Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 99 (1981)
Heft: 20: SIA, Heft 3

Artikel: Wärmetechnische Analysen im Hochbau
Autor: Lanz, Jürg / Schopfer, Adolf
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-74497

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: 13.07.2025

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

Wärmetechnische Analysen im Hochbau

Von Jürg Lanz und Adolf Schopfer, Baden

Ein *Gebäude bildet ein thermisch komplexes Regelsystem* von Baustruktur, haustechnischen Installationen, Klimabelastungen und Nutzungsanforderungen (Bild 1). Für eine Vorhersage des thermischen Verhaltens dieses Regelsystems bleibt entweder das *Experiment*, die *Berechnung aufgrund von vereinfachenden Annahmen* oder von mehr oder weniger komplexen *mathematischen Modellen*.

Ziel einer *interdisziplinären Projektgruppe* bei Motor-Columbus ist es, im Rahmen des Projektes IGLOU (*i*ntegrierte *G*esamtenergie*l*ösung *o*ptimiert und *u*mweltgerecht) Grundlagen, Konzepte und Instrumente zu erarbeiten und zu erweitern, um dieses Regelsystem analytisch zu erfassen und wärmetechnische Planungs- und Sanierungsaufgaben nach dem neuesten Stand der Technik durchführen zu können. Der vorliegende Aufsatz befasst sich hauptsächlich mit dem Teilgebiet des baulichen Wärmeschutzes.

Für die eigentliche *Berechnung des Regelsystems* stehen *zwei Methoden* im Vordergrund:

- die stationären Methoden (k-Wert),
- die instationären Berechnungen.

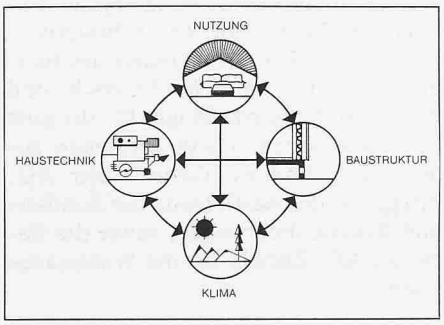

Bild 1. Thermisches Regelsystem eines Gebäudes

Gegenüber stationären Methoden ermöglichen die instationären Berechnungen, die Wärmespeicherfähigkeit eines Gebäudes, dessen Absorptionsverhalten, den zeitlichen Einfluss der Sonneneinstrahlung durch die Fenster, die zeitlichen Beschattungsverhältnisse, die Innentemperaturverläufe sowie die Trägheit des Heizsystems zu berücksichtigen.

Die *wärmetechnische Optimierung* eines Gebäudes umfasst zwei Dinge:

Erstens muss das ganze Regelsystem des Gebäudes in ein Gleichgewicht gebracht werden, das heisst, es müssen die Lage des Gebäudes, seine bauliche Auslegung, das Heizsystem und die Anforderungen des Benutzers optimal aufeinander abgestimmt werden. Die interdisziplinäre, ganzheitliche Betrachtungsweise ist wesentlich.

Zweitens umfasst die Optimierung das Anheben des gesamten Regelsystems auf ein *energetisch optimales Niveau*. In die Zielfunktion dieser Optimierungsaufgabe können je nach Gegebenheiten im Einzelfall verschiedene Kriterien mit unterschiedlichem Gewicht eingehen. Zum Beispiel:

- *Normen, Vorschriften:* Eine Vorschrift ist im weitesten Sinne schon das Resultat einer volkswirtschaftlichen Optimierung
- *Wirtschaftlichkeit:* Die Summe von Investitionskosten und Energiekosten soll über einen bestimmten Zeitraum minimal werden
- *Nutzungskriterien:* Es sollen bestimmte Behaglichkeitskriterien erreicht werden, welche insbesondere im Sommer für die Auslegung massgebend werden können.
- *Ideelle Kriterien:* Es wird zum Beispiel eine möglichst autarke Wärmeversorgung eines Gebäudes angestrebt.
- *Rein energetische Kriterien:* Zum Beispiel soll die Summe der in den Bau- und Werkstoffen investierten Primärenergie und der über einen bestimmten Zeitraum zu Heizzwecken verbrauchten Primärenergie minimal werden [1, 2].
- *Technische Kriterien:* z.B. soll die geforderte Behaglichkeit mit den verfügbaren technischen Anlagen erreicht werden.

Die wirtschaftliche Optimierung wird im allgemeinen im Vordergrund stehen. Eine wesentliche Grösse bei der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung ist der Energieverbrauch während der Heizperiode. Im Abschnitt über den Jahresenergiebedarf wird ein Modell erläutert werden, wie mittels instationärer Berechnungen der Jahresenergieverbrauch ermittelt werden kann. Anschliessend wird eine Methode für die wirtschaftliche Optimierung der Gebäudehülle angeführt.

Meteorologische Grundlagen für wärmetechnische Analysen

Die Durchführung von instationären Raumtemperatur- und Heizleistungsberechnungen verlangt *Tagesverläufe* für die meteorologischen Einflüsse wie Aussenlufttemperatur, Sonnenstrahlungsintensität usw. In der Schweiz liegen stündliche Messungen der Klimadaten für einige wenige Orte und erst seit kurzer Zeit vor. Eine Analyse ergibt, dass die Tagesmittelwerte und Tagesschwankungen der Lufttemperatur stärker von der Wetterlage als von der geographischen Lage des Orts abhängig sind. Aus eigenen Untersuchungen wurde ein Verfahren entwickelt, das bei gegebener Wetterlage, geographischer Lage und Meereshöhe eines Orts die Ermittlung eines typischen Lufttemperaturverlaufes für einen bestimmten Tag erlaubt. Bei der Berücksichtigung der Wetterlage wird für sommerliche Verhältnisse zwischen extrem warmen, warmen, normalen und kühlen Tagen, bei winterlichen Verhältnissen zwischen extrem kalten, kalten, normalen und milden Tagen unterschieden; bei der geographischen Lage zwischen Alpennord- und Alpensüdseite. Die beinahe lineare Abhängigkeit zwischen Meereshöhe und Tagesmittelwerten der Lufttemperatur erlaubt es, die Lufttemperaturverhältnisse eines bestimmten Standorts aufgrund dessen Höhe über Meer zu definieren. Diese Abhängigkeit der *Tagesmitteltemperaturen* von der Wetterlage und Meereshöhe, wie sie in Bild 2 dargestellt ist, liefert die Grund-

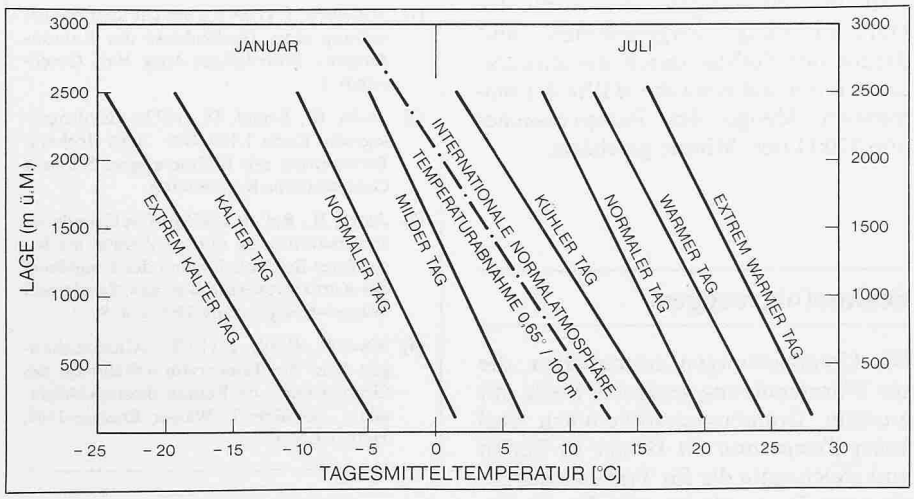

Bild 2. Temperaturabnahme im Vergleich zur Normalathmosphäre im Januar und Juli für verschiedene Wetterlagen (Alpennordseite)

lage für das Generieren von Tagestemperaturverläufen für beliebige Orte der Alpennordseite. Einen wesentlichen Einfluss für Tagesgänge der Aussenlufttemperatur stellen die Bewölkungsverhältnisse dar. Die *Tagesschwankung* der Lufttemperatur ist einerseits abhängig von den Bewölkungsverhältnissen, aber andererseits von der Tagesmitteltemperatur (Jahreszeit), wie aus der Darstellung in Bild 3 ersichtlich ist.

Dieses Verfahren erlaubt es, für Orte bis etwa 2000 m ü.M. Tagesgänge der Lufttemperatur mit genügender Genauigkeit zu generieren. Ein Normtagesverlauf der Temperatur für einen warmen Julitag geht aus Bild 4 hervor und ermöglicht den Vergleich mit statistisch ausgewerteten Lufttemperaturtagesgängen von vier Messstationen der Alpennordseite. Alle Tagesverläufe sind als Abweichung der jeweiligen Tagesmittelwerte dargestellt.

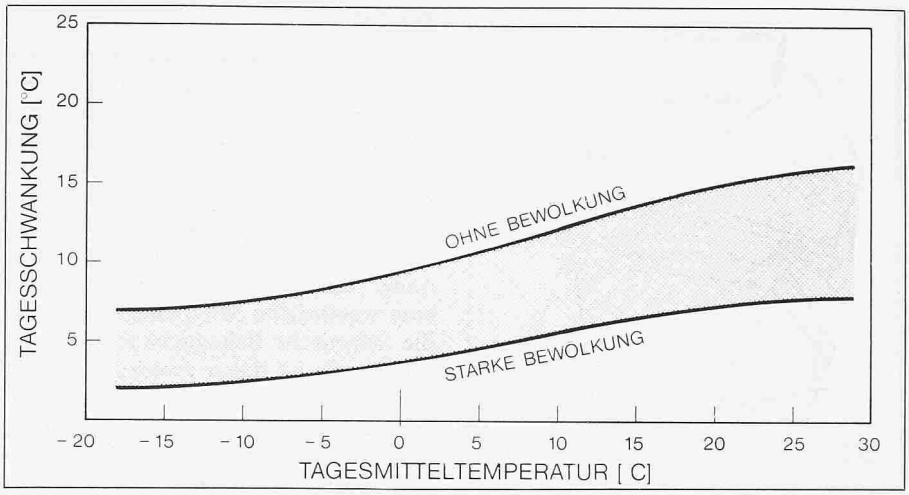

Bild 3. Abhängigkeit der Tagestemperaturschwankung von der Tagesmitteltemperatur (Jahreszeit)

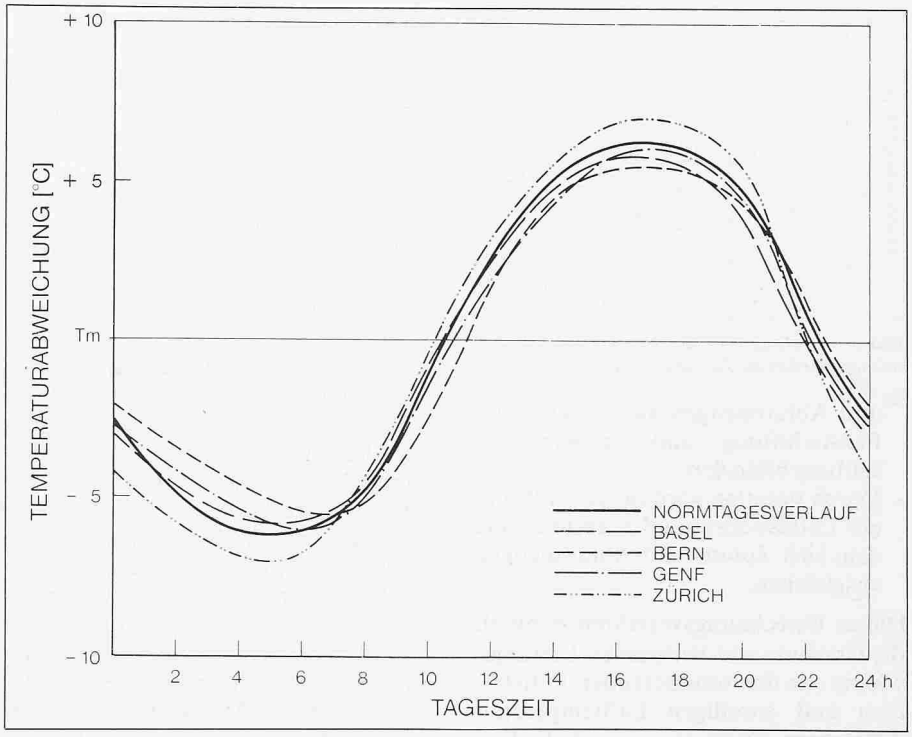

Bild 4. Tagestemperaturverläufe im Juli von Messstationen der Alpennordseite im Vergleich zum Normtagesverlauf

Rechenprogramm IGLOU-G

Programmbeschreibung

Das nachfolgend beschriebene EDV-Programm wurde durch die Projektgruppe IGLOU installiert und stellt ein wesentliches Instrument für wärmetechnische Analysen dar. Diesem Rechenprogramm liegt das Rechenverfahren nach *Heindl/Haferland/Fuchs* [3] zugrunde. Das Verfahren setzt *periodische* Vorgänge voraus, z.B. täglich im gleichen Zyklus wiederkehrende thermische Vorgänge. Die Berechnung basiert auf einer Fourier-Analyse von Tagesgängen der spezifizierten äusseren und inneren Einflussgrössen, der resultierenden Temperaturen oder Wärmestromdichten.

Das Programm dient zur *Berechnung von Raumluft- und Bauteiltemperaturen sowie Heiz- oder Kühlleistungen für ganze Gebäude oder einzelne Gebäudeteile.* Dabei gilt es, alle wesentlichen äusseren und inneren Einflüsse einschliesslich der thermischen Wechselwirkungen innerhalb eines Gebäudes zu berücksichtigen. Im einzelnen werden neben den aussenklimatischen Einflüssen wie Aussenlufttemperatur, Sonneneinstrahlungsintensitäten unter Berücksichtigung von Beschattungsverhältnissen, Umgebungstemperaturen und Windverhältnissen auch die wesentlichen Einflüsse im Gebäudeinnern in Rechnung gestellt. Dazu zählen neben den Heizleistungen eigentlicher Heizungen auch diejenigen von Personen, Beleuchtung und Maschinen. Der Wärmeaustausch zwischen verschiedenen Räumen eines Gebäudes infolge Wärmeleitung durch Wände und Decken sowie durch Luftaustausch wird ebenfalls berücksichtigt. Die Wirksamkeit von geplanten Sonnenschutzmassnahmen (Beschattung) und der Einfall der Sonnenstrahlung (Erwärmung von Innenbauteilen) bei Fenstern wird rechnerisch erfasst.

Mit diesem EDV-Programm durchgeführte Berechnungen liefern eine Beurteilungsbasis über das thermische Verhalten verschiedener Varianten von Baukonstruktionen in jedem Planungsstadium. Dies gilt für die Energieoptimierung bei der Beheizung oder Kühlung von Gebäuden sowie für die Schaffung von thermisch behaglichem Innenklima während des ganzen Jahres mit einem Minimum an energieerforderlichen, künstlichen Massnahmen.

Lüftung

Während die mechanische Lüftung durch Luftwechselzahlen definiert wird, sind die natürlichen Lüftungsverhältnisse in Abhängigkeit der Luftdurchlässigkeit von Fenstern, Türen usw. und auftretenden Winddrücken schwierig zu berücksichtigen. Die folgenden Punkte beschreiben die im Rechenprogramm IGLOU-G realisierte Methode für die analytische Erfassung der Lüftungsverhältnisse:

- Aus vorgegebener Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Gebäudeform werden die äusseren Winddruckverhältnisse an den Fassaden ermittelt;
- Bei Fenstern, Türen usw. sind Fugendurchlasswerte und Fugenlängen oder Öffnungsflächen mit Öffnungszeiten zu spezifizieren. So können Lüftungsgewohnheiten von Personen im Gebäude simuliert werden;
- Für jeden Raum werden die Zuluft-

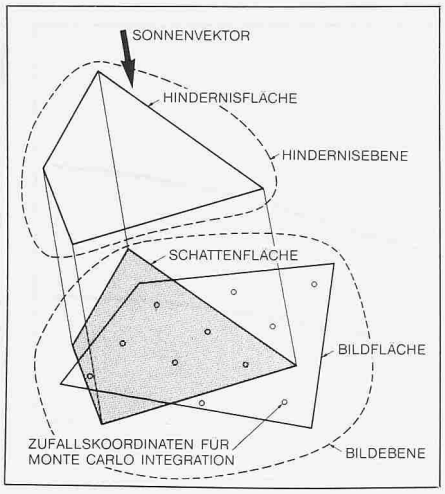

Bild 5. Definition für analytische Ermittlung der Beschattung

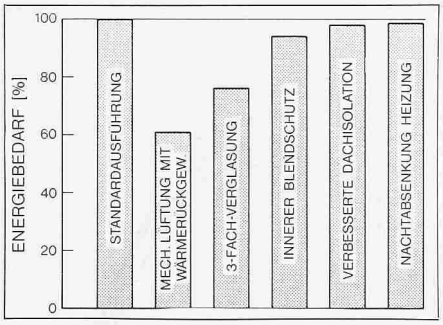

Bild 6. Einflüsse einzelner Massnahmen auf Jahresenergiebedarf für Heizung (Verwaltungsgebäude)

und Abluftmengen aus Fugen- oder Fensterlüftung und mechanischer Lüftung bilanziert;

- Durch Iteration wird für jeden Raum ein Luftdruckzustand berechnet, bei dem sich Zuluft- und Abluftmengen ausgleichen.

Dieses Berechnungsverfahren ermittelt die Gewinne und Verluste an Lüftungswärme aus den resultierenden Luftströmen und jeweiligen Lufttemperaturdifferenzen. Daraus lassen sich die Einflüsse von Lüftungsverhältnissen beurteilen.

Beschattung

Während die meisten Parameter, die den Verlauf der Strahlungslufttemperatur beeinflussen, nicht durch bauliche Massnahmen veränderbar sind, ist der Einfluss der Sonnenstrahlung bei Aussenwänden und insbesondere bei Fenstern von der Beschattung abhängig und wird damit Bestandteil der Planung. Mit der Beschattung ist somit eine wesentliche Möglichkeit gegeben, die thermische Behaglichkeit zu beeinflussen. Es ist daher zweckmässig, für Aussenbauteile und insbesondere Fenster, einen Tagesverlauf so zu ermitteln, dass die beschatteten Anteile in Flächenprozenten für jede Stunde vorliegen. Die im folgenden beschriebene Methode (Bild 5) soll aufzeigen, wie Beschattungsgänge ermittelt werden:

- Grundlage für die Berechnung der beschatteten Fläche liefern die analytische Geometrie des Raumes sowie die Monte-Carlo-Integration;
- Der Lösungsalgorithmus basiert auf der Voraussetzung, dass zwei Flächen (Hindernisfläche, Bildfläche) sowie der Sonnenvektor in einem kartesischen Koordinationssystem definiert sind;
- Für den Sonnenstand jeder Stunde durchläuft die Hindernis- und Bildfläche den Lösungsalgorithmus, der als Resultat die prozentuale Beschattung der Bildfläche liefert;
- Durch Projektion der Hindernisfläche auf die Bildebene entsteht die Schattenfläche. Mit einem Zufallszahlengenerator für die zweidimensionale Monte-Carlo-Integration werden die Koordinaten eines beliebigen Punktes innerhalb der Bildfläche generiert. Mittels Kontrolle des Vorzeichens eines ausgewählten Vektorprodukts wird geprüft, ob dieser Punkt auch innerhalb der Schattenfläche liegt. Die positive oder negative Antwort für einen Punkt stellt das Resultat eines Integrationsschrittes dar. Es zeigt sich, dass bereits mit zehn Integrationsschritten eine Genauigkeit der prozentualen Beschattung von 10 Prozent erreicht wird

Berechnung des Jahresenergiebedarfes

Allgemeines

Die nachfolgenden Ausführungen sollen ein Vorgehen für die *Ermittlung und Optimierung des Jahresenergiebedarfes aufgrund instationärer Berechnungen* aufzeigen und am Beispiel eines Verwaltungsgebäudes verdeutlichen.

Wärmetechnische Massnahmen

Instationäre Analysen von repräsentativen Tagen zeigen Proportionalität zwischen Tagesmittel der Heizleistung bzw. Kühlleistung und entsprechendem Jahresenergiebedarf. Deshalb ist es möglich, die Wirksamkeit einzelner Verbesserungsmassnahmen bei der Planung von Bauwerken an einzelnen repräsentativen Tagen zu bestimmen. In Bild 6 sind auf diese Weise für verschiedene Massnahmen die zugehörigen prozentualen Reduktionen des Energiebedarfes für ein Verwaltungsgebäude aufgezeigt. Die einzelnen Massnahmen sind mit sehr unterschiedlichen Energieeinsparungen verbunden, wobei die notwendigen Investitionen noch zu berücksichtigen wären. Hervorzuheben ist, dass bei gleichzeitiger Vornahme mehrerer Massnahmen nicht die Summe der einzelnen Energiebedarfsreduktionen zu erreichen ist.

Heiz- und Kühlanlagen

Für die Bemessung der Heizanlagen (Kühlanlagen) ist die Kenntnis der massgebenden maximalen Heizleistung (Kühlleistung) notwendig. Für beliebige Tagesmitteltemperaturen sind in Bild 7 die zugehörigen maximalen Heiz- und Kühlleistungen dargestellt, die notwendig sind, um ein behagliches Innenklima zu gewährleisten. Das Diagramm erlaubt durch Festlegung von Auslegungskriterien die Ermittlung der erforderlichen Leistungen ohne Berücksichtigung heiztechnischer Wirkungsgrade oder kühltechnischer Leistungszahlen.

Für die Planung und Optimierung der Heizanlagen ist ferner aus dem beschriebenen Diagramm ersichtlich, bis zu welchen Aussentemperaturverhältnissen eine bestimmte Anlageleistung (Wärmepumpe) ausreicht, um für die übrigen extremen Verhältnisse eine

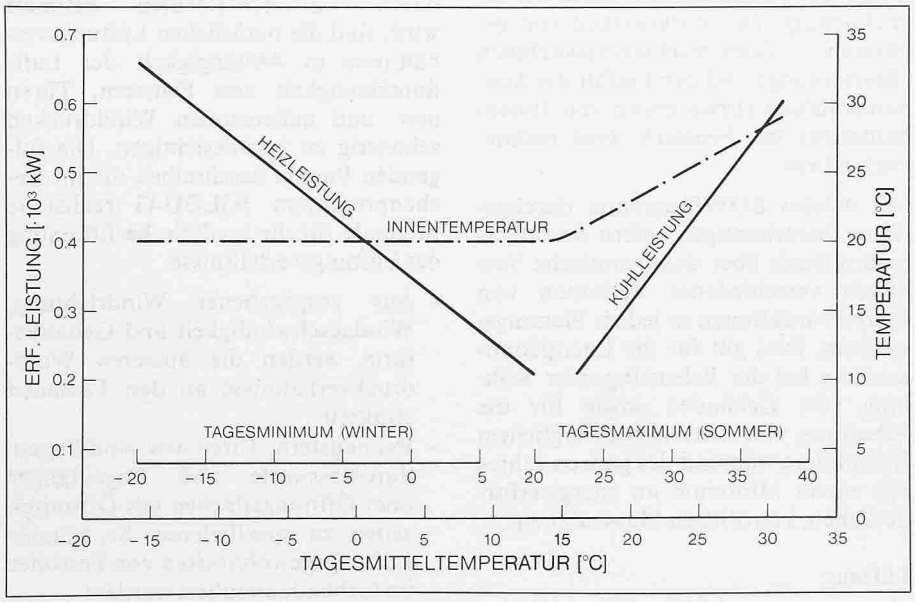

Bild 7. Erforderliche Heiz- und Kühlleistungen (Verwaltungsgebäude)

zweckmässige Zusatzanlage (Ölheizung) vorzusehen.

Ermittlung des Jahresenergiebedarfes

Für die Ermittlung des Jahresenergiebedarfes gilt es, die klimatischen Verhältnisse für ein Gebäude durch ein *Minimum von Kenngrössen* zu beschreiben. Aus statistischen Auswertungen von meteorologischen Messungen stehen für verschiedene Standorte *Summenhäufigkeitskurven der Tagesmitteltemperaturen* zur Verfügung. Durch Definition einer bestimmten Raumtemperatur und unter Berücksichtigung der Temperaturdifferenz (4–9 °C) infolge Innenwärmen durch Personen, Beleuchtung usw. lässt sich die Anzahl Heiz- und Kühlgradtage bestimmen, wie sie in Bild 8 für den Standort des Verwaltungsgebäudes dargestellt sind. Diese beiden Kenngrössen dienen unter der Voraussetzung, dass Analysen für ausgewählte Tage vorliegen, zur Ermittlung des Jahresenergiebedarfes.

Erschwerend für die Extrapolation des Energiebedarfes von einzelnen Tagen auf das ganze Jahr mittels der Summenhäufigkeitskurve wirkt sich der Umstand aus, dass die Anteile von Energiegewinnen (Sonne usw.) und -verlusten (Transmission usw.) an der Gesamtbilanz vom absoluten Betrag der Tagesmitteltemperatur abhängig sind.

Das *Superpositionsprinzip,* wie es bei stationären Berechnungen angenommen wird und welches erlaubt, alle Anteile unabhängig voneinander zu extrapolieren, ist nur beschränkt gültig (z.B. Überheizungsproblem). Durch Einführen von Korrekturfaktoren kann jedoch für viele Fälle eine genügende Genauigkeit erreicht werden [4, 5]. Für komplexe Gebäude ist es oft wichtig, bei wärmetechnischen Untersuchungen alle wesentlichen äusseren und inneren Einflüsse für repräsentative Tage instationär zu analysieren. Als Ergebnisse liefern diese Berechnungen *Energiebilanzen ausgewählter Tage* und die *Abhängigkeit der Bilanzanteile vom Tagesmittelwert der Aussenlufttemperatur.* Jede Tagesmitteltemperatur entspricht einer bestimmten Stelle der Summenhäufigkeitskurve und erlaubt die Bestimmung der Anzahl zugehörigen Heizgradtage. Aus der bekannten Summe Heizgradtage eines Standortes lassen sich fiktive Heizperioden ausgewählter Tage mit zugehörigem Tagesmittelwert der Aussenluft ermitteln. Aus einer minimalen Anzahl Analysen einzelner Tage kann ein *Energiebilanzdiagramm* (Bild 9) erstellt werden. Dieses Diagramm zeigt die einzelnen Anteile der Energieverluste (Transmission, Lüftung) sowie Energiegewinne (Sonne, Personen, Beleuchtung) und insbesondere den Anteil Heizenergie in Abhängigkeit der fiktiven Heizperiode bzw. der zugehörigen Tagesmitteltemperatur der Aussenluft. Aus der Summenhäufigkeitskurve (Bild 8) lassen sich durch Annäherung mittels Treppenlinie Summen einzelner Tage mit bestimmten Tagesmittelwerten der Aussenlufttemperaturen während der Heizperiode herauslesen. Aus den prozentualen Energieanteilen der einzelnen Tage entsprechend den Tagesmitteltemperaturen (fiktive Heizperioden) erhält man durch Aufsummieren die Energiebilanz der Heizperiode und damit den Heizenergiebedarf. Dasselbe Vorgehen erlaubt das Erstellen des Energiebilanzdiagrammes des Verwaltungsgebäudes für sommerliche Verhältnisse aus der Summe Kühlgradtage des Standortes (Bild 10).

Durch detaillierte Auswertung der Energiebilanzdiagramme lassen sich übersichtliche *Energieflussdiagramme* für sommerliche und winterliche Verhältnisse darstellen (Bild 11). Diese

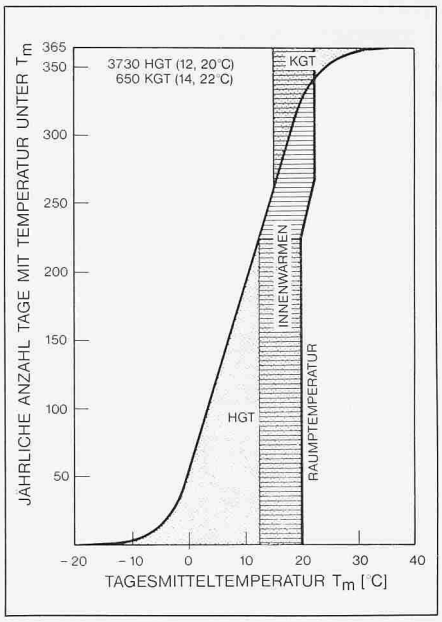

Bild 8. Heiz- und Kühlgradtage (Verwaltungsgebäude)

Diagramme erlauben, die wärmetechnischen Eigenschaften sowie den Jahresenergiebedarf eines Gebäudes zu beurteilen.

Wirtschaftliche Optimierung der Bauhülle

Stufenweise Optimierung

Bei der wärmetechnischen Optimierung ergeben sich *drei Stufen:*

Die erste Stufe umfasst die *thermisch optimale Gliederung* und *Orientierung der Gebäude am gegebenen Standort.*

Die zweite Stufe umfasst die *Optimierung der Fassadengestaltung.*

Die dritte Stufe umfasst die *Optimierung der einzelnen Bauteile.* Für die einzelnen Bauteile (Wände, Dach, Fenster usw.) wird die thermisch optimale Aus-

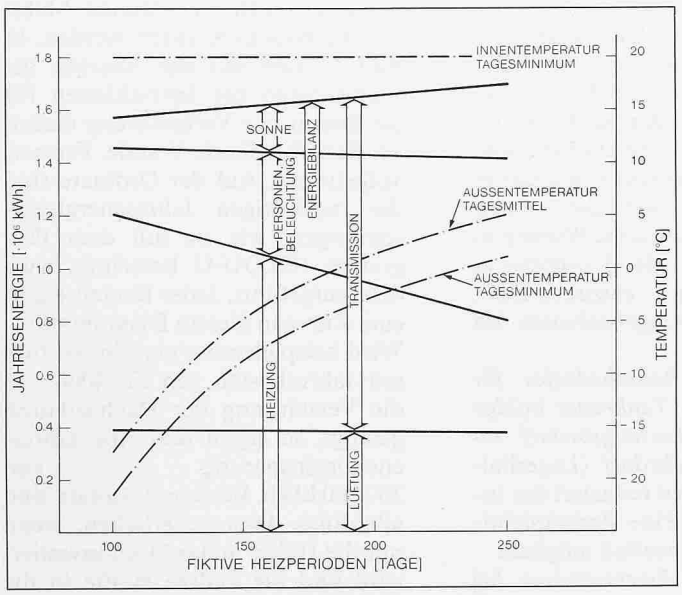

Bild 9. Energiebilanz-Heizperiode (3730 HGT, Verwaltungsgebäude)

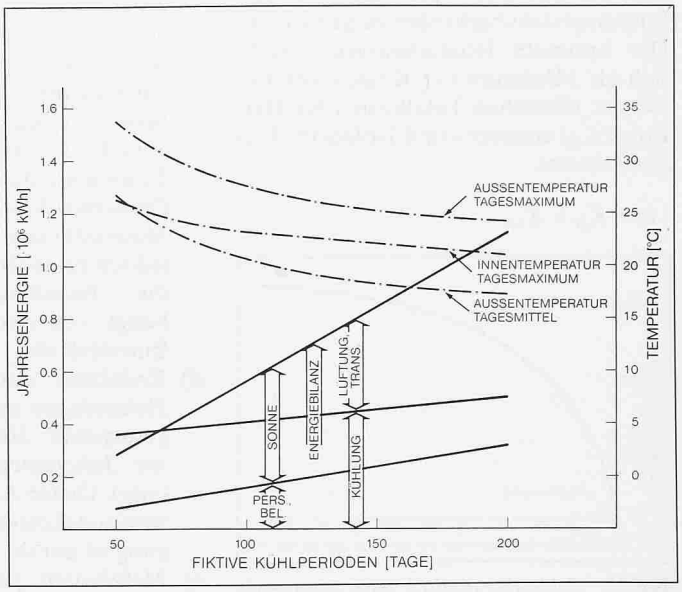

Bild 10. Energiebilanz-Kühlperiode (650 KGT, Verwaltungsgebäude)

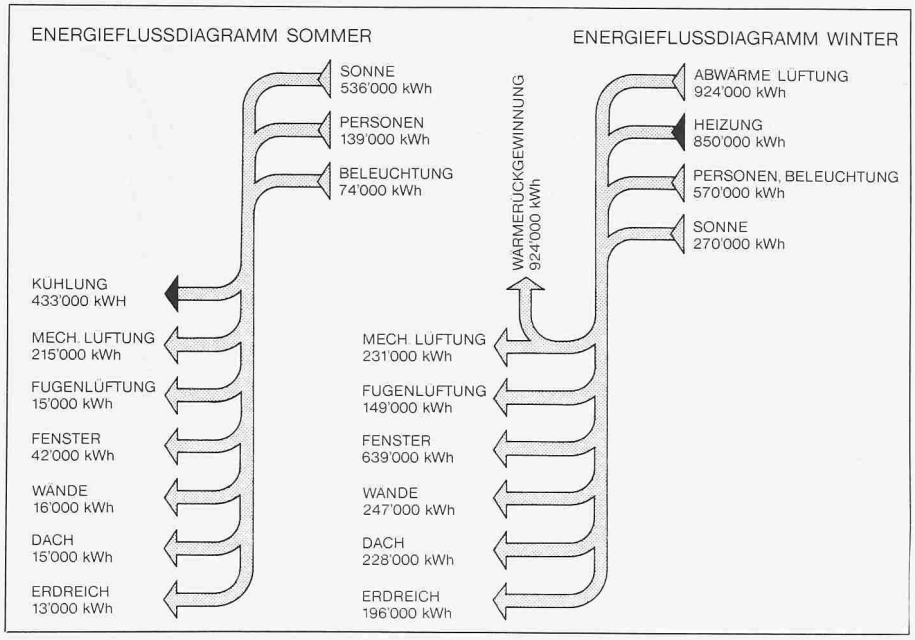

Bild 11. Energieflussdiagramme (Verwaltungsgebäude)

legung ermittelt. Auch hier gilt, dass die Summe der einzeln optimierten Bauteile nicht notwendigerweise die optimale Gesamtlösung für die Gebäudehülle ergibt. Wesentlich ist deshalb die *Ermittlung eines optimalen Verteilschlüssels der Gesamtinvestitionen* auf die einzelnen Bauteile. Das Vorgehen wird nachstehend skizziert.

Der einzelne Bauteil

Soll bei fixiertem Wandaufbau die optimale Stärke der Isolationsschicht ermittelt werden, so ist die Bauteilcharakteristik dazu ein taugliches Instrument. Diese Bauteilcharakteristik stellt das Verhältnis der Jahreskosten der Investitionen für die Isolation zu den Jahreseinsparungen an Energie dar. In Bild 12 ist die Bauteilcharakteristik für das Dach eines Mehrzweckgebäudes dargestellt. Soll nun die wirtschaftlich optimale Investition bestimmt werden, so sind die Energieeinsparungen mit den Energiegestehungskosten zu gewichten. Die optimale Isolationsstärke ergibt sich als Minimum der Kostenfunktion (K) der jährlichen Totalkosten für Heizung (K_H) einerseits und Isolation (K_{IS}) andererseits:

$$K = K_H + K_{IS}$$

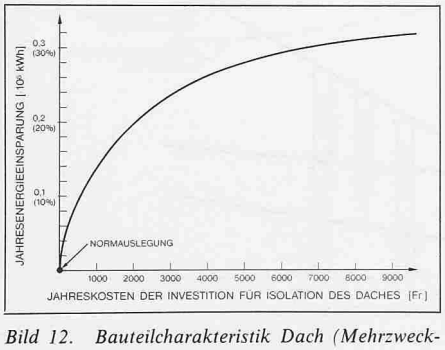

Bild 12. Bauteilcharakteristik Dach (Mehrzweckgebäude)

Zwei Parameter verdienen etwas näher betrachtet zu werden:

- Die Festlegung des *mittleren Energiepreises während der Amortisationszeit* ist mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Eine Grenzwertbetrachtung kann hilfreich sein.
- Die *Investitionskosten für die Isolation* setzen sich unter anderem aus folgenden Anteilen zusammen:

a) *Reine Materialkosten:* Bei einem Preis je nach Materialwahl und -stärke ergeben sich beispielsweise etwa Fr. 2.30 je m² und cm Isolation.

b) *Montagekosten:* Da die Montagekosten zu einem gewissen Grad unabhängig von der Isolationsstärke sind, können sie den Grundkosten der Tragmauer zugewiesen werden. Mehrschichtige Konstruktionen bedingen besondere Behandlung.

c) *Landpreis für die erforderliche Isolierungsgrundfläche:* Bei einem Landpreis von beispielsweise Fr. 500.–/m² und einer Ausnutzungsziffer von 1,0 ergeben sich, bei voller Ausnutzung und 3,0 m Stockwerkhöhe, Landkosten der Isolation von etwa Fr. 1.70 je m² und cm Isolation. Es können also Kosten von gleicher Grössenordnung wie die reinen Materialkosten auftreten. Wieweit es jedoch sinnvoll ist, den Landpreis in die Berechnung einzubeziehen, hängt von den Gegebenheiten im Einzelfall ab.

d) *Reduktion des Raumbedarfes für Heizanlagen und Tankraum infolge geringerem Heizleistungsbedarf sowie Jahresenergiebedarf* (Lagerhaltung): Dieser Anteil reduziert die Investitionskosten. Eine Berücksichtigung ist nur im Einzelfall möglich.

e) *Mehrkosten für Erschwernisse bei den Anschlusskonstruktionen, wie Brüstungen usw., bei grösserer Isolationsstärke:* Berücksichtigungen sind nur im Einzelfall möglich.

Aus der Liste der Anteile zu den Investitionskosten ist ersichtlich, dass erstens die Optimierungsfunktion für jeden Fall separat erarbeitet werden muss. Oft wird dies nur über konkrete Offerten möglich sein. Zweitens kann es nur darum gehen, den optimalen Bereich der Isolierstärke zu ermitteln. Grosse Genauigkeit ist nicht sinnvoll. Bei Berücksichtigung von nur den Materialkosten erweisen sich Dämmschichtstärken zwischen 8 und 14 cm als akzeptabel.

Die gesamte Gebäudehülle

a) *Gleichartige Bauteile:* Die optimale Verteilung der Investition auf gleiche Bauteile ist anhand eines einfachen Gedankenmodells sofort ersichtlich: Wenn wir uns eine Gebäudehülle nur aus Wärmedämmaterial bestehend vorstellen, so stellen sich, für einen bestimmten Materialaufwand, die minimalen Transmissionsverluste dann ein, wenn alle Teilflächen der Hülle die gleiche Schichtstärke aufweisen. Nimmt man nämlich an der Stelle A Dämmmaterial weg und fügt es an der Stelle B wieder hinzu, so nimmt der Gesamtenergieverbrauch zu, da die Transmissionsverluste in A stärker zunehmen als sie in B abnehmen. Dies ist eine direkte Folge der nichtlinearen Abhängigkeit der Transmissionsverluste von der Schichtstärke.
Für die energetisch optimale Lösung ist also anzustreben, alle gleichen Bauteile der Gebäudehülle gleich stark zu isolieren.

b) *Optimale Verteilung einer Investition auf die verschiedenen Bauteile der Gebäudehülle:* Das Prinzip dieser Verteilung soll wiederum anhand des schon früher erwähnten Mehrzweckgebäudes erläutert werden. In Bild 13 sind auf der Abszisse die Jahreskosten der Investitionen für die thermische Verbesserung einzelner Bauteile (Dach, Wände, Fenster) aufgetragen. Auf der Ordinate sind die zugehörigen Jahresenergieeinsparungen, wie sie mit dem Programm IGLOU-G berechnet wurden, aufgeführt. Jeder Bauteil ergibt eine Kurve in diesem Diagramm:
Wird beispielsweise eine Investition mit Jahreskosten von Fr. 4000.– in die Verstärkung der Dachisolation getätigt, so ergibt dies eine Jahresenergieeinsparung von 260 000 kWh. Bessere Resultate sind allerdings dann zu erhalten, wenn nur die Hälfte in das Dach investiert wird und die andere Hälfte in die Wand (300 000 kWh). Es ist klar,

dass im allgemeinen auch mit der hälftigen Verteilung der Kosten auf Wand und Dach das Optimum noch nicht gefunden ist, sondern dass vielmehr ein optimaler Investitionsverteilschlüssel für alle untersuchten Bauteile (hier: Dach, Wand und Fenster) mit grösstmöglicher Energieeinsparung existiert. Dieser optimale Verteilschlüssel der Investitionen kann graphisch oder analytisch bestimmt werden und führt gleichzeitig zur Kurve der grösstmöglichen Energieeinsparung für das ganze Gebäude in Abhängigkeit der jeweiligen Investition. Diese Kurve wird «Gebäudecharakteristik» genannt. Sie ist am Beispiel des Mehrzweckgebäudes in Bild 14 dargestellt. Die Gebäudecharakteristik ist die optimierte Kosteneinsparungsfunktion für das gesamte Gebäude.

Abhängig vom Energiegestehungspreis können verschiedene Preisgeraden im Diagramm (Bild 14) eingetragen werden. (Im Beispiel Heizölpreis: 0.35 Fr., 0.60 Fr., 1.00 Fr. je kg Öl).

Im Bereich unterhalb der Preisgeraden liegen die Punkte, bei denen die Einsparungsgewinne kleiner sind als die erforderlichen Investitionen. Punkte oberhalb der Preisgeraden liegen in der Gewinnzone. Durch Parallelverschieben der Preisgeraden in tangentiale Lage an die Gebäudecharakteristik erhält man im Berührungspunkt diejenige Investition, die für den entsprechenden Energiegestehungspreis den grösstmöglichen Gewinn für das ganze Gebäude ergibt. Die dazu erforderlichen baulichen Massnahmen sind durch die Gebäudecharakteristik bestimmt [6].

Das Beispiel soll die Methode aufzeigen und lässt keine allgemein gültigen Schlussfolgerungen zu. Die Ergebnisse hängen stark vom Einzelfall ab.

Das beschriebene Vorgehen erlaubt auch eine Gegenüberstellung von verschiedenen Energieträgern.

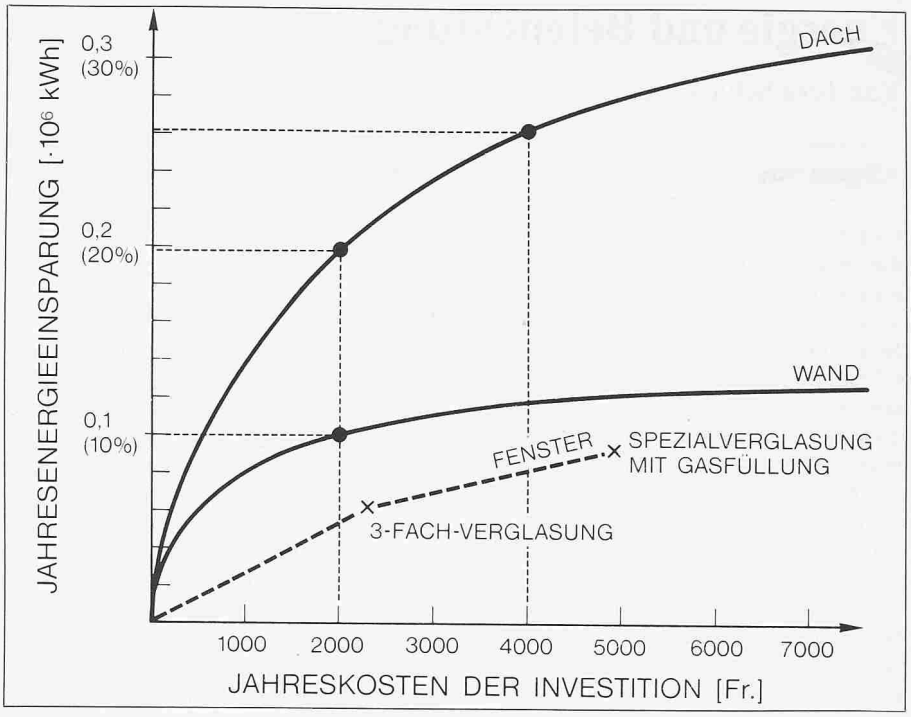

Bild 13. Bauteilcharakteristiken (Mehrzweckgebäude)

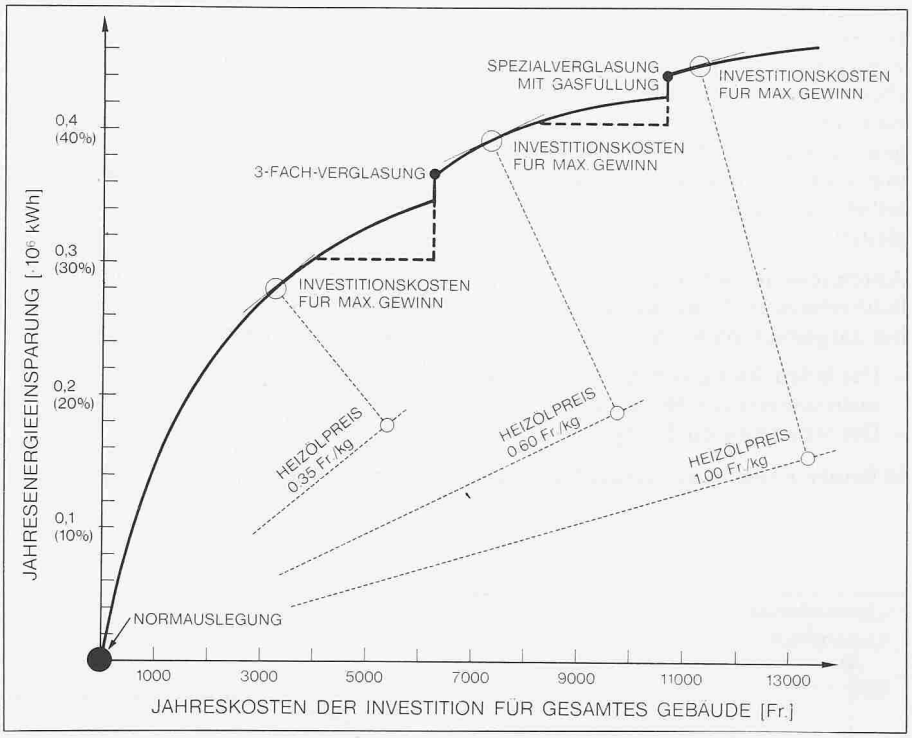

Bild 14. Gebäudecharakteristik (Mehrzweckgebäude)

Adresse der Verfasser: *J. Lanz*, dipl. Bau -Ing. ETH und *A. Schopfer*, Bau -Ing. HTL, Motor-Columbus Ingenieurunternehmung AG, 5401 Baden

Literaturhinweise

[1] *Kohler N. & Roulet C.*: "Energy Budgets for Buildings". IEA Conference on new energy conservation technologies and their commercialisation, Berlin 6–10, April 1981.

[2] *Werner H.*: «Methoden zur wirtschaftlichen Optimierung von Wärmedämm-Massnahmen». Bauphysik 5 (1980), 167–169.

[3] *Haferland F., Heindl W. & Fuchs H.*: «Ein Verfahren zur Ermittlung des wärmetechnischen Verhaltens ganzer Gebäude unter periodischer Belastung». Berichte aus der Bauforschung, Heft 99, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, München 1975.

[4] *Hauser G.*: «Der *k*-Wert im Kreuzfeuer – ist der Wärmedurchgangskoeffizient ein Mass für Transmissionsverluste?». Bauphysik 1 (1981) 3–8.

[5] «Wärmetechnische Gebäudesanierung», Handbuch Planung und Projektierung. Impulsprogramm des Bundesamtes für Konjunkturfragen, Bern 1980.

[6] *Lanz J. & Schopfer A.*: "Energetically-optimized retrofitting of existing building envelopes". IEA Conference on new energy conservation technologies and their commercialisation. Berlin 6–10, April 1981.

[7] *Gertis K. & Hauser G.*: «Instationärer Wärmeschutz». Berichte aus der Bauforschung H. 103, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1975