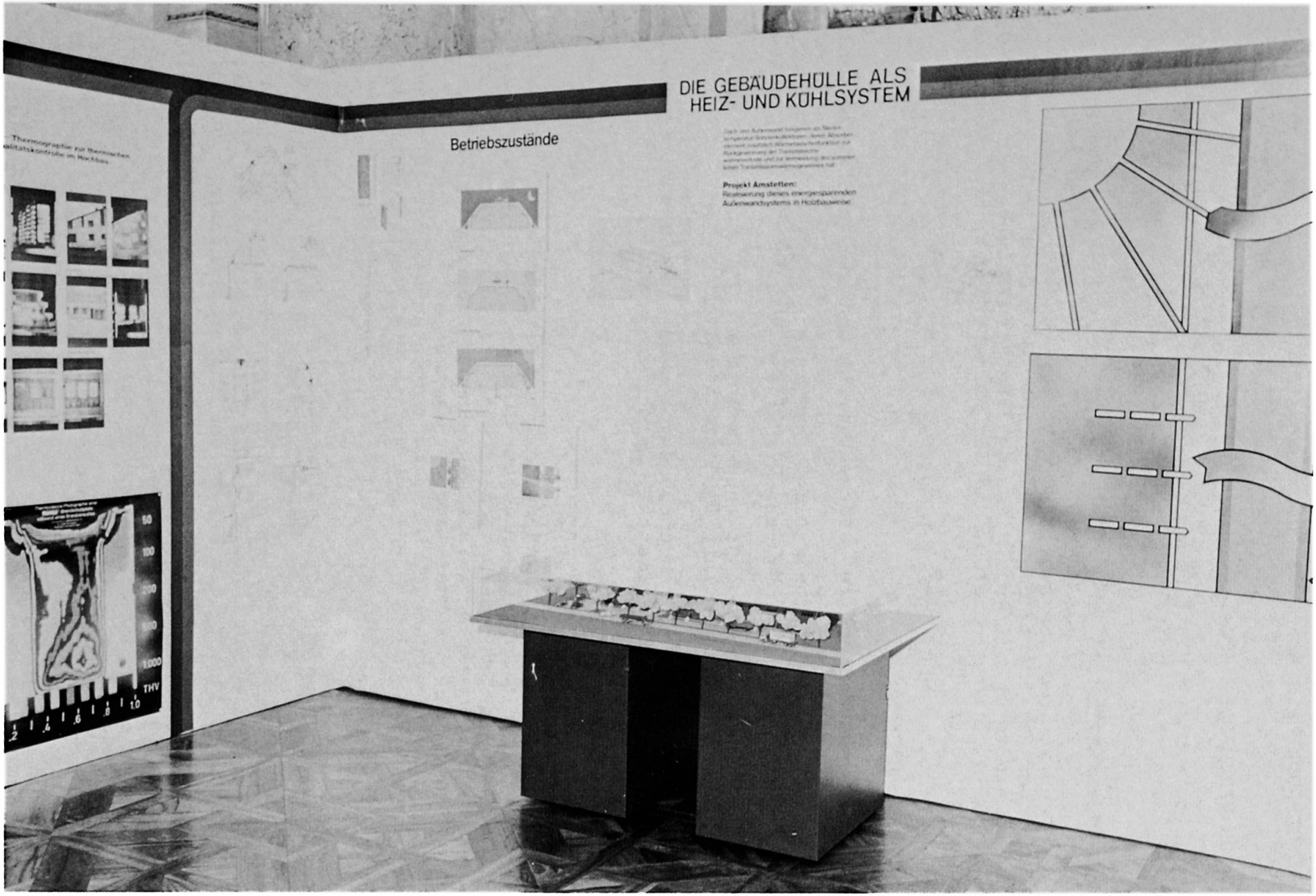
Arbeitskreis 4 – Öffentlichkeitsarbeit

Innerhalb dieses Arbeitskreises werden Mittel und Methoden der Öffentlichkeitsarbeit im Tätigkeitsbereich des Vereins zielgruppenspezifisch entwickelt. Weiterhin ist es seine Aufgabe, die Ergebnisse aus den anderen Arbeitskreisen zu publizieren.

Arbeitskreis 5 – Rentabilitätsfragen

Gegenüberstellung der Investitionen und Folgekosten einerseits und der erzielbaren Einsparungen durch die einzelnen Energiesparmaßnahmen andererseits zur Feststellung der Rentabilität.

Neben der Herausgabe von Merkblättern und Fachpublikationen, sowie Beiträgen zu Messen und Fachausstellungen (BAU '80' München, IVBH Wien) ist die Gesellschaft für Rationelle Energieverwendung e. V. bemüht, ihre Erfahrungen unmittelbar in der Verbraucher- und Bürgerberatung umzusetzen. Die auf dem IVBH-Kongress in Wien gezeigten Poster und Merkblätter zur rationellen Energieverwendung werden fortlaufend ergänzt und Interessenten auf Anforderung übersandt.


DIE GEBÄUDEHÜLLE ALS
HEIZ- UND KÜHLSYSTEM
Betriebszustände
Projekt Amstetten:
Realisierung dieses energiesparenden
Außenwandsystems in Holzbauweise
50
100
200
500
1.000
THV
1.0

DIE GEBÄUDEHÜLLE ALS HEIZ- UND KÜHLSYSTEM

ERICH PANZHAUSER, Professor Dr.

Technische Universität Wien
1040 Wien, Karlsplatz 13

1. PROBLEMSTELLUNG

Ausgehend von der Tatsache, daß die Heiz- und Kühllast eines Gebäudes von der thermischen Qualität der Gebäudehülle bestimmt wird, ist es ein vordringliches Planungs- und Entwicklungsziel, eine Gebäudehülle zu konstruieren, die den Wärmestrom nur in erwünschter Richtung durchläßt.

2. PROBLEMLÖSUNG

Eine solche Gebäudehülle wurde entworfen und sie besitzt folgende Eigenschaften:

- keine Transmissionsverluste im Winter
- solarer Energiegewinn durch diffuse und direkte Sonnenstrahlung
- keine Transmissionsgewinne im Sommer
- Vorkühlung der Zuluft im Sommer möglich.

Die Ausführung dieses Konzeptes erfolgt an einem Industriegebäude der Fa. THERMOVAL in Amstetten, Österreich.

3. PRÄSENTATION

Ein Modell und ein Satz von System- und Detailzeichnungen des Projektes wurden im Rahmen der Poster-Session präsentiert. Die Systemzeichnungen stellen die verschiedenen Betriebszustände (Wintertag, Winternacht, Sommertag), insbesondere die Führung der Zu- bzw. Abluft durch das Absorber-Tauscher-Element dar.
Die Detailzeichnungen geben den konkreten Aufbau der Außenwand- bzw. Dachelemente wieder und zeigen die vielfältigen Bauteilanschlüsse.

4. IR-THERMOGRAPHIE

Ein kleiner Teil der Posterwand ist einer kurzen Darstellung der IR-Thermographie zur thermischen Qualitätskontrolle im Hochbau gewidmet. Die Bilder zeigen Natur- und Infrarot-Aufnahmen von Bauwerken aus

- Betonsandwichelementen
- Ziegelwände (Hohlziegel)
- Sichtbeton (mit Innendämmung)
- Gasbeton-Element
- Stahl-Leichtbau-Elemente

Schlussbemerkung

F. LEONHARDT
Prof. Dr. Ing.
Stuttgart, Bundesrepublik Deutschland

Der stellvertretende Vorsitzende der Sitzung, Professor Dr. H.J. Cowan, Australien, begrüßte zum Schluß, daß die IVBH das Gebiet Bauphysik aufgegriffen hat. Er wies mit Recht darauf hin, daß optimale Lösungen für alle bauphysikalischen Anforderungen schwer zu erreichen seien, weil zum Beispiel bauliche Maßnahmen für gute Wärmedämmung im Hinblick auf Schallschutz schlecht seien. Man müsse daher von Fall zu Fall sorgfältig überlegen, welchen Anforderungen der Vorzug zu geben sei.

Die vorgetragenen Beiträge zeigen, daß die Bauphysik im Begriff ist, verbesserte Grundlagen für das Zusammenwirken der verschiedenen Einflüsse zu erarbeiten. Bei den hierfür entwickelten Meßeinrichtungen sind elektronische Steuerung und Registrierung eine wertvolle Hilfe geworden. Die Beiträge zeigen auch, daß es gelingt, die theoretischen Ansätze für komplexe Wirkungen so zu verbessern, daß eine gute Übereinstimmung mit der Wirklichkeit entsteht.

Der Kongreß gab in dieser Arbeitssitzung schon die Möglichkeit, sich über Forschungsarbeiten für solche verbesserte Grundlagen in verschiedenen Ländern gegenseitig zu orientieren.

Was die IVBH jedoch in Zukunft auf dem Gebiet der Bauphysik braucht, das sind einerseits Diskussionen über sinnvolle quantitative Anforderungen, abhängig von klimatischen Gegebenheiten und von Nutzungsarten der Bauwerke. Ferner brauchen wir Diskussionen über konstruktive Lösungen zur Erfüllung der Anforderungen, wobei die Entwicklung geeigneter Baustoffe oder Bauelemente einzuschließen ist. Schließlich sollten die wirtschaftlichen Auswirkungen bauphysikalischer Maßnahmen auf Baukosten und Betriebskosten behandelt werden.

Ein weites Feld neuer Entwicklungen steht hier zur Bearbeitung an, wenn man die Fehler der Vergangenheit beseitigen will, in der die niedrigsten Baukosten angestrebt wurden. Heute geht es vielmehr darum, einerseits Energie zu sparen und andererseits dem Wohlbefinden der Menschen zu dienen. Diese neuen Ziele können nur erreicht werden, wenn wir bereit sind, neue Wege beim Bauen in vielerlei Hinsicht zu gehen.

Final Remark

F. LEONHARDT
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e.h.
Stuttgart, Germany

Closing, the vice-chairman of the seminar, Professor Dr. H.J. Cowan, Australia, expressed his appreciation that IABSE has taken up the field of building physics. He pointed out that optimum solutions for all requirements of building physics would be difficult to achieve because, for instance, structural measures for good thermal insulation would be disadvantageous to sound insulation. Therefore, it should be considered carefully from time to time which of the requirements should be given preference.

The reports presented show that building physics is going to elaborate improved bases for the interaction of the different influences. As regards the measuring instruments developed for this purpose, electronic control and recording have become very helpful. The reports also show that it is possible to improve the theoretical assessments for complex effects in a way that good accordance with reality is achieved.

On occasion of this seminar, the participants of the Congress have had the opportunity to get informed about research work for such improved bases in other countries.

However, what IABSE needs in future in the field of building physics is this: On the one hand, discussions about reasonable quantitative requirements dependent on climatic conditions and on how the structures are utilized; on the other hand, discussions about constructive solutions to meet the requirements, inclusive of the development of appropriate building materials or building components. Finally, economic effects of measures taken in respect of building physics on building expenses and operation cost should be dealt with.

There is a wide field of new developments which requires further work in order to eliminate mistakes of the past when it was above all important to keep the building expenses down. Today emphasis should be put on the point of saving energy and of contributing to the comfort of man. These new aims can only be achieved if we are ready to apply new methods in the construction of structures in many respects.