

**F O R S C H U N G S I N S T I T U T**  
**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 17

**Der Feuchtigkeitseinfluß auf die Wärmeleitfähigkeit  
von Bau- und Wärmedämmstoffen**

Walter F. Cammerer



# Der Feuchtigkeitseinfluß auf die Wärmeleitfähigkeit von Bau- und Wärmedämmstoffen

Walter F. Cammerer \*)

Physikstudium an der Technischen Hochschule München, ab 1950 wissenschaftlicher Assistent im Forschungsheim für Wärmeschutz e.V., München, von 1959 bis 1985 wissenschaftlicher Leiter desselben Instituts (seit 1966: Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München).

## Kurzfassung

Die zweckmäßige Beschreibungs- und damit Berechnungsweise des Feuchteinflusses auf die Wärmeleitfähigkeit von Bau- und Wärmedämmstoffen wird, wie bereits in früheren Jahren, erneut in Veröffentlichungen und in Normungsausschüssen des Bauwesens diskutiert. Nach der vorgenommenen Auswertung von Versuchsergebnissen an anorganischen und organischen Bau- und Dämmstoffen kann der Schluß gezogen werden, daß für die absolute Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit von feuchten, porösen Stoffen der volumenbezogene Feuchtegehalt maßgebend ist. Für die Berechnung des Feuchteinflusses werden drei verschiedene Feuchteinfluß-Koeffizienten angegeben, die unter bestimmten Voraussetzungen von der Roh-

dichte des Stoffes unabhängig sind. Zwei Koeffizienten haben den volumenbezogenen und ein Koeffizient hat den massebezogenen Feuchtegehalt zur Grundlage. In der Praxis ist von Fall zu Fall zu entscheiden, welcher Feuchteinfluß-Koeffizient am zweckmäßigsten ist.

Für annähernd homogene Leichtbetone eignet sich die relative Zunahme der Wärmeleitfähigkeit je massebezogenen Feuchtegehalt, wenn sich die bisherigen Meßergebnisse allgemeingültig bestätigen, daß der praktische Feuchtegehalt entsprechend der massebezogenen Sorptionsfeuchte von der Rohdichte kaum beeinflußt wird. Für andere anorganische Baustoffe, insbesondere für Mauerwerk oder Baukonstruktionen, auf deren Feuchteverhalten sich Hohlräume und Mörtelfugen oder integrierte Dämmstoffe merklich auswirken können, bedarf diese Frage noch der Klärung.

Bei organischen Bau- und Wärmedämmstoffen ist nach den Untersuchungsergebnissen die Bezugnahme auf den volumenbezogenen Feuchtegehalt zweckmäßig.

## 1 Fragestellung und historischer Rückblick

Die Frage nach der Wirkungsweise und Größenordnung sowie der zweckmäßigen Beschreibungs- und Berechnungsweise des Feuchtigkeitseinflusses auf die Wärmeleitfähigkeit von Bau- und Wärmedämmstoffen ist so alt wie die Wärmeschutzwissenschaft. Die Forschung auf dem Gebiet der Wärmeübertragung im technischen Bereich und damit auch des Wärmeschutzes wurde in Deutschland etwa zu Beginn dieses Jahrhunderts aufgenommen. Insbesondere arbeitete man an diesen Fragen im Laboratorium für Technische Physik der Technischen Hochschule München [1]. Da nur poröse Stoffe aufgrund ihres Gehaltes an im allgemeinen mit Luft gefüllten Hohlräumen eine merkliche Wärmedämmung bieten, ist der Einfluß von Wasser, das in kleineren oder größeren Mengen in die Poren gelangt, von nicht zu vernachlässigender Bedeutung für den

Wärmetransport. Die Wärmeleitfähigkeit von Wasser ist ja etwa 25mal größer als die von ruhender Luft und beträgt etwa das 20fache der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit<sup>1)</sup> einer Luftschicht von 1 mm Dicke. Dabei kann das Wasser, je nach der Porenstruktur des Stoffes und dem Wasserangebot, an der inneren Oberfläche des porösen Körpers haften, kleinere oder größere Hohlräume teilweise oder ganz ausfüllen und ggf. Wärmebrücken bilden. In jedem Fall wird Luft oder ein anderes Porengas durch Wasser mit der wesentlich größeren Wärmeleitfähigkeit verdrängt. Es ist aber auch eine zusätzliche Energie- und damit Wärmeübertragung durch Enthalpieänderungen des Wassers bei temperaturbedingten Feuchtigkeitsbewegungen möglich.

<sup>1)</sup> Die „äquivalente Wärmeleitfähigkeit“ einer Luftschicht umfaßt die Wärmeübertragung durch Wärmeleitung der ruhenden Luft, Wärmestrahlung und Luftbewegung (Konvektion). Der Einfluß der Konvektion ist bei Raumtemperatur und Porengrößen unter 8 mm [25] und der der Wärmestrahlung bei Porengrößen kleiner als 0,1 mm vernachlässigbar klein.

\*) Dr. rer. nat. Walter F. Cammerer, Monatshauer Straße 14, 8132 Tutzing

Die Ursache für einen Wassergehalt von Baustoffen in der Praxis ist mit wenigen Ausnahmen zunächst eine Wasseraufnahme aus der Umgebungsluft aufgrund der kapillaren Struktur der Stoffe (Hygroskopizität). Hinzu kommt, sofern eine Bau- oder Herstellungsfeuchte ausgetrocknet ist, ggf. eine Restfeuchtigkeit als Folge einer wechselnden Tauwasserbildung und -verdunstung aufgrund von Wasserdampf-Diffusionsvorgängen infolge jahreszeitlicher Klimaschwankungen, vor allem bei hohen Raumluftheuchten. Eventuell ist auch eine zusätzliche Durchfeuchtung bei mangelhaftem Schlagregenschutz von Einfluß. Für diesen „bleibenden durchschnittlichen Wassergehalt“ hat *J. S. Cammerer* den Begriff des „praktischen Feuchtigkeitsgehalts“ vorgeschlagen [2], der heute noch in der für den Wärmeschutz im Hochbau maßgebenden Norm DIN 4108 [3] verwendet wird.

*J. S. Cammerer* veröffentlichte bereits 1924 [4] erste Untersuchungsergebnisse über den Feuchtigkeitseinfluß auf die Wärmeleitfähigkeit von Bau- und Dämmstoffen und gab diesen als prozentuale Erhöhung je 1 Vol.-% Feuchtigkeit sowie 1% Dichteänderung an, d. h. in heutigem Sprachgebrauch je % volumen- bzw. massebezogenen Feuchtegehalt. Dabei stellte er fest, daß „der Einfluß der Feuchtigkeit größer ist als der einer gleich großen Dichteänderung des völlig trockenen Materials“ und vermutete, daß „vielleicht das Wandern der Feuchtigkeit mit dem Wärmestrom eine gewisse Rolle spielt und bei dem Wechselspiel der Aggregatzustände des Wassers in den Poren Verdampfungswärme frei wird“. *Krischer* und *Rohnalter* haben dies später nachgewiesen [5].

In einer Veröffentlichung, in der über die Ergebnisse einer Auswertung von Forschungsarbeiten auf dem Gebiet des Wärmeschutzes des In- und Auslandes nach dem Stand von 1949 berichtet wird [6], schlug *J. S. Cammerer* vor, bei organischen Baustoffen, wie z. B. Hölzern, Kork- und Holzwole-Leichtbauplatten, den Feuchtegehalt auf Gew.-% (heute % massebezogen), bei anorganischen Baustoffen, vor allem bei Mauersteinen, dagegen auf Vol.-% (heute % volumenbezogen) zu beziehen. Er begründete diese Unterscheidung damit, daß der praktische Feuchtigkeitsgehalt bei organischen Baustoffen von ihrer Hygroskopizität bestimmt würde, somit die in der Raumeinheit vorhandene Feuchtigkeit eines Stoffes proportional der Menge der festen Bestandteile, also proportional dem Raumgewicht (heute Rohdichte), und ferner, daß die in Gew.-% gemessene Feuchtigkeit für alle Raumgewichte gleich groß sei. Ferner habe sich gezeigt, daß bei diesen Stoffen die prozentuale Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit in dem interessierenden Feuchtigkeitsbereich nicht von der Wassermenge abhängen und sie für alle Raumgewichte den konstanten Wert von 1,25% je Gew.-% annehmen würde. Bei anorganischen Baustoffen bestünde jedoch eine solche Gesetzmäßigkeit nicht, so daß die Bezugnahme auf die im Volumen enthaltene Feuchtigkeit zweckmäßiger sei. Diese Folgerung zog er bei der Auswertung von Probenentnahmen aus ausgeführten Gebäuden, wobei er ferner feststellte, daß anorganische Baustoffe in der Praxis fast immer einen höheren Wassergehalt hätten, als ihre Hygroskopizität erwarten ließe. Für den prozentualen Feuchteeinfluß auf die Wärmeleitfähigkeit fand er bei diesen Baustoffen z. T. sehr große Werte, die er vor allem auf den Einfluß der Verdampfungswärme bei Diffusionsvorgängen in den Poren entsprechend den Forschungsergebnissen von *Krischer* zurückführte [5]. Die von ihm geschätzte prozentuale Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit je Vol.-% Feuchtegehalt gegenüber dem trockenen Zustand zeigt eine starke Abhängigkeit vom volumenbezogenen Feuchtegehalt, und zwar nimmt sie von 32% bei 1 Vol.-% auf etwa 6% bei 25 Vol.-% Feuchtegehalt ab, wobei er glaubte, einen Einfluß der Rohdichte vernachlässigen zu können. Für den Bereich zwischen dem völlig trockenen und dem „luft-trockenen“, also einem nicht genau definierten hygroskopischen Feuchtegehalt, gab er eine Erhöhung von etwa 6% je Vol.-% Feuchtegehalt an. Dieser Wert ist auch heute noch in DIN 52612 Teil 2 [7] für den Fall vorgesehen, daß ein Meßwert, der an einem bei Raumklima gelagerten Probekörper gewonnen wurde, auf den trockenen Zustand umgerechnet werden soll. Die genannten Zuschlagswerte für anorganische Baustoffe, die *J. S. Cammerer* aus Meßergebnissen

an Versuchswänden im Freien und im Laboratorium abgeleitet hatte [8], wurden jedoch bei späteren Forschungsarbeiten nicht als allgemein gültig bestätigt. Dagegen hat sich der Wert von etwa 1% Zunahme der Wärmeleitfähigkeit je Gew.-% Feuchtegehalt bei organischen Baustoffen auch heute noch als zutreffend erwiesen [12].

*Jespersen* [9] veröffentlichte 1953 umfangreiche Versuchsergebnisse über den Feuchtigkeitseinfluß auf die Wärmeleitfähigkeit von organischen und anorganischen Baustoffen aus dem Heiztechnischen Laboratorium des Technologischen Instituts, Kopenhagen. Er bezog die gefundenen Erhöhungen der Wärmeleitfähigkeit bei allen Stoffen grundsätzlich auf den volumenbezogenen Feuchtegehalt und leitete aus den Meßergebnissen Gesetzmäßigkeiten ab, auf die später näher eingegangen werden soll.

In den deutschen Wärmeschutz-Normen für das Bauwesen wurde der Vorschlag von *J. S. Cammerer* übernommen, den praktischen Feuchtegehalt bei anorganischen Baustoffen volumenbezogen, bei organischen jedoch massebezogen darzustellen. Als bei der Normung des Prüfverfahrens für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen mit dem Plattengerät im Jahre 1959 im Teil 2 dieser Norm eine Tabelle mit Zuschlagswerten zur Berücksichtigung des praktischen Feuchtegehaltes aus den Meßwerten im trockenen Zustand aufgenommen wurde [7], hielt man sich im wesentlichen an die von *J. S. Cammerer* angegebenen Werte des Feuchtigkeitsefflusses. Der Verfasser der vorliegenden Ausführungen hat 1961 über den damaligen Forschungsstand berichtet [10] und darauf hingewiesen, daß noch viele Fragen ungeklärt seien und vor allem der Feuchteeinfluß bei den verschiedenen Baustoffen im hygroskopischen Feuchtebereich eingehender untersucht werden müsse. Auch der Feuchteeinfluß auf die Wärmeleitfähigkeit von Schaumkunststoffen war damals noch völlig unbekannt.

In den folgenden Jahren wurden zur genaueren Erforschung der physikalischen Gesetzmäßigkeiten des Feuchteefflusses auf die Wärmeleitfähigkeit verschiedener Bau- und Wärmedämmstoffe und zur Ermittlung von Zuschlagswerten auf die Wärmeleitfähigkeit im trockenen Zustand eine größere Anzahl von Untersuchungen durchgeführt, und zwar nicht nur mit Unterstützung der daran interessierten Industrie, sondern besonders auch durch Förderung des Bundesbauministeriums. Die Ergebnisse sind zum größten Teil veröffentlicht [11] bis [20] und bei den inzwischen erfolgten sieben Neubearbeitungen von DIN 52612 Teil 2 berücksichtigt worden. Sie wurden auch mit bisher noch nicht veröffentlichten Forschungsarbeiten des Forschungsinstituts für Wärmeschutz e. V. München für die Überlegungen der folgenden Abschnitte ausgewertet.

Im vergangenen Jahr hat sich *Künzel* [21] erneut mit der Frage beschäftigt, ob die Bezugnahme auf das Volumen oder die Masse bei der Beschreibung des Feuchtegehalts bei Baustoffen „physikalisch sinnvoll“ und zweckmäßig sei, vor allem im Hinblick auf die Berechnung der feuchtebedingten Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit. Aufgrund der Ergebnisse von Messungen der Sorptionsfeuchte verschiedener Stoffe sowie der Wärmeleitfähigkeit eines Gasbetonproduktes in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt und der Rohdichte folgert er, daß der auf die Stoffmasse bezogene Feuchtegehalt den Feuchtezustand insbesondere hinsichtlich der physikalischen Auswirkungen, wie z. B. der Wärmeleitung, richtig beschreibt. *Künzel* begründet diese Auffassung mit der Feststellung, daß sich bei porösen, hygroskopischen Stoffen nach Abgabe erhöhter Bau- oder Herstellungsfeuchte ein Feuchtigkeitszustand einstellt, der im Bereich der hygroskopischen Feuchte oder nur wenig darüber liegt. In diesem Falle sei die Feuchtigkeit im Feststoff physikalisch gebunden und befinde sich nicht in sichtbaren Poren oder Hohlräumen. Ferner vertritt er die Meinung, daß der Wärmetransport in porösen, hygroskopischen Stoffen im wesentlichen durch Wärmeleitung stattfindet und ein Wärmetransport durch Wasserdampfdiffusion vernachlässigt werden könnte.

In den folgenden Abschnitten soll aufgrund theoretischer Überlegungen und der Auswertung von Versuchsergebnissen an anorganischen sowie organischen Bau- und Wärmedämmstoffen natürlicher

und künstlicher Herkunft der Feuchteinfluß auf die Wärmeleitfähigkeit untersucht und dabei auch auf die Theorie von *Künzel* eingegangen werden.

## 2 Theoretische Überlegungen

Die effektive Wärmeleitfähigkeit<sup>2)</sup> und damit die Wärmedämmwirkung eines porösen Materials sind, abgesehen von der Wärmeleitfähigkeit des Feststoffs und der Struktur des Stoffgefüges, vor allem vom Porengehalt abhängig. Die Wärmeleitfähigkeit nimmt daher im allgemeinen mit abnehmender Porosität oder mit steigender Rohdichte zu. Bild 1 zeigt zwei Regressionskurven der Wärmeleitfähigkeit völlig trockener Bau- und Dämmstoffe sowohl als Funktion der Rohdichte als auch der daraus angenähert berechneten Porosität<sup>3)</sup>, die diese Gesetzmäßigkeit bestätigen. Die ausgezogene Kurve wurde aus 78 Meßwerten von Gasbetonen sowie Betonen aus Naturbims, Blähton und Blähschiefer, die gestrichelte Kurve aus 6 Meßwerten von Korkplatten sowie Fichten-, Kiefern- und Eichenholz gewonnen.

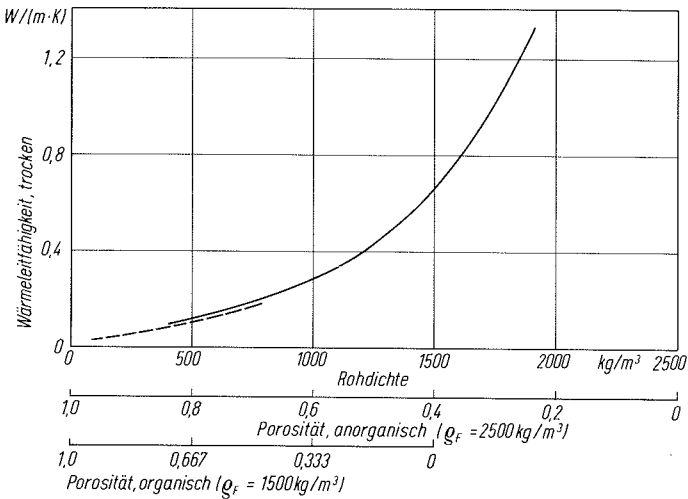


Bild 1. Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von Leichtbetonen und natürlichen, organischen Baustoffen (trocken, Mitteltemperatur 10°C) von der Rohdichte und der Porosität nach Meßergebnissen von *Jespersen* [9], des Forschungsinstituts für Wärmeschutz e. V. München [12], [16] und des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik [15], [18] ( $\rho_F$  Dichte der festen Bestandteile).

— Leichtbetone (Regression,  $n = 78$ ,  $r = 0.989$ )  
 - - - Korkplatten und verschiedene Hölzer ( $n = 6$ )  
 (n Anzahl der Meßwerte, r Korrelationskoeffizient)

Wenn die Vorstellung von *Künzel* zutrifft, daß im hygrokopischen Feuchtebereich das Wasser beim Wärmetransport im Feststoff physikalisch gebunden bleibt, müßte die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit durch einen Feuchtegehalt aus der dadurch bedingten Rohdichteerhöhung oder der Porositätsverminderung des trockenen porösen Stoffes abgeschätzt werden können. Das Ergebnis würde zwischen zwei Grenzfällen liegen, denn im ersten Fall wird nur die Massenvergrößerung, während im zweiten Fall auch das größere Volumen des Wassers gegenüber dem Feststoff aufgrund seiner geringeren Dichte berücksichtigt wird. In beiden Fällen wirkt sich als Sicherheit die vor allem bei anorganischen Baustoffen wesentlich höhere Wärmeleitfähigkeit des Feststoffs gegenüber der des Wassers aus.

<sup>2)</sup> Als „effektive Wärmeleitfähigkeit“ eines porösen Stoffes bezeichnet man die Wärmeleitfähigkeit eines porenfreien Ersatzstoffes, der die gleiche Wärmeleitfähigkeit aufweist wie der poröse Stoff. Der Einfachheit halber wird, wie allgemein üblich, der Zusatz „effektiv“ weggelassen.

<sup>3)</sup> Die Porosität  $\Psi$  kann näherungsweise mittels folgender Gleichung berechnet werden:  $\Psi = 1 - \rho/\rho_F$  ( $\rho$  Rohdichte des porösen Stoffes,  $\rho_F$  mittlere Dichte der festen Bestandteile).

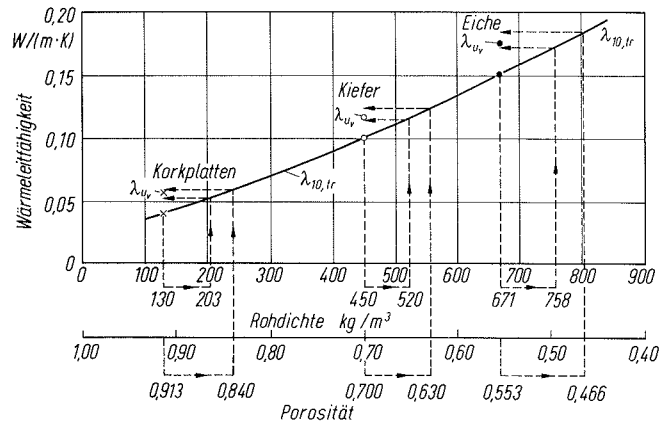


Bild 2. Vergleich von Meßwerten der Wärmeleitfähigkeit von Korkplatten ( $\rho_{tr} = 130 \text{ kg/m}^3$ ,  $\Psi_{tr} = 0.913$ ), Kiefernholz ( $\rho_{tr} = 450 \text{ kg/m}^3$ ,  $\Psi_{tr} = 0.700$ ) und Eichenholz ( $\rho_{tr} = 671 \text{ kg/m}^3$ ,  $\Psi_{tr} = 0.553$ ) im feuchten Zustand nach [9], [12] mit Werten, die sich rechnerisch aus der Wärmeleitfähigkeit im trockenen Zustand durch eine dem Feuchtegehalt entsprechende Rohdichteerhöhung oder Porositätsverminderung ergeben.

- × Korkplatten (trocken und  $u_v = 7,3\%$ )
- Kiefernholz (trocken und  $u_v = 7,0\%$ )
- Eichenholz (trocken und  $u_v = 8,7\%$ )

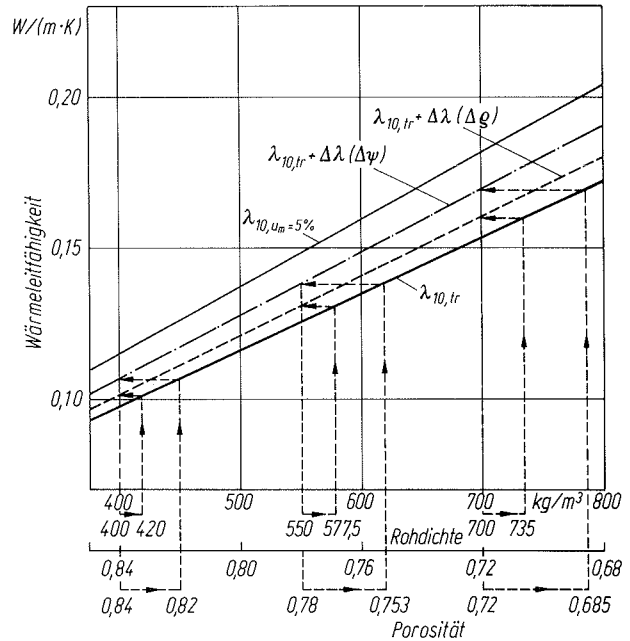


Bild 3. Vergleich der Wärmeleitfähigkeit von Gasbeton bei einem massebezogenen Feuchtegehalt von 5% (nach [21]) mit Werten, die sich rechnerisch aus der Wärmeleitfähigkeit im trockenen Zustand bei Rohdichten von 400, 550 und 700  $\text{kg/m}^3$  durch eine dem Feuchtegehalt entsprechende Rohdichteerhöhung ( $\lambda_{10,tr} + \Delta\lambda(\Delta\rho)$ ) oder Porositätsverminderung ( $\lambda_{10,tr} + \Delta\lambda(\Delta\Psi)$ ) ergeben

In Bild 2 wird diese Überprüfung an der Wärmeleitfähigkeitskurve der organischen Stoffe nach Bild 1, in Bild 3 an derjenigen des Gasbetonproduktes vorgenommen, die der Arbeit von *Künzel* entnommen wurde. Während bei Gasbeton Wärmeleitfähigkeitskurven sowohl für den trockenen Zustand als auch für den massebezogenen Feuchtegehalt von 5% in Abhängigkeit von der Rohdichte aus der Veröffentlichung von *Künzel* zugrunde gelegt werden konnten, und damit ein Vergleich für den ganzen Rohdichtebereich von 400 bis 800  $\text{kg/m}^3$  möglich ist, liegen bei den natürlichen, organischen Stoffen nur Meßwerte verschiedener Materialien bei unterschiedlichen Feuchtegehalten aus einer Veröffentlichung von *Jespersen* [9] und Meßergebnisse des Forschungsinstituts für Wärmeschutz [12] vor. Trotzdem ist auch hier der geschilderte Vergleich aufgrund der Regressionskurve von Bild 1 näherungsweise möglich.

Wie die drei in Bild 2 vorgenommenen Vergleiche für die Korkplatten (Rohdichte trocken im Mittel 130  $\text{kg/m}^3$ , feucht 203  $\text{kg/m}^3$ ),

für Kiefernholz (Rohdichte trocken  $450 \text{ kg/m}^3$ , feucht  $520 \text{ kg/m}^3$ ) und Eichenholz (Rohdichte trocken  $671 \text{ kg/m}^3$ , feucht  $758 \text{ kg/m}^3$ ) zeigen, führt die Wärmeleitfähigkeit im trockenen Zustand bei der durch die Feuchtigkeit erhöhten Rohdichte zu nur geringfügig kleineren Werten, als die jeweils gemessenen Wärmeleitfähigkeiten im feuchten Zustand ausweisen. Benutzt man im Diagramm den Weg der Porositätsverminderung, so liegen die gefundenen Werte entsprechend der obigen Voraussage etwas höher. Es bestätigt sich daher für diese organischen Stoffe die Aussage von *Künzel*, daß im hygroscopischen Feuchtebereich das Wasser beim Wärmetransport an den Feststoff gebunden bleibt, wie bereits *J. S. Cammerer* [6] und *Jespersen* [9] festgestellt hatten. Dies trifft aber auch für den überhygroscopischen Feuchtezustand bei den gewählten kleinen Temperaturdifferenzen bei der Messung zu, wie weitere Untersuchungen zeigten (in Bild 2 nicht dargestellt). Es findet daher keine nennenswerte Feuchtigkeitswanderung aufgrund eines im Bauwesen üblichen Temperaturgefälles statt, die eine zusätzliche Energieübertragung zur Folge hätte.

Ein anderes Vergleichsergebnis zeigt jedoch Bild 3 für Gasbeton. Sowohl die Rohdichteerhöhung als auch die Porositätsverminderung aufgrund des massebezogenen Feuchtegehalts von 5% führen zu sichtlich geringeren Werten als die Messungen bei diesem Feuchtezustand ergaben. Wenn auch die Porositätsverringerng aufgrund der erwähnten Ausführungen größere Werte erbringt als die Rohdichteerhöhung, so sind sie doch noch im ganzen Rohdichtebereich etwa 7% zu klein. Die Ursache kann nur in einer zusätzlichen Wärmeübertragung infolge einer Feuchtigkeitsbewegung liegen, nachdem das Wasser bei diesem Feuchtegehalt nicht chemisch gebunden ist und durch Trocknung wieder entfernt werden kann.

Daß es sich hier nicht um ein Zufallsergebnis handelt, bestätigen Ergebnisse ähnlicher Vergleiche bei Regressionskurven aus 19 Meßreihen verschiedener Gasbetone sowie von Betonen aus Naturbims. Hierfür wurden entsprechende Veröffentlichungen ausgewertet [14], [22]. Dabei ergaben sich noch größere Unterschiede und zwar bis zu 10% zwischen den Meßwerten im feuchten Zustand und den Wärmeleitfähigkeiten im trockenen Zustand, die aus der Porositätsverminderung für den jeweiligen Feuchtegehalt gewonnen wurden.

Eine Erklärung kann die Theorie von *Krischer* [23] geben, wonach durch Phasenänderung bei Dampfdiffusionsvorgängen innerhalb der Poren Verdampfungswärme frei wird, die die äquivalente Wärmeleitfähigkeit der Poren mit feuchten Begrenzungsflächen erhöht. Es handelt sich dabei nicht um eine Wasserdampfdiffusion durch die ganze Stoffschicht, die sich nach den bekannten Gleichungen mittels der Diffusionswiderstandszahl des Stoffes berechnen läßt [24], sondern nach der Vorstellung von *Krischer* um eine reine Porendiffusion von der wärmeren Oberfläche einer Pore zur kälteren, wo sich Tauwasser niederschlägt und Verdampfungswärme freigesetzt wird. Die Diffusionswiderstandszahl des porösen Stoffes hat auf diesen Vorgang keinen Einfluß.

*Krischer* hat zur Abschätzung des Feuchteinflusses auf die Wärmeleitfähigkeit einschließlich der Porendiffusion ein Ersatzschaltbild mit einer relativ einfachen Berechnungsgleichung angegeben. Nachdem aus einer Forschungsarbeit des Forschungsinstituts für Wärmeschutz über die Wärmeleitfähigkeit von feuchten Bau- und Dämmstoffen mehrere Meßwerte für einen Gasbeton (Rohdichte  $540 \text{ kg/m}^3$ ) im volumenbezogenen Feuchtebereich zwischen 0 und 10% (massebezogen etwa zwischen 0 und 20%) vorlagen, ergab sich die Möglichkeit, die Theorie von *Krischer* nachzuprüfen.

Bild 4 zeigt das Ergebnis. Die ausgezogene Kurve stellt die berechnete Kurve nach dem *Krischer*-Modell und die strichpunktierte Gerade ebenfalls ein Berechnungsergebnis nach *Krischer* unter Vernachlässigung der Porendiffusion dar. Die vier ausgefüllten Kreise sind Meßpunkte, die durch die gestrichelte Gerade ausgeglichen wurden. Die punktierte Parallele zur Abszisse deutet die Wärmeleitfähigkeit im trockenen Zustand an, um den Vergleich der sich auf diese Weise ergebenden absoluten Feuchtigkeitsinflüsse zu erleichtern.

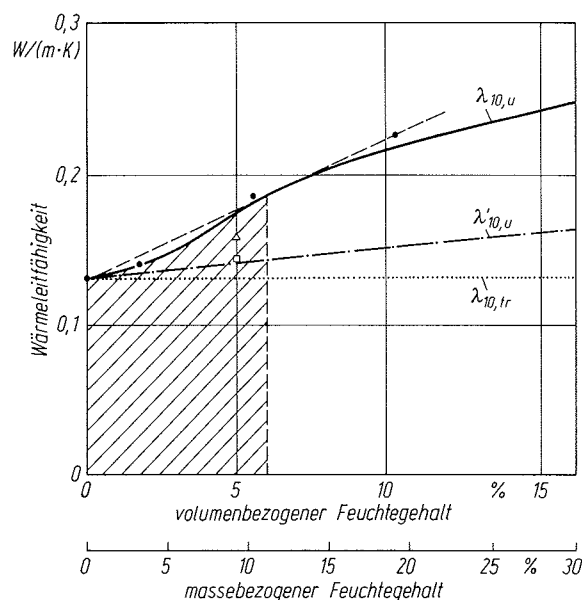


Bild 4. Wärmeleitfähigkeit einer Gasbetonplatte ( $\rho = 540 \text{ kg/m}^3$ ) in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt nach berechneten Werten unter Zugrundelegung des *Krischer*-Modells [23] im Vergleich zu Meßwerten des Forschungsinstituts für Wärmeschutz e. V. München.

- $\lambda_{10,u}$  und  $\lambda'_{10,u}$  Berechneter Verlauf nach dem *Krischer*-Modell
- mit Porendiffusion
- - - - - ohne Porendiffusion
- Meßwerte des Forschungsinstituts für Wärmeschutz
- $\lambda_{tr} + \Delta \lambda (\Delta \rho)$
- △  $\lambda_{tr} + \Delta \lambda (\Delta \psi)$
- ..... Wärmeleitfähigkeit im trockenen Zustand
- /////// Hygroscopischer Feuchtebereich

Wenn auch dieses Ergebnis keinen endgültigen Beweis für die *Krischer*sche Theorie darstellen kann, so ist doch die Übereinstimmung zwischen den Meßwerten und der berechneten Kurve überraschend. Es scheint sich tatsächlich ein Einfluß der Porendiffusion anzudeuten. Übrigens wurde der Wendepunkt im Verlauf der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt im Bereich der hygroscopischen Feuchte auch von *Jespersen* [9] und *Krischer* [23] gemessen. Er ist für die Praxis bedeutungslos und kann im Rahmen der Meßunsicherheit vernachlässigt werden.

### 3 Beschreibungswesen des Feuchteinflusses auf die Wärmeleitfähigkeit poröser Stoffe

Der Wasser- oder Feuchtegehalt eines porösen Stoffes kann, wie bereits mehrfach erwähnt, sowohl massebezogen ( $u_m$ ) als auch volumenbezogen ( $u_v$ ) angegeben werden:

$$u_m = m_W / m \quad (1)$$

$$u_v = V_W / V = u_m \rho / \rho_W \quad (1a)$$

( $m_W$  Wassermasse,  $V_W$  Wasservolumen,  $m$  Masse und  $V$  Volumen des porösen Körpers von der Rohdichte  $\rho = m/V$ ,  $\rho_W$  Dichte des Wassers  $\approx 1000 \text{ kg/m}^3$ )

Der Feuchtegehalt könnte auch durch die Feuchtekonzentration oder Feuchtedichte  $u_c$  ausgedrückt werden, deren Maßzahl jedoch nur um die Dichte des Wassers (ca.  $1000 \text{ kg/m}^3$ ), also um einen konstanten Faktor größer ist als die des volumenbezogenen Feuchtegehalts:

$$u_c = m_W / V = \rho_W V_W / V = \rho_W u_v.$$

In einem  $\lambda_u$ - $u_c$ -Diagramm<sup>4)</sup> ändern sich daher gegenüber einem  $\lambda_u$ -

<sup>4)</sup>  $\lambda_u$ - $u_c$ -Diagramm bedeutet in diesen Ausführungen, daß im Diagramm die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_u$  (Ordinate) in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt  $u$  (Abszisse) dargestellt wird.

$u_v$ -Diagramm die Abszisseneinheiten lediglich um einen Maßstabsfaktor 1000.

Während  $u_m$  und  $u_v$  dimensionslose Größen sind, hat  $u_c$  die Maßeinheit  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

Aus den bisherigen Überlegungen stellt sich die Frage, auf welche Weise der Einfluß der Feuchtigkeit auf die Wärmeleitfähigkeit poröser Stoffe am zweckmäßigsten beschrieben wird. Hierfür eignen sich Darstellungsweisen, die von der Rohdichte nicht beeinflußt werden.

Es bieten sich daher zwei Möglichkeiten an, nämlich a) die Porositätsverminderung und b) die relative Rohdichteerhöhung aufgrund des Feuchtegehaltes.

Zu a): Die Porositätsverminderung läßt sich durch folgende Gleichung ausdrücken:

$$\Delta\Psi = \Psi - \Psi_w = V_L/V - (V_L - V_w)/V = V_w/V = u_v.$$

( $V_L$  Luftvolumen des porösen Körpers)

Sie ist daher gleich dem volumenbezogenen Feuchtegehalt des porösen Stoffes, unabhängig von der Rohdichte.

Es kann daher folgender Ansatz gemacht werden:

Die absolute Zunahme der Wärmeleitfähigkeit eines porösen Stoffes infolge eines Feuchtegehaltes  $\Delta\lambda = \lambda_u - \lambda_{tr}$  sei proportional der dadurch bedingten Porositätsverminderung, d. h. dem volumenbezogenen Feuchtegehalt. ( $\Delta\lambda$  Unterschied zwischen den Wärmeleitfähigkeiten im feuchten ( $\lambda_u$ ) und im trockenen ( $\lambda_{tr}$ ) Zustand).

Daraus ergibt sich folgende Gleichung:

$$\Delta\lambda = a u_v \quad \text{mit } a = \Delta\lambda/u_v \quad (2)$$

$a$  ist ein Proportionalitätsfaktor, ausgedrückt in  $\frac{\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})}{\% \text{ vol.-bez.}}$ ,

und stellt in einem  $\lambda_u$ - $u_v$ -Diagramm die Steigung der Wärmeleitfähigkeitskurve in Abhängigkeit von  $u_v$  dar. Wenn dieser Ansatz richtig ist, müßten sich bei der Messung der Wärmeleitfähigkeit eines Stoffes im feuchten Zustand bei verschiedenen Rohdichten die gleiche Abhängigkeit vom volumenbezogenen Feuchtegehalt ergeben, d. h. in einem  $\lambda_u$ - $u_v$ -Diagramm etwa parallele Geraden für die einzelnen Rohdichten. Trägt man dagegen die Wärmeleitfähigkeit als Funktion von  $u_m$  auf, so würde die Steigung der Kurven mit der Rohdichte zunehmen, denn aus Gl. (1a) und (2) ergibt sich:

$$\Delta\lambda = \frac{a}{\rho_w} \rho u_m, \quad (3)$$

wobei  $a$  und  $\rho_w$  Konstante sind. In der bereits erwähnten Veröffentlichung [21] hat *Künzel* die hier hergeleiteten Gesetzmäßigkeiten für das untersuchte Gasbetonprodukt bestätigt, jedoch auf andere Weise begründet. Bild 5 und 6 zeigen die entsprechenden Diagramme aus seiner Arbeit. Es ist nun zu prüfen, ob die Gleichungen (2) und (3) auch für andere Stoffe zutreffen.

Bei Gültigkeit von Gl. (2) kann die Wärmeleitfähigkeit eines feuchten Stoffes additiv aus der Wärmeleitfähigkeit im trockenen Zustand nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$\lambda_{u_v} = \lambda_{tr} + a u_v. \quad (4)$$

Voraussetzung hierfür ist, daß der Faktor  $a = \Delta\lambda/u_v$ , d. h. die absolute Zunahme der Wärmeleitfähigkeit je volumenbezogenen Feuchtegehalt, für einen durch seine festen Bestandteile und sein poröses Gefüge definierten Bau- oder Dämmstoff aufgrund ausreichend vieler Messungen in einem bestimmten Rohdichte- und Feuchtebereich als eine konstante Größe angesehen werden kann<sup>5)</sup>.

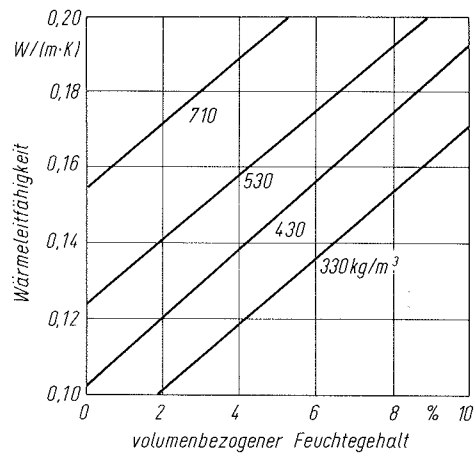


Bild 5. Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von Gasbeton unterschiedlicher Rohdichte vom volumenbezogenen Feuchtegehalt nach *Künzel* [21]

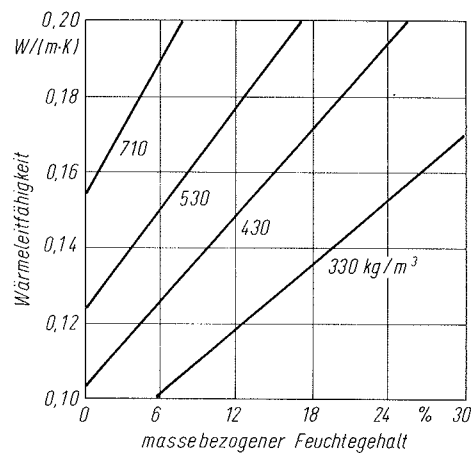


Bild 6. Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von Gasbeton unterschiedlicher Rohdichte vom massebezogenen Feuchtegehalt nach *Künzel* [21]

Zu b): Die relative Rohdichteerhöhung errechnet sich aus folgender Gleichung:

$$\Delta\rho/\rho = \frac{(m + m_w)/V - m/V}{m/V} = m_w/m = u_m.$$

Sie gleicht daher dem massebezogenen Feuchtegehalt des porösen Stoffes und hängt ebenfalls nicht von der Rohdichte ab. Entsprechend den Ausführungen unter a) ist somit folgender Ansatz möglich:

Die relative Zunahme der Wärmeleitfähigkeit eines porösen Stoffes  $\Delta\lambda/\lambda_{tr}$  aufgrund eines Feuchtegehaltes sei proportional der dadurch bedingten relativen Rohdichteerhöhung  $\Delta\rho/\rho$ , d. h. dem massebezogenen Feuchtegehalt.

Daraus ergeben sich folgende Gleichungen:

$$\Delta\lambda/\lambda_{tr} = b u_m \quad (5)$$

mit

$$b = \Delta\lambda/(\lambda_{tr} u_m) \quad (5a)$$

$$\lambda_{u_m} = \lambda_{tr} (1 + b u_m). \quad (6)$$

Diese Beziehungen hat *Künzel* bereits an dem untersuchten Gasbeton nachgewiesen und gezeigt, daß der Faktor  $b$  in dem Rohdichtebereich von 300 bis 800  $\text{kg}/\text{m}^3$  praktisch konstant ist [21].

<sup>5)</sup> Statistisch betrachtet heißt dies, die Stoffe, für die ein konstanter Faktor gelten soll, müssen einer Grundgesamtheit angehören.

Bezieht man dagegen die relative Zunahme der Wärmeleitfähigkeit auf den volumenbezogenen Feuchtegehalt nach der Gleichung

$$c = \Delta\lambda / (\lambda_{tr} u_v) \quad (7)$$

und damit

$$\lambda_{uv} = \lambda_{tr} (1 + cu_v), \quad (7a)$$

so ergibt sich bei Gasbeton eine starke Abnahme von  $c$  mit wachsender Rohdichte, die allgemein bekannt ist, und auf die *Künzel* besonders hinweist. Maßgebend dafür, daß der Faktor  $b$  praktisch nicht, der Faktor  $c$  dagegen deutlich von der Rohdichte des betreffenden Stoffes beeinflusst wird, ist der annähernd lineare Anstieg der Wärmeleitfähigkeit im trockenen Zustand mit der Rohdichte. Ersetzt man nämlich in den Gleichungen (5a) und (7)  $\lambda_{tr}$  durch die lineare Beziehung  $d + e\rho$ , so zeigt sich, daß bei konstantem  $\Delta\lambda/u_v$  der Faktor  $b$  theoretisch mit  $\rho$  nur ganz geringfügig zunimmt, während  $c$  dagegen mit  $\rho$  merklich abfällt. Ist aber  $\lambda_{tr}$  annähernd unabhängig von  $\rho$ , d. h.  $e \approx 0$ , so steigt  $b$  mit der Rohdichte stark an, während  $c$  praktisch eine Konstante wird<sup>6)</sup>.

Im folgenden Abschnitt soll aufgrund der Auswertung von weiteren Meßergebnissen an anorganischen und organischen Bau- und Wärmedämmstoffen untersucht werden, ob die vorgeschlagenen Ansätze zur Beschreibung des Feuchteinflusses auf die Wärmeleitfähigkeit anwendbar, und welche davon für die Praxis zweckmäßig sind. Die Faktoren  $a$ ,  $b$  und  $c$  sollen „Feuchteinfluss-Koeffizienten“ genannt werden.

#### 4 Auswertung von Meßergebnissen über den Feuchteinfluß auf die Wärmeleitfähigkeit von Bau- und Wärmedämmstoffen

##### 4.1 Gasbeton

Aus den Meßergebnissen für ein Gasbetonprodukt nach der Veröffentlichung von *Künzel* [21] ergeben sich folgende Koeffizienten:

$$a = 0,86 \cdot 10^{-2} \frac{W/(m \cdot K)}{\% \text{ vol.-bez.}}$$

$$b = 3,7 \frac{\%}{\% \text{ massebez.}}$$

Wertet man die unter Abschn. 2 genannten 19 Meßwerte von Gasbetonen unterschiedlicher Herkunft, die von verschiedenen Forschungsinstituten ermittelt wurden, nach den oben dargestellten Gesichtspunkten durch lineare Regression aus, so errechnen sich ähnliche Werte, nämlich

$$a = 0,93 \cdot 10^{-2} \frac{W/(m \cdot K)}{\% \text{ vol.-bez.}}$$

$$b = 3,9 \frac{\%}{\% \text{ massebez.}}$$

##### 4.2 Beton aus Naturbims

Bild 7 und 8 zeigen die nach [14] ausgewerteten Regressionsgeraden für die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom volumenbezogenen sowie massebezogenen Feuchtegehalt für drei Rohdichten. Sie bestätigen ebenfalls die vermutete Gesetzmäßigkeit, daß der Einfluß der auf das Volumen bezogenen Feuchtigkeit auf die Wärmeleitfähigkeit des Leichtbetons praktisch von der Rohdichte unabhängig

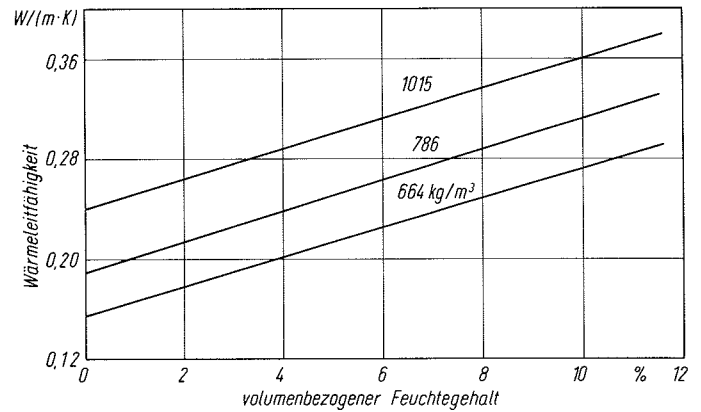


Bild 7. Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von Leichtbeton mit porigen Zuschlägen unter Verwendung von Naturbims unterschiedlicher Rohdichte vom volumenbezogenen Feuchtegehalt nach *Neunast* [14] (lineare Regression der Meßwerte des Forschungsinstituts für Wärmeschutz e. V. München)

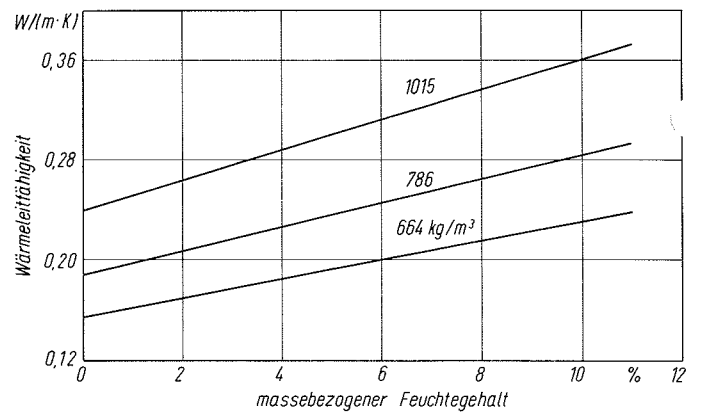


Bild 8. Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von Leichtbeton mit porigen Zuschlägen unter Verwendung von Naturbims unterschiedlicher Rohdichte vom massebezogenen Feuchtegehalt nach *Neunast* [14] (lineare Regression der Meßwerte des Forschungsinstituts für Wärmeschutz e. V. München)

ist, während die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit vom massebezogenen Feuchtegehalt mit der Rohdichte ansteigt.

Die Koeffizienten  $a$  und  $b$  ergeben sich wieder als praktisch unabhängig von der Rohdichte, nämlich

$$a = 1,2 \cdot 10^{-2} \frac{W/(m \cdot K)}{\% \text{ vol.-bez.}}$$

$$b = 5,0 \frac{\%}{\% \text{ massebez.}}$$

##### 4.3 Hölzer und Korkplatten

In Bild 9 und 10 sind für die verschiedenen Hölzer und die Korkplatten bei den jeweiligen Rohdichten die Abhängigkeiten der Wärmeleitfähigkeit vom volumenbezogenen und vom massebezogenen Feuchtegehalt nach der Auswertung der Veröffentlichungen [9] und [12] dargestellt. Auch hier zeigt sich erneut der fast parallele Verlauf der Kurven als Funktion des volumenbezogenen Feuchtegehaltes, während der Anstieg der Kurven in Abhängigkeit vom massebezogenen Feuchtegehalt mit zunehmender Rohdichte der Stoffe größer wird.

Während bei den bisher besprochenen Stoffen die Koeffizienten  $a$  und  $b$  in dem betrachteten Rohdichtebereich nur um maximal 3% schwanken, sind hier die Unterschiede größer. Es handelt sich auch nicht um Stoffe, die einer „Grundgesamtheit“ angehören (siehe Fußnote 5), sondern um verschiedene natürliche, organische Stoffe mit unterschiedlichen Zellstrukturen. Besonders die Korkplatten

<sup>6)</sup> Mit  $\lambda_{tr} = d + e\rho$  ergibt sich:

$$b = \frac{\Delta\lambda}{(d + e\rho) u_v \rho_w / \rho} = \frac{a}{\rho_w} \frac{1}{d/\rho + e};$$

$$c = \frac{\Delta\lambda}{(d + e\rho) u_v} = \frac{a}{d + e\rho}; \text{ Für } e = 0: b = \frac{a}{\rho_w d} \rho; c = a/d;$$



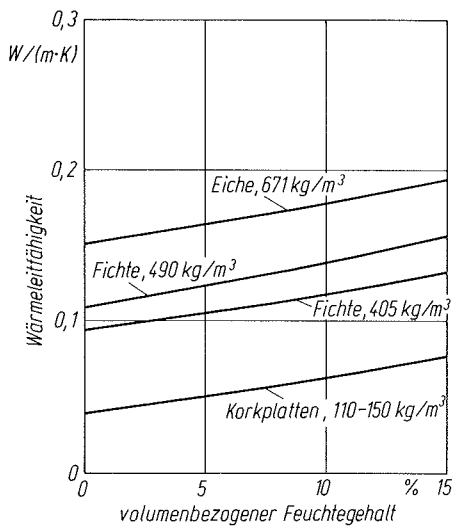


Bild 9. Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von organischen Bau- und Dämmstoffen vom volumenbezogenen Feuchtegehalt nach Meßwerten von *Jespersen* [9] und des Forschungsinstituts für Wärmeschutz e. V. München [12]

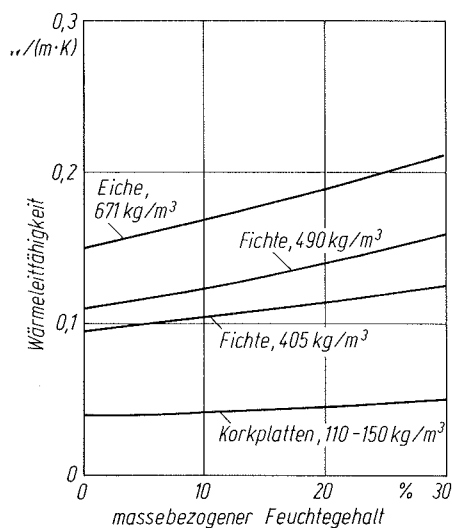


Bild 10. Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von organischen Bau- und Dämmstoffen vom massebezogenen Feuchtegehalt nach Meßwerten von *Jespersen* [9] und des Forschungsinstituts für Wärmeschutz e. V. München [12]

(nach Angabe von *Jespersen* Bau- und Kältekork mit Bitumenbindung) sind bezüglich der Stoffzusammensetzung nicht mit den Hölzern vergleichbar. Trotzdem ergibt sich für den Koeffizienten  $a$  eine wesentlich günstigere Abhängigkeit von der Rohdichte als für  $b$ , nämlich

$$a = 0,25 \cdot 10^{-2} \pm 8\% \frac{W/(m \cdot K)}{\% \text{ vol.-bez.}}$$

für den Rohdichtebereich von 100 bis 700 kg/m<sup>3</sup>. Ähnliche Werte hatte *Jespersen* [9] festgestellt, wobei er allerdings Kork und Hölzer trennte. Er schlug bereits die Berechnungsweise nach Gl. (4) für organische Stoffe vor, während er bei anorganischen Baustoffen in diese Formel ein additives Korrekturglied für den Einfluß der Wasserdampfdiffusion nach *Krischer* oder für eine Wärmebrückenwirkung des Wassers einfügte.

Für den Koeffizienten  $b$  errechnet sich folgender Wert:

$$b = 1,0 \pm 25\% \frac{\%}{\% \text{ massebez.}}$$

für den oben angegebenen Rohdichtebereich. Er deckt sich etwa mit dem bereits von *J. S. Cammerer* mehrfach genannten Zuschlagswert für organische Stoffe.

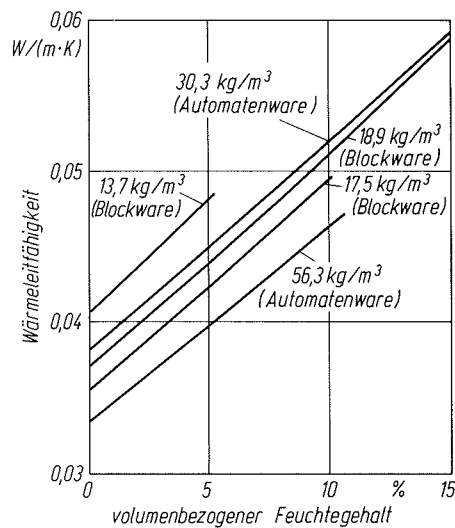


Bild 11. Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von Polystyrolpartikel-Hartschaumplatten vom volumenbezogenen Feuchtegehalt nach Messungen des Forschungsinstituts für Wärmeschutz e. V. München im Auftrage der Güteschutzgemeinschaft Hartschaum e. V. Frankfurt

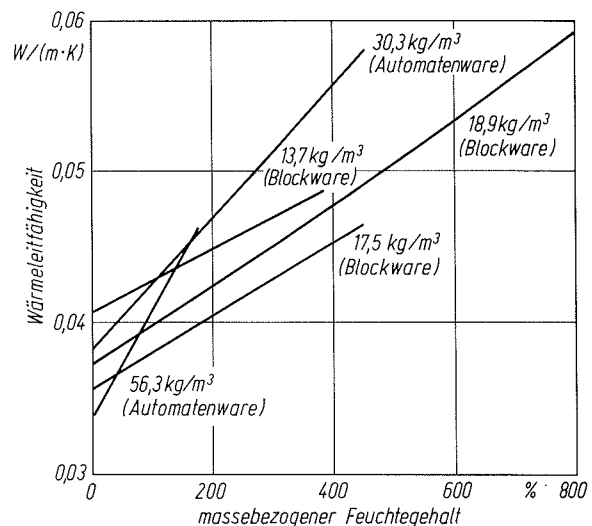


Bild 12. Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von Polystyrolpartikel-Hartschaumplatten vom massebezogenen Feuchtegehalt nach Messungen des Forschungsinstituts für Wärmeschutz e. V. München, im Auftrage der Güteschutzgemeinschaft Hartschaum e. V. Frankfurt

#### 4.4 Polystyrolpartikel-Hartschaum

Aufgrund der Auswertung von Messungen des Forschungsinstituts für Wärmeschutz über den Feuchteeinfluß auf die Wärmeleitfähigkeit von Polystyrolpartikel-Hartschaumplatten, die im Auftrage der Güteschutzgemeinschaft Hartschaum e. V., Frankfurt, durchgeführt wurden, konnte die bisher beschriebene Untersuchung auch an nichthygroskopischen Schaumkunststoffen auf Polystyrolbasis vorgenommen werden. Es wurden sowohl blockgeschäumte als auch formgeschäumte Platten<sup>7)</sup> erfaßt. Obwohl das Wasser bei diesem Dämmstoff sicher nicht durch Kapillar- oder Absorptionskräfte an den Feststoff gebunden ist, ergeben sich die gleichen Gesetzmäßigkeiten wie bei den hygroskopischen Stoffen. Bild 11 und 12 zeigen die Ergebnisse. Besonders stark ist die Rohdichteabhängigkeit des Feuchteinflusses in Abhängigkeit vom massebezogenen Feuchtegehalt ausgeprägt. Da die Hartschaumplatten in dem unter-

<sup>7)</sup> „Blockgeschäumte“ Platten werden in der erforderlichen Dicke aus einem größeren Block geschnitten (Blockware), während „formgeschäumte“ Platten in der gewünschten Dicke in einer entsprechend bemessenen Form hergestellt werden (Automatenware).

suchten Rohdichtebereich im Gegensatz zu den bisher betrachteten Stoffen aufgrund des Strahlungseinflusses [25] eine, allerdings nach diesen Meßwerten nur geringfügige, Abnahme der Wärmeleitfähigkeit mit steigender Rohdichte aufweisen, sind die Ergebnisse nach den theoretischen Hinweisen in Fußnote 6) besonders interessant. Für die Koeffizienten a, b und c wurden folgende Werte, die die gemachten Voraussagen bestätigen, ermittelt:

$$a = 0,14 \cdot 10^{-2} \pm 8\% \frac{W/(m \cdot K)}{\% \text{ vol.-bez.}}$$

$$b = 0,13 \pm 71\% \frac{\%}{\% \text{ massebez.}}$$

$$c = 3,8 \pm 0,6\% \frac{\%}{\% \text{ vol.-bez.}}$$

## 5 Folgerungen aus den Untersuchungsergebnissen

Bei den bisher untersuchten Stoffen zeigt sich sowohl bei hygroskopischen als auch bei nicht-hygroskopischen Bau- und Dämmstoffen, daß die absolute Zunahme der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit vom volumenbezogenen Feuchtegehalt für einen bestimmten Stoff von der Rohdichte nicht merklich beeinflusst wird<sup>8)</sup>. Daraus kann geschlossen werden, daß die wirksame Größe für den Feuchteeinfluß das im Stoffvolumen enthaltene Wasservolumen ist, unabhängig davon, ob nur das örtlich vorhandene oder physikalisch gebundene Wasser die Wärmeleitfähigkeit des porösen Stoffes erhöht, und ob eine zusätzliche Energieübertragung durch Enthalpieänderungen des Wassers bei Feuchtigkeitsbewegungen aufgrund des Temperaturgefälles den Wärmetransport vergrößert.

Eine andere Frage ist, welche von den möglichen, d.h. praktisch rohrichteunabhängigen Beschreibungsweisen des Feuchteinflusses – und damit welche Feuchteinfluss-Koeffizienten – sich bei den verschiedenen Bau- und Wärmedämmstoffen für die Praxis am besten eignen. Es genügt nicht, daß nur der gewählte Feuchteinfluss-Koeffizient von der Rohdichte des betreffenden Stoffes weitgehend unabhängig ist, sondern auch der maßgebende, im allgemeinen der sogenannte praktische Feuchtegehalt, der zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit im feuchten Zustand nach Gl. (4), (6) oder (7a) benötigt wird, soll diese Eigenschaft aufweisen. Heute haben ja im Gegensatz zu früheren Jahren, in denen J. S. Cammerer seine Vorschläge veröffentlichte, Außenwände aufgrund einer fortgeschrittenen Bautechnik durch einen zweckmäßigen Tauwasser- und Regenschutz praktisch nur mehr einen hygroskopischen Feuchtegehalt. Es ist daher der Auffassung von Künzel [21] zuzustimmen, daß bei bestimmten Baustoffen, wie z. B. bei Gasbeton, zur Berechnung des Feuchteinflusses die relative Zunahme der Wärmeleitfähigkeit je massebezogenen Feuchtegehalt, also der Koeffizient b, vorzuziehen ist, wenn sich die auf die Masse bezogene hygroskopische Feuchte im Gegensatz zur volumenbezogenen als praktisch rohrichteunabhängig erweist. Bei Mauerwerk aber, bei dem auch die Mörtelfugen oder integrierte Dämmstoffe von Einfluß und damit starke Streuun-

gen des praktischen Feuchtegehalts zu erwarten sind, muß diese Frage noch geprüft werden. Für organische Bau- oder Dämmstoffe scheint jedoch, im Gegensatz zur bisherigen Gepflogenheit, die Bezugnahme auf den volumenbezogenen Feuchtegehalt durch Anwendung der Koeffizienten a oder c richtiger zu sein.

## Literatur:

- [1] Raisch, E.: Die in der Wärmeschutztechnik erzielten Fortschritte und ihre wirtschaftliche Auswirkung. Feuerungstechn. 15 (1927), H. 28, S. 325–327.
- [2] Cammerer, J. S.: Der Feuchtegehalt organischer Baustoffe in der Praxis. Ges. Ing. 60 (1937), H. 12, S. 173–176.
- [3] DIN 4108 Teil 4: Wärmeschutz im Hochbau; Wärme- und feuchte-schutztechnische Kennwerte.
- [4] Cammerer, J. S.: Über den Zusammenhang zwischen Struktur und Wärmeleitfähigkeit bei Bau- und Isolierstoffen und dessen Beeinflussung durch einen Feuchtegehalt. Mitt. Forsch.-Heim f. Wärmeschutz (e. V.), München (1924), H. 4, S. 5–29.
- [5] Krischer, O., und Rohhalter, H.: Wärmeleitung und Dampfdiffusion in feuchten Gütern. VDI-Forsch.-H. 402 (1940).
- [6] Cammerer, J. S.: Stand der internationalen Forschung auf dem Gebiet des baulichen Wärmeschutzes. Die Bauwirtschaft (1949), H. 8.
- [7] DIN 52612 Teil 2: Wärmeschutztechnische Prüfungen; Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät; Weiterbehandlung der Meßwerte für die Anwendung im Bauwesen.
- [8] Cammerer, J. S.: Der Wärmeschutz der wichtigsten Vollsteinwände. Deutsche Bauzeitung 75 (1941), S. 789–795.
- [9] Jespersen, H. B.: Die Wärmeleitfähigkeiten feuchter Stoffe und ihre Messung. Ges.-Ing. 74 (1953), H. 11/12, S. 187–193.
- [10] Cammerer, W. F.: Der Einfluß der Feuchtigkeit auf die Wärmeleitfähigkeit von Bau- und Isolierstoffen nach dem gegenwärtigen Stand der Forschung. Kältetechnik 13 (1961), H. 12, S. 413–420.
- [11] Krischer, O.: Vergleichsversuche zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen mit Hilfe eines Kurzzeitverfahrens (stationäre Methode). Ber. a. d. Bauforschung (1962), H. 23, S. 57–64.
- [12] Cammerer, C. (J. S.), und Achtziger, J.: Schätzungsweise Bestimmung des Feuchteinflusses auf die Wärmeleitfähigkeit von Bau- und Isolierstoffen. Chemie-Ingenieur-Technik 36 (1964), S. 493–496.
- [13] Wagner, A.: Der Einfluß des Feuchtegehaltes auf die Wärmeleitfähigkeit von Gasbeton. Materialprüf. 13 (1971), H. 1, S. 14–16.
- [14] Neunast, A.: Der Feuchtegehalt von Wänden aus Bimsbaustoffen und sein Einfluß auf die Wärmeleitfähigkeit. Die Bauwirtschaft (1971), H. 18, S. 639–641.
- [15] Schüle, W., und Kupke, C.: Wärmeleitfähigkeit von Blähton-Betonen ohne und mit Quarzsandzusatz. Ber. a. d. Bauforschung (1972), H. 77, S. 15–24.
- [16] Cammerer, W. F., und Achtziger, J.: Rechenwerte der Wärmeleitfähigkeit von Stahlleichtbeton. Ber. a. d. Bauforschung (1972), H. 77, S. 25–29.
- [17] Schüle, W., Jenisch, R., und Greulich, H.: Wärmedämm-Messungen an feuchten Bauteilen. Ges.-Ing. 97 (1976), H. 1/2, S. 17–26.
- [18] Schüle, W., Giesecke, M., und Reichardt, I.: Untersuchungen über die Wärmeleitfähigkeit von Leichtbetonen ohne und mit Quarzsandzusatz. Ges.-Ing. 97 (1976), H. 12, S. 314–318.
- [19] Zehendner, H.: Einfluß von Feuchtigkeit auf die Wärmeleitfähigkeit von Schaumkunststoffen im Bereich von  $-30^{\circ}\text{C}$  bis  $+30^{\circ}\text{C}$ . Kunststoffe im Bau 14 (1979), H. 1.
- [20] Achtziger, J.: Kerndämmung von zweischaligem Mauerwerk; Einfluß des Wassergehalts und der Feuchtigkeitsverteilung auf die Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht. Bauphysik 7 (1985), H. 4, S. 121–124.
- [21] Künzel, H.: Bestimmt der volumen- oder der massebezogene Feuchtegehalt die Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen? Bauphysik 8 (1986), H. 2, S. 33–39.
- [22] Achtziger, J., und Cammerer, J.: Einfluß des Feuchtegehalts auf die Wärmeleitfähigkeit von Bau- und Dämmstoffen. Bericht d. Forschungsinstituts für Wärmeschutz e. V. München v. 20. 12. 1984.
- [23] Krischer, O., und Kast, W.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. 3. Aufl., Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1978.
- [24] DIN 4108 Teil 5: Wärmeschutz im Hochbau; Berechnungsverfahren.
- [25] Koglin, B.: Der Wärmetransport in Schaumstoffen. Diss. TU Berlin 1967.

<sup>8)</sup> Selbstverständlich können Herstellungsschwankungen und Einflüsse der experimentell bedingten Meßunsicherheit Abweichungen von dieser Gesetzmäßigkeit zur Folge haben.



