

Bestimmt der volumen- oder der massebezogene Feuchtegehalt die Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen?

**F 2021**

F 2021

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlußberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen -BMVBW- geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69  
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00  
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)



BERICHT AUS DEM

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR BAUPHYSIK

FB 5/1985

Bestimmt der volumen- oder der massebezogene Feuchtegehalt die Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen?

H. Künzel

Der Bundesminister für Wohnungsbau

*Abschluß Zwischenbericht  
zum Forschungs-Vorgang*

Az.: *BIV-800183-206* Eing.: *22.11.85*

Sammlung der  
Forschungsergebnisse  
des Referats

Nr. *2021*

# Fraunhofer-Institut für Bauphysik

## AUSSENSTELLE HOLZKIRCHEN

Amtlich anerkannte Prüfstelle für die Zulassung neuer Baustoffe, Bauteile und Bauarten

Institutsleitung: Prof. Dr. F. P. Mechel

FB-5/1985

Bestimmt der volumen- oder der massebezogene Feuchtegehalt  
die Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen?

Abschlußbericht zum Forschungsauftrag  
"Vergleichende Untersuchungen über masse- und volumenbezogene  
Feuchte in Baustoffen"

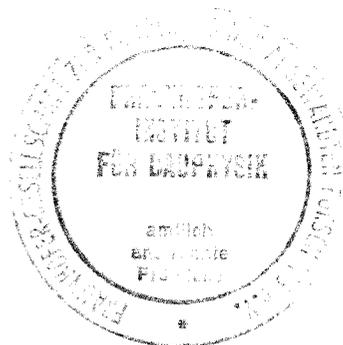
AZ.: B I 6 - 80 01 83 - 206

Untersuchungen durchgeführt im  
Fraunhofer-Institut für Bauphysik

unter Förderung des  
Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau

Der Bericht umfaßt  
Seiten Text  
14 Bilder

Holzkirchen, den 11. November 1985



Sachbearbeiter und Abteilungsleiter:

Dr.-Ing. H. Künzel

Institutsleiter:

Prof. Dr.-Ing. habil. K.A. Gertis

# Fraunhofer-Institut für Bauphysik

## AUSSENSTELLE HOLZKIRCHEN

Amtlich anerkannte Prüfstelle für die Zulassung neuer Baustoffe, Bauteile und Bauarten

Institutsleitung: Prof. Dr. F. P. Mechel

Bericht FB 5/1985

Bestimmt der volumen- oder der massebezogene Feuchtegehalt  
die Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen?

von

Dr.-Ing. H. Künzel

Fraunhofer-Institut für Bauphysik  
Institutsbereich Wärme/Klima  
(Leitung: Prof. Dr.-Ing. habil. K.A. Gertis)



Auszugsweise Veröffentlichung nur mit  
schriftlicher Genehmigung des Instituts  
für Bauphysik gestattet.

Bestimmt der volumen- oder der massebezogene Feuchtegehalt  
die Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen?

Inhaltsverzeichnis

<u>1. Einleitung und Problemstellung</u>	3
<u>2. Vergleich zwischen volumen- und massebezogenem Feuchtegehalt</u>	5
<u>3. Einfluß des Feuchtegehalts auf die Wärmeleitfähigkeit</u>	7
3.1 Homogene Baustoffe	7
3.2 Gelochte Baustoffe	11
<u>4. Zusammenfassung und Folgerungen</u>	11
<u>Literatur</u>	13

Bestimmt der volumen- oder der massebezogene Feuchtegehalt  
die Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen?

1. Einleitung und Problemstellung

Die gravimetrische Bestimmung des Feuchtegehaltes von Baustoffen erfolgt durch Trocknen einer abgewogenen Probenmenge und Ermitteln des Gewichtsverlustes bei einer festgelegten Trocknungstemperatur. Die Angabe des Feuchtegehalts kann in Prozenten bezogen auf die Masse oder bezogen auf das Volumen erfolgen (Masse-%:  $u_m$ , Volum-%:  $u_v$ ). Zwischen beiden Wertangaben und der Rohdichte  $\rho$  [ $\text{kg/m}^3$ ] des Stoffes besteht die Beziehung

$$u_v = \frac{\rho}{\rho_w} u_m$$

mit  $\rho_w$ : Rohdichte des Wassers ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ).

Die beiden Wertangaben unterscheiden sich somit für einen bestimmten Baustoff nur durch den konstanten Quotienten  $\rho/\rho_w$  und es erscheint daher im Prinzip gleichgültig, wie der Feuchtegehalt angegeben wird.

Am einfachsten zu ermitteln ist der massebezogene Feuchtegehalt, da er unmittelbar aus der gravimetrischen Auswertung zu gewinnen ist. Zur Bestimmung des volumenbezogenen Feuchtegehalts muß man die Rohdichte des Materials kennen oder das Volumen der entnommenen Materialprobe messen. Letzteres ist oft nicht einfach durchzuführen, z.B. wenn die Probenentnahme durch Herausstemmen oder Herausbohren aus einem Bauteil erfolgt.

Bei einem Vergleich des Feuchtegehalts verschiedener Baustoffe untereinander kann jedoch der massebezogene Wert zu einer falschen Bewertung führen, wenn man nicht gleichzeitig die Rohdichte in Betracht zieht. Dies wird aus der folgenden Gegenüberstellung unterschiedlicher massebezogener Feuchtegehalte von drei Stoffen deutlich, die aber auf das Volumen bezogen gleiche Feuchtegehalte aufweisen.

Rohdichte kg/m <sup>3</sup>	Feuchtegehalt	
	massebezogen u <sub>m</sub> %	volumenbezogen u <sub>v</sub> %
25 (z.B. Hartschaum)	200	5
500 (z.B. Gasbeton)	10	5
2000 (z.B. Kalksandvollstein)	2,5	5

Im Bereich der Trocknungstechnik interessiert vor allem die Wassermenge, die pro Volumeneinheit des Trocknungsgutes vorhanden ist und abgeführt werden muß. Aus diesen Gründen hat sich für die Bewertung des Feuchtegehaltes von hygroskopischen, porösen Baustoffen der volumenbezogene Wert durchgesetzt, während aus praktischen Erwägungen für Schaumkunststoffe, Faserdämmstoffe und Holz der massebezogene Wert üblich ist.

Mit der Einführung von Hohlblock- und Lochsteinen trat wieder in anderer Weise das Problem der Feuchteangabe auf: Man muß in diesem Fall zwischen der Steinroh-dichte - bezogen auf das Volumen des Steins einschließlich Löcher oder Hohlkammern - unterscheiden und der Scherbenroh-dichte - bezogen auf das Volumen des massiven Materials, allein\*. Den Feuchtegehalt kann man dann auf die Masse oder auf das Volumen des Steins oder des Scherbens beziehen. Es gibt also dann drei verschiedene Möglichkeiten, den Feuchtegehalt darzustellen.

Neuere Überlegungen führten dazu, daß die Gleichgewichtsfeuchte oder der praktische Feuchtegehalt von porösen Stoffen physikalisch richtiger durch den auf die Masse bezogenen Wert angegeben wird als durch den auf das Volumen bezogene. So wies Hums darauf hin, daß die durch Sorption ermittelte Gleichgewichtsfeuchte von Gasbeton bei Darstellung in Masse-% kaum eine Abhängigkeit von der Rohdichte erkennen läßt, während sich bei Darstellung in Vol-% eine deutliche Zunahme mit der Rohdichte ergibt [1]. Auch die Angabe der praktischen Feuchte in Masse-% führt nach Hums zu einheitlichen Zuschlagswerten im Gegensatz zu der jetzigen Modalität bei der Ermittlung des Rechenwertes auf der Basis eines volumenbezogenen Wertes [2]. Bei der Darstellung von Trocknungsverläufen von Wärmedämmputzen mit Rohdichten zwischen ca. 200 und 600 kg/m<sup>3</sup> erwiesen sich ebenfalls die massebezogenen Werte als zweckmäßiger [3].

\*Der Begriff "Scherben" gilt streng genommen nur für das massive Ziegelmaterial. Im folgenden wird dieser Begriff aber auch auf andere Lochsteine wie z.B. aus Leichtbeton oder Kalksandstein übertragen.

Im folgenden werden Überlegungen und Messungen hinsichtlich eines Vergleiches zwischen volumen- und massebezogenem Feuchtegehalt von porösen Stoffen dargestellt. Des weiteren wird der Einfluß des Feuchtegehaltes auf den  $\lambda$ -Zuschlag zur Ermittlung des Rechenwertes der Wärmeleitfähigkeit untersucht.

## 2. Vergleich zwischen volumen- und massebezogenem Feuchtegehalt

Betrachtet werden zwei Materialien unterschiedlicher Rohdichte, die aber aus dem gleichen Feststoff bestehen hinsichtlich der Struktur der Kapillaren und Mikroporen. Die unterschiedliche Rohdichte kommt durch eine unterschiedliche Anzahl und Größe von Makroporen zustande, die so groß sind, daß sich in ihnen kein Wasser infolge Sorption einlagert. Ein gutes Beispiel hierfür ist Gasbeton. Die sichtbaren, kugelförmigen Poren bestimmen die Rohdichte, sind aber im Bereich der hygroskopischen Feuchte (Gleichgewichtsfeuchte, praktischer Feuchtegehalt) ohne Einfluß auf den Wassergehalt. Diese Feuchte wird ausschließlich durch die Porenstruktur des Feststoffes bestimmt (Mikroporen). Werden nun die zwei betrachteten (idealisierten) Materialien aus gleichem Feststoff aber unterschiedlichem Gesamtporenvolumen und damit unterschiedlicher Rohdichte gleichen Umgebungsbedingungen hinsichtlich der relativen Luftfeuchte ausgesetzt, dann stellt sich im Feststoff durch Wasserdampf-Absorption ein gleicher Feuchtegehalt in beiden Fällen ein, also ein gleicher Feuchtegehalt, bezogen auf die Masse der beiden Materialien. Bezogen auf das Volumen ist aber der Feuchtegehalt des leichteren Materials mit einem größeren Volumen von Makroporen, die nicht mit Wasser gefüllt sind, kleiner als der des kompakteren Materials.

Dieser Sachverhalt wird schematisch in Bild 1 dargestellt und erläutert. Bei den beiden idealisierten Materialien mit unterschiedlichem Volumenanteil der Makroporen kann man sich Gasbetone unterschiedlicher Rohdichte vorstellen, aber auch Hochlochziegel mit unterschiedlichem Lochbild. Wenn in solchen Fällen die Struktur des Feststoffes oder Scherbens bei unterschiedlicher Rohdichte gleich ist, dann ist auch der massebezogene Feuchtegehalt gleich. Nun können aber bei der Herstellung von Baustoffen unterschiedlicher Steinrohddichte aus gleichen Ausgangsmaterialien produktionsbedingte Einflüsse auftreten, welche sich auf die Rohdichte und Struktur des Feststoffes oder Scherbens auswirken. In diesen Fällen ist dann bei gleichen Umgebungsbedingungen keine Konstanz des massebezogenen Feuchtegehalts unabhängig von der Steinrohddichte zu erwarten.

Einige Beispiele über die Gleichgewichtsfeuchte von Baustoffen verschiedener Art bezogen auf das Volumen bzw. die Masse in Abhängigkeit von der Rohdichte enthalten die Bilder 2 bis 4. Man erkennt daraus, daß der massebezogene Feuchtegehalt keine oder nur eine geringe Abhängigkeit von der Rohdichte aufweist, während der volumenbezogene Feuchtegehalt stark rohddichteabhängig ist. Die Tatsache, daß die Feuchtigkeit nicht im Volumen, sondern in der Masse des Stoffes gebunden ist, wird daher durch die Angabe der Stofffeuchte bezogen auf die Masse physikalisch richtig dargestellt und beschrieben.

Man kann aus diesen Überlegungen sogar die weitergehende Aussage machen, daß Stoffe gleicher Herstellungsart, die aber bei gleichen Umgebungsbedingungen deutlich unterschiedliche massebezogene Feuchtegehalte aufweisen, nicht einem einheitlichen Stoffkollektiv zuzuordnen sind. Die bei festgelegten Randbedingungen ermittelte massebezogene Sorptionsfeuchte ist ein Bewertungskriterium für das feuchtetechnische Verhalten eines hygroskopischen Baustoffes.

Da - wie früher gezeigt wurde [4] [5] - zwischen dem durch Sorption sich einstellenden Gleichgewichtsfeuchtegehalt und dem praktischen Feuchtegehalt\* von Baustoffen eine direkte Beziehung besteht, wird auch der praktische Feuchtegehalt physikalisch richtiger in Masse-% angegeben. Für Gasbeton, Ziegel- und Bimsbeton sind die für die Ermittlung des praktischen Feuchtegehaltes herangezogenen Meßwerte volumen- und massebezogen in Abhängigkeit von der Rohdichte in den Bildern 5 bis 7 dargestellt\*\*. Bei den Messungen an Gasbeton- und Ziegelwänden bestätigt es sich, daß die massebezogenen Werte eine geringere Rohdichtenabhängigkeit haben als die volumenbezogenen. Bei Leichtbeton mit haufwerkporigem Gefüge mit porigen Zuschlägen nach DIN 4226, Teil 4 sind hingegen die Ausgleichsgeraden für  $u_m$  und  $u_v$  etwa in gleichem Maße - aber gegenläufig - abhängig von der Betonrohddichte. Hieraus ist zu schließen, daß die betrachteten Leichtbetone kein einheitliches Kollektiv darstellen. Es wäre ggf. nach Zuschlagsart zu differenzieren (Naturbims, Blähton u.a.).

---

\* Unter praktischem Feuchtegehalt versteht man den Feuchtegehalt, der bei der Untersuchung genügend ausgetrockneter Bauten, die zum dauernden Aufenthalt von Menschen dienen, in 90 % aller Fälle nicht überschritten wurde.

\*\* Die Auswertung - Zusammenstellen der Meßwerte und Ermitteln von Ausgleichsgeraden - erfolgte durch das Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V., München.

### 3. Einfluß des Feuchtegehalts auf die Wärmeleitfähigkeit

Über den Einfluß der Feuchte auf die Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen liegen sehr viele Untersuchungen vor, aber wenig systematische. Dies zeigt u.a. eine kürzlich vorgelegte Dokumentation ohne Wertung des Forschungsinstituts für Wärmeschutz [6]. Grundsätzliche Überlegungen über den Wärmetransport in Stoffen wurden z.B. von Krischer vorgenommen, mit spezieller Zielrichtung auf die Trocknungstechnik [7]. In diesem Bereich ist der Wärmetransport durch Dampfdiffusion von erheblichem Einfluß. Dieser Einfluß ist bei der Bewertung von Baustoffen für die Anwendung im Hochbau gering, wie bereits früher dargelegt wurde [5]. Zumindest gilt dies für poröse, hygroskopische Baustoffe nach erfolgter Austrocknung. Gezielte Untersuchungen und grundsätzliche Überlegungen fehlen für diesen wichtigen Anwendungsbereich. Anregungen hierzu sollen die folgenden Auswertungen und Überlegungen liefern, die für homogene und gelochte Baustoffe vorgenommen werden und bei denen ein Wärmetransport durch Wasserdampfdiffusion vernachlässigt wird. Als homogen in diesem Sinne sind Vollsteine bzw. das Scherbenmaterial von Baustoffen zu verstehen.

#### 3.1 Homogene Baustoffe

Grundlage der folgenden Darlegungen sind Meßergebnisse über die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von Gasbeton unterschiedlicher Rohdichte in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt. Die Untersuchungen wurden im Rahmen einer Diplomarbeit im Hauptlabor der Ytong AG durchgeführt [8]. Die Ergebnisse aus dieser Arbeit sind in Bild 8 enthalten. Die Darstellungen in den folgenden drei Bildern sind aus den Ergebnissen in Bild 8 abgeleitet.

In Bild 9 ist die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Rohdichte der geprüften Gasbetonarten dargestellt. Der lineare Zusammenhang wurde auch bei vielen anderen mineralischen Stoffen festgestellt.

Die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom volumenbezogenen Feuchtegehalt ist nochmals in Bild 10 - ohne Meßpunkte - aufgezeichnet (vergl. Bild 8); außerdem enthält dieses Bild die prozentuale Zunahme der Wärmeleitfähigkeit pro Vol-% Feuchtegehalt in Abhängigkeit von der Rohdichte. Die entsprechenden Darstellungen aber mit massebezogenen Feuchteangaben zeigt Bild 11. Die Unterschiede dieser beiden Darstellungen sind offensichtlich: Bei Bezug auf das Volumen ist der An-

stieg der Wärmeleitfähigkeit mit der Feuchte (absolute Zunahme) unabhängig von der Rohdichte, aber die relative Zunahme nimmt mit der Rohdichte ab. Bei Bezug auf die Masse zeigt sich die relative  $\lambda$ -Zunahme unabhängig von der Rohdichte aber die absolute Zunahme ist bei den verschiedenen Rohdichten unterschiedlich.

Im folgenden wird eine numerische Analyse unter Einbeziehung plausibler Hypothesen der in den Bildern 8-11 enthaltenen Zusammenhänge vorgenommen.

Die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des trockenen Gasbetons  $\lambda_{tr}$  von der Rohdichte wird durch folgende Gleichung beschrieben (Ausgleichsgerade durch die Meßpunkte Bild 9):

$$\lambda_{tr} = 0,024 + 0,185 \cdot 10^{-3} \rho$$

Für die Rohdichte  $\rho=0$  ergibt sich hieraus die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{tr}=0,024$  W/mK. Dies entspricht ziemlich genau der Wärmeleitfähigkeit ruhender Luft bei 10 °C, die in der Literatur mit  $\lambda = 0,025$  W/mK angegeben wird [9]. Somit kann die Wärmeleitfähigkeit eines trockenen Materials in Abhängigkeit von der Rohdichte allgemein durch die Beziehung beschrieben werden:

$$\lambda_{tr} = \lambda_0 + a \rho \quad (1)$$

mit  $\lambda_0$ : Wärmeleitfähigkeit der Luft oder des im Material befindlichen Zellgases  
 $a$ : stoffspezifischer Koeffizient, der die Wärmeleiteigenschaften des Stoffes beschreibt

Ist der Stoff feucht, dann erhöht sich dessen Rohdichte, aber auch die Wärmeleiteigenschaften des Stoffes, sofern dieser nicht die gleiche Wärmeleitfähigkeit wie Wasser hat. Es ist naheliegend, die feuchtebedingte Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit auf den massebezogenen Feuchtegehalt zu beziehen, so daß man den Ansatz machen kann:

$$\lambda_{um} = \lambda_{tr} + a' u_m \quad (2)$$

mit  $\lambda_{um}$ : Wärmeleitfähigkeit des Stoffes beim massebezogenen Feuchtegehalt  $u_m$   
 $a'$ : stoffspezifischer Koeffizient, der die feuchtebedingte Zunahme der Wärmeleitfähigkeit beschreibt.

Nach Bild 11 ist die auf 1 Masse-% bezogene relative Zunahme der Wärmeleitfähigkeit unabhängig von der Rohdichte. Für den geprüften Gasbeton gilt

$$\frac{\lambda_{um} - \lambda_{tr}}{\lambda_{tr} \cdot u_m} = 0,037 = b \quad (3)$$

mit b: stoffspezifischer konstanter Faktor, der die feuchtebedingte relative Zunahme der Wärmeleitfähigkeit beschreibt.

Aus den Gleichungen 2 und 3 ergibt sich

$$a' = 0,037 \lambda_{tr}$$

oder allgemein, unter Berücksichtigung von Gleichung 1:

$$a' = b \lambda_{tr} = b (\lambda_0 + a \rho) \quad (4)$$

Aus Gleichung 4 folgt, daß die feuchtebedingte Zunahme der Wärmeleitfähigkeit nicht konstant ist, sondern mit  $\lambda_{tr}$  bzw. der Rohdichte zunimmt

Die Wärmeleitfähigkeit des geprüften Gasbetons errechnet sich somit nach der Formel

$$\lambda_{um} = (\lambda_0 + a \rho) (1 + b u_m) \quad (5)$$

oder

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

mit

$$\lambda_0 = 0,025 \text{ W/mK}$$

$$a = 0,185 \cdot 10^{-3} \text{ (Wm}^2\text{)/(K kg)}$$

$$b = 0,037 \text{ (-)}$$

Drückt man den Feuchtegehalt in Vol-% aus, dann geht Gleichung (6) über in

$$\lambda_{uv} = \lambda_{tr} \left( 1 + b \frac{1000}{\rho} u_v \right) \quad (7)$$

In der folgenden Tabelle sind nach Gleichung 5 berechnete Werte der Wärmeleitfähigkeit für 0 % und 6,5 Masse-% Feuchte den entsprechenden Meßwerten gegenübergestellt.

Rohdichte $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]			
	$u_m = 0 \%$		$u_m = 6,5 \%$	
	gemessen	berechnet	gemessen	berechnet
330	0,084	0,084	0,104	0,107
430	0,103	0,105	0,128	0,130
530	0,124	0,123	0,153	0,153
710	0,154	0,156	0,191	0,194

Aus der guten Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung ist zu schließen, daß die einfachen linearen Beziehungen physikalisch zutreffen. Die daraus abzuleitende Gesetzmäßigkeiten können verallgemeinert werden. Dies bedeutet insbesondere, daß im hygroskopischen Feuchtebereich und bei 10 °C Mitteltemperatur der Wärmetransport praktisch ausschließlich durch Wärmeleitung erfolgt. Bei einem merklichen zusätzlichen Transport durch Dampfdiffusion müßte die Wärmeleitfähigkeit mit zunehmender Feuchte und abnehmendem Diffusionswiderstand (= kleinere Rohdichte) zunehmen. Dies ist nach Bild 8 nicht erkennbar, weshalb der rechnerische Ansatz (2) gewählt werden konnte.

Für anorganische Baustoffe ist der praktische Feuchtegehalt in DIN 4108, Teil 4 in Vol-% angegeben. Für Gasbeton beträgt dieser Wert 3,5 Vol-%. Eine Auswertung der massebezogenen Werte führt zu 6,5 Masse-%. Die feuchtebedingte prozentuale Zunahme der Wärmeleitfähigkeit für den volumen- bzw. massebezogenen praktischen Feuchtegehalt gemäß den Gleichungen 6 bzw. 7 führt zu den in Bild 12 dargestellten Zusammenhängen im Vergleich zu dem in DIN 52 612 festgelegten Zuschlag für Gasbeton. Der auf einem praktischen Feuchtegehalt von 3,5 Vol-% basierende Zuschlag nach DIN 52 612 ist physikalisch falsch und für kleine Rohdichten ungerechtfertigt hoch. Richtig und einfacher ist ein von der Rohdichte unabhängiger Zuschlag, bezogen auf  $u_m$ . Die unterschiedliche Abhängigkeit der  $\lambda$ -Zunahme bei dem betrachteten Gasbeton bei Bezug auf  $u_v$  bzw.  $u_m$  wird durch viele Messungen an anderen Gasbetonen bestätigt, wie aus Bild 13 zu entnehmen ist.

### 3.2 Gelochte Baustoffe

Bei Lochsteinen oder Hohlblocksteinen unterscheidet man zwischen der Scherben- bzw. Betonrohddichte und der Steinrohddichte. Die Steinrohddichte bezieht sich auf das Gesamtvolumen eines Steines einschließlich der abmeßbaren Hohlräume im Stein. Zur Ermittlung der Scherbenrohddichte ist das Volumen der Hohlräume abzuziehen.

Bei homogenen Baustoffen ist ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen der Wärmeleitfähigkeit und der Steinrohddichte gegeben (siehe Bild 9) und auch verständlich. Bei gelochten Steinen ist ein Zusammenhang zwischen der Wärmeleitfähigkeit und der Steinrohddichte bzw. auch der Scherbenrohddichte zu erwarten, sofern die Lochanordnung ähnlich ist und die Wärmeleitung hauptsächlich durch die Wärmeleitfähigkeiten des Scherbenmaterials bestimmt wird. Dies ist aber bei vielen der heutigen gelochten Baustoffen mit ausgeklügelten Lochanordnungen nicht mehr der Fall. Bei Hochlochziegeln beträgt der (abmeßbare) Hohlraumanteil bis zu 50 % des Steinvolumens. Damit gewinnen Anordnung und Geometrie der Hohlräume einen entscheidenden Einfluß auf die Wärmeleiteigenschaften des Steines. Das gleiche gilt für die Zunahme der Wärmeleitfähigkeit bei erhöhter Feuchte. Bei Vernachlässigung eines Wärmetransportes durch Diffusion bleibt der Wärmewiderstand der Hohlräume unverändert; lediglich die Wärmeleitfähigkeit des Scherbens erhöht sich, wobei dessen massebezogener Feuchtegehalt bestimmend ist.

Die feuchtebedingte Zunahme der Wärmeleitfähigkeit von gelochten Steinen ist daher von den Eigenschaften des Scherbens, vom Hohlraumanteil und von der Geometrie der Hohlräume abhängig, wie in Bild 14 schematisch dargestellt ist. Eine eindeutige Zuordnung zwischen der Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit und der Materialfeuchte ist in diesem Fall nicht zu erwarten.

### 4. Zusammenfassung und Folgerungen

Der Feuchtegehalt von Baustoffen kann in Prozenten bezogen auf das Volumen oder auf die Masse angegeben werden. Welche Art der Angabe richtig bzw. zweckmäßig ist, wird in der vorliegenden Arbeit behandelt. Dies erfolgt auf Grund von Messungen der Sorptionsfeuchte verschiedener Stoffe und der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Rohddichte und dem Feuchtegehalt. Die Ergebnisse der Untersuchungen lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

1. Bei porösen, hygroskopischen Stoffen stellt sich nach Abgabe erhöhter Bau- oder Herstellungsfeuchte ein Feuchtigkeitszustand ein, der im Bereich der hygroskopischen Feuchte oder nur wenig darüber liegt. Die Feuchtigkeit ist in diesem Falle im Feststoff physikalisch gebunden, nicht in sichtbaren Poren oder Hohlräumen. Daher beschreibt der auf die Stoffmasse bezogene Feuchtegehalt den Feuchtezustand insbesondere hinsichtlich der physikalischen Auswirkungen - wie Wärmeleitung oder Formänderungen - richtig.

Für einen anschaulichen Vergleich des Feuchtigkeitszustandes von Baustoffen unterschiedlicher Art ist hingegen der auf das Volumen bezogene Feuchtegehalt besser geeignet.

2. Bei gleichen Umgebungsbedingungen (Temperatur, Luftfeuchte) stellen sich in Materialien aus dem gleichen Feststoff (Ausgangsstoff) aber unterschiedlichen Rohdichten gleiche massebezogene Feuchtegehalte ein. Merklich unterschiedliche massebezogene Feuchtegehalte deuten auf unterschiedliche Ausgangsstoffe hin.
3. Bei den in Außenbauteilen von Gebäuden unter winterlichen Bedingungen auftretenden Temperaturen und Feuchtegehalten findet der Wärmetransport in porösen hygroskopischen Stoffen im wesentlichen durch Wärmeleitung statt. Ein Wärmetransport durch Wasserdampfdiffusion kann vernachlässigt werden.

Bei homogenen Baustoffen nimmt die Wärmeleitfähigkeit im trockenen Zustand proportional mit der Rohdichte zu. Die feuchtebedingte prozentuale Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit - bezogen auf  $\lambda_{tr}$  - ist unabhängig von der Rohdichte proportional dem massebezogenen Feuchtegehalt. Für die absolute Zunahme ist das Produkt aus der Rohdichte und dem massebezogenen Feuchtegehalt maßgebend; sie ist also bei leichten Baustoffen kleiner als bei schweren Stoffen der gleichen Art. Bei Loch- und Kammersteinen ist die Geometrie der Hohlräume für die Wärmeleitfähigkeit im trockenen und feuchten Zustand mitbestimmend.

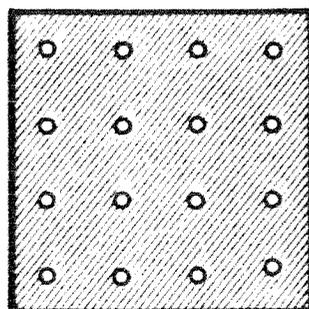
Bei den heutigen Mauersteinen mit kleiner Steinrohichte hat somit die Feuchte einen geringeren Einfluß auf die Wärmeleitfähigkeit als bei den früheren massiven Steinen. Andererseits kann die handwerkliche Ausführung bei vielen heutigen Bauarten einen merklichen Einfluß auf die Dämmeigenschaften haben. Weitere Untersuchungen und Überlegungen sind daher erforderlich, um eine angemessene praktische Bewertung des Wärmeschutzes von Bauteilen vornehmen zu können.

Literaturhinweise

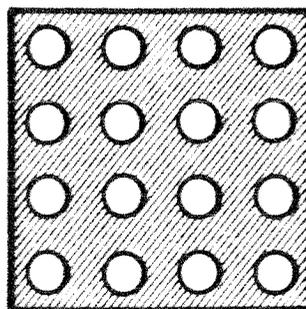
- [ 1] Hums, D.: Ytong Laborbericht TH-AWL vom 12.1.1981.
- [ 2] Hums, D.: Relation between Humidity and Heat Conductivity in Aerated Concrete. In Tagungsbericht Autoclaved aerated concrete, Moisture and Properties 1983.
- [ 3] Künzel, H.: Bauphysikalische Untersuchungen an Wärmedämmputzen. Bericht des FhG-Instituts für Bauphysik B Ho 5/83.
- [ 4] Künzel, H.: Zusammenhang zwischen der Feuchtigkeit von Außenbauteilen in der Praxis und den Sorptionseigenschaften der Baustoffe. Bauphysik 4 (1982) H. 3 S. 101-107.
- [ 5] Künzel, H.: Zur Frage des Zuschlags auf Meßwerte der Wärmeleitfähigkeit zur Ermittlung des Wärmeschutzes von Baukonstruktionen. WKSB Sonderausgabe Mai 1985
- [ 6] Achtziger, J. und Cammerer, J.: Einfluß des Feuchtegehalts auf die Wärmeleitfähigkeit von Bau- und Dämmstoffen. Bericht des Forschungsinstituts für Wärmeschutz e.V. München vom 20.12.1984.
- [ 7] Krischer, O.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Springer-Verlag 1963.
- [ 8] Akgün, H.: Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit und Festigkeit von Porosität und Feuchte von Calcium-Silicat-Hydrat-Produkten. Diplomarbeit Universität Erlangen Nürnberg 1982.
- [ 9] Gröber, Erk, Grigull: Die Grundgesetze der Wärmeübertragung. Springer-Verlag 1963.

## Vergleich Volum % - Masse %

1



2



Bei gleichem Feuchtegehalt des Feststoffes  
in beiden Fällen :

$$U_{m1} = U_{m2}$$

größere Masse,  
größere Wassermenge

kleinere Masse,  
kleinere Wassermenge

Aber bezogen auf das Steinvolumen:

$$U_{v1} > U_{v2}$$

großes Volumen  
große Wassermenge

gleiches Volumen  
kleinere Wassermenge

Bild 1: Schematische Darstellung zum Vergleich

Vol-% - Masse-%

Die Feuchtigkeit ist im Feststoffgerüst (Scherben) gebunden, nicht in den sichtbaren Poren oder Hohlräumen.

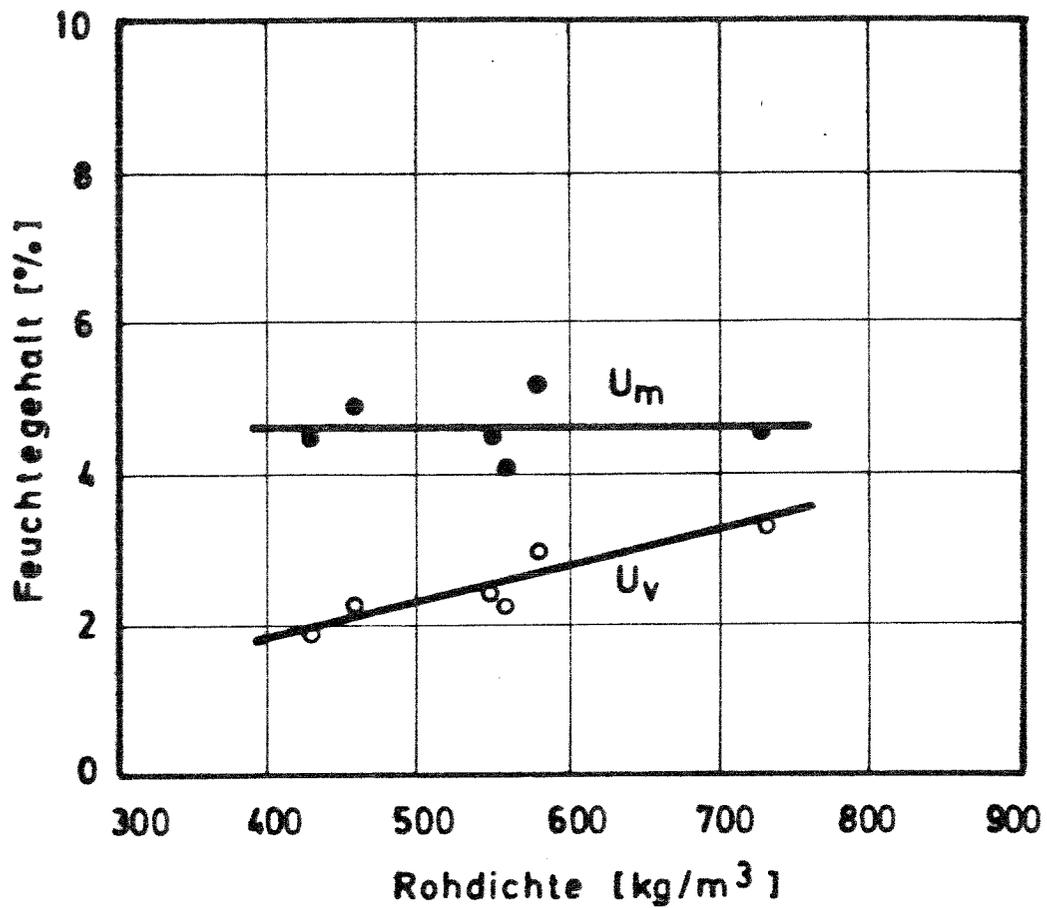


Bild 2: Sorptionsfeuchte (Gleichgewichtsfeuchte) von Gasbeton bei 20 °C und 80 % r.F., bezogen auf das Volumen ( $u_v$ ) bzw. die Masse ( $u_m$ ) des Materials in Abhängigkeit von der Rohdichte.

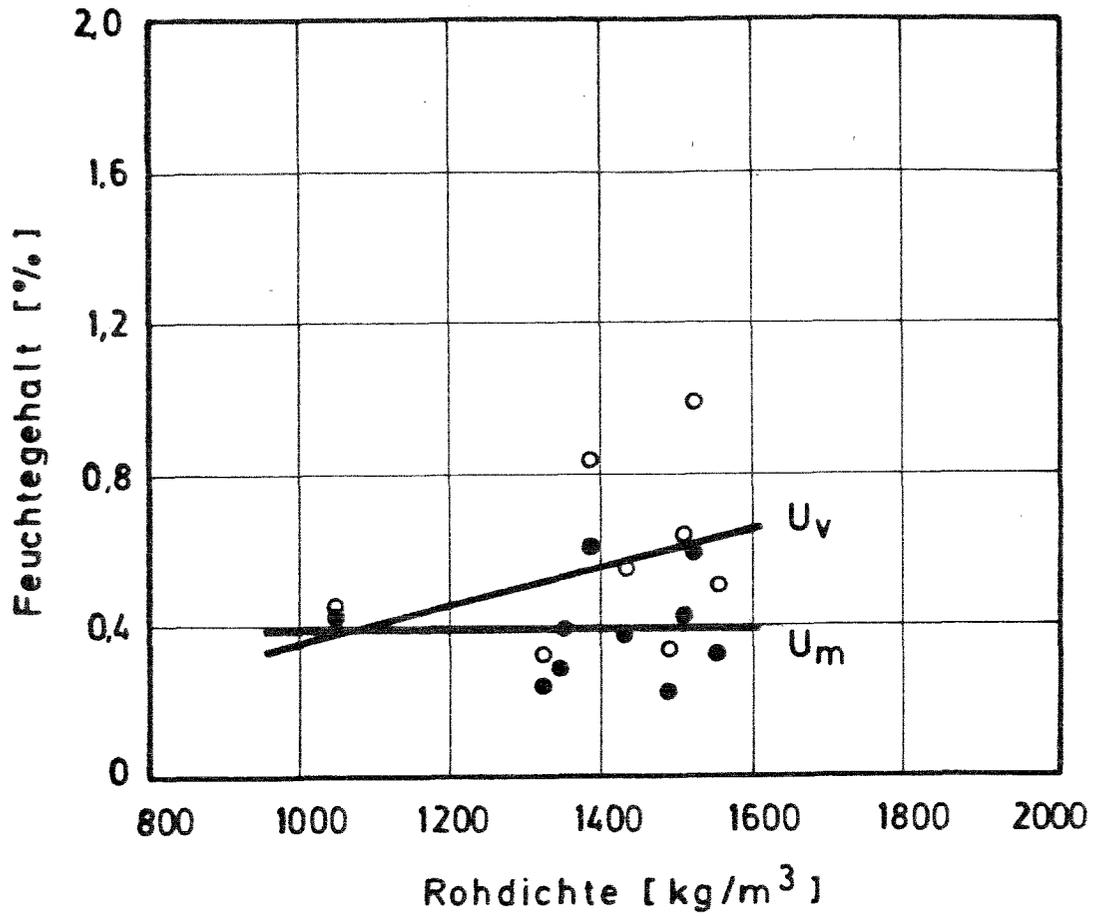


Bild 3: Sorptionsfeuchte (Gleichgewichtsfeuchte) von Ziegelscherben bei 20 °C und 80 % r.F., bezogen auf das Volumen ( $u_v$ ) bzw. die Masse ( $u_m$ ) des Materials in Abhängigkeit von der Scherbenrohddichte.

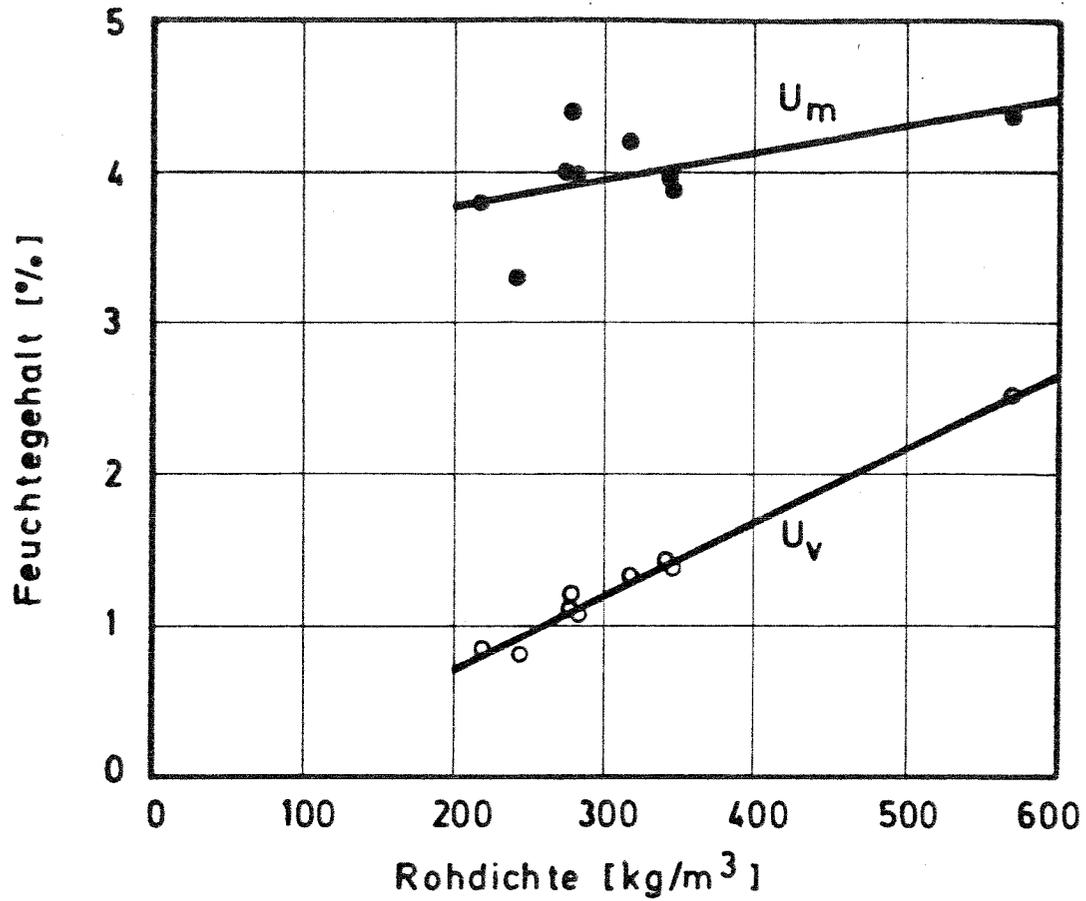


Bild 4: Sorptionsfeuchte (Gleichgewichtsfeuchte) von EPS-Wärmedämmputzen bei 20 °C und 80 % r.F., bezogen auf das Volumen ( $u_v$ ) bzw. die Masse ( $u_m$ ) des Materials in Abhängigkeit von der Rohdichte.

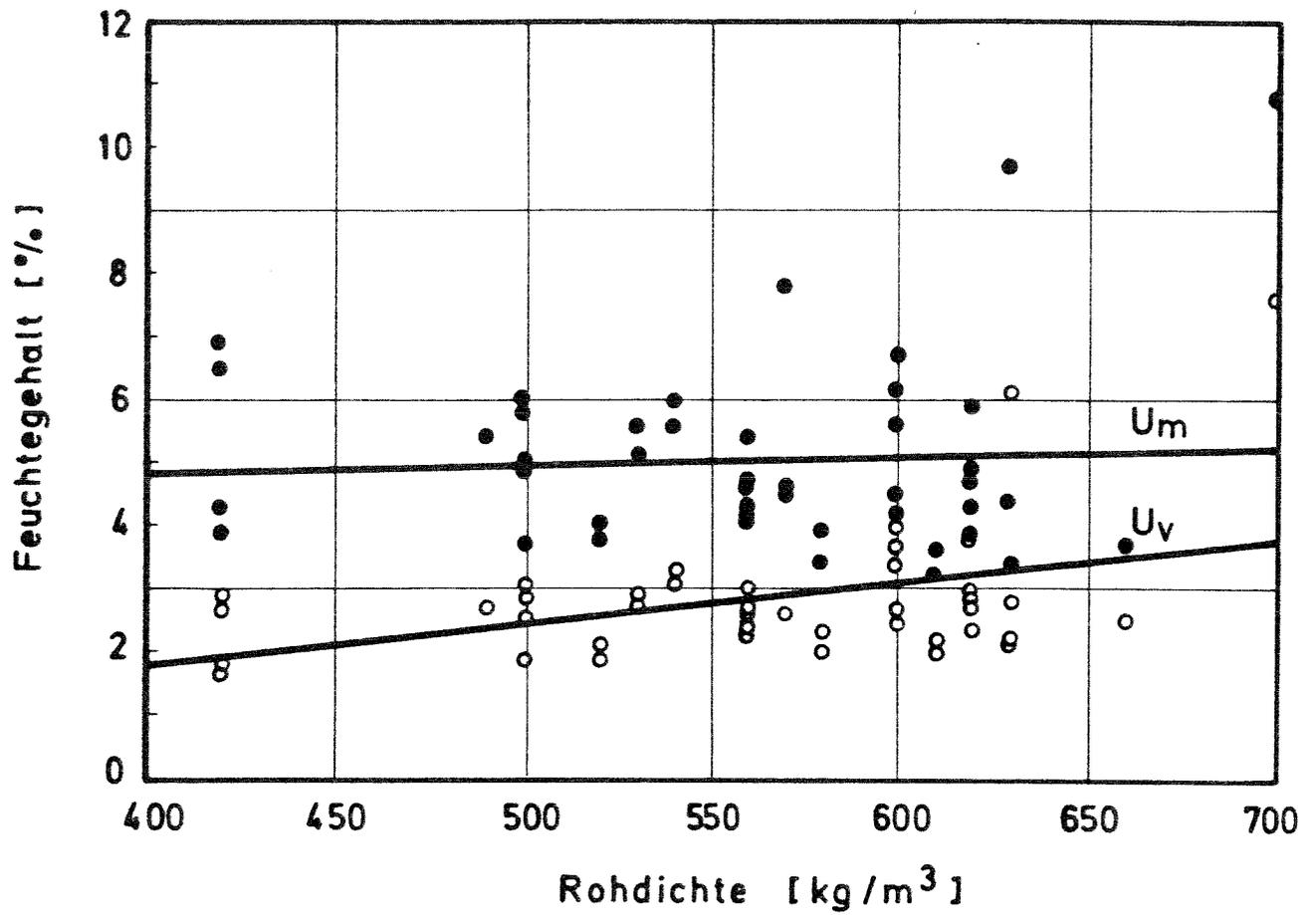


Bild 5: Feuchte von Gasbetonwänden in der Praxis, bezogen auf das Volumen ( $u_v$ ) bzw. die Masse ( $u_m$ ) des Materials in Abhängigkeit von der Gasbetonrohddichte (Meßwerte zur Ermittlung des praktischen Feuchtegehalts).

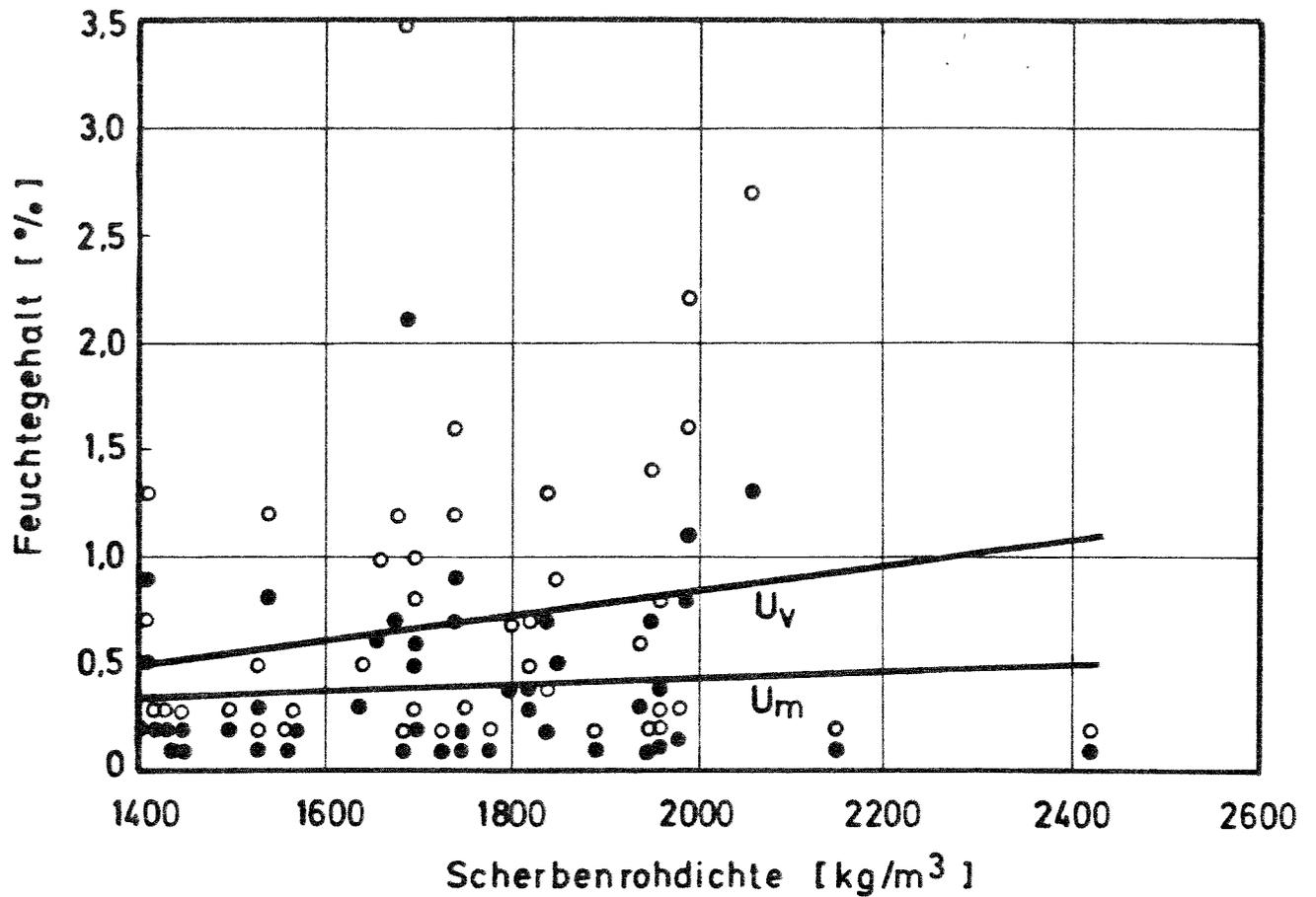


Bild 6: Feuchte von Ziegelaußenwänden in der Praxis, bezogen auf das Volumen ( $u_v$ ) bzw. die Masse ( $u_m$ ) des Ziegelscherbens in Abhängigkeit von der Rohddichte (Meßwerte zur Ermittlung des praktischen Feuchtegehalts).

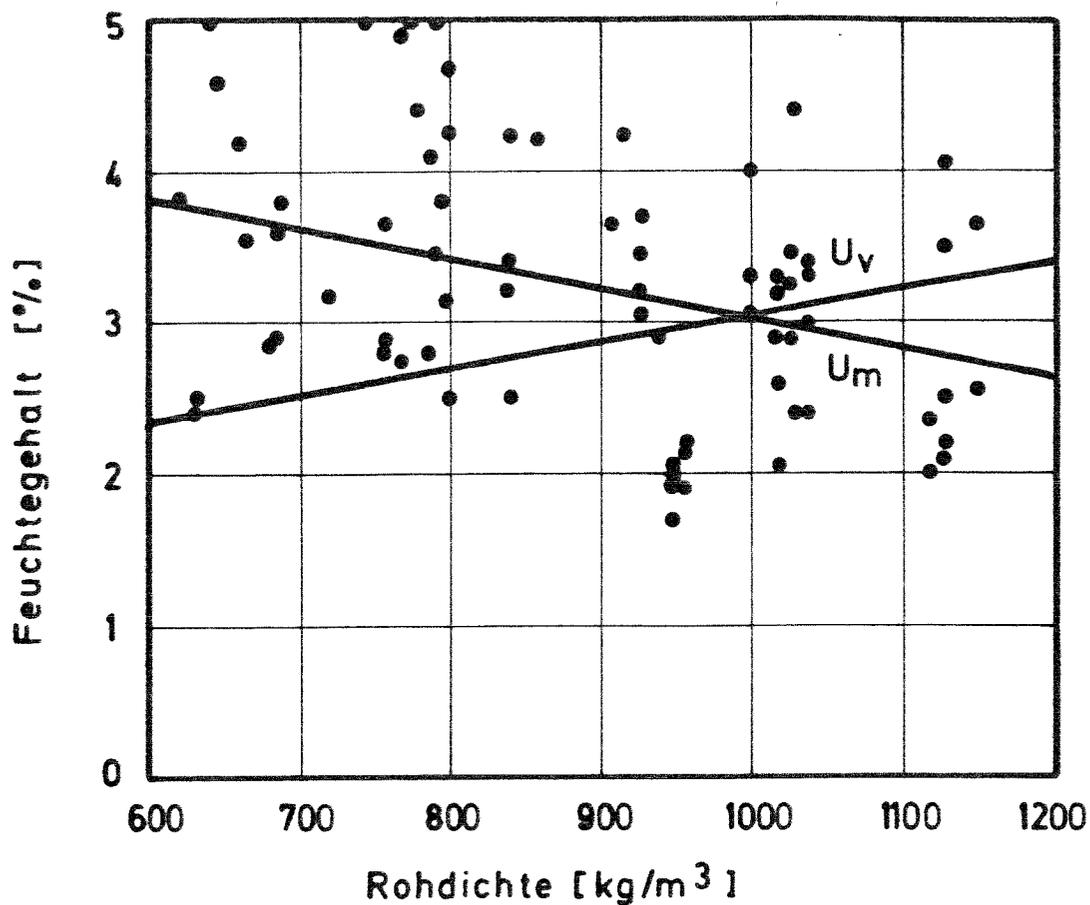


Bild 7: Feuchte von Leichtbetonaußenwänden in der Praxis, bezogen auf das Volumen ( $u_v$ ) bzw. die Masse ( $u_m$ ) des Betons in Abhängigkeit von der Betonrohddichte (Meßwerte zur Ermittlung des praktischen Feuchtegehalts). Im Diagramm sind die Meßwerte des massebezogenen Feuchtegehalts mit Ausgleichsgerade eingetragen und von den volumenbezogenen Werten lediglich die Ausgleichsgerade.

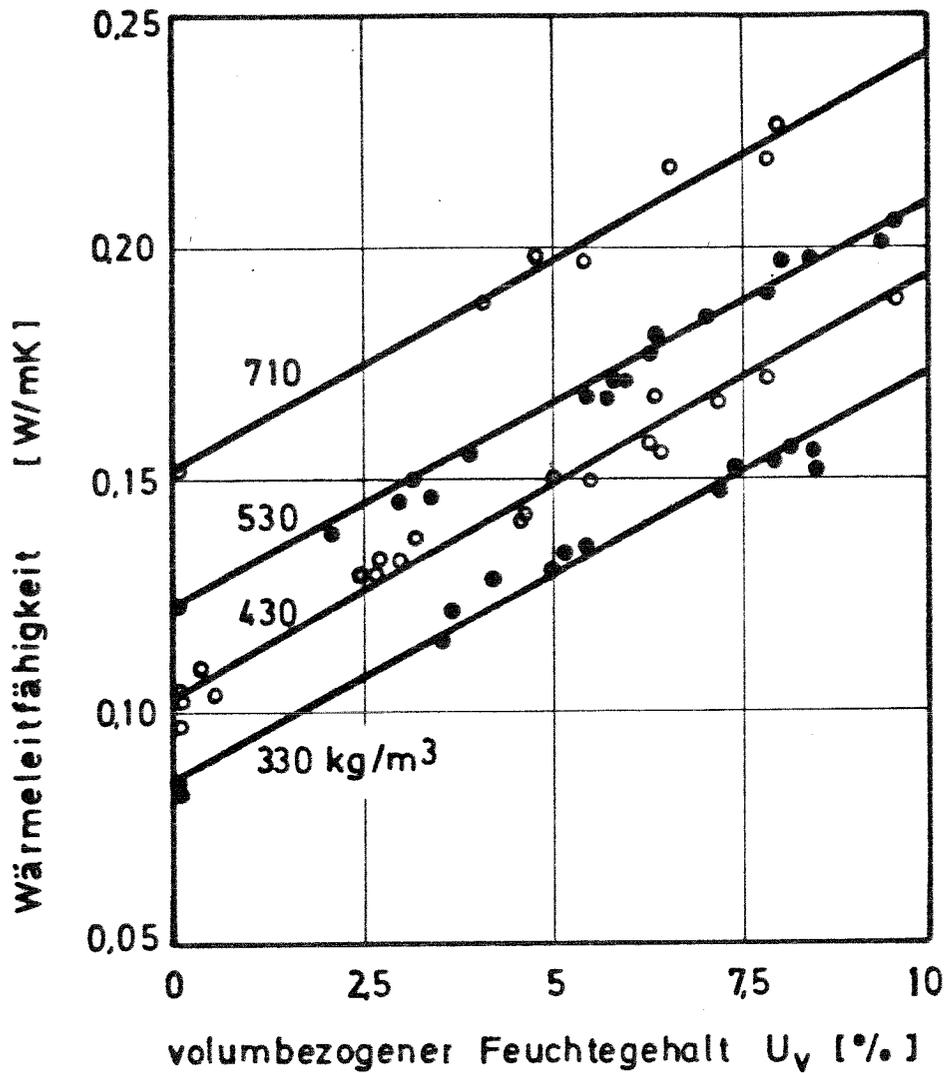


Bild 8: Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{10, tr}$  von Gasbeton unterschiedlicher Rohdichte vom volumbezogenen Feuchtegehalt nach Messungen im Plattengerät bei 10 °C Mitteltemperatur [8].

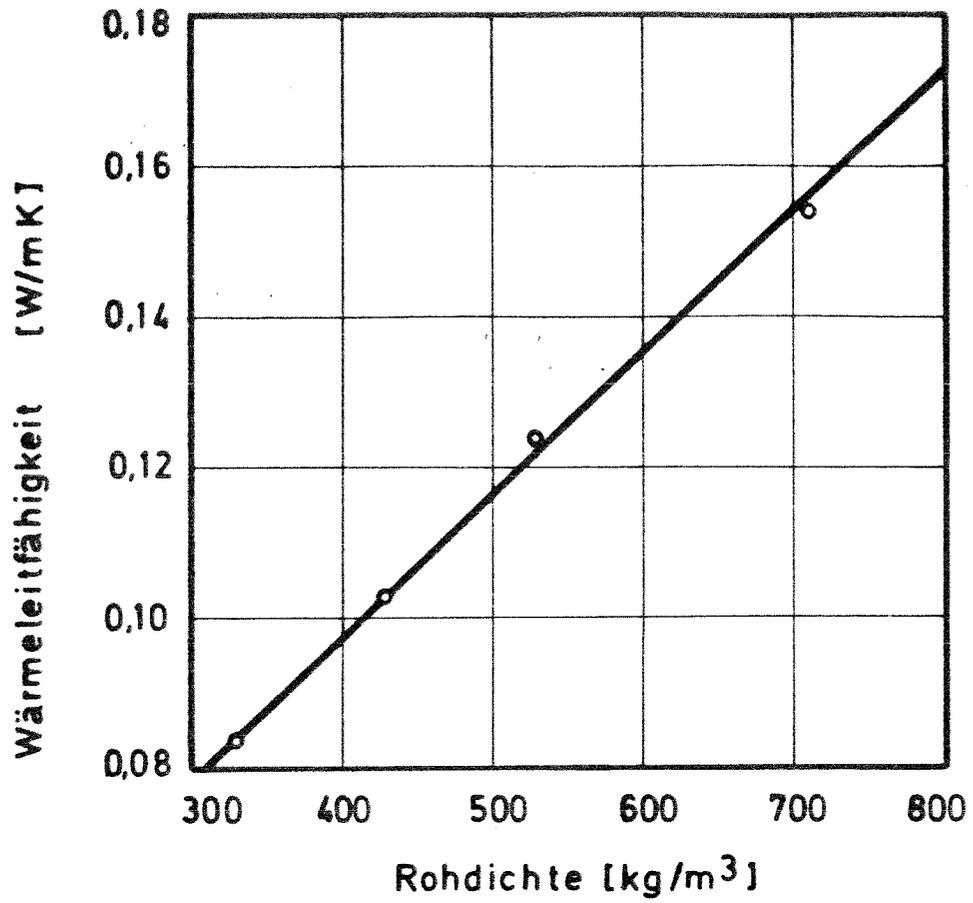


Bild 9: Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von trockenem Gasbeton von der Rohdichte.

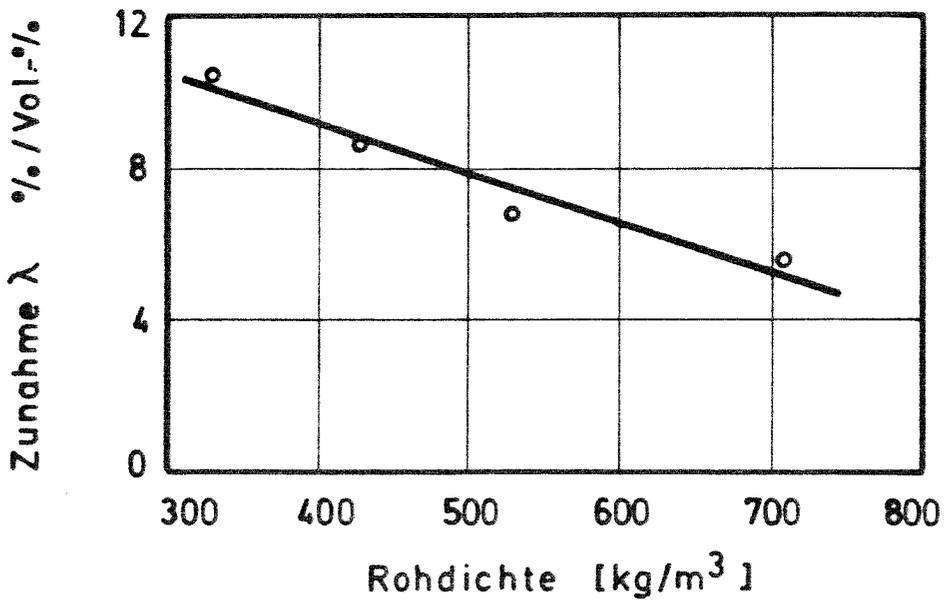
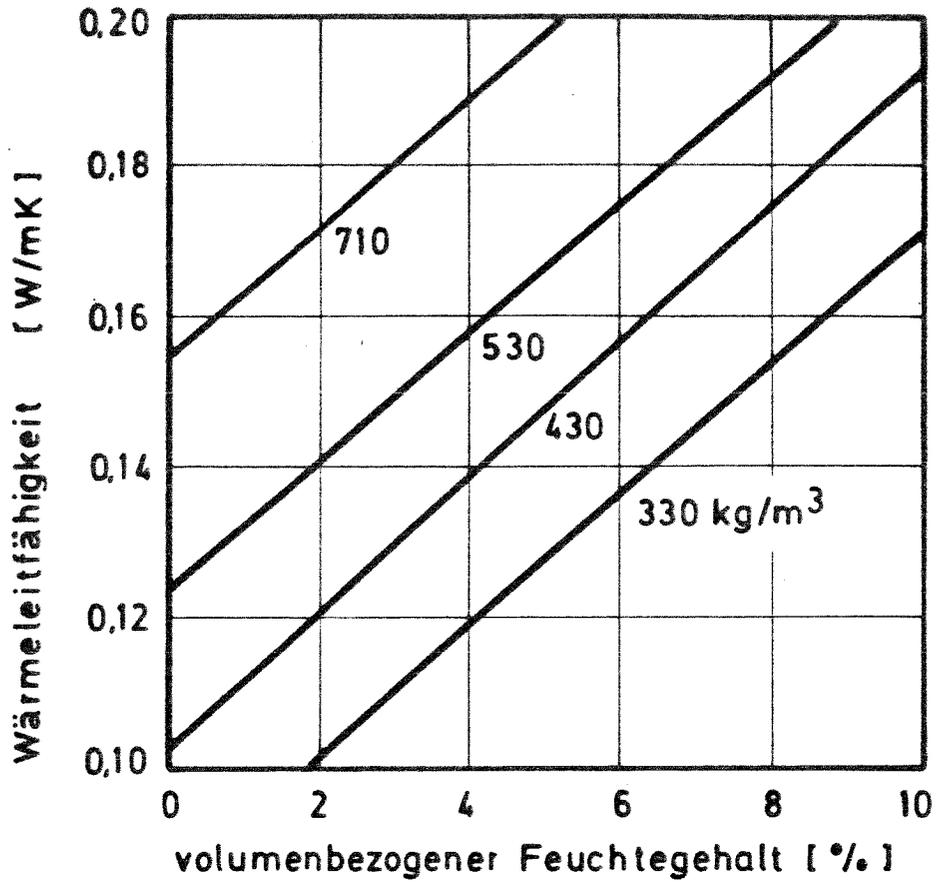


Bild 10: Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von Gasbeton unterschiedlicher Rohdichte vom volumenbezogenem Feuchtegehalt (oben) und Zunahme der Wärmeleitfähigkeit pro Vol-% in Abhängigkeit von der Rohdichte (unten).

Zunahme  $\lambda$ : 
$$\frac{\lambda_{uv} - \lambda_{10, tr}}{\lambda_{10, tr} \cdot u_v} \cdot 100$$

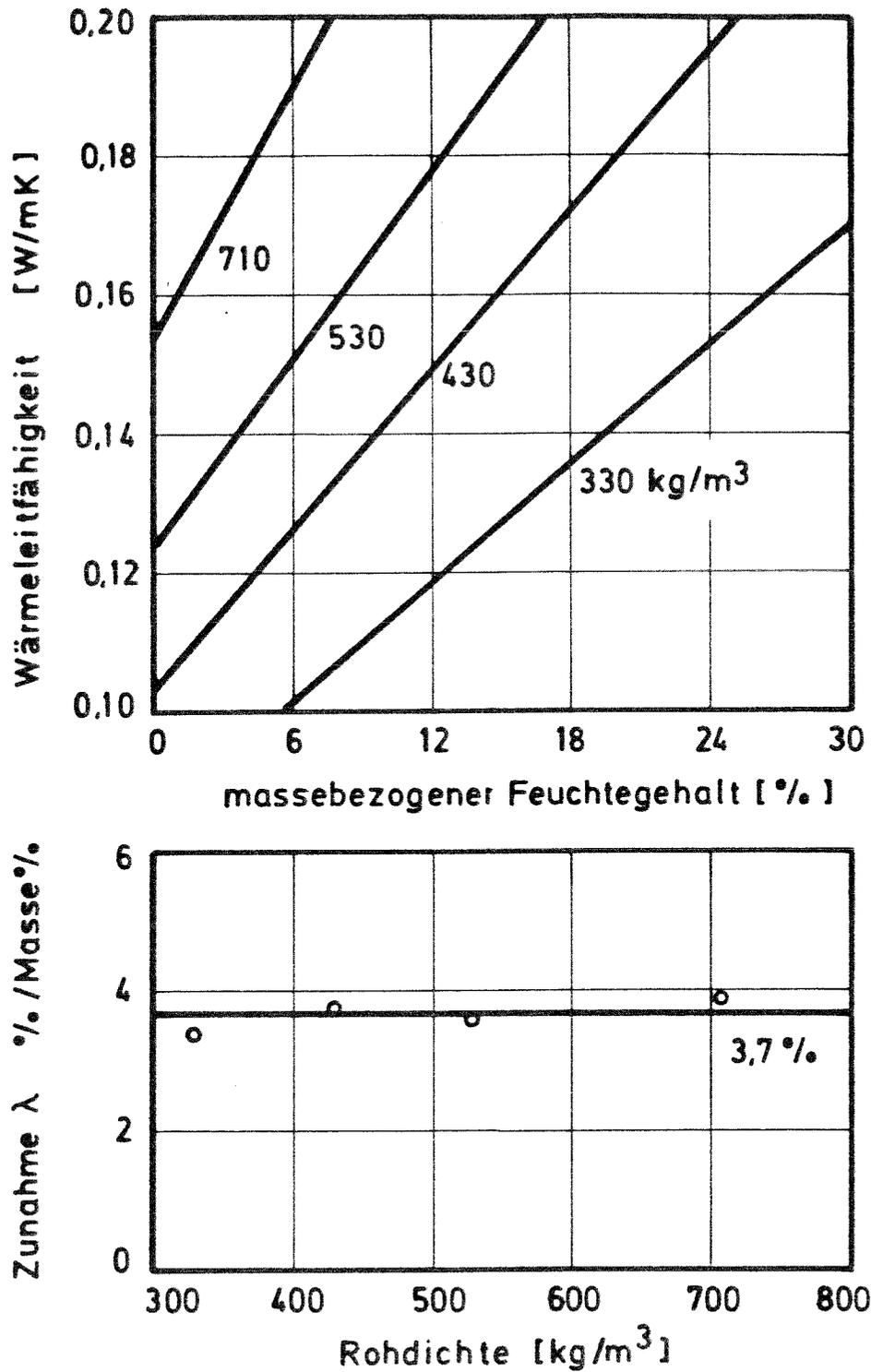


Bild 11: Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von Gasbeton unterschiedlicher Rohdichte vom massebezogenen Feuchtegehalt (oben) und Zunahme der Wärmeleitfähigkeit pro Masse-% in Abhängigkeit von der Rohdichte (unten)

$$\text{Zunahme } \lambda: \frac{\lambda_{um} - \lambda_{lo, tr}}{\lambda_{lo, tr} \cdot u_m} \cdot 100$$

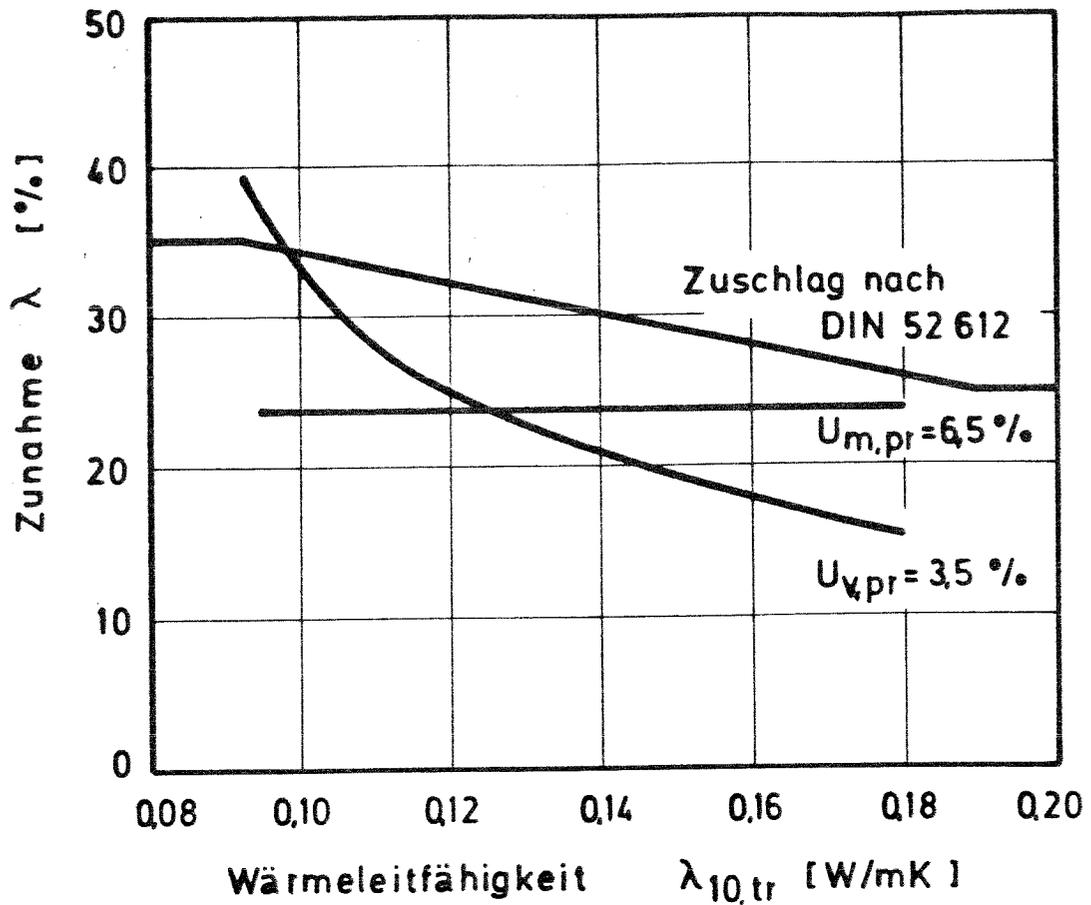


Bild 12: Feuchtebedingte Zunahme der Wärmeleitfähigkeit des betrachteten Gasbetons in Abhängigkeit von der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{10, tr}$  auf Grund der Gleichungen 6 bzw. 7 und nach DIN 52 612.

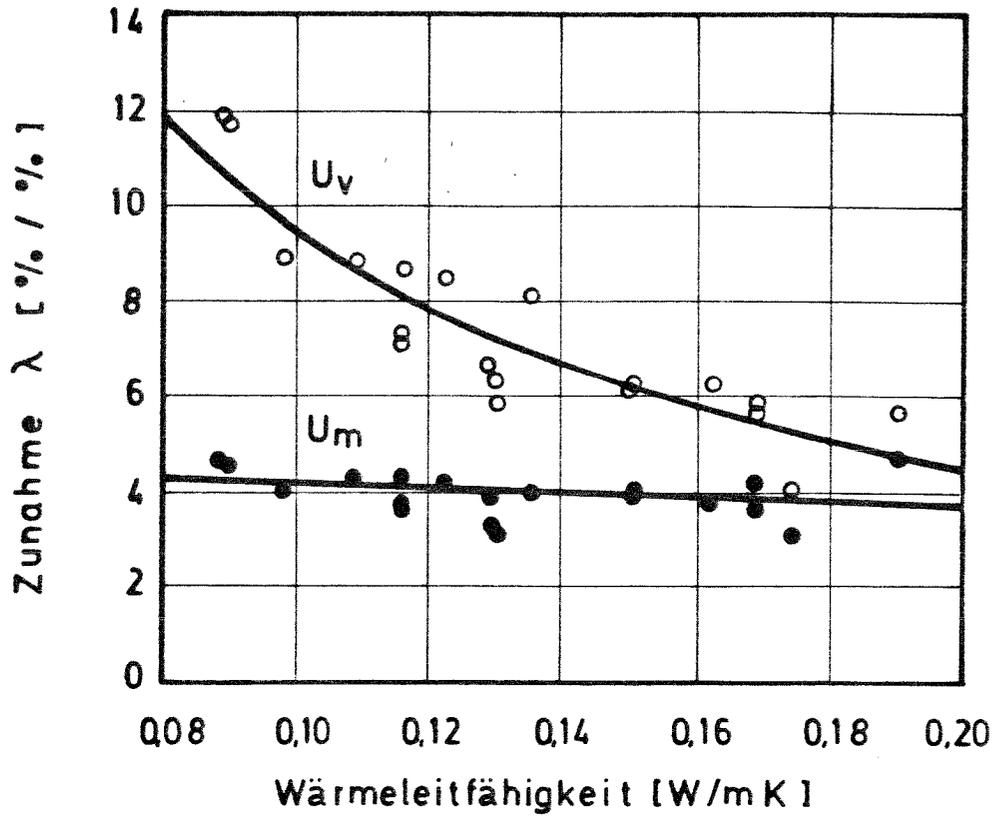


Bild 13: Prozentuale Zunahme der Wärmeleitfähigkeit von Gasbeton in Abhängigkeit von  $\lambda_{10, \text{tr}}$ , bezogen auf 1 Vol-% bzw. 1 Masse-% nach [6].

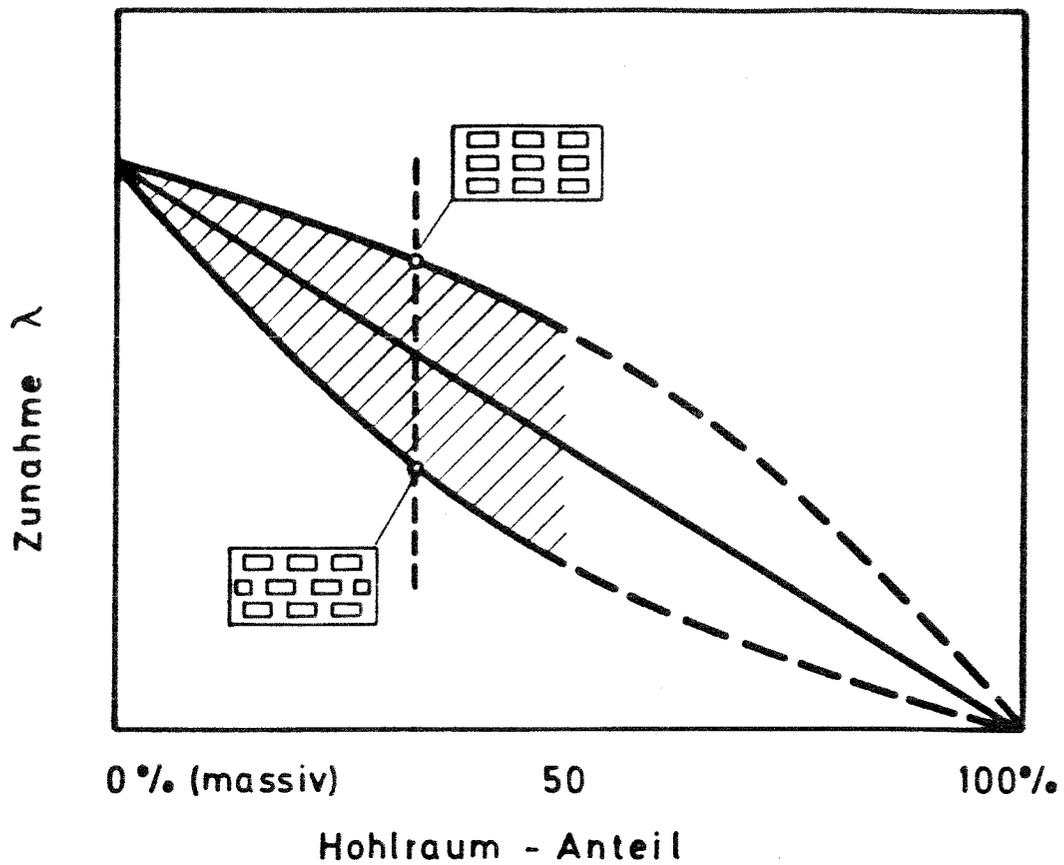


Bild 14: Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen der feuchtebedingten Zunahme der Wärmeleitfähigkeit und dem Hohlraumanteil bei Lochsteinen. Je größer der Hohlraumanteil ist, desto kleiner ist die Zunahme. Bei gleichem Hohlraumanteil ergeben sich Abweichungen durch die Geometrie des Lochbildes. Reale Lochsteine haben einen Hohlraum-Anteil bis zu ca. 50 %.