

**Überprüfung der Festlegung der
Bauregelliste zur Wärmeleitfähigkeit
von Ziegelmauerwerk. Tl.B.**

T 2944

T 2944

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2001, ISBN 3-8167-5786-3

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 info@irb.fhg.de

URL <http://www.IRBbuch.de>

GB 146/1999

Überprüfung der Festlegung der Bauregelliste zur Wärmeleitfähigkeit von
Ziegelmauerwerk

von

J. Achtziger
U. Hammerschmidt
N. König
K. Zeus

Durchgeführt im Auftrag und mit Förderung des
Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) Berlin

Überprüfung der Festlegung der Bauregelliste zur Wärmeleitfähigkeit von Ziegelmauerwerk

N. König¹, J. Achtziger², U. Hammerschmidt³, K. Zeus⁴

Kurzfassung :

Mauersteine für Wände von Gebäuden dürfen nach den Landesbauordnungen nur verwendet werden, wenn diese nach den Regeln der jeweiligen Produktnormen hergestellt und eingebaut sind. Für Produkte mit wesentlichen Abweichungen von diesen Normen ist als Verwendbarkeitsnachweis eine bauaufsichtliche Zulassung erforderlich. Die relevanten technischen Regeln sind in der Bauregelliste (BRL) [1] angegeben, zusammen mit dem Nachweisverfahren für die Festlegung eines Rechenwertes der Wärmeleitfähigkeit für das jeweilige Mauerwerk. Diese Anlage 2.7 /BRL 1997 erlaubt die direkt Messung an Wandprobekörpern nach dem Heizkastenverfahren oder die Messung des Feststoffes (Platten aus Steinmaterial) im Plattengerät mit der

¹ N. König, Dipl.-Phys., Leiter der Gips-Schüle-Abteilung für neue Baustoffe und Bauteile, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart (Direktor: Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Dr. E.h. mult. Karl Gertis).

² J. Achtziger, Dr.-Ing., Direktor des Forschungsinstituts für Wärmeschutz e.V., München.

³ U. Hammerschmidt, Dr. rer.nat., Referat 3.12, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig.

⁴ K. Zeus, BD Dipl.-Ing., Leiter des Referates 13, Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Baden-Württemberg, Stuttgart.

anschließenden dreidimensionalen Berechnung des Mauerwerks unter Zugrundelegung der Wärmeleitfähigkeiten für Feststoff, Mörtel und Luftkammern (falls vorhanden). Eine Einschränkung auf bestimmte Stoffgruppen war damals nicht vorgesehen; Erfahrungen lagen aber bei Leichtziegelsteinen für den zweiten Weg nicht vor, weshalb zu klären war, unter welchen Bedingungen diese Verfahren anwendbar sind und wie die Anlage 2.7 zu ändern ist.

In einem Ringversuch haben vier Institutionen (FIW, FMPA, IBP, PTB) die wärmeschutztechnischen Eigenschaften von Leichtziegelsteinen nach unterschiedlichen Verfahren gemessen, sowie mit einer 3D-Finiten-Differenzen-Methode die äquivalente Wärmeleitfähigkeit verschiedener Wände berechnet. Der Vergleich mit den Wandmessungen gab Hinweise auf die Meßunsicherheit und Anwendbarkeit dieser Prüfverfahren bei dünnen Ziegelstein-Platten. Erst mit Hilfe eines neu in der PTB entwickelten Meßverfahrens (Heizstreifen-Methode) und einer in der Präparation aufwendigen Messung im Einplatten-Gerät können die wahren Wärmeleitfähigkeiten des Ziegelsteinmaterials ermittelt werden. Die Ergebnisse variieren je nach Meß-/Präpariertechnik zwischen 0,3 und 0,45 W/mK; eine Anisotropie des Ziegelmaterials auf Grund von Preßtexturen in den Außen- und Innenseiten ist hierbei noch nicht vollständig berücksichtigt. Um solche Effekte über den Steinquerschnitt mit einzubeziehen, wurden Messungen an halbierten Ziegelsteinen im Platten-Gerät erprobt und zeigten eine befriedigende bis gute Übereinstimmung mit den Wandmessungen nach dem Heizkastenverfahren mit Wärmestrom-Meßplatten.

Ausgehend von diesen Untersuchungen konnte die Anlage 2.7 in der Bauregelliste 1998 modifiziert und die Richtlinien zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Ziegelsteinen in den DIBt-Mitteilungen, Heft 3/1998 veröffentlicht werden. Die Erfahrungen zur Festlegung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von Ziegelsteinen bei Prototyp- und Überwachungsprüfungen werden derzeit mit den interessierten Kreisen (Industrie, Bauaufsicht, Institute) abgestimmt und demnächst publiziert.

1. Bisherige bauaufsichtliche Regelungen und künftige Normen

1.1 Landesbauordnungen

Die Landesbauordnungen regeln auf der Basis der einheitlichen Musterbauordnung in Deutschland in ihrem 4. Teil „Bauprodukte und Bauarten, § 17 ff“ die Verwendung von Mauersteinen und die Regeln für die Nachweise der Verwendbarkeit [1]. Dort wird auf die Vorschriften des Bauproduktengesetzes und der Bauproduktenrichtlinien hingewiesen, vor allem auf die Festlegungen der technischen Regeln sowie etwaiger Abweichungen in der Bauregelliste [2, 3]. Für die Bauprodukte, die von diesen technischen Regeln wesentlich abweichen oder für die es technische Baubestimmungen oder allgemein anerkannte Regeln der Technik nicht gibt, müssen bei Mauersteinen allgemeine baurechtliche Zulassungen erteilt werden. Dies trifft vor allem dann zu, wenn durch besondere Maßnahmen in Mauersteinen die wärme-schutztechnischen Eigenschaften verbessert werden und diese Produkte dann wesentliche Abweichungen von den Festlegungen der Produktnormen haben. Der Umfang und die Art der Nachweisführung für Mauersteine ist in Anlage 2.7 der Bauregelliste dargelegt. Sonderwerte der Wärmeleitfähigkeit werden für die Berechnungen des Wärmeschutzes nach der Wärmeschutzverordnung in Bekanntmachungen von Stoffwerten des Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau (ab 1998: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen) in unregelmäßigen Abständen veröffentlicht im Bundesanzeiger und im Mauerwerk-Kalender [2].

Diese Anlage 2.7 war einschließlich der Ausgabe 1997 ohne Einschränkung für alle Mauersteinarten gültig und erlaubte die Nachweisführung der besonderen Festlegung der Wärmeleitfähigkeit auf der Basis von Messungen an Wandprobekörpern (Heizkasten-Verfahren [5]). Bei dieser Messung wird die Wärmeübertragung durch Inhomogenitäten im Mauerstein (Luftkammern, Porenverteilung im Steinmaterial, Vermörtelung oder Luftkammern im Stoß- und Lagerfugenbereich etc.) meßtechnisch berücksichtigt, da im allgemeinen der Probekörper 1,5 m x 1,5 m groß ist und aus einer Vielzahl einzelner Steine besteht. Durch die Weiterentwicklung der Rechenprogramme auch für 3-dimensionale Strukturen konnte der Nachweis geführt werden [9], daß durch Messungen an Steinmaterial im Plattengerät nach DIN 52 612 [6]

und einer anschließenden Nachbildung der Steingeometrie mit allen Hohlkammern und Vermörtelung die Berechnung nach der Methode der Finiten Differenzen (FD) zu guter Übereinstimmung führt. Dies galt vor allem dann, wenn die Verteilung des Steinmaterials im Steinquerschnitt repräsentativ erfaßt werden konnte, wie dies bei haufwerksporigen Leichtbeton-Hohlkammersteinen der Fall ist. Deshalb erfolgte über viele Jahre der Nachweis der Übereinstimmung solcher besonderer Rechenwerte der Wärmeleitfähigkeit an Steinmaterial-Platten, herausgeschnitten aus Hohlkammer-Steinen und gemessen im Plattengerät.

Mit der weiteren Umsetzung der EU-Bauprodukten-Richtlinie ist die europäische Normung auf dem Gebiet des wärmeschutztechnischen Messens ebenfalls vorangeschritten. Mit der DIN EN 1934 [7], Messung des Wärmedurchlaßwiderstandes - Heizkastenverfahren mit dem Wärmestrommesser - ist für die Bestimmung an Wandprobekörpern eine vollständige Beschreibung der Messungen für den europäischen Markt auf der Basis der deutschen Erfahrungen vorgelegt. Die Alternativ-Messungen über die Bestimmung an Platten, herausgeschnitten aus Mauersteinen, oder die Messung von halbierten Steinen im Plattengerät ist in Entwürfen des CEN TC 125 „Mauerwerk“, prEN 1745 [8] dagegen nicht ausreichend erprobt. Im Rahmen der Diskussion zur Festlegung von günstigeren Wärmeleitfähigkeitswerten für Ziegel-Leichtmauerwerk mit wabenförmigen Strukturen und sehr dünnen Stegen erfolgten umfangreiche Messungen an dünnen Ziegelstein-Platten und Berechnungen nach der FD-Methode im Rahmen eines Forschungsvorhaben bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt. Die Ergebnisse zeigten, daß die Vergleiche mit den Messungen an Wandprobekörpern nicht übereinstimmten und waren Anlaß, das im folgenden vorgestellte DIBt-Forschungsvorhaben durchzuführen.

1.2 Bauregelliste

Ein von DIN 4108-4:1991-11 „Wärmeschutz im Hochbau“ abweichender Rechenwert λ_R der Wärmeleitfähigkeit für Mauerwerk aus Steinen einer bestimmten Rohdichteklasse unter Verwendung eines bestimmten Mauer-

mörtels nach DIN 1053-1:1990-02 konnte nach Bauregelliste, Ausgabe 1997/1 [3] ermittelt und festgelegt werden durch

- Messung an Wandprobekörpern nach Anlage 2.7, Abschnitt 2 oder
- Messung des Steinmaterials nach Abschnitt 3 mit anschließender Rechnung oder
- Rechnung nach Abschnitt 4.

Die dort beschriebene Vorgehensweise zur Probenauswahl und Durchführung der Messung beruhte auf Erfahrungen der Prüfstellen überwiegend an Leichtbetonsteinen. Erst die umfangreichen Berechnungen von Ziegelmauerwerk mit dünnen Stegen führte zu Abweichungen, die eine Neuregelung erforderten. Der Vorteil der mehrdimensionalen Finite-Differenzen-Berechnungen im Rahmen der Produktoptimierung sollte auch für die Untersuchung der Prototyp-Probekörper verwendbar sein und im Rahmen der Überprüfung der Übereinstimmung der Festlegungen zu Vereinfachungen führen; dies war Wunsch sowohl der betroffenen Firmen als auch der Industrieverbände und Güteschutzgemeinschaften.

Mit der Weiterentwicklung des Ziegelscherbens durch andere Porosierungen und der Verringerung der Stegdicken im Steininnern waren aber die Grenzen der Meßmöglichkeiten im Plattengerät erreicht. Mit den in den Prüfinstituten üblichen Apparaten mit Meßflächen von ca. 300 mm sind Proben in der Dicke <10 mm nicht mit ausreichender Meßunsicherheit prüfbar. Mit Sondergeräten und Meßflächen von ca. 120 mm ist die geringste zulässige Probendicke etwa 5 mm, so daß Abschnitte aus Ziegelsteinen mit Stegdicken um 3 mm nur durch aufwendige Probenpräparation (Schleifen) und ein Aufeinandersetzen von mehreren solcher Steinscheiben meßbar sind. Welche Einflüsse diese andersartige Meßtechnik auf das Ergebnis hat und ob dies zu praktikablen Vorgehensweisen in der Güteüberwachung im Vergleich zu den üblichen Wandmessungen führt, war in dem nationalen Ringversuch der vom DIBt anerkannten Prüfstellen FIW, München, FMFA, Stuttgart und IBP, Stuttgart festzustellen. Als Kalibrier- und Schiedsstelle fungierte die Bundesoberbehörde PTB, Braunschweig.

2. Beschreibung der Mauersteine und Probekörper

Um die Aufwendungen für die sehr umfangreichen und zeitintensiven Messungen zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit zu reduzieren, wurden Vergleichsuntersuchungen an Ziegelsteinen vereibart, die in dieser Zeit in Zulassungsverfahren zu messen waren. In Bild 1 und 2 sind vier typische Ziegelsteine fotografisch dargestellt, die das Spektrum der Variationen von dünnen bis dicken Stegen (Wärme- bzw. Schallschutzziegel) repräsentieren. In Bild 3 sind für den meist untersuchten Stein W 17 die Geometrie-Daten und Rohdichten (für Stein und Scherben) gezeigt. Um eine größere Sicherheit bei der Materialverteilung im Steininnern zu bekommen, waren auch die Rohdichteverteilung und eine Gefügeanalyse an solchen Wabenziegelsteinen durchzuführen. Die Materialproben wurden überwiegend von FMPA über IBP und FIW an die PTB weitergegeben.

3. Ergebnisse

3.1 Rohdichte und Rohdichteverteilung

Die in Bild 4 dargestellten Steinabschnitte der Probe W 17 führten zu den Ergebnissen der Rohdichteverteilung gemäß der Tabelle 1 und zeigt, daß die Schwankungen des Ziegelmaterials im Steininnern in den Extremwerten vom Mittelwert 1406 kg/m^3 um minimal -9% und maximal $+11 \%$ abweichen. Welche Folgerungen dies auf die Wärmeleitfähigkeit von Ziegelsteinscheiben hat, wird später berichtet. Die Ursache solcher Schwankungen in den Rohdichten sind in den Scherben-Texturen durch die Verpressung des Tonmaterials zu suchen. Bild 5 und 6 geben Hinweise auf Ergebnisse der bildanalytischen Auswertungen.

Die Abmessungen, Rohdichten und weiteren charakteristischen Kenngrößen aller untersuchter Ziegelsteine sowie der Wärmeleitfähigkeiten an Ziegelsteinscheiben sind in den Tabellen 2 bis 5 dargestellt. Hieraus ist zu entnehmen, daß die Rohdichte der Steinscheiben sich in relativ engen Grenzen zwischen

1400 und 1550 kg/m³ bewegt und zu Wärmeleitfähigkeiten zwischen 0,21 und 0,43 W/mK führt. Hierbei ist der Einbau der dünnen Proben in das Plattengerät von wesentlichem Einfluß: Sofern die Proben trocken ohne zusätzliche Ausgleichsschichten aus Weichschaum eingebaut sind, wirken sich geringe Unebenheiten aufgrund des nicht perfekten Schleifens der Oberflächen und der aufgetragenen Thermoelemente durch zusätzliche Luftschichten aus. Die Wärmeleitfähigkeit wird zu gering gemessen, vergleiche Fall „Einbau A“ in Tabelle 4. Wenn gewalzte Thermoelemente und Silikonausgleichsschichten verwendet werden (Einbau B) oder die Proben mit Kontaktmitteln (Öl) an die wärmeübertragenden Platten gekoppelt werden, ergeben sich deutlich höhere Wärmeleitfähigkeiten (ca. +50 bis 100 %). Wenn dann noch die zulässige Minimaldicke der Proben aufgrund der Meßflächendimension unterschritten wird, sind diese Ergebnisse mit einer zu hohen Meßunsicherheit zu bewerten und nicht für die weitere Berechnung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von Mauerwerksprobekörpern geeignet.

Wie sich diese Variation der Wärmeleitfähigkeit des Ziegelscherbens auf das Gesamtergebnis auswirkt, ist in Tabelle 6 für Ziegelmauerwerk mit unterschiedlichen Stegen berechnet und in Bild 9 und 10 grafisch dargestellt. Diese Zunahme der Wärmeleitfähigkeit des Ziegelscherbens aufgrund von nicht-idealem Einbau im Plattengerät, z.B. von 0,28 auf 0,36 W/mK, führt zu einer Veränderung in einer (theoretischen) Einstufung in Wärmeleitfähigkeitsklassen von 0,13 zu 0,15 W/mK. Zusätzlich zu dieser meßtechnischen Variation machen sich noch die bekannten Unterschiede in der Vermörtelungsart (Leichtmauermörtel, Dünnbettmörtel) und Steinroh-dichteschwankungen bemerkbar.

Die Ergebnisse der Messungen an Wandprobekörpern und halbierten Steinen sind in den Tabelle 7 bis 9 gezeigt. Die Übereinstimmung der Ergebnisse aus den drei Prüfstellen nach dem Heizkastenverfahren an Wandprobekörpern, die separat in den Institutionen aufgebaut wurden, zeigen, daß hierbei kein Handlungsbedarf für Harmonisierung ist. Um jedoch das Alternativ-Verfahren mit halbierten Ziegelsteinen in einer DIBt-Richtlinie festzulegen, ergaben die umfangreichen Messungen bei FMPA und FIW, siehe Tabelle 7 und 8, daß eine hinreichend gute Korrelation zwischen der Wandmessung und der

Halbsteinmessung besteht. Am Beispiel des Steins R 1.57, vergleiche Tabelle 9, ist die Abweichung der Wärmeleitfähigkeit vom Mittelwert (0,165 W/mK) bei den Messungen in den drei Instituten sehr gut ($<\pm 3\%$).

4. Literaturwerte und Einfluß von Preßtexturen

Von Erker [24] und aus eigenen Untersuchungen ist die Anisotropie der Wärmeleitfähigkeit von Ziegelstein-Material im Innern bekannt. Bild 6 zeigt die schematische Darstellung der signifikanten Materialbereiche für den Wärmefluß in Steinen mit Hohlkammern: Hier ist zu erkennen, daß die Richtung B quer zur Wandrichtung für die Wärmeübertragung im Scherbenmaterial maßgeblich ist und somit die Steinscheiben zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit von Hohlkammersteinen aus diesem Steinbereich zu schneiden sind. Bisher wurde diesem Phänomen noch zu wenig Beachtung geschenkt, da die Stegdicken im Steinbereich „längs der Wand“ meist dicker und somit die Präparation der Proben leichter ist. Bei den Leichtbetonsteinen (Bild 6 unten) bedeutet dies, daß nicht die Scheiben 1 bis 4, sondern die Proben 5 und 6 für die λ -Messung heranzuziehen sind. Welche Auswirkungen eine solche Verschiedenheit der Wärmeleitfähigkeiten im Mauerstein in x-, y- oder z-Richtung (Anisotropie) hat, ist in Bild 8 exemplarisch für einen Ziegelstein dargestellt. Die Ergebnisse der FD-Berechnungen 4 bis 6 in Tabelle 6, nach [22], zeigen Unterschiede in der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Ziegelmauerwerks mit Leichtmauermörtel LM 21 in der Lagerfuge, von ca. 20 %.

Ein Vergleich der Wärmeleitfähigkeit von Ziegelmaterial nach Erker [24, Tabelle 1] zeigt ähnliche Variationen in Meßrichtung A von 0,25 bis 0,40 W/mK für unterschiedliche Scherbenqualitäten. In Meßrichtung B sind diese Wärmeleitfähigkeiten um 22 bis 85 % höher, was durch die Preßtextur und Verteilung der mikroskopischen Hohlräume im begründbar ist.

Diese Erkenntnisse zeigen, daß mit wenigen Einzelmessungen aus einem Ziegelsteinmaterial keine Aussage zur repräsentativen Wärmeleitfähigkeit über den gesamten Stein gemacht werden kann.

5. Vorschläge für die Erst- und Güteprüfung

Aus den Untersuchungen zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit im Plattengerät an Ziegelsteinmaterial und an halbierten Ziegeln sowie im Heizkastenapparat an Wandprobekörpern war zu folgern, daß die Festlegungen in der Bauregelliste 1997 [3] nicht ausreichend waren. Diese wurden in der Folgeausgabe 1998 [4] dahingehend ergänzt, daß bei Zulassungsprüfungen für Ziegelsteine die Messung an Wandprobekörpern vorerst die allein gültige Methode ist. Die Alternative der Messung von Steinmaterial und anschließender Berechnung führte zu nicht akzeptablen Unterschieden im Ergebnis. Eine Hilfsmessung an halbierten Steinen wurde für eine Überprüfung im Rahmen der Erst- und Überwachungsprüfungen zugelassen [4], um weitere Erfahrungen mit dieser einfacheren Methode zu sammeln. Im Rahmen der Umsetzung von prEN 1745 [8] ist mit der betroffenen Industrie und den Güteschutzgemeinschaften zu prüfen, inwieweit die dort genannten Verfahren gleichwertig sind. Vor allem die Definition von Produktfamilien und Rohdichteklassen bei Mauersteinen ist noch nicht hinreichend geklärt, um den Aufwand für die Sicherung der besonderen Rechenwerte der Wärmeleitfähigkeit für verschiedene Mauersteinmaterialien und zu anderen Wärmeschutz-Produkten vergleichbar zu halten. Hierzu finden derzeit Abstimmungen innerhalb der Sachverständigenkreise und mit den Güteschutzgemeinschaften statt.

6. Umsetzung der neuen Meßmethoden

Die Veröffentlichung der DIBt-Richtlinien zur Messung der Wärmeleitfähigkeit nach der Heizstreifen-Methode, entwickelt von PTB [15], sowie der modifizierten Einplatten-Methode nach DIN 52 612, PTB [16], sowie der Messung an halbierten Steinen, nach FMFA [14], erfolgte in der DIBt-Mitteilung Nr. 3/1998. Hierauf ist in der Bauregelliste, Ausgabe 1998/1, Anlage 2.7, verwiesen. Die weitere Umsetzung der Meßmöglichkeiten mit der instationären Heizstreifen-Methode obliegt der PTB, die dieses Verfahren im Rahmen von Einweisungen und Seminaren zu den Prüfinstituten umsetzen will.

7. Weitergehende Forschungsarbeiten

Die Ergebnisse dieses Rundversuches haben gezeigt, daß für die Anwendung der europäischen Rechenverfahren und Meßmöglichkeiten an Ziegelstein-Mauerwerk noch weitere Erfahrungen zu sammeln sind. Gelegenheit hierzu gibt ein EU-Projekt „Moist Masonry Materials“, wo im Umgang mit den neuen EU-Normen die Gleichbehandlung und ein Erfahrungsaustausch in den EU-Ländern sichergestellt werden soll: 14 Institute aus 6 Ländern messen derzeit an identischen Materialien (Porenbetonsteinen unterschiedlicher Dicke, Leichtbetonsteinen und Leichtziegelsteinen) die thermischen und hygrischen Kenngrößen. Neben dem reinen Ringversuch mit Überprüfung der Wiederholgenauigkeit ist auch die Umrechnung von Meßwerten der Wärmeleitfähigkeit in Bemessungswerten des Mauerwerks bei praktischem Feuchtegehalt zu erproben. Somit kann dieses EU-Projekt als eine Fortsetzung der Diskussion um die wärmeschutztechnisch richtige Charakterisierung von Mauerwerk verstanden werden.

8. Literatur

- [1] Landesbauordnung für Baden-Württemberg (LBO) vom 8. August 1995 (GBl. S. 617) auf der Basis der Musterbauordnung (MBO) für die Länder der BRD.
- [2] Lühr, H.-P.: Rechenwerte für die Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen. Mauerwerk-Kalender 1997. S. 225 bis 346. Verlag Ernst + Sohn, Berlin.
- [3] Bauregelliste (BRL) A, Bauregelliste B und Liste C, Ausgabe 97/1. Mitteilungen des Deutschen Instituts für Bautechnik (28), Sonderheft Nr. 15, Mai 1997.

- [4] Bauregelliste (BRL) A, Bauregelliste B und Liste C, Ausgabe 98/1. Mitteilungen des Deutschen Instituts für Bautechnik (29), Sonderheft Nr. 18, Mai 1998.
- [5] DIN 52611-1:1991-01: Wärmeschutztechnische Prüfungen, Bestimmung des Wärmedurchlaßwiderstandes von Wänden und Decken, Prüfung im Laboratorium. Beuth-Verlag Berlin.
- [6] DIN 52612-1:1979-09: Wärmeschutztechnische Prüfungen, Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät, Durchführung und Auswertung. Beuth-Verlag Berlin.
- [7] DIN EN 1934:1998-04: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden. Messung des Wärmedurchlaßwiderstandes - Heizkastenverfahren mit dem Wärmestrommesser- Mauerwerk. Beuth-Verlag Berlin.
- [8] prEN 1745:1997-08: Masonry and masonry products, Methods for determining design thermal values. (CEN TC 125), Beuth-Verlag Berlin.
- [9] Achtziger, J.; Anton, H.: Bestimmung des Wärmedurchlaßwiderstandes von Außenwänden aus Mauerwerk - Vergleich zwischen experimenteller Untersuchung und Berechnung nach der Finiten-Differenzen-Methode. Bericht Forschungsinstitut für Wärmeschutz, München, T 2626, IRB-Verlag, Stuttgart.
- [10] DIBt-Richtlinien:
 - a) Messung der Wärmeleitfähigkeit und Temperaturleitfähigkeit von Ziegelscherben nach der Heizstreifen-Methode.
 - b) Messung der Wärmeleitfähigkeit von Ziegelscherben nach der Einplatten-Methode.
 - c) Messung der Wärmeleitfähigkeit von Mauersteinprobekörpern. DIBt-Mitteilungen, Heft 3, S. 76 bis 80, 1998.

- [11] Hammerschmidt, U.: A Linear Procedure for Analyzing Transient Hot Strip Signals, 24th Thermal Conductivity Conference, Pittsburgh/USA, 1999.
- [12] Achtziger, J.; Anton, H.: Überprüfung der Bedingungen entsprechend Anlage 2.7 der Bauregelliste zur Festlegung des Rechenwertes der Wärmeleitfähigkeit für Mauerwerk. Bericht Nr. D1-17/97 des FIW München, 1997.
- [13] Zeus, K.: Überprüfung der Festlegungen der Bauregelliste zur Wärmeleitfähigkeit von Ziegelmauerwerk; Messung der Wärmeleitfähigkeit von Ziegelscherben. Bericht Nr. 13-24843/1 der FMPA Stuttgart, 1997.
- [14] Zeus, K.: Überprüfung der Festlegungen der Bauregelliste zur Wärmeleitfähigkeit von Ziegelmauerwerk; Messung der Wärmeleitfähigkeit von Probekörpern aus halbierten Ziegeln. Bericht Nr. 13-24843/2 der FMPA Stuttgart, 1997.
- [15] Hammerschmidt, U.: Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Ziegelscherben nach dem instationären Heizstreifenverfahren. PTB-Laborbericht 3.12-11924/97, Braunschweig, 1997.
- [16] Hammerschmidt, U.: Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Ziegelscherben nach dem Plattenverfahren. PTB-Laborbericht 3.12-11949/97, Braunschweig, 1997.
- [17] König, N.; Schad, M.: Wärmeleitfähigkeit von Ziegelsteinscherben nach DIN 52612. Prüfberichte des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) P1-369a/1996, P1-299/1996, P1-180 bis 185/1997, Stuttgart.
- [18] König, N.; Schad, M.: Rohdichtebestimmung in einem Ziegelstein. Prüfbericht des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) P1-457/1996, Stuttgart.

- [19] Gödeke, H.; Schwitalla, C.: Untersuchung zur Rohdichte und Struktur von Ziegelmaterial. Bericht des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) P12-178/1997, Stuttgart.
- [20] Hettinger, F.: Einfluß von Luftschichten und Probekörperunebenheiten auf die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät. Diplomarbeit am IBP/LKB, Universität Stuttgart, Jan. 1998.
- [21] DIN EN ISO 10211-1:1995-11: Wärmebrücken im Hochbau; Wärmeströme und Oberflächentemperaturen, Teil 1: Allgemeine Berechnungsverfahren. Beuth-Verlag Berlin.
- [22] Sedlbauer, K.; König, N.: Berechnung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von Mauerwerk aus Ziegelmauerwerk mit Bienenwabenlochung. Bericht des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) P7-109/1994, Stuttgart.
- [23] König, N.; Schad, M.: Wärmeleitfähigkeit von Ziegelsteinen nach der Halbsteinmethode im Plattengerät. Bericht des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) P1-181/1997, Stuttgart.
- [24] Erker, A.: Anisotropie der Wärmeleitfähigkeit von Ziegelscherben im Zusammenhang „Messen - Rechnen“ von Ziegelmauerwerk. Bauphysik (20), H. 4, S. 122 bis 125, 1998.

Tabelle 1: Rohdichteschwankungen des Steinmaterials in Ziegelsteinen W 17, siehe auch Bild 3 bis 6, ermittelt an 36 Proben eines Steiners, nach [18]. Die Extremwerte weichen um -9 % und +11 % vom Mittelwert (1406 kg/m³) ab.

| Steinabschnitt | Probe Nr. | Rohdichte | Standardabweichung |
|----------------------------------|-----------|---------------------|--------------------|
| | | kg/m ³ | kg/m ³ |
| 1 (oben) | 1 | 1375 | |
| | 2 | 1375 | |
| | 3 | 1370 | |
| | 4 | 1425 | |
| | 5 | 1515 | |
| | 6 | 1385 | |
| | 7 | 1315 | |
| | 8 | 1320 | |
| | 9 | 1560 ^{*)} | |
| | 10 | 1335 | |
| | 11 | 1465 | |
| | 12 | 1365 | |
| Mittelwert des Steinabschnitts 1 | | 1400 | 77 |
| 2 (Mitte) | 1 | 1365 | |
| | 2 | 1355 | |
| | 3 | 1350 | |
| | 4 | 1275 ^{**)} | |
| | 5 | 1470 | |
| | 6 | 1445 | |
| | 7 | 1370 | |
| | 8 | 1365 | |
| | 9 | 1335 | |
| | 10 | 1345 | |
| | 11 | 1340 | |
| | 12 | 1415 | |
| Mittelwert des Steinabschnitts 2 | | 1369 | 52 |
| 3 (unten) | 1 | 1395 | |
| | 2 | 1440 | |
| | 3 | 1460 | |
| | 4 | 1365 | |
| | 5 | 1460 | |
| | 6 | 1470 | |
| | 7 | 1410 | |
| | 8 | 1500 | |
| | 9 | 1440 | |
| | 10 | 1410 | |
| | 11 | 1530 | |
| | 12 | 1525 | |
| Mittelwert des Steinabschnitts 3 | | 1450 | 51 |
| Mittelwert des Steines (gesamt) | | 1406 | 41 |

*) Maximalwert

**) Minimalwert

Tabelle 2: Abmessungen, Rohdichten und weitere charakteristische Kenngrößen der untersuchten Ziegel (oben, s.a. Bilder 1 bis 3) und des für Wandmessungen verwendeten Leichtmauermörtels LM 21 unten, aus [13]

| Kurzbezeichnungen der Ziegel | | | W 17-1,4 | W 17-1,5 | W 27-1,4 | R 17-1,5 | S 1,5 |
|----------------------------------|--------|--------------------|----------|----------|----------|----------|-------|
| Abmessungen | Länge | mm | 246 | 245 | 240 | 240 | 370 |
| | Breite | mm | 303 | 301 | 298 | 293 | 298 |
| | Höhe | mm | 247 | 248 | 245 | 248 | 248 |
| Ziegelrohddichte | | kg/dm ³ | 0,55 | 0,59 | 0,53 | 0,77 | 0,54 |
| Scherbenrohddichte ¹⁾ | | kg/dm ³ | 1,45 | 1,54 | 1,42 | 1,57 | 1,54 |
| Gesamtlochanteil | | % | 51,3 | 51,4 | 58,5 | 47,0 | 63,8 |
| Dicke der Außenlängswandung | | mm | 7,0 | 7,1 | 5,5 | 10,5 | 29,0 |
| Dicke der Außenquerwandung | | mm | 6,5 | 6,2 | 5,9 | 11,0 | 24,0 |
| Dicke der Innenstege | | mm | 3,6/4,0 | 3,4/3,4 | 2,5/2,6 | 6,4/5,8 | 2,0 |
| Lochreihenzahl | | | 17 | 17 | 27 | 17 | - |
| Summe der Querstegdicke | | mm/m | 223 | 202 | 176 | 210 | - |

1) durch Unterwasserwägung des ganzen Ziegels ermittelt

| Leichtmauermörtel LM 21 Sack | | 1 | 2 | 3 |
|---------------------------------------|--------------------|-------|-------|-------|
| Trockenmörtelrohddichte | kg/dm ³ | 0,60 | 0,65 | 0,68 |
| Biegezugfestigkeit | N/mm ² | 2,45 | 2,52 | - |
| Druckfestigkeit | N/mm ² | 6,55 | 6,40 | 7,91 |
| Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, tr}$ | W/mK | 0,133 | 0,145 | 0,179 |

Tabelle 3: Wärmeleitfähigkeit von Ziegelstein-Scheiben, ermittelt im Platten-
gerät (DIN 52 612) mit Zuordnung der Lage im Ziegelstein, nach IBP
[17]

| Stein-Scheiben | | | | |
|--------------------|----------------|---------------------|------------------------|--|
| Bezeichnung | Schnittbereich | Dicke | Rohdichte (trocken) | Wärmeleitfähigkeit bei 10 °C Mitteltemperatur |
| | | mm | kg/m ³ | W/(m·K) |
| „R“ | | 17,1 | 1530/1550 | * 0,30 |
| „R 1,57 Q“ | quer | 7,4 | 1560 | 0,27 |
| „M“ | MEO 0,14 M | 4,5 | 1410 | 0,21 |
| „T“ | TH 0,14- T | 6,5 | 1480 | 0,24 |
| „H“ | HH-23 ZS | 6,2 | 1475/1515 | 0,22 |
| S 1.5 (16.1.97) | | 17,1 bis 17,9 | 1540 | 0,30 |
| W 17-1,4 | Längssteg | 5,5 | 1400 | 0,27 |
| S 1.5 | | 14/13 | 1510 | 0,33 |

Tabelle 4: Wärmeleitfähigkeit von Ziegelstein-Scheiben, ermittelt im Plattengerät (DIN 52 612) in FMPA (oben, nach [13]) und FIW (unten, nach [12])

| Kurzbezeichnungen der Ziegel | | W 17-1,4 | W 17-1,5 | W 27-1,4 | R 17-1,5 | S 1,5 |
|---|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--|---------------------|
| Scherbenrohddichte des Ziegels | kg/dm ³ | 1,45 | 1,54 | 1,42 | 1,57 | 1,54 |
| Dicke des Prüfkörpers aus den Außenwandscheiben | mm | 17/16 ²⁾ | 18/15 ²⁾ | 15/17 ²⁾ | 16/18 ²⁾ 24/23 ³⁾ | 17/18 ⁴⁾ |
| Rohddichte des Prüfkörpers aus den Außenwandscheiben | kg/dm ³ | 1,2/1,2 | 1,3/1,2 | 1,0/1,1 | 1,3/1,3 | 1,5/1,5 |
| Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, tr}$ des Prüfkörpers aus den Außenwandscheiben | W/mK | 0,216 ²⁾ | 0,256 ²⁾ | 0,213 ²⁾ | 0,249 ²⁾ 0,317 ³⁾ | 0,307 ⁴⁾ |

- 1) Zone mit Griffhilfen abgesägt
- 2) Prüfkörper aus 2 aufeinanderliegenden Scheiben aus den Längsstegen
- 3) Prüfkörper aus 2 aufeinanderliegenden Scheiben aus den Querstegen
- 4) Prüfkörper aus 1 Scheibe aus dem Quersteg

| Bezeichnung | Probendicke | Rohddichte | Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, tr}$ | |
|-------------|-------------|-------------------|---------------------------------------|-----------------|
| | | | <u>Einbau A</u> | <u>Einbau B</u> |
| | mm | kg/m ³ | W/(m·K) | W/(m·K) |
| 22 I+II | 16,7 | 1492 | - | 0,357 |
| H-26.03.97 | 6,5 | 1401 | 0,229 | 0,341 |
| M 13.03.97 | 4,3 | 1477 | 0,184 | 0,335 |
| T-13.03.97 | 6,7 | 1423 | - | 0,325 |

Tabelle 5: Wärmeleitfähigkeit von Ziegelstein-Scheiben, ermittelt in PTB nach dem Einplatten-Verfahren (oben, nach [16]) sowie an den gleichen Proben nach dem instationären Heizstreifen-Verfahren (unten, nach [15] bei unterschiedlicher Ankopplung der Probe an die Wärmeübertrager-Platten.

roh: ohne Kontaktmittel

Öl: angekoppelt mit Silikon-Öl bekannter WLF und Schichtdicke

| Bezeichnung der Probe | Rohdichte in g/cm ³ bei 22 °C | Wärmeleitfähigkeit λ in W/(m·K) bei 10 °C |
|-----------------------|---|--|
| „H“ (roh) | 1,523 | 0,362 |
| „H“ (mit Öl) | 1,523 | 0,403 |
| „M“ (roh) | 1,515 | 0,361 |
| „M“ (mit Öl) | 1,515 | 0,410 |
| „T“ (roh) | 1,494 | 0,378 |
| „T“ (mit Öl) | 1,494 | 0,432 |

Die Meßunsicherheit beträgt: 3 % für die Wärmeleitfähigkeit.

| Bezeichnung der Probe | Rohdichte in g/cm ³ bei 22 °C | Wärmeleitfähigkeit λ in W/(m·K) bei 10 °C | Temperaturleitfähigkeit a in mm ² /s |
|-----------------------|---|--|---|
| „H“ (roh) | 1,523 | 0,384 | 0,366 |
| „H“ (mit Öl) | 1,523 | 0,421 | 0,137 |
| „M“ (roh) | 1,515 | 0,376 | 0,297 |
| „M“ (mit Öl) | 1,515 | 0,395 | 0,149 |
| „T“ (roh) | 1,494 | 0,429 | 0,429 |
| „T“ (mit Öl) | 1,494 | 0,420 | 0,144 |

Die Meßunsicherheit beträgt: 3 % für die Wärmeleitfähigkeit und 10 % für die Temperaturleitfähigkeit.

Tabelle 6: Äquivalente Wärmeleitfähigkeit für Ziegelmauerwerk mit unterschiedlichen Stegen (Dicke, Anzahl, Wärmeleitfähigkeit) und Leichtmauermörtel LM 21, ermittelt nach Anlage 2.7/BRL [3]; vgl. auch Bild 8 und 10

| Nr. FD | Stein | Stegbreite | | | Wärmeleitfähigkeit | | Lochanteil | Äquivalente Wärmeleitfähigkeit | |
|--------|-------|------------|-----------|-----------|--------------------|----------------------------|------------------------------|--------------------------------|----------------|
| | | Höhe | Innensteg | Außensteg | Anzahl der Stege | Mörtel | | | Ziegelscherben |
| | | mm | mm | mm | - | W/mK | | | W/mK |
| FD1 | 238 | 4 | 7 | 25 | LM 21 | 0,25 0,35 | 58,5 ¹⁾ | 0,108 0,122 | |
| FD2 | 250 | 4 | 7 | 25 | - | 0,25 0,35 | 58,5 ¹⁾ | 0,103 0,117 | |
| FD3 | 238 | 2 | 7 | 25 | LM 21 | 0,25 0,35 ³⁾ | 69,8 42,3 42,3 39,9 | 0,106 | |
| | | 7 | 7 | 25 | | | | 0,117 ³⁾ | |
| | | 12 | 7 | 15 | | | | 0,114 | |
| | | 12 | 12 | 15 | | | | 0,130 | |
| FD4 | 238 | 4 | 7 | 25 | LM 21 | 2) | 58,5 | 0,154 | |
| FD5 | 238 | 4 | 7 | 25 | LM 21 | 2) | 58,5 | 0,134 | |
| FD6 | 238 | 4 | 7 | 25 | LM 21 | 2) | 58,5 | 0,155 ³⁾ | |

1) entspricht Steintyp W 27-1,4

2) anisotrope Werte für die 3 Richtungen x, y, z

3) Variationsberechnungen mit höherem Materialwert.

Tabelle 7: Äquivalente Wärmeleitfähigkeit von Ziegelsteinen, ermittelt nach der Halbstein-Methode im großen Plattengerät an halbierten Steinen und nach der Heizkasten-Wärmestrommesser-Methode an vermörtelten Wandprobekörpern, nach FMPA [14].

| Kurzbezeichnung der Ziegel | Maße | | Rohdichte des Ziegels kg/dm ³ | Scherenrohddichte kg/dm ³ | Lochanteil % | Druckfestigkeit des Ziegels N/mm ² | Wärmeleitfähigkeit der Wand | | Wärmeleitfähigkeit der halbierten Ziegel $\lambda_{10, tr}$ W/mK | Wärmeleitfähigkeit der halbierten und im Lagerfugenbereich vermaurten Ziegel $\lambda_{10, tr}$ W/mK |
|----------------------------|--------|-------|---|---|------------------|--|-----------------------------|--------------------------------------|---|---|
| | Länge | Stege | | | | | mit Mörtel W/mK | $\lambda_{10, tr}$ (Wand) W/mK | | |
| | Breite | quer | | | | | | | | |
| | Höhe | längs | | | | | | | | |
| | mm | mm | | | | | | | | |
| W-R 1-25 | 372 | 5 | 0,85 | 1,61 | 47 | - | LM 21 | 0,135 | 0,132 | - |
| | 304 | 4,5 | | | | | | | | |
| | 240 | 8 | | | | | | | | |
| W-R 2-25 | 304 | 5 | 0,84 | 1,47 | 43 | 6,1 | LM 21 | 0,128 | 0,125 | - |
| | 299 | 4,5 | | | | | | | | |
| | 240 | 12 | | | | | | | | |
| W-R 27 | 307 | 5 | 0,80 | 1,48 | 46 | ~5 | LM 21 | 0,129 | 0,124 | 0,126 |
| | 306 | 5 | | | | | | | | |
| | 240 | 11 | | | | | | | | |
| ME 014 | 246 | 5,5 | 0,59 | 1,50 | 60 | 11,4 | LM 21 | 0,150 | 0,149 | 0,147 |
| | 299 | 4,5 | | | | | | | | |
| | 237 | 8,5 | | | | | | | | |
| TH 014 | 301 | 8 | 0,67 | 1,45 | 54 | 8,0 | LM 21 | 0,159 | 0,145 | 0,144 |
| | 365 | 6 | | | | | | | | |
| | 237 | 8 | | | | | | | | |
| UN 014 | 373 | 6,5 | 0,60 | 1,33 | 52 ¹⁾ | 10,1 | LM 21 | 0,148 | 0,146 | - |
| | 300 | 5,5 | | | | | | | | |
| | 240 | 10 | | | | | | | | |
| HE-Mt | 239 | 5,5 | 0,72 | 1,50 | 49 ¹⁾ | 6,8 | LM 21 | 0,174 | 0,168 | - |
| | 364 | 6 | | | | | | | | |
| | 239 | 10 | | | | | | | | |
| RO-113 | 244 | 5 | 0,82 | 1,76 | 50 ¹⁾ | 16,1 | LM 21 | 0,240 | 0,225 | - |
| | 362 | 5 | | | | | | | | |
| | 114 | 10 | | | | | | | | |
| HH 23-ZS | 249 | 7,5 | 0,79 | 1,54 | 49 | 6,4 | DBM | 0,197 | 0,178 | - |
| | 368 | 6,5 | | | | | | | | |
| | 248 | 11 | | | | | | | | |
| W 17-1,4 | 246 | 3,6 | 0,55 | 1,45 | 51 | 6,6 | LM 21 | 0,151 | 0,149 | - |
| | 303 | 4,0 | | | | | | | | |
| | 247 | 7,0 | | | | | | | | |

¹⁾ ohne Mörteltasche

Tabelle 8: Äquivalente Wärmeleitfähigkeit von Ziegelsteinen, ermittelt nach der Halbstein-Methode im Einplatten-Gerät (Meßfläche 250 mm x 250 mm, Probendicke 150 mm, oben) sowie nach der Heizkasten-Wärmestrommesser-Methode an vermörtelten Wandprobekörpern (DB-Mörtel, unten), nach FIW [12]

| Steinrohddichte | Stein | Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, tr}$ Meßwert |
|-------------------|---------|---|
| kg/m ³ | | W/m·K |
| 546 | W17-1,4 | 0,164 |
| 496 | W27-1,4 | 0,129 |
| 773 | R17-1,5 | 0,169 |

| Bericht | Steinrohddichte | Scherbenrohddichte | Lochreihen Stein | Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, tr}$ Meßwert |
|------------|-------------------|--------------------|--------------------------|---|
| Nr. | kg/m ³ | kg/m ³ | - | W/m·K |
| I-1-98/95 | 540 | 1400 | 27 W27-1,4 | 0,178 |
| I-1-99/95 | 540 | 1400 | 27 W27-1,4 | 0,165 |
| I-1-100/95 | 540 | 1400 | 27 W27-1,4 | 0,168 |
| I-1-5/93 | 510 | 1380 | 21 W21-1,4 mit Griffloch | 0,136 |
| I-1-18/96 | 550 | 1370 | 17 W17-1,4 | 0,170 |

Tabelle 9: Äquivalente Wärmeleitfähigkeit von Ziegelsteinen, ermittelt im Plattengerät nach der Halbstein-Methode [10] im Vergleich zu den Ergebnissen nach der Heizkasten-Methode mit Wandprobekörpern gemäß DIN 52 611 [5]

| Steintyp | Institution/ Berichts-Nr. | Roh- dichte | Äquivalente Wärmeleitfähigkeit ermittelt nach der Methode | | | |
|----------|------------------------------|-------------------|--|--------|--------------|-----------------|
| | | | Heizkasten | | Plattengerät | |
| - | - | kg/m ³ | (W/m·K) | | | |
| | | Stein | Wand | Mörtel | Halbstein | ganzer Stein |
| W17-1.4 | FIW/ I.1-18/96 | 546 | 0,170 | DB | 0,164 | 0,174 |
| | FMPA/ 13-24843/1 | 550 | 0,151 | LM 21 | 0,149 | - |
| | IBP/GSA P5- 329/94 | 500 | 0,178 | DB | - | - |
| R 1.57 | FIW/ D.1-17/97 | 773 | - | - | 0,169 | - |
| | FMPA/ 13-24843/1 | 785 | - | - | 0,160 | - |
| | IBP/GSA P1- 181/97 | 794 | - | - | 0,167 | - |

Tabelle 10: Wärmeleitfähigkeit von Ziegelstein-Scheiben (Typ 1), ermittelt im Plattengerät bei unterschiedlichem Einbau (Kontaktplatten, Luftschichten, Abstandhalter, vgl. Bild 1) und relativen Abweichungen nach IBP [20]

| Nr. | Versuchs-Anordnung nach Bild 7 | Einbau im Zweiplattengerät | Wärmeleitfähigkeit | relative Abweichung zu Nr. 1 |
|-----|--------------------------------|--|--------------------|------------------------------|
| | | | W/m·K | % |
| 1 | b | mit Kontaktplatten nach DIN 52612 $T_m = 31,1 \text{ °C}$ | 0,301 | ± 0 |
| 2 | b | mit Kontaktplatten nach DIN 52612 $T_m = 39,8 \text{ °C}$ | 0,307 | + 1,8 |
| 3 | c | ohne Kontaktplatten | 0,197 | - 34,6 |
| 4 | d | mit Luftschicht von 1,2 mm auf der warmen Seite der Probe eingebaut; Thermoelemente auf dem Probekörper | 0,282 | - 6,3 |
| 5 | d | mit Luftschicht von 2,4 mm auf der warmen Seite der Probe eingebaut; Thermoelemente auf dem Probekörper | 0,279 | - 7,3 |
| 6 | d | wie Versuch Nr. 4, jedoch Heizplatte mit Plastikfolie beschichtet; Emissionszahl von 0,2 auf 0,95 erhöht. Abstandhalter an den Ecken | 0,281 | - 6,6 |
| 7 | d | wie Versuch Nr. 6, jedoch Abstandhalter mit Plastikstreifen am Rand (kein Luftaustausch möglich) | 0,284 | - 5,6 |

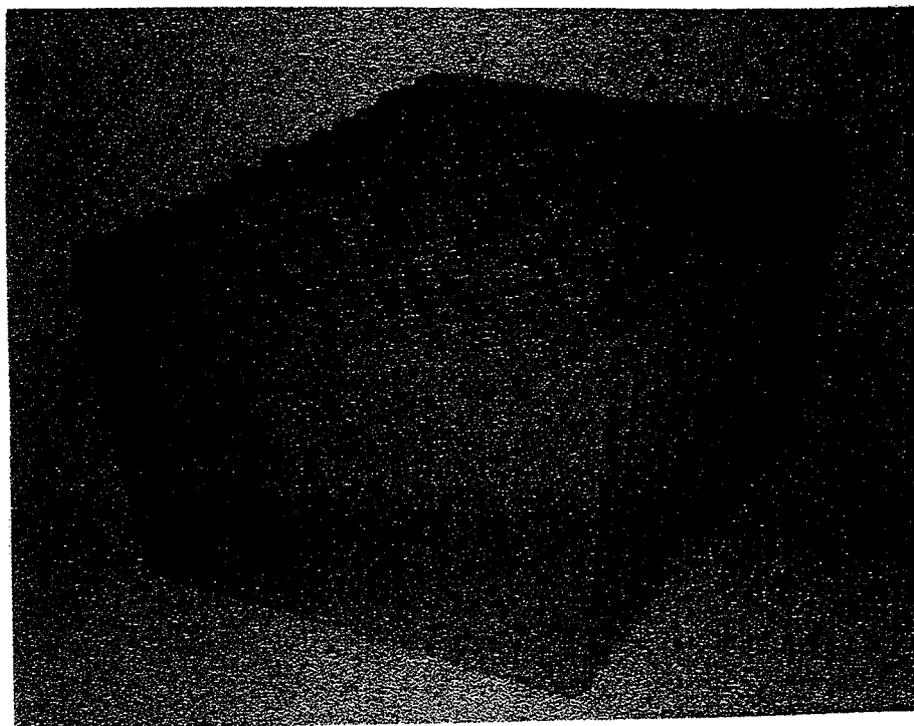
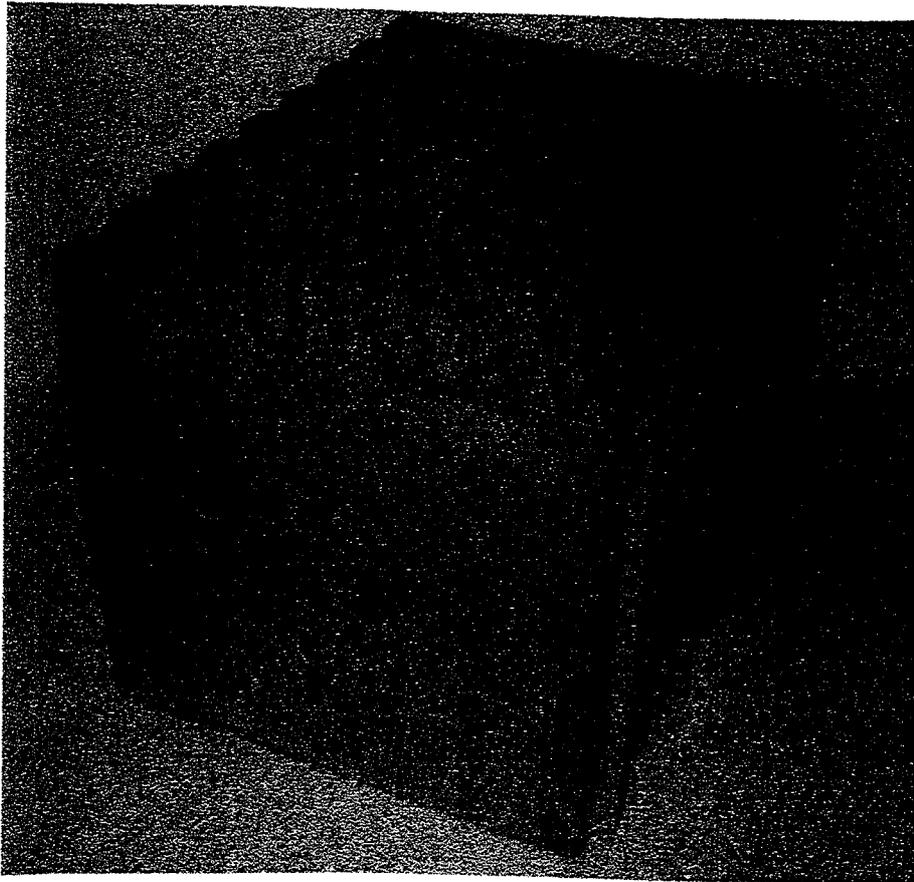


Bild 1: Fotografische Darstellung der Ziegelsteine W 17 (oben) und W 27 (unten), aus [13].

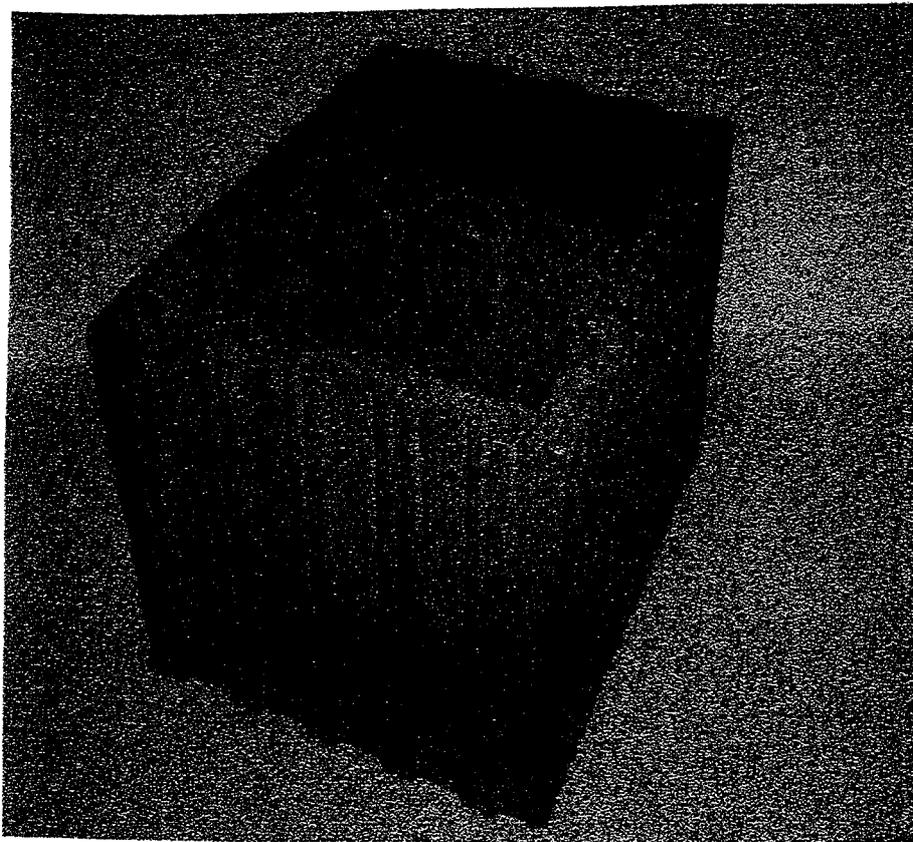
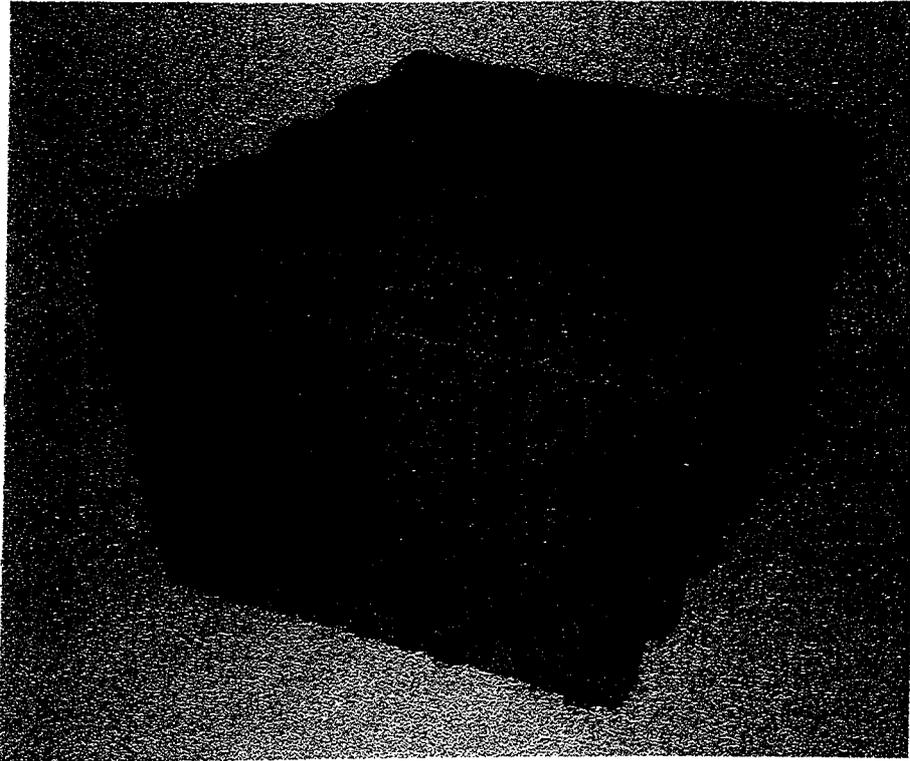
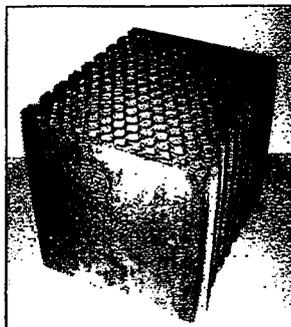


Bild 2: Fotografische Darstellung der Ziegelsteine R 17 (oben) und S (unten), aus [13].

Fraunhofer-Institut für Bauphysik

1. Bild des geprüften Mauersteins



2. Abmessungen, Rohdichte und Scherbenrohddichte

| Prüfziegel | Gewicht [g] | Länge [mm] | Breite [mm] | Höhe [mm] | Rohdichte [kg/dm ³] | Scherbenrohddichte ¹⁾ [kg/dm ³] | Scherbenrohddichte ²⁾ [kg/dm ³] |
|------------|----------------|---------------|----------------|--------------|------------------------------------|---|---|
| 1 | 10160 | 246 | 303 | 247 | 0,55 | 1,13 | 1,45 |

3. Lochung und Stege

| Lochungsart | Lochform | Anzahl | Abmessungen | | Einzelquerschnitt [cm ²] |
|-------------|----------|--------|---------------|----------------|---|
| | | | Länge [mm] | Breite [mm] | |
| Löcher | Wabe | 135 | 18 | | 2,1 |
| | Wabe | 37 | 15,8 | | 1,6 |
| | Fünfeck | 25 | 14,5 | 13,5 16 | 1,6 |

Gesamtochanteil (Löcher+Grifflöcher) [%] 51,3

Lochanteil (Grifflöcher+Mörteltaschen) [%] -

Randabstand der Grifflöcher [mm] -

Abstand der Grifflöcher [mm] -

Dicke der Außenwandung [mm] 7,0

Dicke der Außenwandung (Stirnseite) [mm] 6,5

Dicke der Innenstege -längs- [mm] 3,6

-quer- [mm] 4,0

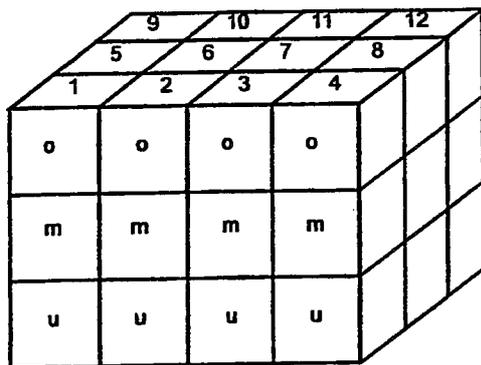
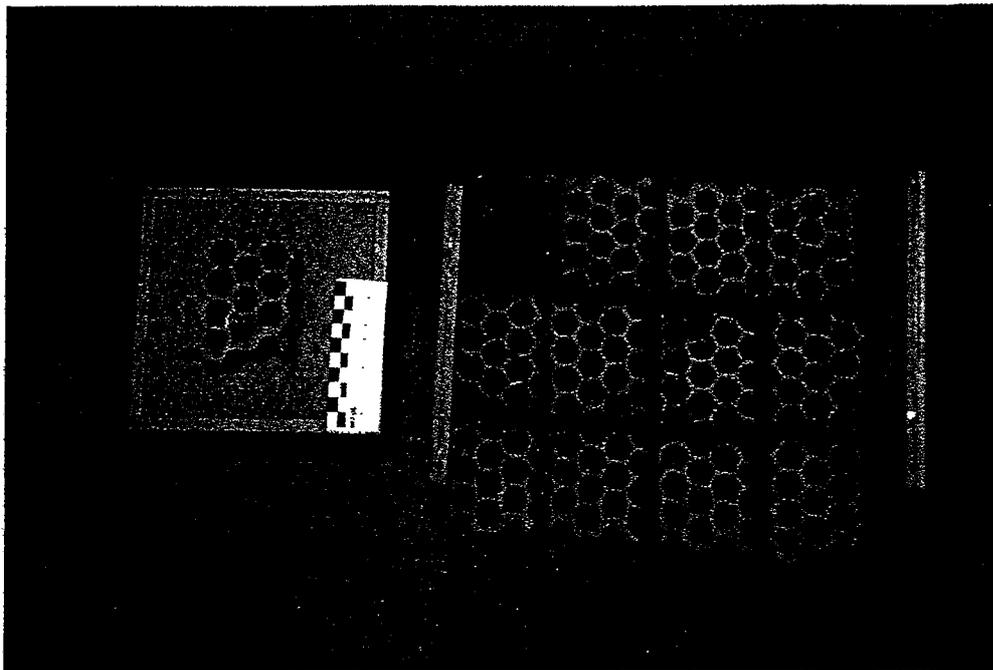
Lochreihenanzahl 17

Summe der Stegdicken [mm/m] 223

¹⁾ Scherbenrohddichte = f(Länge; Breite; Gesamtochanteil)

²⁾ Scherbenrohddichte = f(Masse trocken; Masse nass; Masse unter Wasser)

Bild 3: Beispiel für die Ermittlung der Stein-Kenndaten (Ziegel W 17-1,4) mit Stegdicken innen unter 5 mm, aus [13].



Scherbe o. 9

Scherbe m. 5

Scherbe u. 1

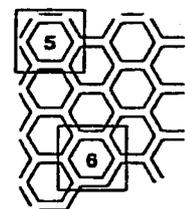
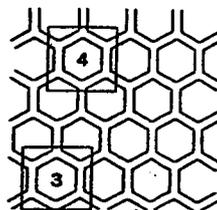
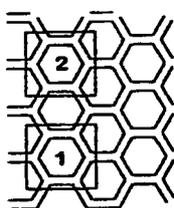


Bild 4: Fotografische Darstellung des zersägten Steines W 17 (vgl. Bild 1) zur Bestimmung der Rohdichteverteilung im Innern (oben) mit Außenstegen als geschliffene Platten zur λ -Messung sowie Skizzen zur Lage der Materialproben für die Gefügeanalyse (unten), nach [19].

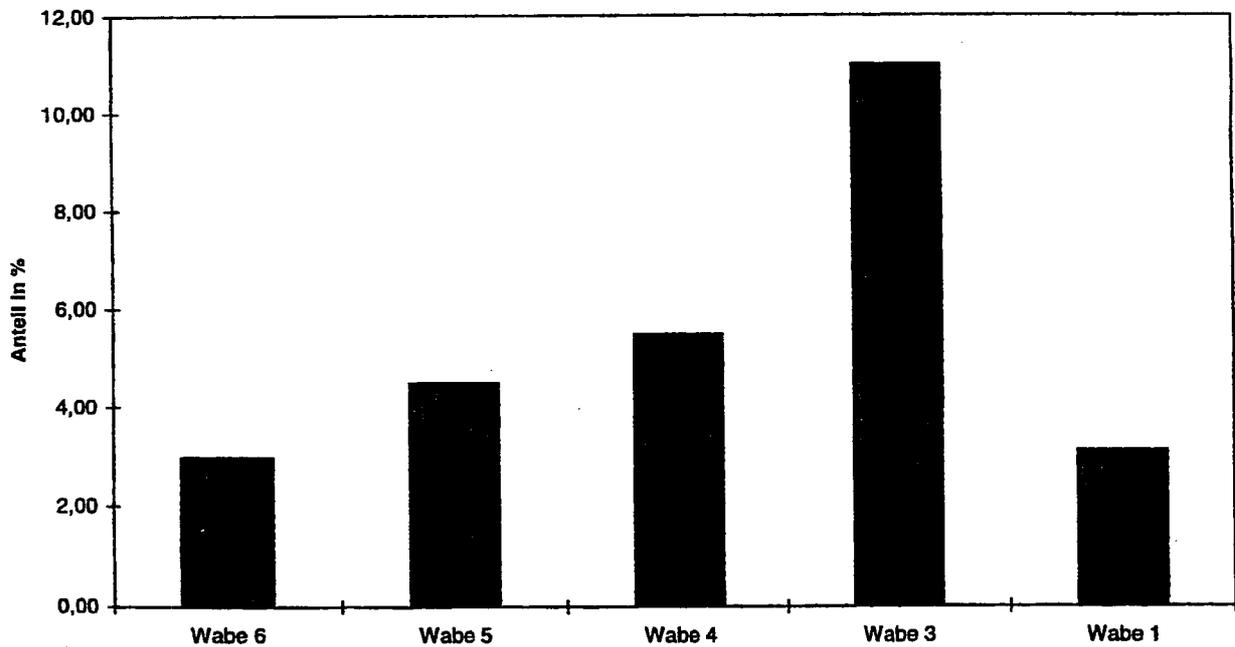
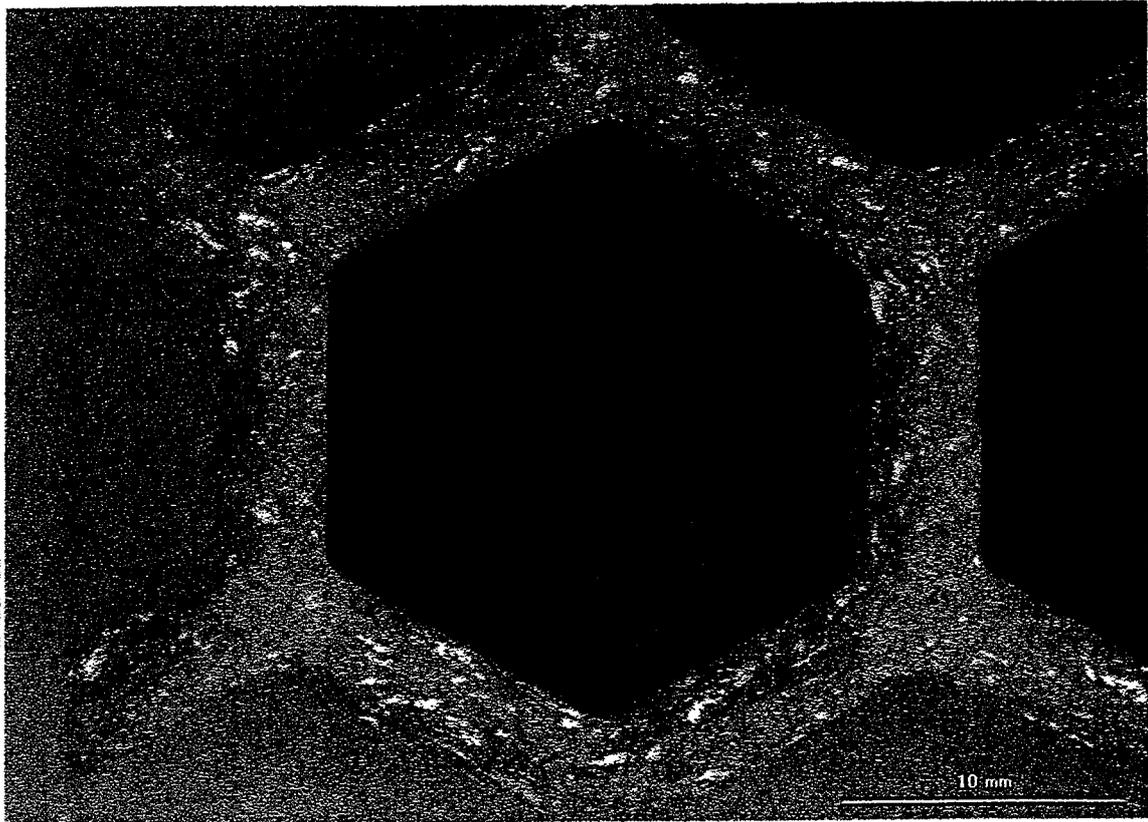
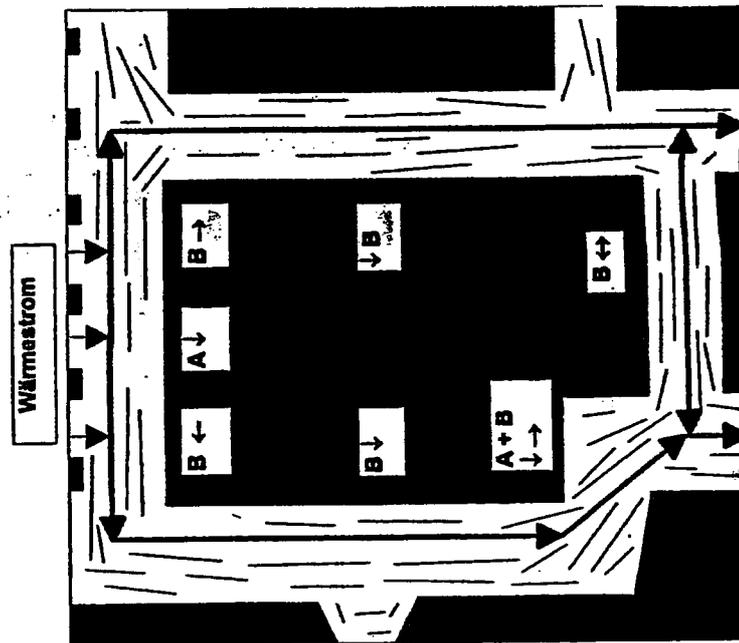
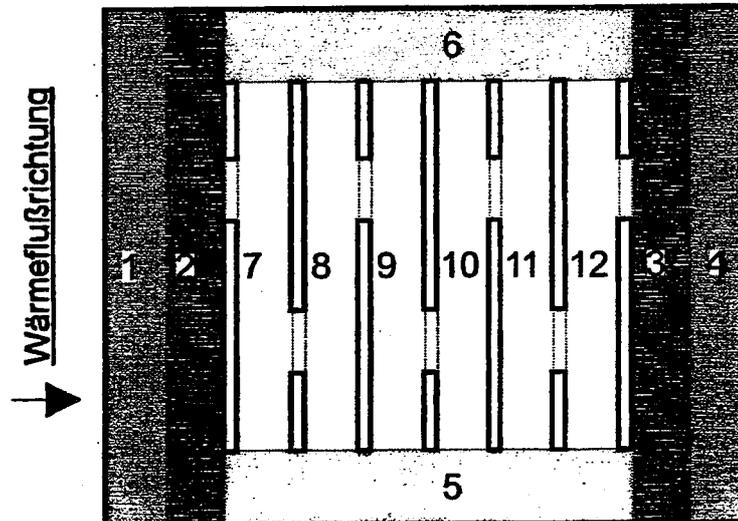


Bild 5: Bildanalytische Auswertung der Scherbentextur mit Vergrößerung (3,5fach) der Wabe 3 (oben) und Verteilung der „weißen Phasen“-Anteile zwischen 3 und 11 % (unten). Aus der Lage der länglichen Einschlüsse (Textur, weiß) ist die Preßrichtung abzuleiten, aus [19].



Maschinenseite



Ausstoßseite

Bild 6: Schematische Darstellung der signifikanten Materialbereiche für den Wärmefluß in Steinen mit Hohlkammern. Stege quer zum Wärmestrom A, oben, nach [24] und Leichtbetonbereiche 1 bis 4, unten) sind weniger wichtig als Stege in Wärmestromrichtung (Ziegelbereich B und Leichtbetonbereiche 5 und 6).

Fraunhofer-Institut für Bauphysik

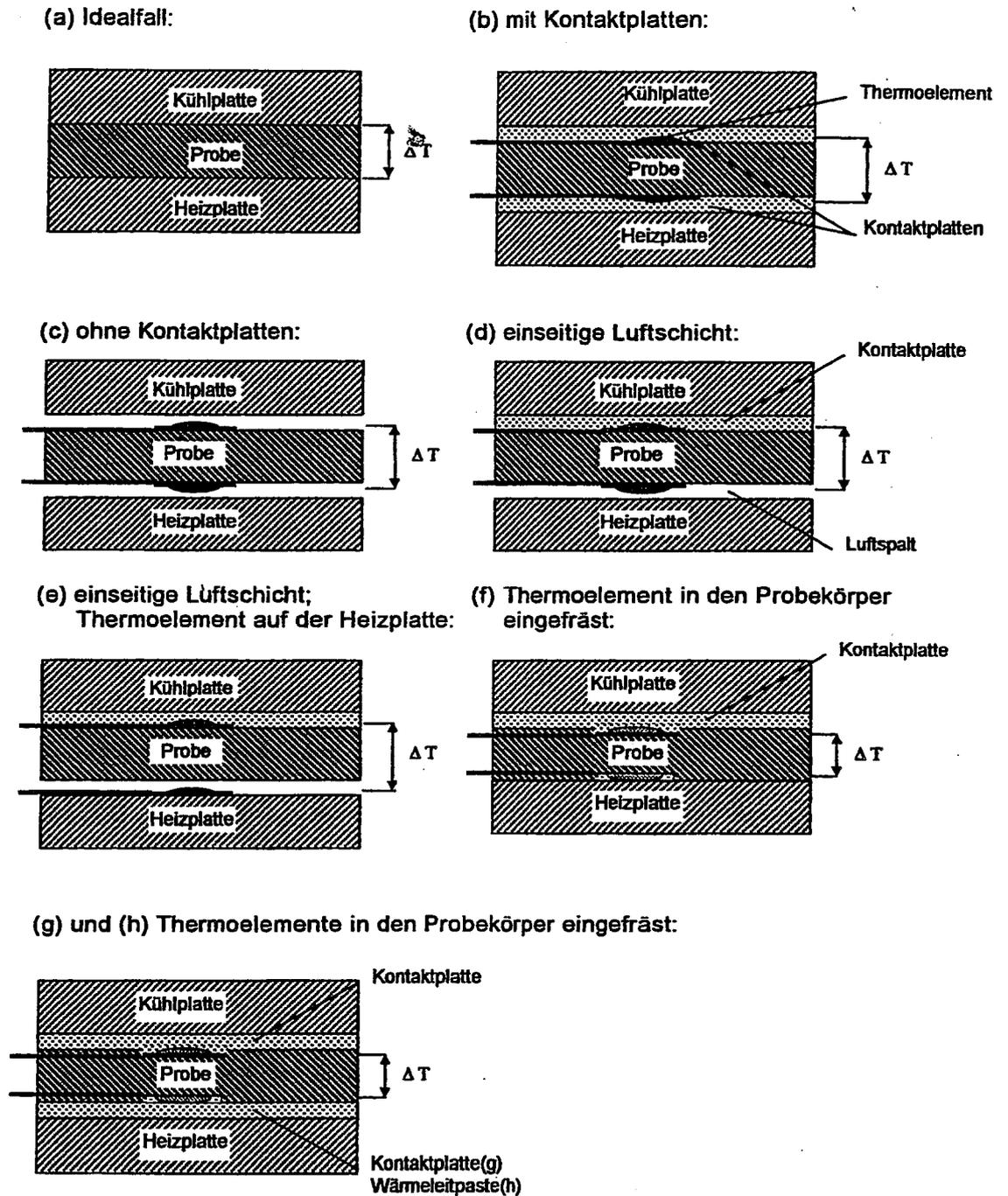
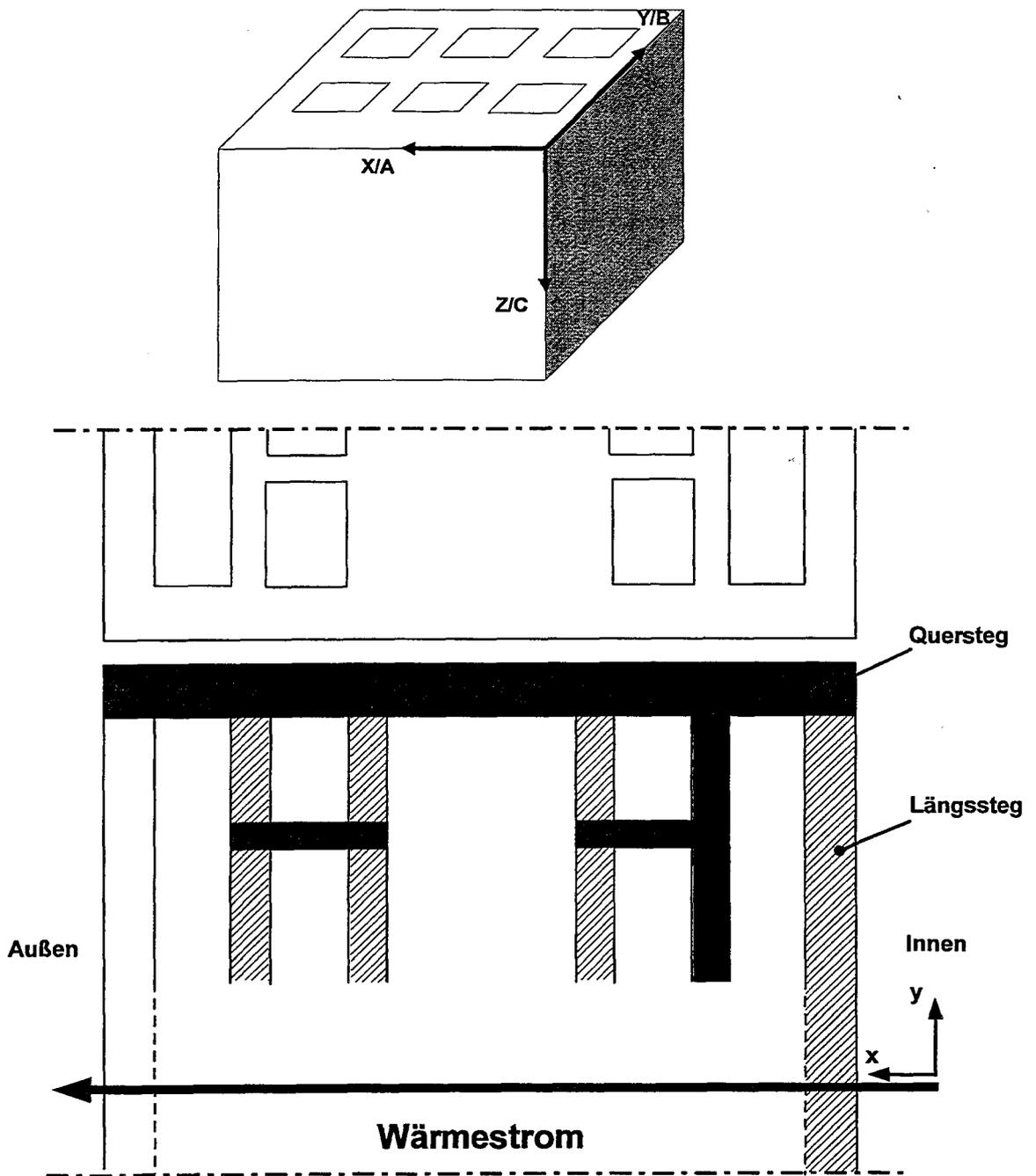


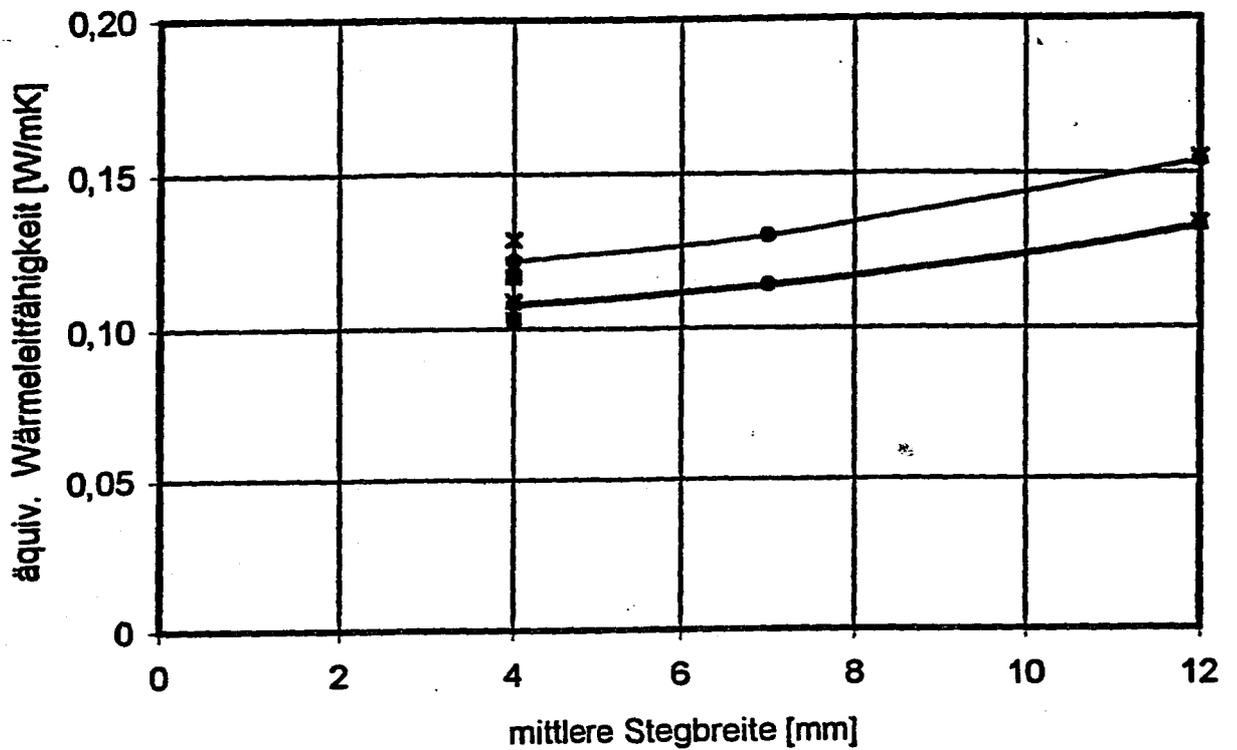
Bild 7: Schematische Darstellung der Probenanordnung im Einplattengerät mit unterschiedlicher Lage von Kontaktplatten, Thermoelementen und Luftschichten, aus [20].

Fraunhofer-Institut für Bauphysik



| Berechnung | λ_x | λ_y | λ_z |
|------------|-------------|-------------|-------------|
| | W/m*K | | |
| FD 4 | 0,25 | 0,35 | 0,25 |
| FD 5 | 0,35 | 0,25 | 0,35 |
| FD 6 | 0,42 | 0,35 | 0,35 |

Bild 8: Schematische Darstellung der Bereiche unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeiten in Mauersteinen (Anisotropie) und Wertezuordnung für Tabelle 6.



| | Steinhöhe mm | Außenstegbreite mm | Lagerfugen- mörtel | Ziegelscherben- material |
|---|-----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------|
| ● | 238 | 7 | LM 21 | isotrop |
| x | 238 | 12 | LM 21 | isotrop |
| ■ | 250 | 7 | Dünnbett | isotrop |
| + | 238 | 7 | LM 21 | anisotrop |

Bild 9: Einfluß von Stegbreiten, Vermörtelung und Materialisotropie auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit von Ziegelsteinmauerwerk mit dünnen Stegen, berechnet mit 3D-FD-Methode.

Fraunhofer-Institut für Bauphysik

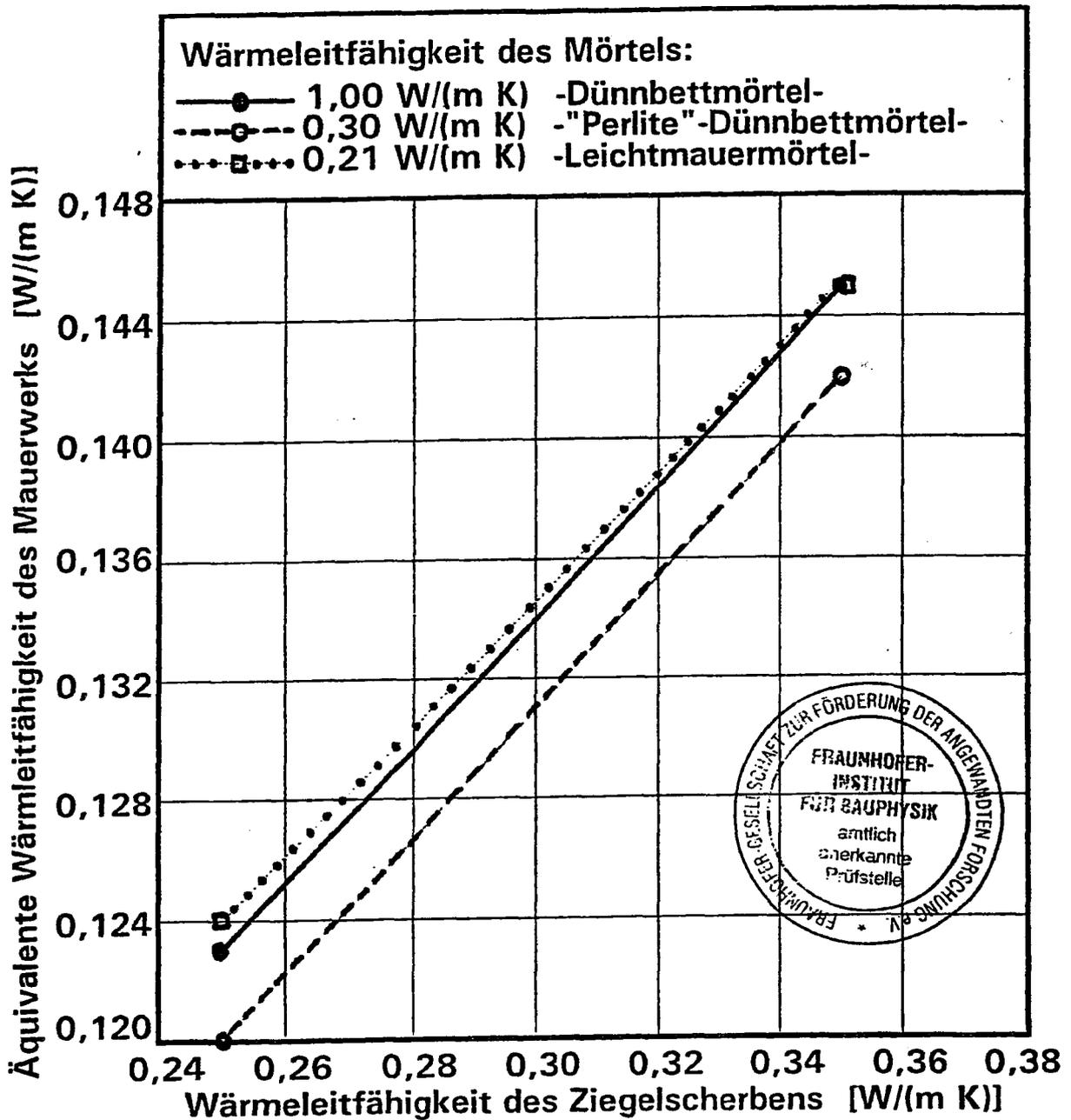


Bild 10: Einfluß von Vermörtelung und Wärmeleitfähigkeit des Ziegelscherbens (Scherbenrohddichte, -qualität) auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit von Ziegelstein-Mauerwerk, berechnet mit FD-Methode, am Beispiel Stein W 17, aus [22].

**Forschungsvorhaben „Überprüfung der Festlegung der Bauregelliste zur
Wärmeleitfähigkeit von Ziegelmauerwerk Teil B“**

hier: Forschungsbericht

Hinweis des Fraunhofer IRB Verlags:

Da es uns leider nicht gelungen ist, Farbfotos für die im Bericht enthaltenen schwarz-weiß Aufnahmen zu bekommen, haben wir den parallel erschienenen Sonderdruck zum Forschungsthema mit den entsprechenden Farbphotos beigelegt.

Der Forscher verzichtete bei der Titelaufnahme auf den Zusatz Teil B.

Fraunhofer IRB Verlag