

**F O R S C H U N G S H E I M**  
**MITTEILUNGEN**  
**F Ü R W Ä R M E S C H U T Z**  
**E . V . M Ü N C H E N**

Reihe I. Allgemeine Fragen des Wärme- und Kälteschutzes

Nummer 3

Der Einfluß der Feuchtigkeit auf die  
Wärmeleitfähigkeit von Bau- und  
Isolierstoffen nach dem gegenwärtigen  
Stand der Forschung

von

Dipl.-Phys. W. F. CAMMERER



## DER EINFLUSS DER FEUCHTIGKEIT AUF DIE WÄRMELEITFÄHIGKEIT VON BAU- UND ISOLIERSTOFFEN NACH DEM GEGENWÄRTIGEN STAND DER FORSCHUNG\*)

*Die physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Wärmeübertragung in feuchten Stoffen werden dargestellt. Von besonderer Bedeutung ist dabei der Wärmetransport durch die Wasserdampfdiffusion in den Poren. Dieser läßt sich meßtechnisch nur erfassen, wenn eine Verlagerung der Feuchtigkeit während der Messung unterbunden wird. Schließlich wird gezeigt, wie sich der Feuchtigkeitsgehalt auf die Wärmeleitfähigkeit einiger organischer und anorganischer Bau- und Isolierstoffe auswirkt.*

### **The influence of humidity on the heat conductivity of building and insulation materials according to the present state of scientific research**

*The physical laws on heat conduction in humid materials are discussed. The heat transport by water vapour diffusion within the voids of the materials is of particular importance. This transport may only be measured if the wet zone, in which condensation takes place, does not change its place during the measurement. The influence of humidity on the heat conductivity of some organic and inorganic building and insulation materials is given.*

### **L'influence de l'humidité sur la conductibilité thermique des matériaux de construction et d'isolation d'après la présente situation de la recherche**

*Les règles physiques de la transmission de chaleur dans des matériaux humides sont décrites. Le transport de chaleur par diffusion de vapeur d'eau dans les pores est d'importance particulière. Ce transport ne peut être mesuré que si le déplacement de l'humidité est empêché pendant le mesurage. L'influence de l'humidité sur la conductibilité thermique de quelques matériaux organiques et inorganiques de construction et d'isolation est démontrée.*

#### **Die Bedeutung des Feuchtigkeitseinflusses auf die Wärmeleitfähigkeit von Bau- und Isolierstoffen**

Der Einfluß des Feuchtigkeitsgehaltes auf die Wärmeleitfähigkeit von porösen Stoffen, die als Baumaterialien sowie als Wärme- und Kälteisolierstoffe Verwendung finden, ist für die Praxis außerordentlich wichtig. Sind die Poren oder Zellen ganz oder auch nur teilweise mit Wasser gefüllt, so wird die Wärmeleitfähigkeit dieser Stoffe erfahrungsgemäß erhöht und zwar im allgemeinen in größerem Maße, als dem volumemäßigen Anteil des Wassers entspricht. Die Folge ist eine Abnahme der Wärmeisolfähigkeit feuchter Bau- und Isolierstoffe gegenüber dem trockenen Zustand.

Im Wohnungsbau interessiert diese Verminderung des Wärmeschutzes aus volkswirtschaftlichen und gesundheitlichen Gründen. Durch viele Probenentnahmen aus Wohnungsaußenwänden, besonders in den letzten 30 Jahren, weiß man beispielsweise, daß der praktische Feuchtigkeitsgehalt von Vollziegelmauerwerk etwa 1 Vol.-% und von Wänden aus anorganischen, nicht gebrannten Baustoffen etwa 4 bis 5 Vol.-% beträgt [1]. Unter diesem praktischen Feuchtigkeitsgehalt einer Wohnungsaußenwand versteht man denjenigen Wassergehalt, der sich in ausgetrockneten Bauten nach genügend langer Zeit unter dem Einfluß der Witterung und der Wohnbedingungen bezüglich Raumtemperatur und Luftfeuchtigkeit im Mittel einstellt. Er wird einerseits durch die hygroscopische Feuchtigkeit hervorgerufen, nämlich durch die Ausfüllung von kleinsten Kapillarräumen des Baustoffs mit Wasser entsprechend der herrschenden relativen Luftfeuchtigkeit und Temperatur, und andererseits durch einen Feuchtigkeitsniederschlag innerhalb der Wand infolge eines Unterschreitens des Taupunktes bei Wasserdampfdiffusionsvorgängen. Eine Diffusion von Wasserdampf geht stets auf Grund eines Wasserdampfdruckgefälles vor sich und hängt außerdem von der Dicke und der Diffusionsdurchlässigkeit des Wandmaterials ab<sup>1)</sup>. Bei bewohnten Räumen ist im Winter immer ein merklicher

Dampfdruckunterschied zwischen Innen- und Außenluft vorhanden, so daß in diesen Monaten mit einer Feuchtigkeitsausscheidung in den Wänden gerechnet werden muß. Kapillar saugende Baustoffe können auch Wasser aufnehmen, das lediglich an der Oberfläche als Tauwasser ausfällt. Im Wechsel mit Austrocknungsperioden in der warmen Jahreszeit ergibt sich ein gewisser mittlerer Feuchtigkeitsgehalt.

Ferner sind auch Durchfeuchtungen durch Schlagregen und aufsteigendes Grundwasser möglich, die jedoch durch Wasser abweisende Putze und ausreichende Abdichtung des Fundamentes weitgehend vermieden werden können.

Von großer Wichtigkeit ist der Einfluß der Feuchtigkeit auf die Wärmeleitfähigkeit von Kälteschutzanlagen, z. B. von Isolierungen von Kühlhäusern, Gastrennungsanlagen, Transportbehältern von flüssigen Gasen, Soleleitungen und anderen. Eine Durchfeuchtung der Isolierung wird in diesen Fällen besonders durch die bereits erwähnte Feuchtigkeitsausscheidung bzw. Reifbildung bei Wasserdampfdiffusion hervorgerufen, wenn diese nicht durch geeignete Dampfsperrschichten verhindert oder verringert werden kann. Die Bedeutung dieser Vorgänge ist hier größer als im Wohnungsbau, da infolge der höheren Temperaturunterschiede ein wesentlich größeres Dampfdruckgefälle in der Isolierung herrscht. Der hygroscopische Feuchtigkeitsgehalt dagegen ist bei Kälteschutzstoffen im allgemeinen gering. Einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit von Kälteschutzstoffen und der dadurch bedingten größeren Kälteverluste muß aber in der Kälteschutztechnik besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden.

Auch an industriellen Wärmeschutzanlagen treten manchmal Durchfeuchtungen auf. Bei Freileitungen oder im Freien stehenden Behältern beispielsweise kann bei undichter äußerer Verkleidung Regenwasser eindringen. Das gleiche gilt für erdverlegte Rohrleitungen. Bekannt ist vor allem die Tauwasserbildung in Isolierungen von Freileitungen bei unterbrochenem Betrieb, deren Ursache noch nicht eindeutig geklärt wurde.

<sup>1)</sup> Die Wasserdampfdiffusionsdurchlässigkeit eines Stoffes wird nach Kricher durch den Diffusionswiderstandsfaktor  $\mu$  gekennzeichnet [5]. Diese dimensionslose Größe gibt an, um wieviel größer der Diffusionswiderstand des Stoffes gegenüber einer Luftschicht mit gleichen Abmessungen ist.

\*) Vortrag anlässlich der Mitgliederversammlung des Forschungsheims für Wärmeschutz e. V., München, am 24. 3. 1961 in München.

Sie liegt wahrscheinlich in einer Änderung des Luftdrucks innerhalb der Isolierung beim Anwärmen und Auskühlen der Leitung und in den damit verbundenen Luftströmungs- und Wasserdampfdiffusionsvorgängen bei einer verhältnismäßig dichten äußeren Sperrschicht in Form des üblichen Blechmantels. Auch in Kraftwerken und Anlagen der chemischen Industrie kann durch Undichtigkeiten von Leitungen oder Behältern manchmal eine Feuchtigkeitsanreicherung in Isolierungen hervorgerufen werden.

Auf Grund dieser in der Praxis an Wärme- und Kälteschutzanlagen möglichen Durchfeuchtungen ist es von besonders großem Interesse, den Einfluß des Feuchtigkeitsgehaltes auf die Wärmeleitfähigkeit von Bau- und Isolierstoffen zu kennen. Eine Ausnahme bilden nur solche Isolierstoffe, deren Poren vollkommen abgeschlossen sind und daher kein Wasser aufnehmen können.

### Die Entwicklung der Forschung über den Feuchtigkeits-einfluß auf die Wärmeleitfähigkeit von porösen Stoffen

Seit dem Beginn der wissenschaftlichen Erforschung des Wärmeschutzes im *Laboratorium für Technische Physik* der *Technischen Hochschule München* unter *O. Knoblauch* zu Anfang dieses Jahrhunderts wurde die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit von Bau- und Isolierstoffen durch einen Feuchtigkeitsgehalt beobachtet. Besonders *J. S. Cammerer*, einer der ersten wissenschaftlichen Mitarbeiter des aus der Technischen Hochschule München hervorgegangenen *Forschungsheims für Wärmeschutz e. V.*<sup>2)</sup> beschäftigte sich mehrere Jahrzehnte mit dem Feuchtigkeitsinfluß auf den praktischen Wärmeschutz von Wohnungsaußenwänden sowie von Kühlhausisolierungen und widmete diesen Fragen viele wissenschaftliche Veröffentlichungen [2, 3]. Auf Grund von Wandmessungen an seinem Tutzingener Forschungsbau und von anderen Forschungsergebnissen ermittelte er die ersten Richtwerte für die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit von organischen und anorganischen Baustoffen bzw. des daraus hergestellten Mauerwerks in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt [4]. Diese Richtwerte haben im wesentlichen auch heute noch Gültigkeit.

Den physikalischen Vorgang der Wärmeübertragung in feuchten porösen Stoffen haben *Krischer* und seine Mitarbeiter grundlegend geklärt [5, 6]. Von *Glaser* wurden Rechenverfahren zur Bestimmung der Durchfeuchtungszone und der ausgeschiedenen Wassermenge bei Wasserdampfdiffusionsvorgängen erarbeitet [7, 8], so daß heute die Feuchtigkeitsgefährdung von Wärme- und Kälteschutzanlagen bei Wasserdampfdiffusion abgeschätzt werden kann.

Der praktischen Bestimmung des Feuchtigkeitsinflusses auf die Wärmeleitfähigkeit verschiedener Stoffe haben sich u. a. *Meißner* und *Inmler* [9], *E. Schmidt* [10], *Raisch* [11, 12], *Wattinger* und *E. Kindem* [13] in Laboratoriumsversuchen gewidmet. *Rowley* und *Algren* haben besonders Messungen an Hölzern [14] sowie *Kreüger* und *Erikson* Untersuchungen von Ziegelmauerwerk durchgeführt [15].

Nach dem zweiten Weltkrieg hat vor allem *Jespersen* umfangreiche Messungen an feuchten Bau- und Isolierstoffen durchgeführt [16]. Neben diesen bekanntesten Forschern haben sich selbstverständlich noch weitere Wissenschaftler im In- und Auslande mit diesen Fragen beschäftigt. Es wird auf das umfangreiche Literaturverzeichnis in der Arbeit von *J. S. Cammerer* verwiesen [3].

### Die Wärmeübertragung in porösen Stoffen

Bevor auf die Gesetzmäßigkeiten der Wärmeübertragung durch das in den Hohlräumen eines porigen Körpers befindliche Wasser eingegangen wird, sollen die physikalischen Grundlagen des Wärmetransportes in einem trockenen porösen Stoff behandelt werden. Ein poröser Körper setzt sich aus einem Feststoffgerüst und den darin eingelagerten Hohlräumen zusammen. Die Verbindung der festen Teile untereinander kann von punktförmiger Berührung, z. B. bei Pulvern, bis zu einer innigen Ver kittung, beispielsweise bei Haufwerksbetonen, und einem durchgehenden Skelett, wie bei Ziegeln oder Schaum-

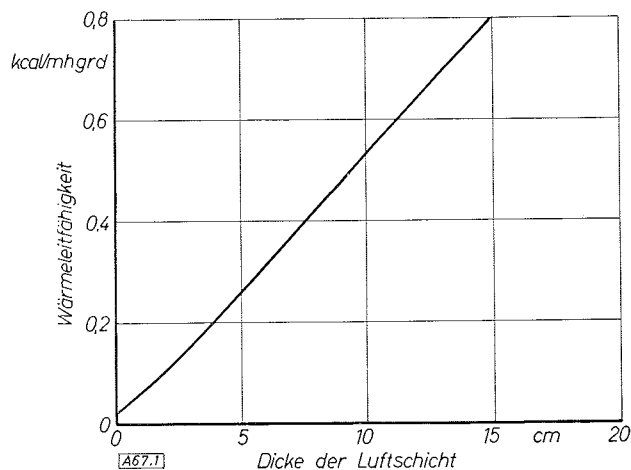
stoffen, reichen. Die Poren von solchen Stoffen, die Wasser aufnehmen können, sind im allgemeinen mit Luft gefüllt. Auf Isolierstoffe mit abgeschlossenen Poren, die andere Gase enthalten, braucht in diesem Zusammenhang nicht eingegangen zu werden.

Die Wärmeleitfähigkeit eines solchen porigen Körpers, die infolge des Anteils verschiedener Wärmeübertragungsarten als äquivalente oder gleichwertige Wärmeleitfähigkeit zu bezeichnen ist, wird zunächst maßgeblich von der Wärmeleitfähigkeit des Feststoffes beeinflusst. Tabelle 1 enthält Zahlenwerte von *J. S. Cammerer* für die Wärmeleitfähigkeit (Wärmeleitzahl) der wichtigsten Grundbestandteile von Bau- und Isolierstoffen [3].

**Tabelle 1.** Wärmeleitfähigkeit der festen Bestandteile von Baustoffen nach *J. S. Cammerer* [3]

Baustoff	Wärmeleitfähigkeit kcal/m h grd
anorganische Baustoffe, allgemein	ca 2,0 bis 3,5
anorganische Baustoffe von glasigem Charakter	ca 0,8
anorganische Baustoffe aus größeren Kristallen, z. B. aus Quarzsand	ca. 5 bis 6
organische Baustoffe	ca 0,25 bis 0,35

Im Gegensatz zu diesen Werten beträgt die gleichwertige Wärmeleitfähigkeit der Porenluft bei Porenabmessungen bis etwa 5 mm unter Berücksichtigung der Wärmeübertragung durch Strahlung und Konvektion im Temperaturbereich des Bauwesens je nach der Porengröße etwa 0,02 bis 0,04 kcal/mh grd. Je poröser ein Stoff, je kleiner also seine Rohdichte (Raumgewicht) ist, desto niedriger liegt im allgemeinen seine Wärmeleitfähigkeit. Bild 1 zufolge steigt jedoch die gleichwertige Wärmeleitfähigkeit von Luftschichten mit der Schichtdicke wegen der Konvektion und der Wärmestrahlung sehr stark an, so daß bei gleicher Rohdichte und gleichem Feststoff die Wärmeleitfähigkeit um so niedriger ist, je kleinere Abmessungen die Poren aufweisen.

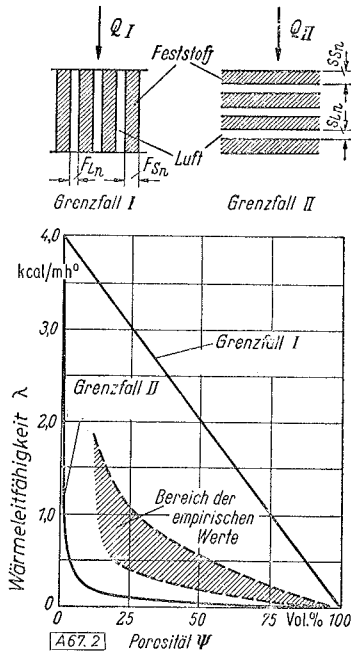


**Bild 1.** Gleichwertige Wärmeleitfähigkeit von senkrechten Luftschichten bei 10°C Mitteltemperatur, einer Strahlungszahl der Begrenzungsflächen von 4,6 kcal/m<sup>2</sup>h (°K)<sup>4</sup> und einer Temperaturdifferenz von 10 grd nach *E. Raisch* [25]

Die Wärmeleitfähigkeit poröser Stoffe kann nach *Krischer* [5] mit Hilfe von zwei Grenzkurven abgeschätzt werden (Bild 2). Beide Kurven stellen die Wärmeleitfähigkeit eines Modellkörpers, der schematisch durch planparallele Schichten von Feststoff und Luft gebildet ist, in Abhängigkeit von der Porosität dar. Dabei wurde eine Wärmeleitfähigkeit des Feststoffes von 4 kcal/m h grd zugrunde gelegt und die äquivalente Wärmeleitfähigkeit der Luftschichten ohne Berücksichtigung von Strahlung und Konvektion eingesetzt, was für Schichtdicken unter 0,1 mm zulässig ist. Die obere Kurve, eine Gerade, stellt

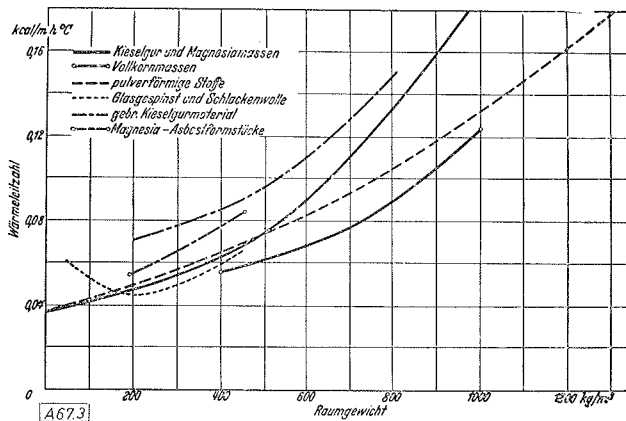
<sup>2)</sup> Gegründet 1918.

das Rechenergebnis für einen Körper dar, dessen Schichten parallel zum Wärmestrom gerichtet sind, während die untere Kurve für den Fall gilt, daß die Schichten senkrecht zur Wärmestromrichtung liegen. Zwischen diesen beiden Grenzkurven befindet sich der Bereich der empirischen Werte, die sich bei



**Bild 2.** Einordnung der Wärmeleitfähigkeit mineralischer poriger Stoffe zwischen berechenbaren Grenzwerten nach Krischer [5]

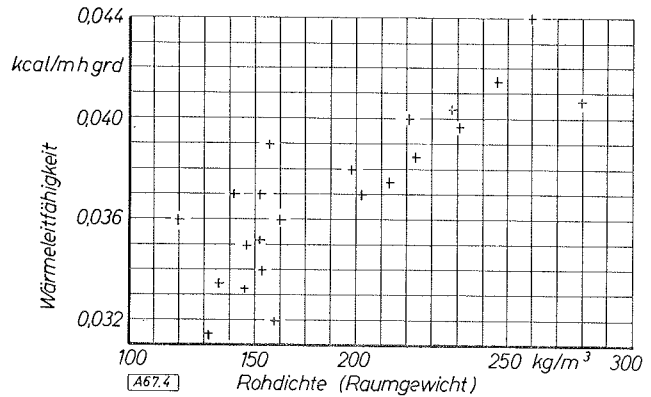
einem lockeren Gefüge des Körpers, z. B. bei Pulvern und faserförmigen Stoffen — Faserrichtung senkrecht zum Wärmestrom — der unteren Kurve nähern, während bei guter Ver kittung der festen Bestandteile oder Faserrichtung parallel zum Wärmestrom die Wärmeleitfähigkeit höher liegt in Richtung der oberen Grenzkurve.



**Bild 3.** Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit verschiedener Isolierstoffe vom Raumgewicht (Rohdichte) nach J. S. Cammerer [2]

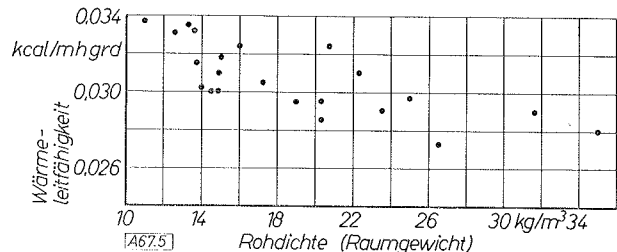
Bild 3 zeigt ein Diagramm von J. S. Cammerer über die Raumgewichtsabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von verschiedenen Isolierstoffen [2]. Theoretisch besitzt jeder poröse Körper bei gleichbleibendem Feststoffmaterial für eine bestimmte Rohdichte einen Mindestwert der Wärmeleitfähigkeit. Einerseits steigt nämlich bei starker Verdichtung infolge des abnehmenden Luftporengehaltes die Wärmeleitfähigkeit poröser Körper an, während andererseits mit geringer werdender Rohdichte bei Überschreiten einer bestimmten Porosität und Porengröße die Wärmeleitfähigkeit wegen der Zunahme

von Konvektion und Strahlung ebenfalls wieder größer wird. In den meisten Fällen kann jedoch diese günstigste Rohdichte aus mechanischen Gründen nicht verwirklicht werden. In Bild 3 ist punktiert eine Kurve für Mineralfaserstoffe eingezeichnet, die bei etwa 200 kg/m<sup>3</sup> die niedrigste Wärmeleitfähigkeit aufweisen. Selbstverständlich verschiebt sich ein solches Minimum mit zunehmender Mitteltemperatur der Isolierung in Richtung höherer Rohdichten, da die Wärmeübertragung durch Strahlung sehr stark zunimmt.



**Bild 4.** Laboratoriumsmeßwerte der Wärmeleitfähigkeit von Korkplatten bei 10°C Mitteltemperatur in Abhängigkeit von der Rohdichte (Raumgewicht)

Diese Gesetzmäßigkeit läßt sich auch an Korkplatten und Kunstschäumen veranschaulichen. So ist in Bild 4 zu erkennen, daß die Wärmeleitfähigkeit von pechgebundenen Korkplatten mit der Rohdichte zunimmt. Die günstigste Rohdichte würde bei einem sehr niedrigen Wert liegen, der sich



**Bild 5.** Laboratoriumsmeßwerte der Wärmeleitfähigkeit von Polystyrol-Schaumstoffplatten bei 10°C Mitteltemperatur in Abhängigkeit von der Rohdichte (Raumgewicht)

aus Festigkeitsgründen nicht verwirklichen läßt. Der umgekehrte Fall liegt bei Polystyrol-Schaumstoffplatten vor, bei denen die Wärmeleitfähigkeit mit der Rohdichte abnimmt (Bild 5). Die günstigste Rohdichte wird hier wegen ihres hohen Wertes aus wirtschaftlichen Gründen nicht hergestellt.

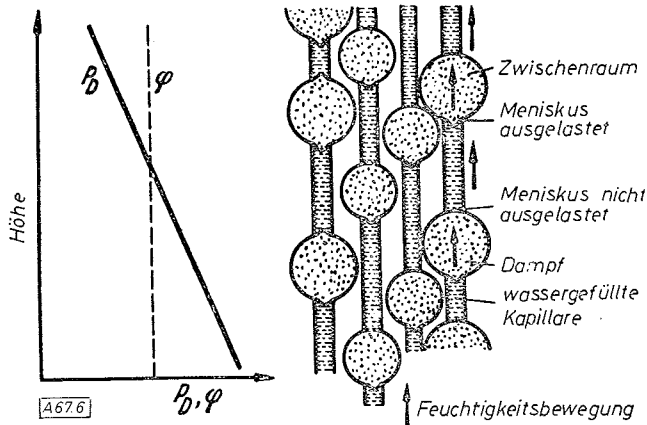
### Der Einfluß der Feuchtigkeit

Nach diesem Überblick über die Gesetzmäßigkeiten der Wärmeübertragung in trockenen Stoffen soll der Einfluß der Feuchtigkeit untersucht werden. Hinsichtlich des Wassergehaltes von porösen Stoffen kann man drei Arten unterscheiden:

- Der hygroscopische Feuchtigkeitsgehalt, der durch Kapillarkondensation entsteht, d. h. durch eine Füllung mikroskopisch und submikroskopisch kleiner Poren mit Wasser bei einem Dampfdruck, der kleiner als der Sättigungsdruck ist, als Folge der Dampfdruckerniedrigung über konkaven Wassermenisken. Der hygroscopische Feuchtigkeitsgehalt hängt daher von der Größe der Poren, dem Feuchtigkeitsgehalt und der Temperatur der Umgebungsluft ab. Bei organischen Stoffen ist die hygroscopische Feuchtigkeit als kolloidal gebundene Flüssigkeit in den Zellwandungen eingelagert [17].
- Benetzung der Wände größerer Poren und Tröpfchenbildung an den Berührungspunkten der festen Bestandteile, wobei in den Poren Sättigungsdruck herrscht.

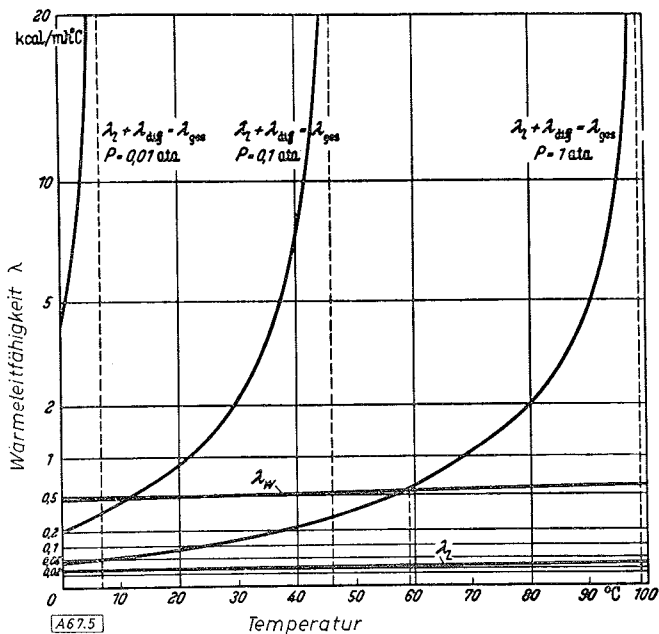
c) Ausfüllung der großen Poren bzw. Zellohräume bei organischen Stoffen.

Während sich beim trockenen Stoff die Wärmeübertragung aus der Wärmeleitung des Feststoffgerüsts und dem Wärmetransport in den Hohlräumen zusammensetzt, ist die Wärmeübertragung im feuchten Stoff wesentlich vielfältiger. Zunächst



**Bild 6.** Feuchtigkeitsbewegung durch Dampfdiffusion in feuchten porösen Stoffen bei Temperaturgefälle (Schema nach Krischer)

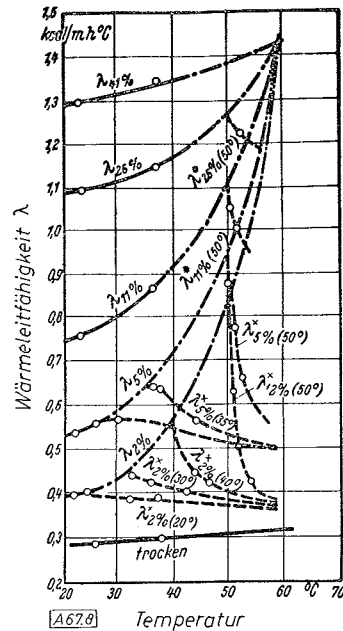
ist es naheliegend anzunehmen, daß die Zunahme der Wärmeleitfähigkeit durch einen Feuchtigkeitsgehalt infolge des Ersatzes der Porenluft durch das besser Wärme leitende Wasser hervorgerufen wird; denn die Wärmeleitfähigkeit von Wasser beträgt bei Raumtemperatur etwa 0,5 kcal/m h grd gegenüber 0,02 bis 0,04 kcal/m h grd der Porenluft. Diese Annahme trifft jedoch nur für mit Wasser gesättigte Stoffe zu. Berechnet man nämlich bei kleineren Feuchtigkeitsgehalten die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit entsprechend dem Volumenanteil des Wassers, so ergibt sich eine zu geringe Zunahme der Wärmeleitfähigkeit gegenüber entsprechenden Meßergebnissen.



**Bild 7.** Äquivalente Wärmeleitfähigkeit der Porenluft  $\lambda_{ges}$  durch Leitung  $\lambda_L$  und Dampfdiffusion  $\lambda_{diff}$  ( $\lambda_W$  = Wärmeleitfähigkeit von Wasser) nach Krischer [5]

Krischer und Rohmalter haben gezeigt, daß die Erhöhung der Wärmeübertragung in feuchten Stoffen gegenüber dem trockenen Zustand vor allem durch einen Wasserdampfdiffusionsvorgang in den mit Dampf-Luftgemisch gefüllten Poren verursacht wird [6]. Das Wasser verdunstet an der warmen Porenoberfläche und kondensiert an der kalten. Dabei wird

Kondensationswärme frei. Besitzt das Stoffgefüge mit Wasser gefüllte Kapillarräume, so wird das ausgeschiedene Wasser darin kapillar weiterbefördert, weil sich der wärmere Meniskus des Wasserfadens wegen des Feuchtigkeitsniederschlags abflacht und somit ein Druckgefälle längs der Kapillare entsteht. Ein Schema dieses Vorganges zeigt Bild 6. Aus der rechnerischen Behandlung der Wärmeübertragung durch freiwerdende Kondensationswärme läßt sich eine Wärmeleitfähigkeit der Porenluft durch Dampfdiffusion herleiten ( $\lambda_{diff}$ ), deren Verlauf in Abhängigkeit von der Temperatur und dem Luftdruck in Bild 7 nach Krischer dargestellt ist. Wie das Bild zeigt, nimmt  $\lambda_{diff}$  mit der Temperatur stark zu, so daß es bei etwa 60° die Wärmeleitfähigkeit des Wassers erreicht, um sodann noch weiter anzusteigen. Ferner ist aus den Kurven bei drei verschiedenen Luftdrücken zu ersehen, daß  $\lambda_{diff}$  mit abfallendem Druck stark zunimmt.

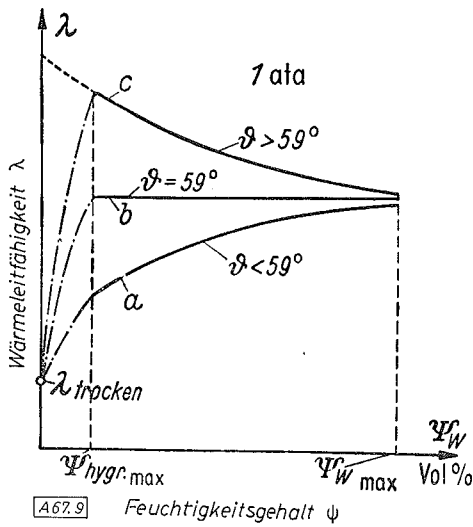


**Bild 8.** Wahre Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  von Ziegelstein (Rohdichte 1450 kg/m<sup>3</sup>) in Abhängigkeit von der Mitteltemperatur bei verschiedenen Feuchtigkeitsgehalten (in Vol.-%).  $\lambda^*$  = scheinbare Wärmeleitfähigkeit, in Klammern die Kaltplattentemperaturen (Nach Krischer u. Rohmalter [6])

Aus dieser Gesetzmäßigkeit ergibt sich, daß die Wärmeleitfähigkeit eines feuchten Stoffes bei einer Temperatur von etwa 60°C unabhängig vom Feuchtigkeitsgehalt ist, da sich die Wärmeleitfähigkeit der dampfgefüllten Luftporen und der Wasserbrücken nicht unterscheidet. Für diese Temperatur werden von einzelnen Forschern verschieden hohe Werte mitgeteilt je nach der gewählten Temperaturabhängigkeit der Diffusionszahl von Wasserdampf in Luft, für die in der Literatur unterschiedliche Zahlenwerte zu finden sind. So berechnet z. B. Jespersen einen Wert von etwa 68°C [16], während Krischer 59,3°C angibt [6]. Bild 8 zeigt Meßergebnisse für die Wärmeleitfähigkeit von Ziegeln nach Krischer, die diese Gesetzmäßigkeit deutlich erkennen lassen. Auf Einzelheiten dieses Bildes wird später noch eingegangen werden.

Diese Erscheinung kann auch in anderer Weise veranschaulicht werden. In Bild 9 ist der Verlauf der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt mit der Temperatur als Parameter schematisch dargestellt. Die Wärmeleitfähigkeit nimmt mit dem Feuchtigkeitsgehalt somit unter 59°C zu und über 59°C ab, während sie bei etwa 59°C konstant ist. Diese Kurven gelten jedoch nur für den Bereich oberhalb der hygroskopischen Feuchtigkeit und können nicht bis zum Feuchtigkeitsgehalt Null extrapoliert werden, da sie stetig bis zur Wärmeleitfähigkeit des trockenen Stoffes abnehmen müssen. Im hygroskopischen Bereich ist auch die Wärmeübertragung durch Dampfdiffusion wesentlich geringer, da einerseits nicht alle

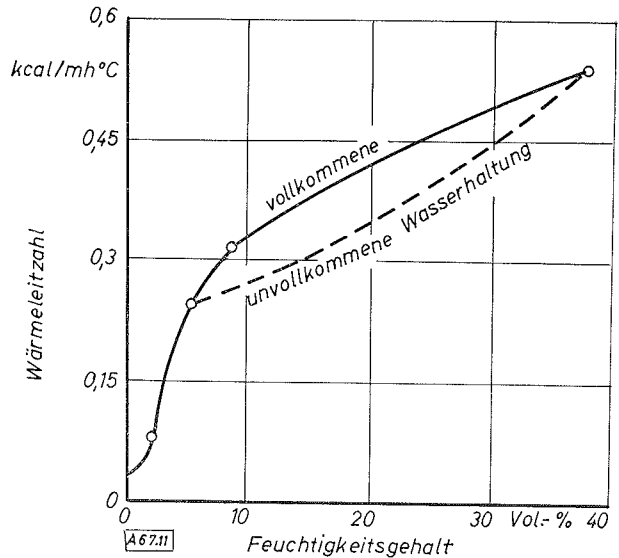
Porenwände feucht und somit auch Poren vorhanden sind, in denen keine Wasserdampfdiffusion stattfindet, und andererseits ein geringeres Dampfdruckgefälle infolge der Dampfdruckabsenkung in hygroskopisch feuchten Kapillaren herrscht. In Bild 10 ist der tatsächliche Verlauf von Wärmeleitfähigkeitskurven für Ziegel gemäß dem Schema von Bild 9 nach Messungen von *Krischer* wiedergegeben.



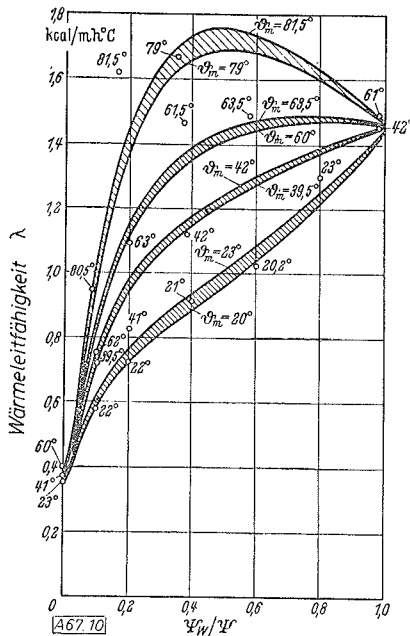
**Bild 9.** Charakteristischer Verlauf der Wärmeleitfähigkeit feuchter Stoffe bei verschiedenen Temperaturen nach *Krischer* [15]

Aus den bisherigen Ausführungen läßt sich für die Zunahme der Wärmeleitfähigkeit mit dem Wassergehalt das grundsätzliche Schema in Bild 11 nach *J. S. Cammerer* entwickeln, das sowohl für lose geschüttete als auch für feste anorganische Baustoffe gilt. Zunächst soll die ausgezogene Kurve betrachtet werden. Im hygroskopischen Bereich steigt die Wärmeleitfähigkeit mit dem Feuchtigkeitsgehalt erst schwach an, um bei

keit, so daß nun der Anstieg in einen fast linearen Ast übergeht bis zur vollen Wasserfüllung der Poren. Dieses Schema gilt jedoch nur für Stoffe mit kleinen Porenräumen, die das Wasser vollkommen festzuhalten vermögen. Bei grobporigen Stoffen, z. B. Kiesbeton-Hohlblocksteinen, tritt mit zunehmender Durchfeuchtung infolge des Einflusses der Schwerkraft eine Schichtenbildung ein, so daß das Wasser ungleichmäßig im Stoff verteilt ist und die Wärmeübertragung vermindert wird (siehe gestrichelte Kurve in Bild 11). Erst bei vollkommener Wassersättigung der Poren vereinigen sich die beiden Kurven. Diese skizzierte Gesetzmäßigkeit hat selbstverständlich nur für Temperaturen unter 59°C Gültigkeit, da in diesem Bereich  $\lambda_{diff}$  stets kleiner als die Wärmeleitfähigkeit des Wassers ist (siehe Bild 7).



**Bild 11.** Schema des Feuchtigkeitseinflusses auf die Wärmeleitfähigkeit bei völlig und begrenzt wasserhaltenden Stoffen nach *J. S. Cammerer* [3]



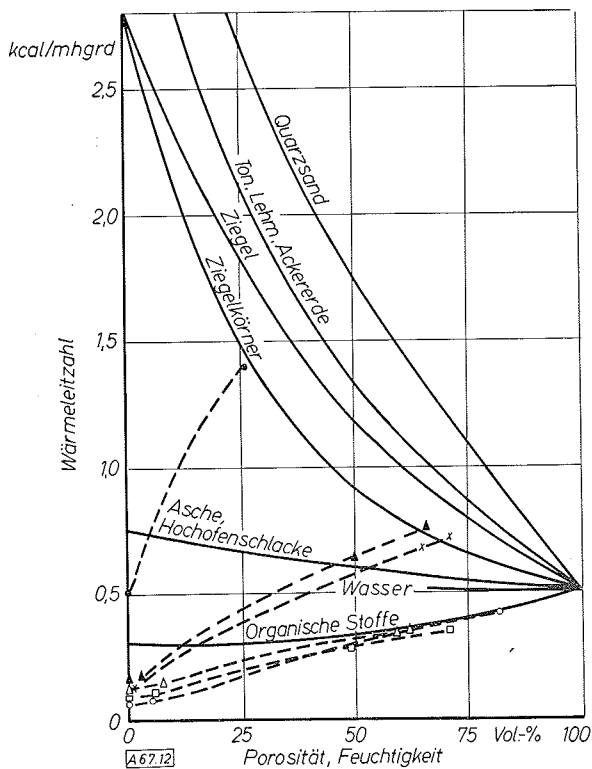
**Bild 10.** Wärmeleitfähigkeit von Ziegelsteinen (Rohdichte 1320 kg/m<sup>3</sup>) in Abhängigkeit von Feuchtigkeit und Temperatur ( $\psi$  Porosität,  $\psi_w$  Feuchtigkeitsgehalt) nach *Krischer* [5]

Überschreitung dieses Bereiches wegen des wachsenden Einflusses der Dampfdiffusion vermehrt zuzunehmen. Hat die Wärmeübertragung durch Dampfdiffusion bei vollkommener Porenbenetzung ihren größten Wert erreicht, so erhöhen nur mehr die zunehmenden Wasserbrücken die Wärmeleitfähig-

Zur Abschätzung des Verlaufs der Wärmeleitfähigkeitskurven in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt können die sogenannten Sättigungslinien der Wärmeleitfähigkeit nach *J. S. Cammerer* verwendet werden [3]. Ist nämlich die Wärmeleitfähigkeit eines Stoffes im mit Wasser gesättigten Zustand bei verschiedenen Porositäten bekannt, so muß die Verbindungslinie dieser Meßpunkte bei der Porosität 0% die Wärmeleitfähigkeit des Feststoffs und bei der Porosität 100% diejenige des Wassers ergeben. In Bild 12 sind diese Sättigungslinien dargestellt. Die zugehörigen Meßwerte stammen von verschiedenen Forschern und sind aus Gründen der besseren Übersichtlichkeit nicht eingezeichnet. Kennt man für einen Stoff die Wärmeleitfähigkeit im trockenen und im lufttrockenen Zustand sowie die zugehörige Sättigungslinie, so kann man entsprechend der geschilderten Gesetzmäßigkeit den ungefähren Verlauf der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt angeben. Bild 12 enthält einige solche Kurven nach Messungen des Forschungsheims, wobei nun auf der Abszisse nicht die Porosität, sondern der Feuchtigkeitsgehalt aufgetragen ist. Die Meßpunkte für den mit Wasser gesättigten Zustand stimmen bei organischen Stoffen mit der zugehörigen Sättigungslinie gut überein. Der Meßwert für Ziegel liegt jedoch etwas zu tief, derjenige für Gasbeton aus Asche zu hoch. Die bisherigen Messungen reichen zur genauen Festlegung der Sättigungslinien allerdings noch nicht aus. Vom Forschungsheim werden weitere Untersuchungen durchgeführt, wozu vom *Bundesministerium für Wohnungsbau* Mittel zur Verfügung gestellt wurden.

Bezüglich des Feuchtigkeitseinflusses auf die Wärmeleitfähigkeit besteht zwischen anorganischen und organischen Stoffen insofern ein wesentlicher Unterschied, als bei organischen Stoffen der hygroskopische Feuchtigkeitsgehalt wenig zur Dampfdiffusion beiträgt, sondern als kolloidal gebundenes

Wasser in den Zellwänden lediglich die Wärmeleitfähigkeit des Feststoffs erhöht. Außerdem reicht der hygroskopische Bereich bis zu höheren Feuchtigkeitsgehalten als bei anorganischen Stoffen.



**Bild 12.** Sättigungslinien der Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen nach J. S. Cammerer [3] mit eingezeichneten Meßwerten des Forschungsheimes

- Holzwohle-Leichtbauplatten 375 kg/m<sup>3</sup>
- Weichholz (Fichte) 457 kg/m<sup>3</sup>
- △ Hartholz (Eiche) 592 kg/m<sup>3</sup>
- x Gasbeton aus Asche 638 kg/m<sup>3</sup>
- ▲ Bimsbeton 805 kg/m<sup>3</sup>
- Vollziegel 2010 kg/m<sup>3</sup>

### Messung der Wärmeleitfähigkeit von feuchten Stoffen

Im Laboratorium wird die Wärmeleitfähigkeit von Stoffproben im allgemeinen mit dem Plattengerät nach Poensgen bestimmt [1]. Bei diesem Meßverfahren ist die kalte Probenoberfläche mit einer Kühlplatte abgedeckt, so daß eine feuchte Probe kein Wasser verdunsten kann. Da bei wasserhaltigen Stoffen mit dem Wärmestrom eine Wasserdampfdiffusion verbunden ist, tritt je nach der Diffusionsdurchlässigkeit, Höhe der Mitteltemperatur und dem Temperaturgefälle eine Feuchtigkeitsverlagerung auf, die bis zur praktischen vollkommenen Austrocknung der warmen Zone führen kann. Ein im Probenquerschnitt geschichteter Feuchtigkeitsgehalt hat aber eine wesentlich niedrigere Wärmeleitfähigkeit zur Folge als eine gleichmäßig verteilte Feuchtigkeit; denn die Wärmeleitfähigkeit des ausgetrockneten Teils nimmt wegen des Feuchtigkeitsverlustes mehr ab, als diejenige des stärker durchfeuchteten ansteigt. Durch diese sogenannte Zonenbildung werden daher falsche und zwar zu niedrige Wärmeleitfähigkeiten gemessen. Der Meßfehler wird um so kleiner, je geringer das gewählte Temperaturgefälle ist. Wärmeleitfähigkeitsmessungen nach DIN 52612 [1] sind daher auf trockene und lufttrockene Stoffe beschränkt.

Krischer hat einen bemerkenswerten Weg gewählt, um trotz Feuchtigkeitsverlagerung richtige Meßergebnisse zu erhalten [6]. Es wurden bei gleichem Feuchtigkeitsgehalt der Probe mehrere Messungen mit derselben Kühlplattentemperatur, jedoch verschiedener Temperaturdifferenz durchgeführt. Der richtige Wert ergab sich dann durch Extrapolation der Meßwerte auf die Temperaturdifferenz Null (Bild 8). Dieses Ver-

fahren ist aber nur dann anwendbar, wenn ein Gleichgewichtszustand der Wärmeströmung und damit auch der Wasserbewegung verwirklicht werden kann, ohne daß die warme Zone vollkommen austrocknet. Es muß also das durch Wasserdampfdiffusion von der warmen Oberfläche zur kalten Seite transportierte Wasser wieder zur warmen zurückgebracht werden. Ein solcher Vorgang ist nur durch Kapillarkräfte möglich, und somit beschränkt sich dieses Meßverfahren auf kapillar gut leitende Stoffe. Vor allem kann es bei kleinen Feuchtigkeitsgehalten wegen der geringen kapillaren Leitfähigkeit kaum angewandt werden.

Krischer hat deshalb später ein instationäres Meßverfahren entwickelt, das unter der Bezeichnung Kurzzeitverfahren nach Krischer und Esdorn bekannt geworden ist [18]. Bei dieser Meßmethode wird in einem sogenannten quasistationären Zustand der Wärmeströmung, in dem die Temperaturdifferenz an der Probe zeitlich konstant bleibt und lediglich die Mitteltemperatur proportional der Zeit ansteigt, die Wärmeleitfähigkeit bestimmt. Gleichzeitig kann auch die Wärmeleitfähigkeit, die Temperaturleitfähigkeit und die Wärmekapazität der Probe ermittelt werden. Da die Zeitdauer der Messung nur etwa eine halbe Stunde beträgt, stellt sich keine Feuchtigkeitsverlagerung ein. Das Meßverfahren ist allerdings auf kleine Probenplatten mit geringer Schichtdicke beschränkt.

Ein weiteres Meßverfahren besteht darin, die Messung im Plattengerät nach Poensgen im Beharrungszustand bei einem so geringen Temperaturgefälle durchzuführen, daß keine merkliche Zonenbildung eintritt. Diese Forderung ist nur dann zu erfüllen, wenn die kapillare Leitfähigkeit des Stoffes ausreicht, das durch Diffusion beförderte Wasser wieder zurückzusaugen, oder wenn der Diffusionswiderstand groß ist, so daß die Feuchtigkeitsverlagerung so langsam vor sich geht, daß ein fast stationärer Zustand von hinreichender Genauigkeit erzielt wird. Es ist allerdings schwer zu kontrollieren, ob diese Bedingungen erfüllt sind. Die geschilderte Meßmethode wurde von Jaspersen angewendet [16].

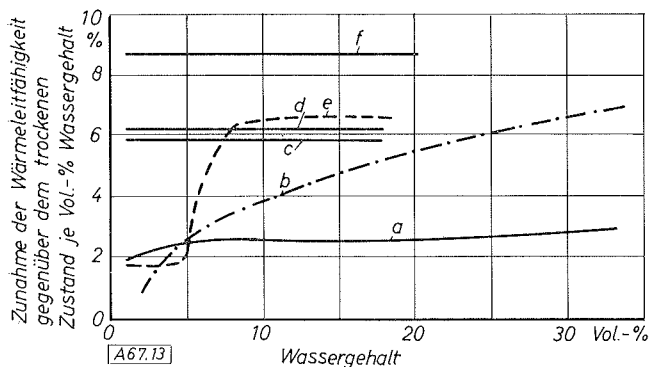
Ferner kann die Wärmeleitfähigkeit von feuchten Wänden im Wohnungsbau unter Bedingungen ermittelt werden, die nahezu den praktischen Verhältnissen im Winter entsprechen. Man erhält auf diese Weise Werte, die der Praxis hinreichend nahe kommen, auch wenn eine gewisse Feuchtigkeitsverlagerung auftreten sollte. Es muß jedoch Sorge getragen werden, daß auf der kalten Wandseite Feuchtigkeit verdunsten und damit keine Wasseranreicherung in der Wand auftreten kann. Solche Messungen werden entweder mit Wärmefluß-Meßplatten [19, 20] oder unter Verwendung einer elektrischen Heizung mit Gegenheizung oder raumseitiger Wärmeisolierung im Laboratorium und in der Praxis durchgeführt [21, 22]. Für Wandmessungen in bewohnten Räumen haben sich neuerdings Zählgeräte in Verbindung mit Wärmeflußmessern gut bewährt [20, 23]. Die Wärmefluß-Meßplatte ist entsprechend den genannten Forderungen auf der warmen Wandoberfläche und niemals auf der kalten anzubringen, da sich sonst Wasser in der kalten Zone stauen kann. Der Nachteil dieses Meßverfahrens besteht jedoch darin, daß kein genauer Vergleich mit der Wärmeleitfähigkeit im trockenen Zustand möglich ist, weil diese geschätzt werden muß. Die aus solchen Messungen berechneten Zuschläge für den Feuchtigkeitseinfluß auf die Wärmeleitfähigkeit sind daher mit Unsicherheiten behaftet, besonders bei niedrigen Feuchtigkeitsgehalten. Außerdem ist in den Meßergebnissen der Einfluß des Mörtels und eventuell auch des Putzes enthalten. Zur Sammlung von Unterlagen für die Festlegung von Rechenwerten der Wärmeleitfähigkeit von Wohnungsaußenwänden sind Wandmessungen in genügend lange bewohnten Häusern, die somit den praktischen Feuchtigkeitsgehalt aufweisen, jedoch sehr wertvoll.

### Meßwerte des Feuchtigkeitseinflusses auf die Wärmeleitfähigkeit von verschiedenen Bau- und Isolierstoffen

Um die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt zu veranschaulichen, wurde die Methode von J. S. Cammerer benutzt, nämlich die Angabe der prozentualen Zunahme der Wärmeleitfähigkeit je Vol.-%



Feuchtigkeitsgehalt. Diese Darstellungsweise ist auch bei organischen Stoffen gewählt worden, während *J. S. Cammerer* in letzterem Fall aus praktischen Gründen den Anstieg der Wärmeleitfähigkeit auf den Wassergehalt in Gew.-% bezog.

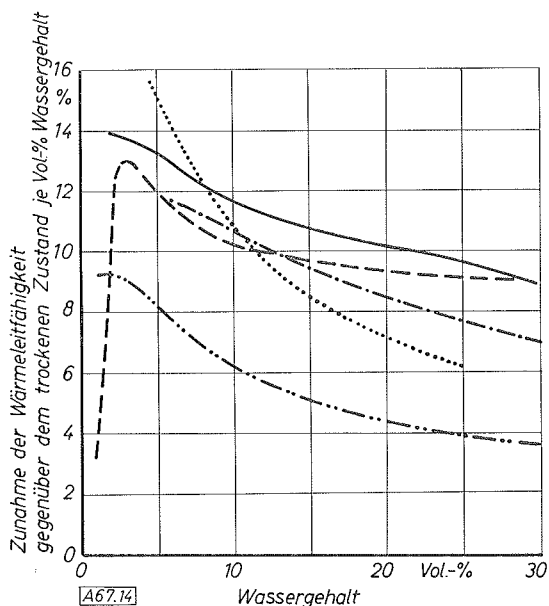


**Bild 13.** Feuchtigkeitsinfluß auf die Wärmeleitfähigkeit von organischen Stoffen

- a Fichtenholz (405 kg/m<sup>3</sup>) nach *Jespersen*
- b Holzwolle-Leichtbauplatten (375 kg/m<sup>3</sup>) nach *Forschungsheim*
- c Korkplatten (110 bis 150 kg/m<sup>3</sup>) nach *Jespersen* (über 0°C)
- d Korkplatten (100 bis 200 kg/m<sup>3</sup>) nach *J. S. Cammerer* (über 0°C)
- e Holzwollbeton (400 kg/m<sup>3</sup>) nach *Jespersen*
- f Korkplatten (100 bis 200 kg/m<sup>3</sup>) nach *J. S. Cammerer* (unter 0°C)

Die gleiche Bezugsgröße ermöglicht aber einen anschaulicheren Vergleich des Feuchtigkeitsinflusses bei organischen und anorganischen Stoffen. Außerdem ist die Bezugnahme auf den Wassergehalt in Volumanteilen für die Vorstellung zweckmäßiger.

Bild 13 zeigt diese prozentuale Zunahme der Wärmeleitfähigkeit je Vol.-% Wassergehalt bei organischen Stoffen und zwar von Korkplatten über und unter 0°C, von Fichtenholz, Holzwolleleichtbauplatten und Holzwollbeton nach Meßergebnissen verschiedener Forscher.

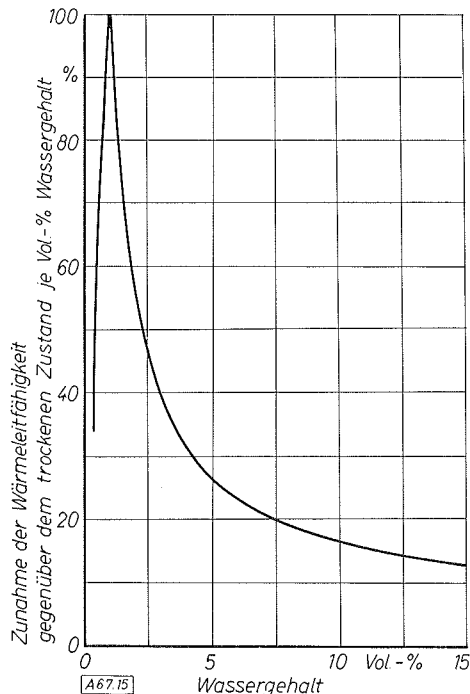


**Bild 14.** Feuchtigkeitsinfluß auf die Wärmeleitfähigkeit von anorganischen Stoffen

- Mauerziegel nach *Krischer* u. *Rohnalter* (1650 kg/m<sup>3</sup>,  $\lambda_{tr} = 0,36$  kcal/m h grd)
- - - Mauerziegel nach *Jespersen* (1680 kg/m<sup>3</sup>,  $\lambda_{tr} = 0,54$  kcal/m h grd)
- - - Porenbeton aus Quarzsand nach *Jespersen* (445 kg/m<sup>3</sup>,  $\lambda_{tr} = 0,084$  kcal/m h grd)
- - - Porenbeton aus Quarzsand nach *Krischer* (520 kg/m<sup>3</sup>,  $\lambda_{tr} = 0,14$  kcal/m h grd)
- - - Richtwerte nach *J. S. Cammerer*

In Bild 14 ist dieser Feuchtigkeitsinfluß für bekannte anorganische Baustoffe wie Ziegel und Porenbeton nach Messungen von *Krischer* und *Jespersen* dargestellt. Zu diesen Kurven passen sehr gut die allgemeinen Richtwerte nach *J. S. Cammerer*, die dieser aus praktischen Wandmessungen abgeleitet hat. Bei kleinen Feuchtigkeitsgehalten scheinen diese Richtwerte allerdings zu hoch zu liegen, was wohl durch die bereits erwähnte Schätzung der Wärmeleitfähigkeit im trockenen Zustand erklärt werden kann.

Bild 15 zeigt die Auswertung einer Messung an mineralischen Faserstoffen von *Jespersen* [16]. Die Zunahme der Wärmeleitfähigkeit ist besonders bei 1 Vol.-% Feuchtigkeitsgehalt sehr groß.



**Bild 15.** Feuchtigkeitsinfluß auf die Wärmeleitfähigkeit einer kunstharzgebundenen Mineralwolleplatte (78 kg/m<sup>3</sup>) nach *Jespersen* [16]

Während bei organischen Stoffen der Feuchtigkeitsinfluß mit dem Wassergehalt zunimmt oder gleichbleibt, fällt er bei anorganischen Materialien bei Feuchtigkeiten oberhalb des hyroskopischen Bereiches ab. Dies ist dadurch zu erklären, daß, wie bereits erwähnt, bei organischen Stoffen der hyroskopische Feuchtigkeitsgehalt sich bis zu hohen Wassergehalten erstreckt und im wesentlichen eine Wärmeleitfähigkeitserhöhung des Feststoffs bewirkt, während bei anorganischen Stoffen die Dampfdiffusion von entscheidendem Einfluß auf die Wärmeübertragung ist. Vor allem bei mineralischen Faserstoffen macht sich dies infolge der großen Diffusionsdurchlässigkeit sehr stark bemerkbar. Mit zunehmendem Feuchtigkeitsgehalt verringert sich der Anteil der Dampfdiffusion gegenüber der Auswirkung der Wärmeleitung des flüssigen Wassers, was eine Abnahme des prozentualen Anstiegs der Wärmeleitfähigkeit je Vol.-% Wassergehalt zur Folge hat.

#### Ungeklärte Fragen

Aus den obigen Ausführungen ergibt sich, daß die theoretischen Grundlagen der Wärmeleitfähigkeitserhöhung von porösen Stoffen durch einen Feuchtigkeitsgehalt zwar geklärt sind und genügend Meßergebnisse vorliegen, um die Wärmeleitfähigkeit von feuchten Baustoffen und der wichtigsten Isoliermaterialien abzuschätzen, daß aber für eine feinere Unterscheidung verschiedener Stoffe noch viele praktische Meßwerte fehlen.

Das sicherste Zahlenmaterial liegt bei Ziegel, Holzwolleleichtbauplatten und Korkplatten vor. Ungeklärt ist jedoch bei

vielen Stoffen der Feuchtigkeitseinfluß im hygroskopisch feuchten Zustand. Der pauschale Abzug von 6% je Vol.-% Feuchtigkeitsgehalt in diesem Bereich für alle anorganischen Baustoffe nach DIN 52612 [1] zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit im trockenen Zustand ist unbefriedigend. Außerdem sollte der in diesem Normblatt angegebene pauschale Zuschlag von 60%, d. h. von 12% je Vol.-% bei einem praktischen Feuchtigkeitsgehalt von 5 Vol.-% für anorganische, nicht gebrannte Baustoffe näher untersucht werden. Dieser Zuschlag mußte bei der Ausarbeitung von DIN 52612 mangels genauerer Unterlagen festgelegt werden und er trifft auch für Porenbeton zu (siehe Bild 14), bei dichten Betonen mit geringerer Diffusionsdurchlässigkeit gilt jedoch sicher ein niedrigerer Wert [24]<sup>3)</sup>.

Vollkommen ungeklärt ist der Feuchtigkeitseinfluß auf die Wärmeleitfähigkeit von Kunstschäumen, wie z. B. Polystyrol, Iporka, Phenolharzschäum, Polyurethanschäum, Polyvinylchlorid- sowie Polyäthylen-Schäume und andere. Der Zuschlag in DIN 52612 in Höhe von 20% wurde vorläufig festgelegt, da der Feuchtigkeitseinfluß bei diesen Stoffen noch nicht bekannt ist. Auch über die Wärmeleitfähigkeitserhöhung durch Eisbildung in den Poren liegen nur wenige Meßergebnisse vor.

Das Forschungsheim wird sich diesen Fragen mit Hilfe von Mitteln des *Bundesministeriums für Wohnungsbau* und Forschungsaufträgen der Industrie besonders widmen.

### Zusammenfassung

Entsprechend der großen Bedeutung des Feuchtigkeitseinflusses auf die Wärmeleitfähigkeit von Bau- und Isolierstoffen, insbesondere im Wohnungsbau und bei Kälteisolierungen, werden die physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Wärmeübertragung in feuchten Stoffen nach dem gegenwärtigen Forschungsstand dargestellt. Dabei wurde vor allem auf den Wärmetransport durch Wasserdampfdiffusion in den mit Wasserdampfgemisch gefüllten Poren eingegangen, der bei nicht zu großen Feuchtigkeitsgehalten, besonders bei anorganischen Stoffen, den größten Teil der Wärmeleitfähigkeitserhöhung verursacht. *Krischer* und seine Mitarbeiter haben diese Vorgänge weitgehend geklärt.

Messungen an feuchten Stoffen mit dem Plattengerät nach *Poensgen* im Baharrungszustand können infolge der Bildung von Feuchtigkeitszonen fehlerhaft sein.

Der Feuchtigkeitseinfluß auf die Wärmeleitfähigkeit einiger organischer und anorganischer Bau- und Isolierstoffe wird

<sup>3)</sup> Die Verabschiedung von DIN 52612 und damit die Festlegung von pauschalen Zuschlägen für den Einfluß des praktischen Feuchtigkeitsgehaltes auf die Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen konnte nicht bis zur Erforschung all dieser Fragen verzögert werden, da für eine einheitliche Berechnung des Wärmeschutzes von Baukonstruktionen dringend Unterlagen benötigt wurden.

in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt in Diagrammen dargestellt. Im übrigen bleibt noch eine Reihe von Fragen der Praxis zu klären. [A. 67]

### Literatur

- [1] DIN 52612: Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät; Beuth-Vertrieb Berlin und Köln (Juli 1959).
- [2] Zusammenfassung der Arbeiten von J. S. Cammerer in: *Der Wärmeschutz in der Industrie*; 4. Aufl. Berlin-Göttingen-Heidelberg. Springer-Verlag (erscheint demnächst).
- [3] J. S. Cammerer: Der Einfluß der Feuchtigkeit auf die Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen nach dem derzeitigen internationalen Schrifttum; veröffentlicht in „Feuchtigkeitsregelung, Durchfeuchtung und Wärmeleitfähigkeit bei Baustoffen und Bauteilen“, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1957.
- [4] J. S. Cammerer: Die konstruktiven Grundlagen des Wärme- und Kälteschutzes im Wohn- und Industriebau; Berlin 1936.
- [5] O. Krischer: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik; Berlin-Göttingen-Heidelberg 1956, Springer-Verlag.
- [6] O. Krischer u. H. Rohnalter: Wärmeleitung und Dampfdiffusion in feuchten Gütern; VDI-Forschungsheft 402. 1940.
- [7] H. Glaser: Vereinfachte Berechnung der Dampfdiffusion durch geschichtete Wände bei Ausscheidung von Wasser und Eis; *Kältetechnik* 10 (1958), S. 358/364 u. S. 386/390.
- [8] H. Glaser: Graphisches Verfahren zur Untersuchung von Diffusionsvorgängen; *Kältetechnik* 11 (1959), S. 345/349.
- [9] W. Meißner u. R. Immler: Einfluß des Wassergehaltes auf die Wärmeleitfähigkeit von Isolierstoffen; *Wärme- und Kälte-Technik* 40 (1938), H. 9, S. 1/4.
- [10] E. Schmidt: Über Trocknungsvorgänge; *Z. f. d. ges. Kälte-Ind.* 43 (1936), S. 75/80.
- [11] E. Raisch: Die Wärmeleitfähigkeit von Beton in Abhängigkeit vom Raumgewicht und Feuchtigkeitsgrad; *Ges.-Ing.* 53 (1930), Sonderheft.
- [12] E. Raisch: Das Forschungsheim für Wärmeschutz e. V., München, in zwanzigjähriger Tätigkeit, Entwicklung und Stand der Wärmeschutztechnik; *Wärme- und Kälte-Technik* 41 (1939), S. 1/6.
- [13] A. Watzinger u. E. Kindem: Om Byggningsmaterialers Varmsislering; Trondheim 1935, in Kommission bei F. Bruns.
- [14] F. B. Rowley u. A. B. Algren: Thermal Conductivity of Building Materials; University of Minnesota E. E. S. B. 1937, Nr. 12.
- [15] H. Kreüger u. Erikson: Undersökningar rörande bygnadskonstruktioners värmsisleringsförmåga. II-IV A-handlingar nr. 36, Stockholm 1924.
- [16] H. B. Jespersen: Die Wärmeleitfähigkeiten feuchter Stoffe und ihre Messung; *Ges.-Ing.* 74 (1953), S. 187/193.
- [17] F. Kollmann: Technologie des Holzes; Berlin-Göttingen-Heidelberg 1936, Springer-Verlag.
- [18] O. Krischer u. H. Esdorn: Einfaches Kurzzeitverfahren zur gleichzeitigen Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit, der Wärmekapazität und der Wärmeleitfähigkeit fester Stoffe; VDI-Forschungsheft 450. 1955.
- [19] E. Raisch u. K. Schropp: Die thermoelektrische Temperatur- und Wärmeleitfähigkeitsmessung; *Mittlg. a. d. Forschungsheim für Wärmeschutz e. V., München.* H. 8. (1930).
- [20] Forschungsheim f. Wärmeschutz e. V.: Das Schrifttum des Wärme- und Kälteschutzes (1960) H. 2.
- [21] K. Hencky u. J. S. Cammerer: Forschungsergebnisse über die wärmetechnische Leistung der Wärmeschutzstoffe; *Mittlg. a. d. Forschungsheim für Wärmeschutz e. V., München.* H. 1 (1921).
- [22] W. Meißner u. G. Gerloff: Über eine neue Methode zur Bestimmung der Wärmedurchlaßzahl von ausgeführten Wänden und über Wärmedurchlaßbestimmungen in nicht völlig stationärem Zustand; *Wärme- und Kälte-Technik* 38 (1936), H. 6, S. 1/4.
- [23] J. S. Cammerer: Ein automatisches Zählgerät zur Bestimmung des Wärmeschutzes von Wänden und Decken in der Praxis. *Bauwirtsch.* 11 (1957), S. 1026/27.
- [24] W. F. Cammerer: Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen aus Hochofenschlacke; *Die Bauwirtschaft* 14 (1960), S. 984/87.
- [25] E. Raisch: Wärmeleitfähigkeit von mineralischen Faserstoffen; *Mittlg. a. d. Forschungsheim für Wärmeschutz e. V., München.* H. 9 (1955), S. 16/28