

**Einfluss von Steingeometrie, Mörtel
und Feuchte auf die äquivalente
Wärmeleitfähigkeit von wärmetechnisch
hochwertigem Mauerwerk**

T 3335

T 3335

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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.

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.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2016

ISBN 978-3-8167-9709-8

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

www.baufachinformation.de



Einfluss von Steingeometrie, Mörtel und Feuchte auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit von wärmetechnisch hochwertigem Mauerwerk

Forschungsbericht

gefördert durch:
Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin
P 52-5-5.110-1402/12



FIW München

Forschungsbericht FO-03/11



FIW München e.V. – Forschungsbericht FO-03/11

Einfluss von Steingeometrie, Mörtel und Feuchte auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit von wärmetechnisch hochwertigem Mauerwerk

Forschungsbericht FO-03/11

**gefördert durch:
Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin
P 52-5-5.110-1402/12**

Die Verantwortung für den Bericht liegt bei den Autoren.

Der Bericht umfasst

104 Seiten (inkl. Anhang)
26 Tabellen
42 Abbildungen

Gräfelfing,
den 29. Februar 2016

Institutsleiter

Abteilungsleiter

Bearbeiter

Prof. Dr.-Ing. Andreas Holm

Dipl.-Ing. Christoph Sprengard

Max Engelhardt B.Eng.

Die gemessenen und berechneten Werte gelten nur für die angegebenen Materialien sowie deren Eigenschaften und Abmessungen. Für die durchgeführten Berechnungen, Begutachtungen und Beurteilungen ist der gegenwärtige Stand der Forschung maßgebend. Eine Haftung kann daher nur im Rahmen dieses Kenntnisstandes übernommen werden. Die Gewährleistung für gutachterliche Aufträge an das FIW München e.V. beschränkt sich auf die gesetzliche Haftung von 5 Jahren entsprechend den Verjährungsbestimmungen nach § 634a BGB für Bauwerke.

Inhalt

1	EINLEITUNG	9
1.1	Hintergrund	9
1.2	Aufgabenstellung	12
2	GRUNDLAGEN DER UNTERSUCHUNG	14
2.1	Technische Größen	14
2.2	Stand der Normung	15
	DIN 4108-4	15
	DIN EN 1745	18
	DIN EN ISO 6946	24
	DIN EN ISO 10456	25
2.3	Material	27
	Porenbeton	27
	Ziegel	27
	Mörtel	28
2.4	Messmethoden	28
	Wärmeleitfähigkeit der Materialien	28
	Halbsteinmessungen	31
	Wärmeleitfähigkeit ganzer Wände nach DIN EN 1934	33
2.5	Grundlagen für die Berechnungen	35
	Randbedingungen für die Berechnung und Auswertung	35
	Eigenschaften und Abmessungen der Materialien	35
3	DURCHFÜHRUNG DER UNTERSUCHUNG	38
3.1	Messprogramm	38
	Porenbeton	38
	Ziegel	38
3.2	Numerische Berechnungen	40
	Porenbeton	40
	Ziegel	40
4	ERGEBNISSE UND AUSWERTUNG	42

4.1	Messergebnisse	42
	Wandmessungen nach DIN EN 1934 – trocken	42
	Halbsteinmessungen nach DIBt Richtlinie – trocken	44
	Messungen am Steinmaterial	49
4.2	Berechnungsergebnisse	52
	Nachrechnung der Messergebnisse	52
	Einfluss der Mörtelart und Lagerfugendicke	56
	Einfluss der Feuchte	63
	Einfluss der Steinabmessungen	66
	Einfluss der Griffhilfen in Messung und Berechnung	67
	Einfluss der Anisotropie	68
5	BEURTEILUNG UND DISKUSSION	70
5.1	Vergleich der Messungen und der Berechnungen	70
5.2	Einfluss des Mörtels	73
5.3	Einfluss des Ausgleichsfeuchtegehaltes	74
5.4	Einfluss der Steinbreiten bei Mörtel und Griffhilfen	76
5.5	Einfluss der Anisotropie	77
5.6	3 % Kriterium beim U-Wert aus DIN EN ISO 6946	78
5.7	Gegenüberstellung der genormten Verfahren	81
5.8	Empfehlungen zur Harmonisierung	82
	Angleichung der Verfahren für Mauerwerks- und Dämmstoffprodukte	85
	Formulierter Entwurfsvorschlag für den Anhang der DIN 4108-4	87
6	FAZIT UND AUSBLICK	92
	Messungen	92
	Numerische Berechnungen	93
	Weitere Verfahren	94
	Bewertung der Einflüsse	94
	Hinweise und Erklärungen	95
	Zukünftiger Forschungsbedarf	96
7	LITERATUR UND NORMEN	97
8	ANHANG	101

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schema für die Umrechnung der deklarierten Werte der Wärmeleitfähigkeit [DIN 4108-4]	16
Abbildung 2: Schematische Darstellung der Ermittlung der wärmeschutztechnischen Eigenschaften von Mauersteinen und Mauerwerk [DIN EN 1745]	18
Abbildung 3: grafisches Verfahren zur Ermittlung der Trocken-Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, dry, mat}$ des Materials aus drei Einzel-Messungen [DIN EN 1745]	20
Abbildung 4: Wärmefluss durch verschiedene Bereiche des Ziegels mit entsprechender Wärmeleitfähigkeit – Schemazeichnung	29
Abbildung 5: Probenplatte aus plangefrästen Streifen der Querstege eines Hochlochziegels zur Messung der Wärmeleitfähigkeit in Querstegrichtung	30
Abbildung 6: Probenplatte aus den Innen-Längsstegen des luftgefüllten Hochlochziegels mit zwei übereinander angeordneten plangefrästen Platten - getrennt durch eine dünne PE-Folie	30
Abbildung 7: Schematische Darstellung der Mauersteinprobekörper im Zweiplattengerät [DIBt 1998]	31
Abbildung 8: Wärmestrom-Messplattengerät mit drehbarer Probenaufnahme	32
Abbildung 9: Halbsteinprobekörper aus plangefrästen Ziegeln in einem Einbaurahmen aus Dämmstoff mit zusätzlichem Holzrahmen zur Verspannung	32
Abbildung 10: Schemazeichnung des Halbsteinprobekörpers	33
Abbildung 11: Fassadenprüfstand Schemazeichnung (Quelle: DIN EN 1934:1998-04)	34
Abbildung 12: Schemazeichnung der Wand- / Mauerwerksprobekörper	34
Abbildung 13: Ergebnis der Wandmessung nach DIN EN 1934 - äquivalente Wärmeleitfähigkeit	43
Abbildung 14: Ergebnis der Halbsteinmessung nach DIBt-Richtlinie - äquivalente Wärmeleitfähigkeit der Porenbeton-Planblöcke ohne Mörtel in waagrechter und senkrechter Orientierung	45
Abbildung 15: Halbsteinmessung nach DIBt-Richtlinie - äquivalente Wärmeleitfähigkeit - Einfluss der Griffhilfen	46
Abbildung 16: Halbsteinmessung nach DIBt-Richtlinie - äquivalente Wärmeleitfähigkeit - Einfluss des Mörtels	47
Abbildung 17: Ergebnis der Halbsteinmessung nach DIBt-Richtlinie – äquivalente Wärmeleitfähigkeit für die Ziegel ohne Mörtel in waagrechter und senkrechter Orientierung	48
Abbildung 18: Ergebnisse der Messung an Porenbeton Platten im Zweiplattengerät - Wärmeleitfähigkeit trocken und Anstieg der Wärmeleitfähigkeit durch den Ausgleichsfeuchtegehalt	50
Abbildung 19: Ergebnisse der Messung der Wärmeleitfähigkeit im Zweiplattengerät an Prüfkörpern aus den Längsstegen und den Querstegen	52
Abbildung 20: Vergleich der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks aus Porenbeton-Planblöcken nach den untersuchten Methoden (Halbsteinmessung nicht vollständig direkt vergleichbar, da ohne Griffhilfen)	54
Abbildung 21: Vergleich der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks aus Ziegeln nach den untersuchten Methoden	56
Abbildung 22: Einfluss des Mörtels auf die Wärmeleitfähigkeit der Porenbeton-Planblöcke im Vergleich der Messung und Berechnung	58
Abbildung 23: Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Mörtels (Mörtelsorte) auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit einer Wand aus Porenbeton Planblöcken in $mW/(m \cdot K)$	59

Abbildung 24: Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Mörtels und der Lagerfugendicke auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit einer Wand aus Porenbeton Planblöcken in $mW/(m \cdot K)$ 60

Abbildung 25: Einfluss des Mörtels auf die Wärmeleitfähigkeit der Ziegel im Vergleich der Messung und Berechnung – die Halbsteinmessung des VZ 0,09 ist fehlerhaft und wird nicht zur Auswertung herangezogen..... 61

Abbildung 26: Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Mörtels (Mörtelsorte) auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit einer Wand aus Ziegeln in $mW/(m \cdot K)$ 63

Abbildung 27: Erhöhung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit der Porenbeton Planblöcke mit Griffhilfen und der Ziegel aufgrund der Ausgleichsfeuchte des Steinmaterials in $mW/(m \cdot K)$ 65

Abbildung 28: Einfluss der Griffhilfen auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit bei Wanddicken 0,30 und 0,365 m in %..... 66

Abbildung 29: Änderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit durch die Griffhilfen der Porenbeton-Planblöcke in $mW/(m \cdot K)$ - Vergleich der Halbsteinmessung und der numerischen Simulation 68

Abbildung 30: äquivalente Wärmeleitfähigkeit des Ziegelmauerwerks bei Ansatz anisotroper und isotroper Wärmeleitfähigkeitswerte für den Ziegelscherben 69

Abbildung 31: Wärmeleitfähigkeiten der Probe AAC0,09 – Methodenvergleich..... 72

Abbildung 32: Änderungen des U-Werts von Wänden aus AAC 0,09 – Methodenvergleich 72

Abbildung 33: Mörtel einfluss auf den U-Wert in Halbsteinmessungen und Berechnungen im Vergleich in Prozent Erhöhung des U-Werts für ein Mauerwerk aus Steinen ohne Mörtel 73

Abbildung 34: Erhöhung der U-Werte beim Porenbeton durch Berücksichtigung des Mörtels für verschiedene Wärmeleitfähigkeiten und Lagerfugendicken von 1 mm und 2 mm..... 74

Abbildung 35: Einfluss der Ausgleichsfeuchte auf den U-Wert des Mauerwerks 75

Abbildung 36: Einfluss der Steinbreite (Wanddicke) beim VZ 0,09 mit Dünnbettmörtel DBM 027 auf den U-Wert der Wand..... 76

Abbildung 37: Einfluss der Griffhilfen abhängig von der Steinbreite (Wanddicke) bei Porenbeton 77

Abbildung 38: Einfluss der Nicht-Berücksichtigung der Anisotropie des Ziegelscherbens beim U-Wert der betrachteten Ziegel in Prozent (ohne Mörtel)..... 78

Abbildung 39: Änderung des U-Wertes aufgrund eines Störeinflusses von 0,002 bzw. 0,004 $W/(m \cdot K)$ über dem U-Wert der ungestörten Wand - mit Darstellung des 3-% Kriteriums 79

Abbildung 40: 3-% Kriterium für Stein-Wärmeleitfähigkeit 0,07 $W/(m \cdot K)$ 80

Abbildung 41: 3-% Kriterium für Stein-Wärmeleitfähigkeit 0,09 $W/(m \cdot K)$ 80

Abbildung 42: 3-% Kriterium für Stein-Wärmeleitfähigkeit 0,12 $W/(m \cdot K)$ 80



Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Liste der wärmeschutztechnischen Größen	14
Tabelle 2: Indizes	14
Tabelle 3: Materialliste Porenbeton Planblöcke nach DIN EN 771-4 bzw. nach Zulassung.....	27
Tabelle 4: Materialliste Ziegel nach allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung	28
Tabelle 5: Lagerfugendicke und Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit des Mörtels	36
Tabelle 6: Wandmessungen nach DIN EN 1934 – Ergebnisse mit Messunsicherheit für den R-Wert und daraus resultierenden Ergebnis-Spannen für die Wärmeleitfähigkeit und den U-Wert	43
Tabelle 7: Ergebnisse der Halbsteinmessung an Porenbeton im trockenen Zustand	45
Tabelle 8: Porenbeton – Messungen an Halbsteinen nach der DIBt-Richtlinie – Änderung bei der Wärmeleitfähigkeit und beim U-Wert.....	47
Tabelle 9: Ergebnisse der Halbsteinmessungen an Ziegeln im trockenen Zustand	48
Tabelle 10: Ziegel – Messungen nach DIBt Richtlinie – Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeit	49
Tabelle 11: Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessung an Porenbeton	50
Tabelle 12: Messungen der Wärmeleitfähigkeit nach DIN EN 12664 am Ziegelscherben	51
Tabelle 13: Ergebnisse der Simulation für die Porenbeton-Probekörper im Vergleich mit den Messergebnissen der Wand und der Halbsteine	53
Tabelle 14: Ergebnisse der Berechnung für die Ziegel-Probekörper im Vergleich mit den Messergebnissen der Wand und der Halbsteine (für Messunsicherheiten siehe vorheriges Kapitel)..	55
Tabelle 15: Ergebnisse der Berechnungen für die Porenbeton-Probekörper im Vergleich mit den Messergebnissen der Halbsteine. (für Messunsicherheiten der einzelnen Ergebnisse der Halbsteinmessung siehe Tabelle 8)	57
Tabelle 16: Ergebnisse der Berechnung für die Porenbeton-Probekörper mit unterschiedlichen Mörtelarten	59
Tabelle 17: Ergebnisse der Berechnung für die Porenbeton-Probekörper mit unterschiedlichen Mörtelarten in zwei Lagerfugendicken.....	60
Tabelle 18: Ergebnisse der Berechnung für die Ziegel-Probekörper im Vergleich mit den Messergebnissen der Halbsteine (Messunsicherheit der Halbsteinmessung siehe Tabelle 10).	62
Tabelle 19: Ergebnisse der Berechnungen für die Ziegel mit unterschiedlichen Mörtelarten.....	63
Tabelle 20: Ergebnisse der Berechnungen für die Porenbeton-Planblöcke trocken und bei Ausgleichsfeuchte	64
Tabelle 21: Ergebnisse der Berechnungen für die Ziegel trocken und bei Ausgleichsfeuchte.....	64
Tabelle 22: Ergebnisse der Berechnungen für die Porenbeton-Probekörper in zwei Wanddicken ohne Mörtel – mit und ohne Griffhilfen	66
Tabelle 23: Ergebnisse der Simulation für die Ziegel in zwei bzw. drei Wanddicken mit und ohne Mörtel.....	67
Tabelle 24: Ergebnisse der Simulation für die Porenbeton-Probekörper in zwei Wanddicken ohne Mörtel – mit und ohne Griffhilfen	67
Tabelle 25: Ergebnisse der Simulation für die Ziegel ohne Mörtel – mit anisotropem und isotropem Ziegelscherben	69
Tabelle 26: Entwurf für eine Umrechnungstabelle für die Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit für die verschiedenen Mörtelsorten	82

1 Einleitung

Seit Frühjahr 2006 werden Mauersteine mit dem CE-Kennzeichen versehen in Europa gehandelt. Die nach DIN EN 771:2011-07 in Verbindung mit DIN EN 1745:2012-07 deklarierten Werte der Wärmeleitfähigkeit, die sogenannten Nennwerte, sind Werte für den trockenen Zustand [dry] der Steine [unit] oder des Materials [mat]. Zudem ist meistens der Einfluss des Fugenmaterials [mor] enthalten. Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit werden jedoch weiterhin von den einzelnen Mitgliedsstaaten der EU gesondert festgelegt. Für die Anwendung in Deutschland regelt DIN 4108-4:2013-02 die Umrechnung der Nennwerte einzelner Steine (Block oder unit) auf den Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit für das Mauerwerk (Wand oder masonry [mas]) mit Feuchteinfluss ($u_{m,80}$ oder u) und einem konkreten Fugenmaterial (Mörtel oder mortar [mor]). Im Rahmen von Nachweisen nach der Energieeinsparverordnung (EnEV) sind U-Werte immer mit Bemessungswerten der Wärmeleitfähigkeit zu berechnen. Die Umrechnung ist in Anhang A von DIN 4108-4 geregelt. Aufgrund der historisch gewachsenen Unterschiede in der Bewertung von Mauerwerk in den europäischen Ländern, geht diese Umrechnung teilweise von nicht eindeutig definierten Angaben aus.

1.1 Hintergrund

Der Nennwert der Wärmeleitfähigkeit (declared value) wird nach europäisch standardisierten Mess- und Statistikverfahren aus einzelnen Messwerten der Wärmeleitfähigkeit bestimmt und vom Hersteller oder von einem Prüfinstitut festgelegt. Er stellt die vom Hersteller zugesicherte Eigenschaft des gehandelten Dämm- oder Baustoffes dar. Nachdem der Hersteller aber nicht weiß, unter welchen klimatischen Bedingungen sein Produkt eingesetzt wird, die Temperatur (und bei vielen Stoffen auch die Umgebungsfeuchte) einen deutlichen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit haben, kann das spätere Dämmverhalten des Materials im Gebäude vom deklarierten Nennwert abweichen. Der U-Wert soll aber für den langjährigen Gebrauchszustand des Dämm- oder Baustoffs im tatsächlichen Gebäude charakterisiert werden.

Für die U-Wert-Berechnung geht man deshalb von sogenannten „Bemessungswerten der Wärmeleitfähigkeit“ (früher Rechenwerte) aus. Sie charakterisieren den langfristigen Gebrauchszustand des Bau- oder Dämmstoffs, und enthalten Zuschläge aufgrund des baupraktischen Feuchtegehalts (Ausgleichsfeuchtegehalt mineralischer Baustoffe und hygroskopischer Dämmstoffe) und der eventuellen Alterung des Materials. Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit werden für die Anwendung in Deutschland durch die Oberste Bauaufsicht d.h. das Deutsche Institut für Bautechnik, DIBt, festgelegt und veröffentlicht. Tabellierte Werte der Wärmeleitfähigkeit in DIN 4108-4 und DIN EN ISO 10456:2010-05 sind ebenfalls Bemessungswerte und dürfen direkt – ohne weitere Zuschläge – in die U-

Wert-Berechnung eingesetzt werden. Die Verwendung anderer Werte anstelle von Bemessungswerten für die Berechnung des U-Werts stellt einen Planungsfehler dar!

Für verschiedene Bau- und Dämmstoffe existieren unterschiedliche Verfahren, wie man von einem Messwert oder einem Nennwert der Wärmeleitfähigkeit zu einem Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit für die Anwendung in Deutschland gelangt.

Normungsarbeit zu Bemessungs- und Berechnungsverfahren von Mauerwerk verfolgt den Zweck, die Regelungsgrundlagen für sichere und energieeffiziente Konstruktionen im Hochbau zu legen. Um eine ausreichende Qualitätssicherung mit probaten Mitteln zu ermöglichen, werden vereinfachte Berechnungs- und Bemessungsmethoden entwickelt, denen empirische und theoretische Nachweise zugrunde liegen, und in den entsprechenden Normblättern und Eurocodes zur Verfügung gestellt. Der Entwicklung einer vereinfachten Rechenmethode gehen somit stets umfangreiche Untersuchungen der Bau- und Dämmstoffe voraus. Der Vorteil dieses Vorgehens liegt auf der Hand – der stetige Prüfaufwand der Produkthersteller reduziert sich durch die repräsentativen Untersuchungen der Baustoffe durch forschende Stellen, die Parametermodelle für die Materialien generieren, aus denen die Bemessungsverfahren in der Normung abgeleitet werden können.

Das bedeutet auch, dass Entwicklungsfortschritte im Bereich der Baustoffe und neue Erkenntnisse der Wissenschaft ständig in die Bewertung der Aktualität und Gültigkeit der betreffenden Normen mit einfließen. So hat sich z.B. die bis in die 90er Jahre verwendete „Reinders-Kurve“, der die Annahme einer allgemeinen Gesetzmäßigkeit zwischen Rohdichte und Wärmeleitfähigkeit von Ziegelscherben zugrunde liegt [Reinders 1981] in späteren Untersuchungen [Anton 1996] als unsichere Pauschalisierung herausgestellt, da bei gleicher Rohdichte Variationen der Wärmeleitfähigkeit je nach Materialherkunft von bis zu 30 % feststellbar waren.

Begründbar ist diese Bandbreite u.a. durch die Poren-Anisotropie. Vor dem Hintergrund solcher Befunde sind auch Verbesserungen der Messtechnik und in der Probenpräparation zu beachten – so sind die Abweichungen der linearen Reiners-Kurve zum neueren Kenntnisstand im messtechnisch anspruchsvolleren Bereich niedriger Wärmeleitfähigkeiten deutlich größer. Ausgleichskurven, z.B. aus späteren Untersuchungen des IZF [Hauck et al. 2000] zeigen dort bessere Übereinstimmungen [Erker 2002].

Die äquivalente Wärmeleitfähigkeit von Mauerwerk konnte durch Fortschritte in der Produktionstechnik und durch neue Produktentwicklungen in den letzten Jahren deutlich gesenkt werden und liegt mittlerweile fast auf dem Niveau von Dämmstoffen. Die vorliegenden Forschungsergebnisse und entsprechenden Normen müssen aus diesem Grund „nach unten“ erweitert werden. Viele hochwärmedämmende Mauersteine werden mittlerweile mit Dämmstofffüllung hergestellt. Für Dämmstoffe und Mauersteine mit Dämmstoffen werden die

wärmetechnischen Kennwerte jedoch mit unterschiedlicher Vorgehensweise ermittelt und festgelegt. Hier ist eine Anpassung des Verfahrens zur Bestimmung der wärmetechnischen Nenn- und Bemessungswerte erforderlich. Durch die bedeutenden wärmetechnischen Verbesserungen beim Steinmaterial und bei den Mauersteinen nehmen die systematischen Einflüsse auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit relativ betrachtet zu.

Bei einigen hochwärmedämmenden Produkten müssen jetzt Einflüsse berücksichtigt werden, die bisher vernachlässigt werden konnten, da sie den Wärmedurchgang der Wand nur unerheblich verschlechterten. Eine mögliche Grenze für diese Einflüsse ergibt sich aus dem „Bagatellkriterium“ in Abschnitt 7 und Anhang D in DIN EN ISO 6946:2008-04. Dieses sagt aus, dass der U-Wert eines Bauteils angepasst werden muss, wenn die kumulierten Einflüsse aus Befestigungen, Luftspalten oder dem Hinterlaufen der Dämmung durch Regenwasser (beim Umkehrdach) den U-Wert des ungestörten Bauteils um mehr als 3 % erhöhen. Dieses Kriterium wird zunehmend auch für andere „Störungen“ homogener Bauteile angewendet.

Bei Mauerwerk sind Einflüsse auf den U-Wert durch den verwendeten Mörtel oder Plansteinkleber, Griffhilfen oder Daumenlöcher in den Steinen gegeben. Durch die stetigen Anpassungen der nationalen und internationalen Normen ergeben sich durch die Berücksichtigung nationaler Interessen und die Vielfalt des Bauens in Europa immer wieder Komplikationen zwischen verschiedenen Normen und Richtlinien.

Zwar sind nationale Regelungen den Internationalen entsprechend zu gestalten und auch internationale Normen zur Angleichung und Konformität angehalten, die Umsetzung kann jedoch durch unterschiedliche und komplexe Regelstrukturen problematisch sein. Die nationalen Ansätze berücksichtigen beispielsweise historisch gewachsene Methoden oder Benennungsweisen, die sich nicht im europäischen Kontext verankern lassen. Umgekehrt müssen europäisch etablierte Vorgehensweisen und Bezeichnungen so flexibel sein, dass die nationalen Regeln angepasst werden können.

In Bezug auf Nenn- und Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit von Mauerwerk sind die Regelungen auf nationaler und europäischer Ebene bis heute nicht übereinstimmend geregelt. Die daraus resultierenden Verweise der DIN 4108-4 sind dadurch teilweise unklar.

Für die Umrechnung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von Mauerwerk auf andere Steinabmessungen und andere Mörtelarten sind mehrere Vorgehensweisen zulässig: z.B. 3-dimensionale und 2-dimensionale numerische Berechnungen nach DIN EN ISO 10211, Umrechnungen mit dem vereinfachten Verfahren nach DIN EN ISO 6946, sowie flächenanteilige Umrechnungen und auch Tabellenverfahren in

DIN 4108-4. Die Ergebnisse unterscheiden sich mitunter deutlich, vor allem für neuartige Steine mit niedriger äquivalenter Wärmeleitfähigkeit.

Eine Klarstellung der Vorgehensweisen und Angleichung der Verfahren ist dringend erforderlich, damit für Hersteller und Verbraucher klarere Anforderungsgrundlagen und eine höhere Rechtssicherheit geschaffen werden. Auch im Hinblick auf Mauersteine mit Dämmstofffüllung ist eine Festlegung und Angleichung der Vorgehensweise für Mauerwerksmaterial und Dämmstoffe zur Bestimmung wärmetechnischer Nenn- und Bemessungswerte wünschenswert.

1.2 Aufgabenstellung

Forschungsarbeiten zur Umrechnung von Wärmeleitfähigkeitswerten von Mauerwerk [Anton 1996], [König et. al 2000], [Anton 2006a], [Anton 2006b] behandeln die zur jeweiligen Entstehungszeit üblichen Mauerwerke mit äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten von mindestens $0,12 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Zwischenzeitlich wurden jedoch etliche genormte und zugelassene Produkte für den Wärmeleitfähigkeitsbereich von $0,060$ bis $0,12 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ auf den Markt gebracht.

In dieser Untersuchung werden daher die vorliegenden Ergebnisse für diese neuen hochwärmedämmenden Produkte erweitert, zumal die Umrechnungstabelle in DIN V 4108-4:2007-06 den Bereich der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit für Mauerwerk von $0,08$ bis $0,18 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ abdeckt, hierbei aber auf Nennwerte der Wärmeleitfähigkeit abstellt. Die Neuausgabe DIN 4108-4:2013-02 klammert den Wärmeleitfähigkeitsbereich $0,08$ bis $0,09 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ für Dickbettmörtelsorten wieder aus und behebt den Fehler, dass nicht Nennwerte sondern Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit für die Anwendung in Deutschland festgelegt werden.

Es wird auch untersucht, wie sich Art und Abmessungen der Mörtelfugen, Feuchtegehalt, Griffaschen und Daumenlöcher, Steinabmessungen und Ausrichtung der Hohlräume und Luftkammern auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks auswirken. Aufbauend auf den Ergebnissen für die einzelnen Einflüsse werden Schwellen-U-Werte für das Mauerwerk festgelegt, für die die o.g. Einflüsse das 3 %-Kriterium aus DIN EN ISO 6946 übersteigen. Werden diese Einflüsse dann nicht im Rahmen der Festlegung der Nenn- und Bemessungswerte mittels Messungen an ganzen Wänden nach DIN EN 1934 bzw. in dreidimensionalen numerischen Simulationen erfasst, müssen sie bei der Berechnung der U-Werte nachträglich berücksichtigt werden.

Im Rahmen dieses Vorhabens werden die Verfahren zur Bestimmung von wärmetechnischen Nenn- und Bemessungswerten für Mauerwerk in DIN 4108-4 und DIN EN 1745 miteinander verglichen. Einige im europäischen Kontext unklare Aspekte in der DIN 4108-4 werden dargestellt und Empfehlungen zur Anpassung ausgearbeitet. Beispielsweise wird Tabelle A.2 auf Basis von dreidimensionalen

Berechnungen neu erstellt und für weitere Mörtelsorten (z.B. LM 16 und DBM 0,3 in 1 mm Lagerfugendicke) ergänzt.

Es wird ein Vorschlag ausgearbeitet, wie die Harmonisierung der Vorgehensweise für die Ermittlung von Bemessungswerten der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von Mauerwerk und Dämmstoff angenähert werden kann. Anhand von U-Wert-Beispielrechnungen wird der Einfluss der Feuchte (bei Anwendung der e-Funktion aus DIN EN ISO 10456 in Verbindung mit DIN EN 1745) auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit und den U-Wert von Mauerwerk untersucht. Zudem wird ein Vorschlag erarbeitet, wie sich die Vorgehensweisen und die Bezeichnungen in DIN EN 1745 und in DIN V 4108-4 besser angleichen lassen.

2 Grundlagen der Untersuchung

2.1 Technische Größen

Tabelle 1: Liste der wärmeschutztechnischen Größen

Wärmetechnische Größe	Formelzeichen	Einheit
Rohdichte	ρ	kg/m ³
Temperatur	ϑ	°C
Wärmeleitfähigkeit	λ	W/(m·K)
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² ·K/W
Wärmeübergangswiderstand	R _s	m ² ·K/W
Wärmestromdichte	q	W/m ²
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/(m ² ·K)
massebezogener Feuchtegehalt bei X % relativer Luftfeuchtigkeit	u _{m,x}	kg/kg
volumenbezogener Feuchtegehalt	Ψ	m ³ /m ³
Feuchtekorrekturfaktor	F _m	-
Feuchteumrechnungskoeffizient - massebezogen	f _u	kg/kg
Feuchteumrechnungskoeffizient - volumenbezogen	f _ψ	m ³ /m ³

Tabelle 2: Indizes

Bezeichnung	Beschreibung
10	durchschnittliche Prüftemperatur von 10 °C
50/90	50 % -Quantil mit einem Vertrauensintervall von 90 %
90/90	90 % -Quantil mit einem Vertrauensintervall von 90 %
dry	trockener Zustand
e	außen (exterior)
i	innen (interior)
mas	Mauerwerk
mat	Material
mor	Mörtel
unit	Mauerstein

2.2 Stand der Normung

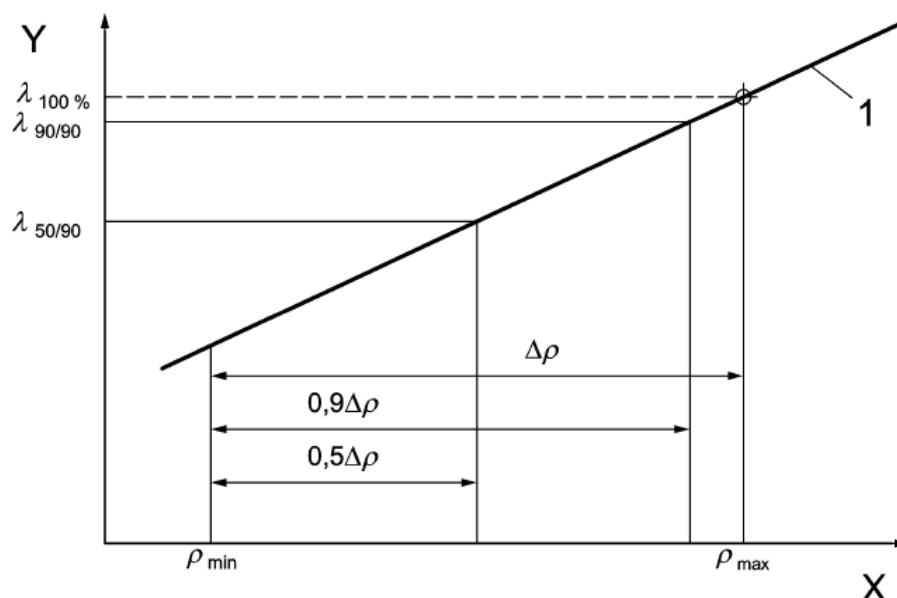
Die zum Zeitpunkt der Berichterstellung in der Bundesrepublik Deutschland wichtigsten gültigen Normen, welche die Untersuchungsgrundlagen des vorliegenden Berichtes sind, werden nachfolgend aufgelistet und die relevanten Inhalte beschrieben. Sämtliche Verweise, Diskussionen und Empfehlungen dieser Arbeit beziehen sich auf die genannten Versionen der Normen. Einige relevante Normen zum baulichen Wärmeschutz und zur Festlegung von Nenn- und Bemessungswerten für Mauerwerk wurden während der Projektlaufzeit angepasst und sind teilweise neu erschienen (DIN EN 1745; DIN 4108-4). Einige Fragestellungen aus der ursprünglichen Antragstellung für dieses Forschungsprojekt sind mittlerweile präzisiert worden und haben Eingang in das Normenwerk gefunden. Trotzdem besteht an vielen Stellen weiterhin Klärungsbedarf hinsichtlich der unterschiedlichen Vorgehensweise in Deutschland und Europa und für Dämmstoffe und Baustoffe.

DIN 4108-4

DIN 4108-4:2013-02 „Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte“ stellt eine Tabellensammlung von wärme- und feuchtetechischen Bemessungswerten zur Verfügung. Seit Frühjahr 2006 werden Mauersteine mit dem CE-Kennzeichen versehen in Europa gehandelt. Für die Anwendung in Deutschland regelt DIN 4108-4 die Umrechnung von im CE-Kennzeichen deklarierten Werten der Wärmeleitfähigkeit des einzelnen Steins (Blockwert) oder einer Mauer inklusive Mörtelfugen in Bemessungswerte der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit. Darüber hinaus regelt DIN 4108-4 die Vorgehensweise zur Festlegung von Feuchtekorrekturfaktoren F_m für Mauerwerksprodukte die von den in der Norm angegebenen Faktoren abweichen. In Anhang A der Norm sind verschiedene Umrechnungsverfahren für Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit von Mauerwerk mit unterschiedlichen Mörtelsorten angegeben. Eine nationale Anpassung der Festlegungen aus DIN EN 1745 ist hier vor allem für die in Deutschland üblichen Rohdichteklassen notwendig. Für nach DIN EN 1745 in Verbindung mit DIN EN 771 festgelegte und deklarierte Rohdichtebereiche ist ein Verfahren angegeben, wie man diese Werte auf die obere Grenze des (selbst gewählten) Rohdichtebereichs extrapoliert und hierfür die zugehörige Wärmeleitfähigkeit bestimmt. Hierfür kann die Steigung der Wärmeleitfähigkeit über der Rohdichte für das zugrunde liegende Steinmaterial nach DIN EN 1745 oder (falls vorhanden und nachgewiesen) eine Werkskurve verwendet werden (Abbildung 1). Dieses Verfahren wird nachfolgend genauer beschrieben.

Extrapolation auf den 100%-Wert der Produktion

Die deklarierten Werte der Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks, oder die mittels obiger Verfahren berechneten Werte, werden auf den 100 %-Wert der Produktion umgerechnet. Diese Umrechnung ist ähnlich der früheren deutschen Vorgehensweise, bei welcher auf das obere Ende der Rohdichteklasse extrapoliert wurde. Sollte aus der Deklaration nicht ersichtlich sein, ob es sich um den 50 %-Wert ($\lambda_{50/90}$) oder den 90 %-Wert ($\lambda_{90/90}$) handelt, dann geht DIN 4108-4 davon aus, dass es sich um den Wert für die Mitte des Rohdichtebereiches ($\lambda_{50/90}$) der Produktion handelt. [Aktualisierung 2015: Zwischenzeitlich wurden die Angaben, welcher Wert deklariert werden soll in den Produktnormen für die einzelnen Steine präzisiert.] Für die Umrechnung werden außerdem Angaben zur minimalen und maximalen Rohdichte des Produkts benötigt. Das Schema für die Umrechnung ist im nachfolgenden Schaubild aus DIN 4108-4 dargestellt:



Legende

- 1 Gerade mit Steigung nach Werksproduktion oder DIN EN 1745
- X Nennrohddichte
- Y Wärmeleitfähigkeit

Abbildung 1: Schema für die Umrechnung der deklarierten Werte der Wärmeleitfähigkeit [DIN 4108-4]

Der $\lambda_{100\%}$ -Wert kann aus der Steigung der Geraden m , der Bandbreite der Rohdichte $\Delta\rho$ und dem deklarierten Wert ($\lambda_{50/90}$ bzw. $\lambda_{90/90}$) berechnet werden. Werte der Geradensteigung sind – für das jeweilige Steinmaterial – dem Anhang A aus DIN EN 1745 zu entnehmen, oder können näherungsweise der Tabelle A.1 aus DIN 4108-4 entnommen werden. Der $\lambda_{100\%}$ -Wert berechnet sich somit zu:

$$\lambda_{100\%} = \lambda_{90/90} + 0,1 \cdot \Delta\rho \cdot m \quad \text{bzw.} \quad \lambda_{100\%} = \lambda_{50/90} + 0,5 \cdot \Delta\rho \cdot m \quad \text{in W/(m}\cdot\text{K)}$$

Feuchteinfluss

Aus der Luft durch Sorption aufgenommene Feuchte erhöht die Wärmeleitfähigkeit mineralischer Baustoffe. Zu dem zuvor extrapolierten Trockenwert muss deshalb noch der Einfluss der baupraktischen Feuchte hinzugerechnet werden. Dafür enthält u.a. DIN 4108-4 eine Tabelle mit Feuchtekorrekturfaktoren F_m für mineralische Bauprodukte, mit denen die Trockenwerte der Wärmeleitfähigkeit zu multiplizieren sind. Das Ergebnis wird auf zwei Nachkommastellen gerundet:

$$\lambda_{100\%,u} = \lambda_{100\%} \cdot F_m \quad \text{in W/(m}\cdot\text{K)}$$

Diese Feuchtekorrekturfaktoren F_m (früher bezeichnet als Zuschlagswert Z mit dem Zusammenhang $Z = F_m - 1$) beinhalten eine gewisse Sicherheit und sollen die ganze Streubreite der betreffenden Produkte umfassen. Zahlenwerte für F_m sind in Tabelle 5 in DIN 4108-4 angegeben. Für ausgereifte Produkte aus technisch hochwertigen Produktionsanlagen liegen sie weit auf der sicheren Seite und führen zu ungünstigen, unrealistisch hohen Werten der Wärmeleitfähigkeit.

Aus diesem Grund verwenden viele Hersteller von Mauerwerksprodukten individuelle Feuchtekorrekturfaktoren. Für die Ermittlung werden Wärmeleitfähigkeitsmessungen im trockenen Zustand und bei Ausgleichsfeuchte miteinander verglichen und der Anstieg der Wärmeleitfähigkeit je 1 % Ausgleichsfeuchtegehalt bestimmt. Solche Messungen sind bei anerkannten Prüfinstituten durchzuführen; der notwendige Prüfungsumfang ist im Anhang von DIN 4108-4 beschrieben.

Einstufung / Rundung

Die Einstufung der so erhaltenen Werte in Wärmeleitfähigkeitsklassen erfolgt nach den folgenden Rundungsregeln. Der eingestufte Wert ist der Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit eines Wandmaterials inklusive Mörtel:

0,08	$\leq \lambda_{100\%,u}$	$\leq 0,99$	gerundet auf 0,01 W/(m·K)
1,00	$\leq \lambda_{100\%,u}$	$\leq 3,00$	gerundet auf 0,1 W/(m·K)

DIN EN 1745

Die DIN EN 1745:2012-07 „Mauerwerk und Mauerwerksprodukte – Verfahren zur Bestimmung von wärmeschutztechnischen Eigenschaften“ regelt die Ermittlung der Nennwerte der Wärmeleitfähigkeit und auf europäischer Ebene auch die Ermittlung von Bemessungswerten der Wärmeleitfähigkeit für Stein-Material, Mörtel, einzelne Steine und Mauerwerk. Die enthaltenen Vorgaben sind Grundlage für die Regelungen in DIN 4108-4. Es werden verschiedene (gleichwertige) Modelle und Vorgehensweisen beschrieben mit denen die Trockenwerte $\lambda_{10, trocken}$, für Mauersteine [unit] und Trockenwerte für das Steinmaterial [dry, mat] bestimmt werden können. Weiterhin beschreibt DIN EN 1745 die Ableitung von Bemessungswerten für das Mauerwerk aus diesen Trockenwerten. Zudem sind Bestimmungsmethoden für den Wärmedurchlasswiderstand beschrieben (Tabellen, Messungen oder Berechnungen). Abbildung 2 stellt die Verfahren als Übersicht grafisch dar. Die üblicherweise für die Deklaration von Mauerwerk und Mauerwerksprodukten verwendeten Trockenwerte sind hellblau hinterlegt dargestellt.

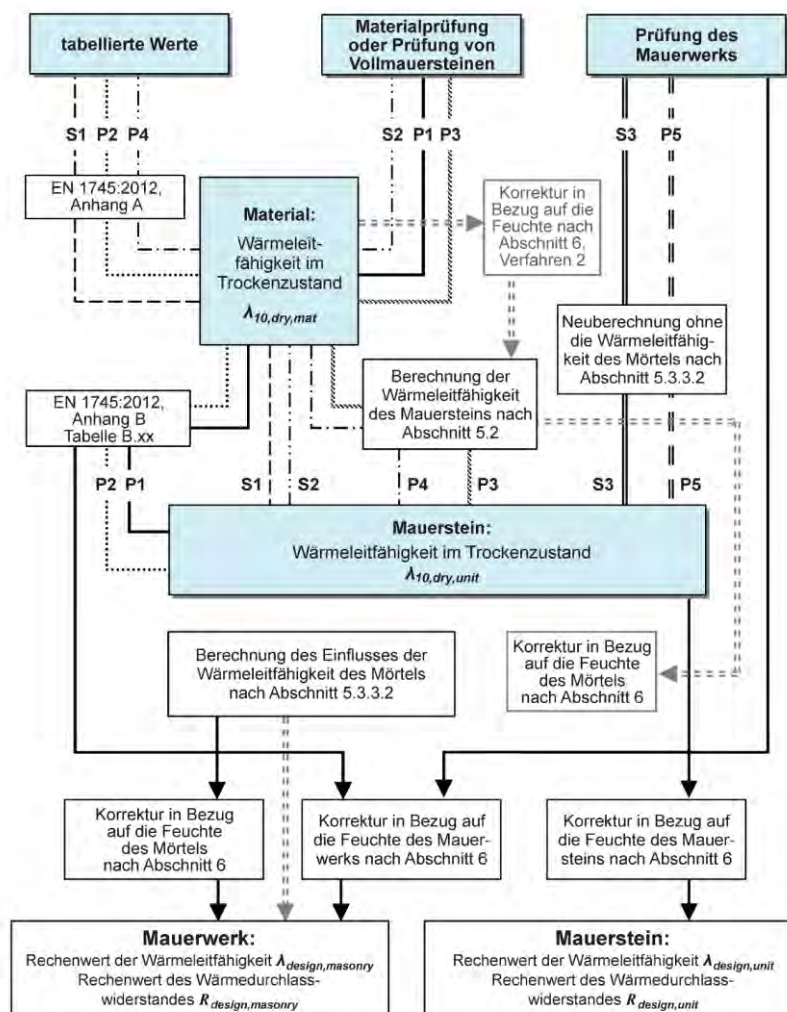


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Ermittlung der wärmeschutztechnischen Eigenschaften von Mauersteinen und Mauerwerk [DIN EN 1745]

Gegenüber der Normenausgabe aus dem Jahr 2002 wurden die Verfahren präzisiert und für Vollmauersteine, Mauerwerksmaterial und Mauersteine mit Kammern getrennte Festlegungen getroffen. In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Verfahren genauer vorgestellt. Abbildung 2 gibt einen Überblick über die Vorgehensweise, die Modelle und die Verfahren.

Vollmauersteine und Mörtel: Trockenwerte

Für Vollmauersteine und Mörtel sind die maßgeblichen Werte $\lambda_{10,dry,unit}$ und $\lambda_{10,dry,mor}$ identisch mit der Trocken-Wärmeleitfähigkeit des jeweiligen Materials $\lambda_{10,dry,mat}$. Diese können durch Prüfungen an Materialproben (Modell S2), aus Tabellen oder Diagrammen (Modell S1) oder mittels Rückrechnung aus der Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten U_{mas} einer Wand aus Vollmauersteinen und Mörtel (Modell S3) bestimmt werden.

Modell S1:

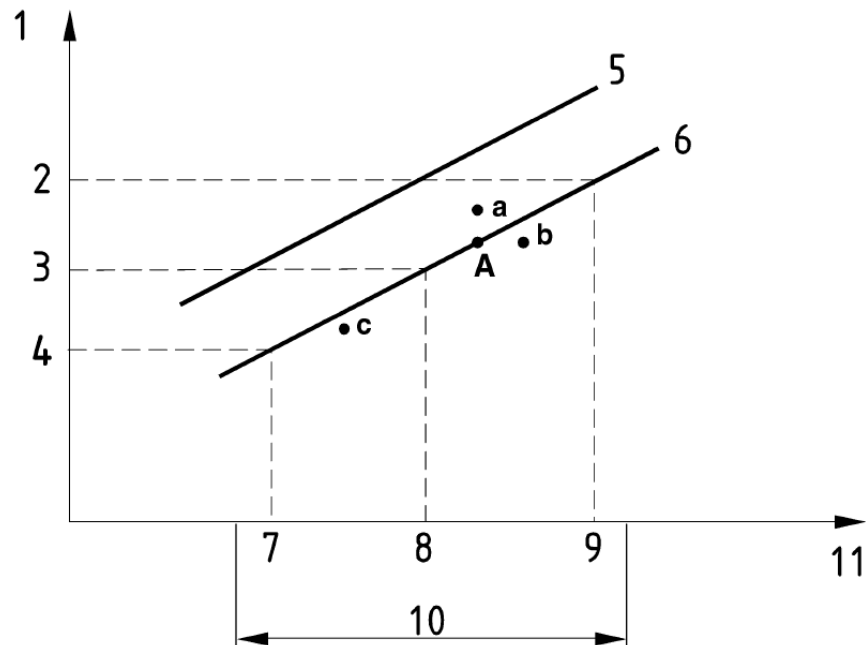
DIN EN 1745 enthält für verschiedene Mauerwerksmaterialien tabellierte Beziehungen (Anhang A) zwischen der Netto-Rohdichte (Trocken-Rohdichte des Materials) und der Trocken-Wärmeleitfähigkeit des Materials $\lambda_{10,dry,mat}$. Diese Werte sind lt. Norm dann zu verwenden, wenn aus der Überwachung nur Werte der Netto-Trockenrohichte aber keine gemessenen Wärmeleitfähigkeitswerte vorliegen.

Modell S2:

Für die direkte Bestimmung der $\lambda_{10,dry,unit}$ Werten aus den $\lambda_{10,dry,mat}$ Werten kann das in DIN EN 1745 beschriebene grafische Verfahren verwendet werden. Hierfür benötigt man die tabellierte Korrelation der Trockenwerte der Wärmeleitfähigkeit des Materials mit der Netto-Trockenrohichte aus Anhang A der Norm, Angaben des Herstellers der Mauerwerksprodukte zu Rohdichtebereichen für die Deklaration und mindestens drei korrespondierende Messwerte für Netto-Trockenrohichte und Trockenwärmeleitfähigkeit des Materials. Die Prüfungen sollen an Probekörpern mehrerer Chargen durchgeführt werden und die Bandbreiten der selbst gewählten Rohdichtespanne abdecken.

Modell S3:

Durch Messung des Wärmedurchgangskoeffizienten U_{mas} und anschließende Rückrechnung kann $\lambda_{10,dry,unit}$ bestimmt werden. Hierfür müssen die wärmetechnischen Eigenschaften des Mörtels und die Flächenanteile von Mörtel und Stein an der gemessenen Wand bekannt sein.



Legende

- 1 $\lambda_{10, \text{dry, mat}}$ [W/(m·K)]
- 2 Oberer Grenzwert für λ
- 3 Mittelwert für λ
- 4 Unterer Grenzwert für λ
- 5 Kurve, die sich aus den tabellierten Werten (Anhang A) ergibt
- 6 Parallelverschobene Kurve durch den Punkt A (Mittelwert der Einzelwerte a, b, c)
- 7 10 % der Produktion des betrachteten Produktes
- 8 Mittlere Netto-Trockenrohddichte
- 9 90 % der Produktion des betrachteten Produktes
- 10 Bandbreite der Netto-Trockenrohddichte
- 11 Netto-Trockenrohddichte (kg/m³)

Abbildung 3: grafisches Verfahren zur Ermittlung der Trocken-Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, \text{dry, mat}}$ des Materials aus drei Einzel-Messungen [DIN EN 1745]

Verfahren für Mauerwerk aus gelochten und zusammengesetzten Steinen: Trockenwerte

Bei gelochten und zusammengesetzten Steinen hat nicht nur die Wärmeleitfähigkeit des Materials sondern auch die Anzahl und Geometrie der Löcher – luftgefüllt oder dämmstoffgefüllt – einen großen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit des Steins $\lambda_{10,dry,unit}$. Für gelochte Mauersteine existieren Tabellen (Modelle P1 und P2), oder es können numerische Simulationen mit der Finite-Elemente- oder Finite-Differenzen-Methode durchgeführt werden (Modelle P3; P4; P5).

In allen Fällen möglich und zulässig sind Wandmessungen und Prüfungen an Steinmaterial, die ggf. mit Berechnungen kombiniert werden können. Im Anhang B von DIN EN 1745 sind tabellierte Beziehungen zwischen der Wärmeleitfähigkeit des Steinmaterials $\lambda_{10,dry,mat}$ und der Wärmeleitfähigkeit des Steins $\lambda_{10,dry,unit}$ für eine Vielzahl in Europa typischer Mauersteine enthalten.

Die nachfolgend kurz beschriebenen Modelle P1 bis P5 sind mögliche Wege zur Bestimmung von $\lambda_{10,dry,unit}$.

Modell P1:

Mit dem festgelegten Wert der Wärmeleitfähigkeit des Materials $\lambda_{10,dry,mat}$ (siehe Modell S2) wird aus der entsprechenden Tabelle (Steinmaterial und Lochgeometrie) in Anhang B von DIN EN 1745 die Wärmeleitfähigkeit des Steins $\lambda_{10,dry,unit}$ abgelesen oder interpoliert.

Modell P2:

Möglich ist für die Anwendung der Tabellen in Anhang B auch die Verwendung von Eingangswerten für das Material $\lambda_{10,dry,mat}$, welche aus den tabellierten Werten in Anhang A entnommen werden. Die Deklaration erfolgt dann für $\lambda_{10,dry,unit}$ mit Bezug auf den Wert $\lambda_{10,dry,mat}$ aus den Tabellen in Anhang A.

Modell P3:

Der nach dem Modell S2 (Messung der Wärmeleitfähigkeit und grafische Auswertung) ermittelte Wert $\lambda_{10,dry,mat}$ wird für eine numerische Berechnung verwendet.

Modell P4:

Als Eingangswerte für die numerischen Berechnungen werden die in Anhang A tabellierten Werte der Wärmeleitfähigkeit des Steinmaterials $\lambda_{10,dry,mat}$ verwendet.

Modell P5:

Durch Messung des Wärmedurchgangskoeffizienten U_{mas} und anschließende Rückrechnung kann $\lambda_{10,dry,unit}$ bestimmt werden. Hierfür müssen die wärmetechnischen Eigenschaften des Mörtels $\lambda_{10,dry,mor}$ und die Flächenanteile von Mörtel und Stein an der gemessenen Wand bekannt sein.

Die Rückrechnung erfolgt aus der gemessenen Wärmeleitfähigkeit der Wand im trockenen Zustand $\lambda_{10,dry,mas}$ nach folgender Formel:

$$\lambda_{10,dry,unit} = \frac{100 \cdot \lambda_{10,dry,mas} - a_{mor} \cdot \lambda_{10,dry,mor}}{a_{unit}}$$

Mit

a_{mor}	prozentuale Fläche des Mörtels im Mauerwerk
a_{unit}	prozentuale Fläche der Steine im Mauerwerk
$\lambda_{10,dry,mor}$	die Wärmeleitfähigkeit des Mörtels im trockenen Zustand
$\lambda_{10,dry,unit}$	die gesuchte Wärmeleitfähigkeit des Steins im trockenen Zustand

Für die Deklaration der Stein-Wärmeleitfähigkeit über die Messung des Wärmedurchgangskoeffizienten der Wand müssen mindestens drei Messwerte vorliegen und ausgewertet werden. Angegeben wird dann der arithmetische Mittelwert für $\lambda_{10,dry,unit}$ aus den Ergebnissen der drei Wandmessungen.

Feuchteumrechnungen für Steinmaterial, Vollmauersteine und Mörtel

Die festgelegten und deklarierten Werte der Wärmeleitfähigkeit des Steins $\lambda_{10,dry,unit}$ werden durch die Berücksichtigung der Feuchte zu Bemessungswerten für die Anwendung im Gebäude.

Verfahren 1:

Für die Berücksichtigung der Feuchte sind in Anhang A von DIN EN 1745 Feuchteumrechnungskoeffizienten f_u bzw. f_ψ angegeben. Zusammen mit dem in DIN EN ISO 10456 angegebenen Bemessungsfeuchtegehalt u_{design} bzw. ψ_{design} kann der Feuchteumrechnungsfaktor F_m bestimmt werden:

$$F_m = e^{f_u \cdot u_{design}} \text{ oder alternativ } F_m = e^{f_\psi \cdot \psi_{design}}$$

Der Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit bzw. des Wärmedurchlasswiderstands des Mauerwerks ergibt sich damit zu:

$$\lambda_{design} = \lambda_{10,dry} \cdot F_m \text{ oder alternativ } R_{design} = \frac{R_{10,dry}}{F_m}$$

DIN EN 1745 lässt die Verwendung von nationalen Bemessungsfeuchtegehalten und von Feuchteumrechnungskoeffizienten sowie Feuchteumrechnungsfaktoren zu, die aus Prüfungen abgeleitet werden. Je nach den Festlegungen in den nationalen Bauvorschriften müssen solche Untersuchungen durch zugelassene Prüfinstitute durchgeführt werden.

Verfahren 2:

Bei gelochten und zusammengesetzten Mauersteinen muss Verfahren 1 für alle beteiligten Materialien durchgeführt werden. Mit den so erhaltenen Bemessungswerten der Wärmeleitfähigkeit für die einzelnen beteiligten Stoffe werden numerische Berechnungen durchgeführt, um die Bemessungswerte zu ermitteln.

Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Bemessungswerte von Mauerwerk

Aus den Bemessungswerten der Wärmeleitfähigkeit des Steins, des Mörtels und ggf. der anderen beteiligten Stoffe wird der Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit bzw. des Wärmedurchlasswiderstands der Wand bestimmt. Hierfür darf eine flächenanteilige Berechnung aus den Bemessungswerten gemacht werden.

$$\lambda_{design,mas} = a_{mor} \cdot \lambda_{design,mor} + a_{unit} \cdot \lambda_{design,unit}$$

Möglich ist natürlich auch die direkte Ermittlung des Bemessungswertes der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit der Wand aus einer numerischen Berechnung unter Verwendung von Bemessungswerten der Wärmeleitfähigkeit für die beteiligten Materialien. Außerdem darf das in DIN EN ISO 6946 beschriebene vereinfachte Verfahren für zusammengesetzte Bauteile für die Bestimmung der Bemessungswerte der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit für das Mauerwerk verwendet werden.

Die Verwendung von Anhang B von DIN EN 1745 für die Ermittlung der Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit bzw. des Wärmedurchlasswiderstands ist zulässig. Die aus Anhang B abgelesenen Werte $R_{dry,mas}$ bzw. $\lambda_{dry,mas}$ müssen noch mit dem Feuchteumrechnungsfaktor F_m multipliziert (für λ) bzw. durch F_m dividiert (für R) werden um die Bemessungswerte zu erhalten.

Die erhaltenen Bemessungswerte sind nach den Regeln der DIN EN ISO 10456 aufzurunden:

$\lambda \leq 0,08$	Rundung nach oben auf die nächsten 0,001 W/(m·K)
$0,08 < \lambda \leq 0,20$	Rundung nach oben auf die nächsten 0,005 W/(m·K)
$0,20 < \lambda \leq 2,0$	Rundung nach oben auf die nächsten 0,01 W/(m·K)
$2,0 < \lambda$	Rundung nach oben auf die nächsten 0,1 W/(m·K)

Diese stehen im Widerspruch mit den zurzeit in Deutschland geltenden Rundungsregeln zur Einstufung von Mauerwerk in DIN 4108-4:

$0,08 < \lambda_{100\%,u} \leq 0,99$	mathematische Rundung auf 0,01 W/(m·K)
$1,0 < \lambda_{100\%,u} \leq 3,0$	mathematische Rundung auf 0,1 W/(m·K)

DIN EN ISO 6946

Die Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) ist international in ISO 6946 normiert. Die Energieeinsparverordnung nimmt die deutsche Ausgabe DIN EN ISO 6946 dieser Norm als Berechnungsvorschrift in Bezug. Somit sind U-Werte generell hiernach zu ermitteln (sofern nicht genauere Berechnungsverfahren wie z.B. DIN EN ISO 10211 für zwei- und dreidimensionale Wärmebrückenberechnungen, DIN EN ISO 10077-1 und -2 für Fensterberechnungen oder DIN EN ISO 13974 für Vorhangfassaden verwendet werden). Abweichungen von den Rechenvorschriften der Norm stellen einen Planungsfehler dar. Weiterhin enthält DIN EN ISO 6946 Festlegungen für die Wärmeübergangswiderstände in Abhängigkeit der Wärmestromrichtung und Festlegungen zum Wärmedurchlasswiderstand hinterlüfteter Bauteile.

Für die numerische Berechnung von Mauerwerk sind die Festlegungen in dieser Norm zur Ermittlung einer äquivalenten Wärmeleitfähigkeit der Luftkammern in den Steinen relevant. Zudem enthält die Norm ein Verfahren zur vereinfachten Ermittlung des U-Werts zusammengesetzter Bauteile, das für die Umrechnung des Einflusses der verschiedenen Mörtelarten in DIN 4108-4 in Bezug genommen wird. Mit diesem Verfahren können U-Werte von Bauteilen aus homogenen und inhomogenen Schichten berechnet werden. Das Verfahren ist „vereinfacht“ im Vergleich zu genauen, zwei- oder dreidimensionalen numerischen Computerverfahren, die ansonsten zur Berechnung des U-Werts verwendet werden.

Nicht anwendbar ist das vereinfachte Verfahren, wenn die Dämmschichten eine Wärmebrücke aus Metall enthalten, oder nebeneinander liegende Bereiche sehr unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten besitzen. Das Verfahren ist nur zutreffend und zulässig, wenn das Verhältnis zwischen R'_T und R''_T kleiner als 2:3 ist ($R'_T/R''_T \leq 1,5$); ist dieser Wert überschritten, ist eine numerische Wärmebrückenberechnung erforderlich. Für das vereinfachte Verfahren werden alle Schichten und alle nebeneinander liegenden Abschnitte des Bauteils in so kleine Segmente aufgeteilt, dass diese thermisch homogen sind. Aus der flächenanteiligen Mittelung der Wärmedurchlasswiderstände der nebeneinander liegenden Abschnitte erhält man den oberen Grenzwert R'_T des Wärmedurchgangswiderstands des Bauteils. Durch eine flächenanteilige Mittelung der Wärmeleitfähigkeiten der Segmente innerhalb jeder Schicht erhält man mittlere Wärmeleitfähigkeiten der einzelnen Schichten, mit denen man den unteren Grenzwert R''_T des Wärmedurchgangswiderstands des Bauteils ermittelt.

Das arithmetische Mittel dieser beiden Wärmedurchgangswiderstände stellt das Ergebnis für den Wärmedurchgangswiderstand R_T des ganzen Bauteils dar:

$$R_T = \frac{R'_T + R''_T}{2} \text{ in } \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

Aus R_T wird durch Kehrwertbildung der U-Wert des Bauteils berechnet. Die früher übliche, flächenanteilige Mittelung von U-Werten nebeneinander liegender Bereiche, beispielsweise für Sparren und Gefach bei Sparrendächern, ergibt zu niedrige und damit zu günstige U-Werte. Die Berechnung des U-Werts zusammengesetzter Bauteile aus homogenen und inhomogenen Schichten erfolgt sinnvollerweise mit einem Berechnungsprogramm.

DIN 4108-4 sieht vor, dass bei bekannter Wärmeleitfähigkeit der Wand und vorhandenen Angaben über den Mörtel durch Rückrechnung mittels dieses vereinfachten Verfahrens für zusammengesetzte Bauteile auf die Wärmeleitfähigkeit des Steins geschlossen werden kann. Durch eine weitere Berechnung kann dann die Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks mit einem anderen Fugenmaterial bestimmt werden.

In DIN EN ISO 6946 ist die 3% Regel zur U-Wert Korrektur bei Luftspalten mechanischen Befestigungen und Umkehrdächern beschrieben, die sinngemäß zur Bewertung der Einflüsse des Mörtels in verschiedenen Lagerfugendicken, des Einflusses von Griffhilfen und Daumenlöchern und für andere Störungen im Mauerwerk herangezogen werden kann.

DIN EN ISO 10456

In DIN EN ISO 10456:2010-05 „Baustoffe und Bauprodukte – Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften – Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte“ sind auch die Feuchte- und Temperaturumrechnungskoeffizienten für eine Vielzahl von Dämm- und Baustoffen beschrieben. Zudem ist in dieser Norm das statistische Verfahren zur Ermittlung der Nennwerte der Wärmeleitfähigkeit definiert. Viele Produktnormen aus dem baulichen Wärmeschutz – vor allem alle harmonisierten europäischen Dämmstoffnormen - verwenden dieses Verfahren und die in dieser Norm angegebenen Koeffizienten zur Ermittlung der Zuschläge und statistischen Vertrauensintervalle. Nachfolgend ist das statische Verfahren aus DIN EN ISO 10456 beschrieben, dass für die Festlegung von Nennwerten durchzuführen ist.

Der Nennwert muss ein 90 %-Fraktilwert mit 90 %-Vertrauensbereich sein. Nur mit diesem Verfahren ermittelte Werte dürfen den Zusatz *90/90* tragen und sind entsprechend doppelt statistisch abgesichert. Die statistische Gleichung, die angewendet wird, um den Grenzwert für dieses einseitige statistische Toleranzintervall, L_S festzulegen, ist (siehe ISO 16269-6:2005, Anhang A):

$$L_S = \bar{x} + k_2(n, p, 1 - \alpha) \cdot s$$

Dabei ist

\bar{x}	der Mittelwert;
k_2	der Koeffizient zur Bestimmung von L_S wenn die Standardabweichung für eine einseitige Toleranz geschätzt wird;
n	die Anzahl von Beobachtungen an der Probe;
p	das Fraktile, das den Mindestanteil der Grundgesamtheit innerhalb des statistischen Toleranzintervalls angibt;
$(1 - \alpha)$	der Vertrauensbereich, für die Annahme, dass der Anteil der Grundgesamtheit innerhalb des Toleranzintervalls \geq dem angegebenen Bereich p ist;
s	die Standardabweichung.

Die Standardabweichung, s , wird wie folgt berechnet:

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Dabei ist

x_i der „i-te“ beobachtete Wert (1,2, ... n)

Für Wärmedämmstoffe geht man davon aus, dass die Standardabweichung für die einseitige Toleranz geschätzt wird, da die Grundgesamtheit nicht für alle Stichproben identisch ist. Das wird damit begründet, dass Dämmstoffe üblicherweise nicht kontinuierlich, sondern in Chargen produziert werden. Die Stichproben für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit an unterschiedlichen Tagen werden damit üblicherweise aus mehreren Chargen der Produktion gewählt.

Werden jedoch mehrere Stichproben einer Produktion untersucht, z.B. durch mehrere Entnahmen aus einer Lieferung auf eine Baustelle, dann könnte auch der Koeffizient k_1 verwendet werden. Die Herstellverfahren für die in Deutschland verwendeten Mauersteine sind nach der o.g. Definition alle Chargen-Produktionen. Für statistische Auswertungen ist somit ebenfalls der Koeffizient k_2 zu verwenden.

2.3 Material

Hintergrund der Materialwahl ist die Betrachtung der Extremwerte. Porenbeton als sehr homogener Stoff mit insgesamt niedriger Materialwärmeleitfähigkeit hat nur eine geringe Querleitung aus dem Stein in die Mörtelfuge und Ziegel mit höherer Materialwärmeleitfähigkeit hat dadurch auch höhere Querleitung aus den Stegen in die Mörtelfuge. Zudem weist Ziegelmaterial i.d.R. anisotrope Materialeigenschaften auf, was eigene Untersuchungen zeigen und u.a. auch in [König et al 2000] beschreiben. Die ausgewählten Baustoffe und wärmetechnischen Qualitäten sind nachfolgend beschrieben. Alle Materialien wurden über den Baustoffhandel besorgt.

Porenbeton

Die ausgesuchten Steine weisen an jeder Stoßfuge eine Griffhilfe auf und haben jeweils zwei Nut- und Feder- Verzahnungen an den Stirnflächen. Die Stoßfugen werden nicht vermörtelt.

In Tabelle 3 sind die Eigenschaften der drei untersuchten Produkte dargestellt. Ausgewählt wurden Porenbeton Planblöcke der Rohdichteklasse 0,35 und 0,50 kg/m³ laut technischen Datenblättern mit Bemessungswerten der Wärmeleitfähigkeit von 0,08 W/(m·K); 0,09 W/(m·K) und 0,12 W/(m·K). Untersucht wurden die Wanddicken 30 cm (Bemessungswerte 0,09 und 0,12 W/(m·K)) und die Wanddicke 36,5 cm (Bemessungswert 0,08 W/(m·K)).

Tabelle 3: Materialliste Porenbeton Planblöcke nach DIN EN 771-4 bzw. nach Zulassung

Planblock	Rohdichte -klasse	Bemessungswert Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]	Brutto Steinvolumen [dm ³]	Abmessungen L x B x H [mm]
AAC 0,08	0,35	0,08	54,4	499 x 365 x 249
AAC 0,09	0,35	0,09	45,4	599 x 300 x 249
AAC 0,12	0,50	0,12	45,4	599 x 300 x 249

Ziegel

Die drei nachfolgend beschriebenen Ziegel wurden untersucht. Bei den Proben der Bezeichnung VZ (Verfüllziegel) handelt es sich um plangeschliffene Hochlochziegel mit integrierter Dämmung aus zugeschnittener Steinwolle. Die Ziegel der Bezeichnung HLZ (Hochlochziegel) haben keinen Dämmstoff in den Kammern, sondern weisen 29 Lochreihen (Luftkammern) auf. Ausgewählt wurden Ziegel der Rohdichteklasse 0,60 (VZ 0,07); 0,65 (HLZ 0,12) und 0,70 kg/m³ (VZ 0,09). Die Ziegel haben laut technischen Datenblättern Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit von 0,07 W/(m·K) (VZ 0,07); 0,09 W/(m·K) (VZ 0,09) und 0,12 W/(m·K) (HLZ 0,12).

Alle untersuchten Ziegel sind für Mauerwerk in der Wanddicke 36,5 cm. Als Fugenmaterial wurde der zugehörige Systemkleber oder ein für wärmedämmende Hochlochziegel geeigneter Dünnbettmörtel verwendet. Die Ziegel HLZ 0,12 mit einem Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit von 0,12 W/(m·K) sind Blockziegel der Steinhöhe 238 mm und werden mit Leichtmauermörtel LM 21 in der Lagerfugendicke 12 mm vermauert. In Tabelle 4 sind Materialeigenschaften der Ziegel zusammengefasst.

Tabelle 4: Materialliste Ziegel nach allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung

	Roh-dichte-klasse	Bemessungswert Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]	Lochanteil [%]	Brutto-Steinvolumen [dm³]	Abmessungen L x B x H [mm]
VZ 0,07	0,60	0,07	62	22,5	248 x 365 x 249
VZ 0,09	0,70	0,09	54	22,5	248 x 365 x 249
HLZ 0,12	0,65	0,12	56	21,5	248 x 365 x 238

Mörtel

Für die Messungen an den vermörtelten Porenbetonsteinen und Hochlochziegeln wird jeweils der mit den Steinen gelieferte System-Dünnbettmörtel bzw. ein vergleichbarer, für wärmetechnisch hochwertiges Mauerwerk geeigneter Dünnbettmörtel verwendet. Für den Blockziegel HLZ 0,12 wird ein im Baustoffhandel gekaufter Leichtmauermörtel LM 21 verwendet.

2.4 Messmethoden

Wärmeleitfähigkeit der Materialien

Um die Anisotropie des Ziegelscherbens zu untersuchen und in den numerischen Simulationen berücksichtigen zu können, werden aus den jeweils maßgebenden Bereichen des Ziegels Proben zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit gewonnen. Wie in Abbildung 4 dargestellt, ist die Ausrichtung der Längsstege im Ziegel senkrecht zur Haupt-Wärmestromrichtung der Wand (y-Richtung). Die Ausrichtung der Querstege liegt hingegen in der Haupt-Wärmestromrichtung der Wand (y-Richtung). Die Extrusionsrichtung der Längs- und Querstege liegt senkrecht zur Haupt-Wärmestromrichtung.

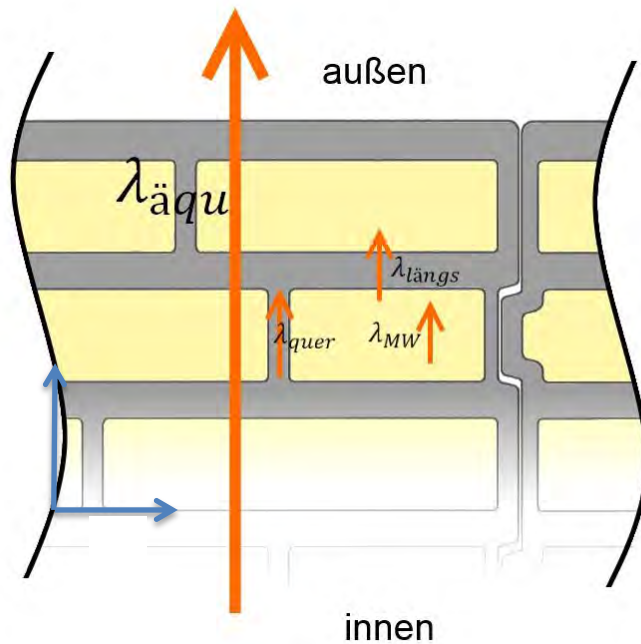


Abbildung 4: Wärmefluss durch verschiedene Bereiche des Ziegels mit entsprechender Wärmeleitfähigkeit – Schemazeichnung

Die Wärmeleitfähigkeit der Materialien (Ziegelscherben sowie Platten aus Porenbeton) wird im Zweiplattengerät nach DIN EN 12664 bestimmt. Hierfür werden aus den Mauersteinen Probenplatten gesägt, plangefräst und getrocknet. Die Probenplatten aus den Innen-Längsstegen der Hochlochziegel mit luftgefüllten Kammern (HLZ 0,12) werden aus jeweils zwei plangefrästen Ausschnitten der Längsstege hergestellt. Die Dicke der Längsstege der VZ 0,07 und VZ 0,09 reicht aus um die Probenplatten einlagig herzustellen.

Um die Anisotropie des Ziegelscherbens aller drei Hochlochziegeltypen zu messen, werden die Querstege herausgesägt, plangefräst, in schmale Streifen geschnitten und diese um 90° gekippt nebeneinander angeordnet. Für die Messung der Wärmeleitfähigkeit in Stegrichtung des HLZ 0,12 werden nebeneinandergesetzte dünne Streifen aus den Längsstegen verwendet. Zur Fixierung dient ein dünner Film aus Sprühkleber bzw. ein möglichst dünnes doppelseitiges Klebeband. Die so erhaltenen Probepplatten werden nochmals beidseitig plangefräst und nach der Trocknung bei 105°C in die Versuchsanordnung eingebaut. Durch die Anordnung der aufgestellten Streifen aus den Querstegen nebeneinander ist sichergestellt, dass die Wärmestromrichtung bei der Wärmeleitfähigkeitsmessung derjenigen entspricht, die beim ausgeführten Mauerwerk in den Querstegen auftritt.



Abbildung 5: Probenplatte aus plangefrästen Streifen der Querstege eines Hochlochziegels zur Messung der Wärmeleitfähigkeit in Querstegrichtung



Abbildung 6: Probenplatte aus den Innen-Längsstegen des luftgefüllten Hochlochziegels mit zwei übereinander angeordneten plangefrästen Platten - getrennt durch eine dünne PE-Folie

Die Messung im Zweiplattengerät nach DIN EN 12664 wird beidseitig mit Ausgleichsschichten aus dünnem Silikonschaumstoff durchgeführt, um beiderseits an die Plattenapparatur eine vollständige wärmetechnische Ankopplung zu gewährleisten. Die Korrektur der Temperaturmesswerte für die auf den Oberflächen der plangefrästen Proben befestigten Thermoelemente erfolgt dann mit dem in DIN EN 12664 angegebenen Verfahren. Für alle Messungen werden möglichst dünne (flachgewalzte) Thermoelemente verwendet.

Halbsteinmessungen

Die Messungen an Halbsteinen wurden nach der DIBt Richtlinie [DIBt 1998] an einem Prüfstand mit neigbarer Probenhalterung durchgeführt. In Abbildung 7 ist der schematische Aufbau der Probekörper für die Messung dargestellt. Geprüft wird ein in Stein-Längsrichtung halbiertes repräsentativer Ausschnitt des Mauerwerks. Der obere Probekörper wird mit Wärmestromrichtung nach oben geprüft; der untere Probekörper mit Wärmestromrichtung nach unten. Ergänzend werden in einigen Fällen Messungen in vertikaler Orientierung mit horizontalem Wärmestrom durchgeführt. Um eine gute thermische Ankopplung an die nur wenig zusammendrückbaren Wärmestrommessplatten (Hartgummi) zu bekommen, werden die Halbsteinprobekörper beidseitig plangefräst und zusätzlich dünne Ausgleichsschichten aus Silikonschaumstoff eingesetzt.

Um mögliche konvektive Einflüsse bei den HLZ 0,12 Ziegeln mit Luftkammern und den Porenbetonsteinen mit Griffhilfen untersuchen zu können wird ein drehbares Wärmestrommessplattengerät verwendet und einige Messungen mit beiden Ausrichtungen (waagrecht und senkrecht) durchgeführt. Hierfür werden die in der Steinmitte halbierten Steine in einem Probenrahmen aus Dämmstoff fixiert.

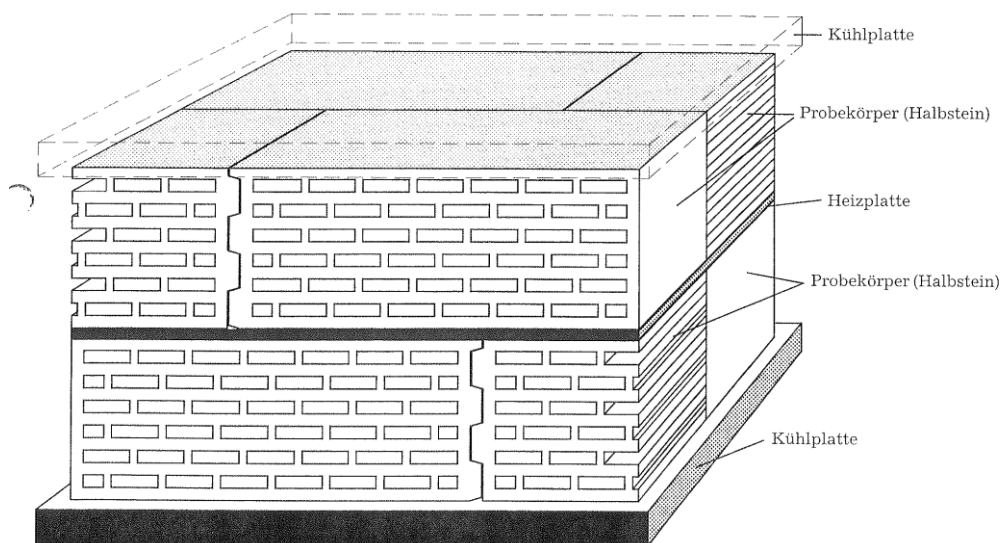


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Mauersteinprobekörper im Zweiplattengerät [DIBt 1998]

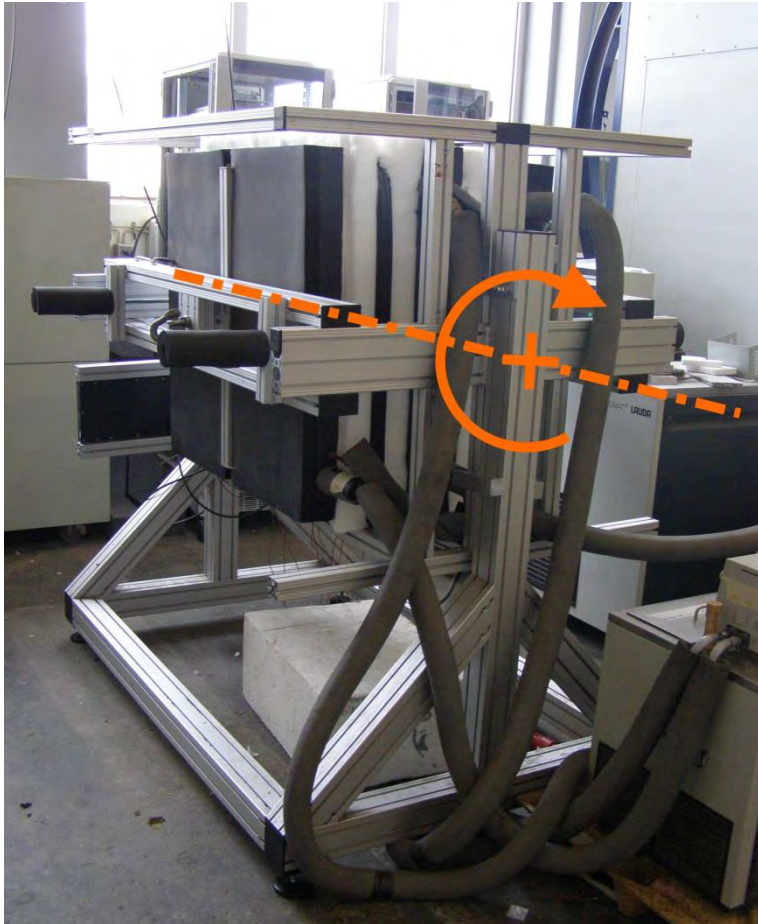


Abbildung 8: Wärmestrom-Messplattengerät mit drehbarer Probenaufnahme



Abbildung 9: Halbsteinprobekörper aus plangefrästen Ziegeln in einem Einbaurahmen aus Dämmstoff mit zusätzlichem Holzrahmen zur Verspannung

Abbildung 9 zeigt einen Halbsteinprobekörper aus Ziegeln, deren Oberfläche plangefräst wurde. Für die Messungen ohne Mörtel werden die Probekörper durch den außen angebrachten Holzrahmen zusammengespant, damit die Drehung im Prüfstand ohne ein Verrutschen der Ziegel möglich ist. Durch den zusätzlichen EPS-Rahmen werden die Ränder zur Laborumgebung gedämmt und während der Messung im Prüfstand fixiert. Beide Probekörper werden mit jeweils sieben

Thermoelementen versehen. Fünf Elemente werden im ungestörten Bereich der Ziegel und jeweils ein Thermoelement an Stoß- und Lagerfuge angebracht. Mit dieser Verteilung können Temperaturunterschiede von Mauer und Mörtel erfasst und über flächenanteilige Gewichtung die mittlere Oberflächentemperatur bestimmt werden. Abbildung 10 zeigt die Anordnung der Thermoelemente (schwarze Markierungen) und der Messplatte (graue Markierung). Mit den Wärmestrom-Messplatten von 50 x 50 cm werden für das Mauerwerk repräsentative Bereiche erfasst.

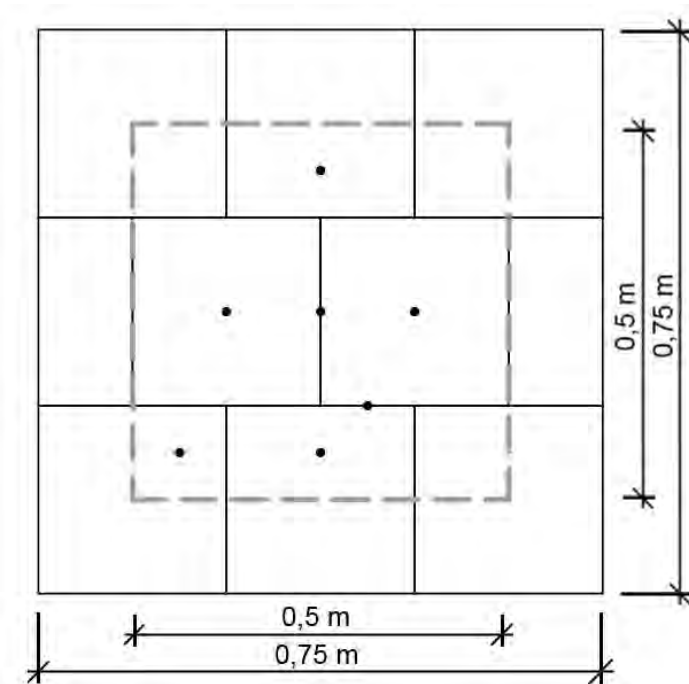


Abbildung 10: Schemazeichnung des Halbsteinprobekörpers

Wärmeleitfähigkeit ganzer Wände nach DIN EN 1934

Die Messung des Wärmedurchlasswiderstandes von Mauerwerk wird nach DIN EN 1934 im Heizkasten mit Wärmestrommesser durchgeführt (Abbildung 11). Untersucht werden Wände ohne Putz, aber mit beidseitig aufgetragenem dünnem Glattstrich von 1 – 2 mm zur Sicherstellung der Luftdichtheit der Konstruktion. Alle untersuchten Wandprobekörper haben die Abmessungen 1,5 m x 1,5 m und werden nur im trockenen Zustand geprüft. Die Wandprobekörper werden so aufgebaut, dass mittels der warm- und kaltseitig aufgebrachten Wärmestrommessplatte ein repräsentativer Ausschnitt gemessen wird und ein normgerechter Schutzstreifen rund um die Messplatte möglich ist. Da die verwendeten Materialien sehr träges Verhalten zeigen, wurde die Abbruchbedingung für Erreichen des stationären Zustandes im Vergleich zur Normregelung verschärft. Die Messung wurde beendet, wenn innerhalb von 48 h die Abweichung des Messergebnisses zum Vortag stets unter $\pm 0,5 \%$ lag. Zudem wurden für die gesamte Dauer der Messung alle

Temperaturen und Wärmestromdichten kontinuierlich aufgezeichnet und die Kurven über der Zeit bewertet, um monotone Schwankungen oder ein Driften der Messwerte auszuschließen.

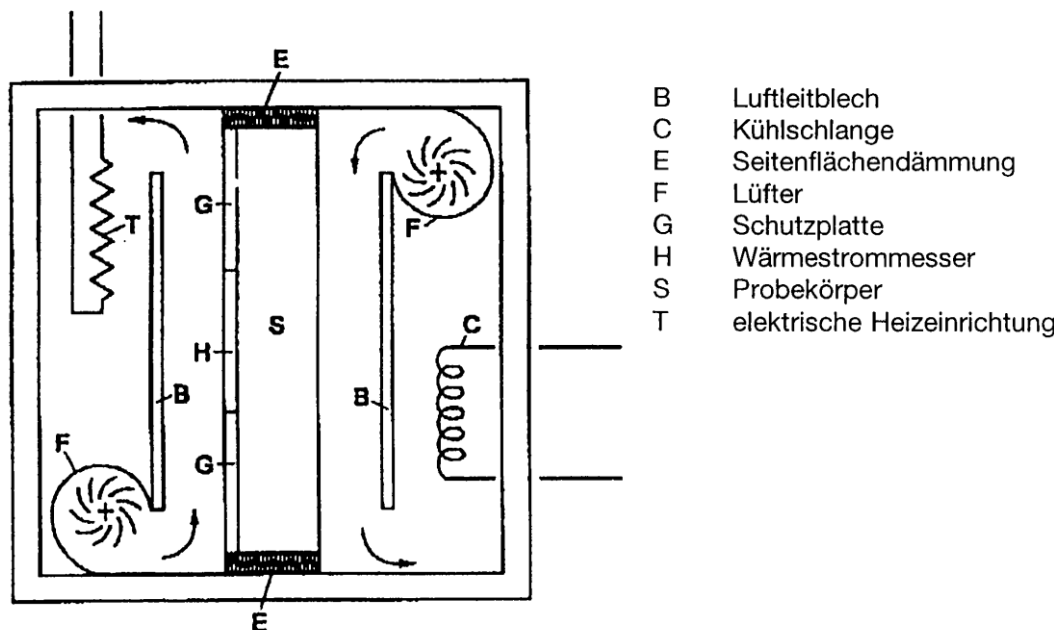


Abbildung 11: Fassadenprüfstand Schemazeichnung (Quelle: DIN EN 1934:1998-04)

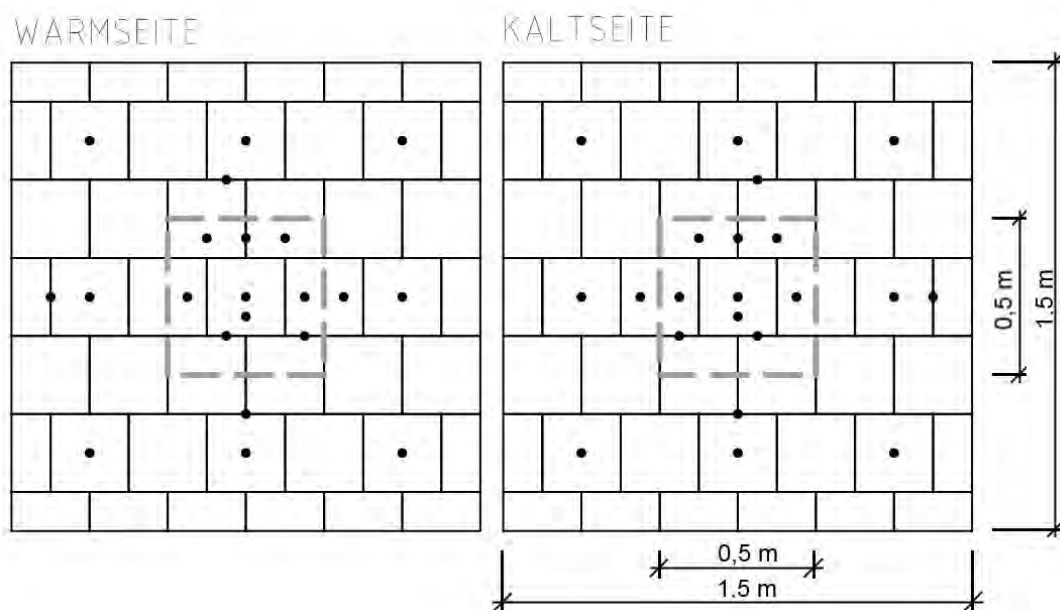


Abbildung 12: Schemazeichnung der Wand- / Mauerwerksprobekörper

Abbildung 12 zeigt die Verteilung der Thermolemente (schwarze Markierungen) auf den Steinen und Fugen und die Position der Messplatte (graue Markierung) am Probekörper in der Ansicht. Für die Messung werden die Thermolemente auf der Messfläche immer so verteilt, dass 1 Thermolement auf einer Stoßfuge und 2 Thermolemente auf einer Lagerfuge zu liegen kommen. Die restlichen 6 Thermolemente werden in der Steinmitte angeordnet. Die Thermolemente auf der

Schutzfläche werden nach dem gleichen Muster verteilt, wobei hier jedoch 12 Thermolemente zur Verfügung stehen, wovon jeweils 2 Thermolemente auf einer Stoß- und Lagerfuge und die restlichen in Steinmitte angeordnet werden. Die mittlere Oberflächentemperatur der Mess- und Schutzflächen wird durch die flächenanteilige Gewichtung (siehe Kapitel 6.3.2 der DIN EN 1934) der Thermolemente im Fugen- und Steinmittenbereich berechnet.

Für alle Messungen im Wandprüfstand nach DIN EN 1934 werden die folgenden Luftgeschwindigkeiten eingestellt:

Warmseite: ca. 0,2 bis 0,3 m/s von oben nach unten

Kaltseite: ca. 2,6 bis 3,0 m/s von unten nach oben

2.5 Grundlagen für die Berechnungen

Randbedingungen für die Berechnung und Auswertung

Folgende Temperaturen und Übergangswiderstände werden für die Berechnungen verwendet:

$$\begin{array}{ll} T_i = 20^\circ\text{C} & R_{si} = 0,13 \text{ m}^2\cdot\text{K/W} \\ T_e = -5^\circ\text{C} & R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\cdot\text{K/W} \end{array}$$

Eigenschaften und Abmessungen der Materialien

Als Abmessungen der Steine werden die in den Produktunterlagen bzw. in den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen hinterlegten Werte verwendet. Diese sind in Abschnitt 2.3 dargestellt. Der für die Füllung verwendete Dämmstoff hat die Nennrohddichte $\rho = 50 \text{ kg/m}^3$; d.h. die Steinrohddichte im verfüllten Zustand erhöht sich gegenüber der Steinrohddichte im unverfüllten Zustand um ca. 20 kg/m^3 . Für die numerischen Simulationen wird von neuen Extruder-Mundstücken ausgegangen, d.h. es werden die minimalen Abmessungen der Ziegelstege in der Berechnung angesetzt. Die Abnutzung der Kerne der Mundstücke wird aus Zeitgründen in dieser Arbeit nicht betrachtet. Eine solche Abnutzung führt zu Vergrößerungen bei den Stegdicken gegenüber den vermaßten Mindestwerten in den bauaufsichtlichen Zulassungen.

Mörtel

Für die Berechnung wird bei allen Plansteinen Dünnbettmörtel in der Regellagerfugendicke 1 mm angesetzt. Die Blockziegel HLZ 0,12 werden mit Leichtmörtel LM 21 in der Lagerfugendicke 12 mm berechnet. Da die Messungen im trockenen Zustand durchgeführt wurden, wird auch die Mörtelwärmeleitfähigkeit mit

dem Trockenwert aus der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung angesetzt, bzw. ein um den Feuchtekorrekturfaktor aus DIN 4108-4 korrigierter Wert der Wärmeleitfähigkeit für den Mörtel. Für einen Dünnbettmörtel mit dem Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit von 0,27 W/(m·K) führt das bspw. zu einem Trockenwert in der vergleichenden Berechnung von $0,27/1,27 = 0,21$ W/(m·K). Für weitere numerische Berechnungen werden die Wärmeleitfähigkeit des Mörtels und die Lagerfugendicke variiert. Nachfolgend sind die Spannen der Wärmeleitfähigkeit des Mörtels bei den numerischen Berechnungen angegeben.

Tabelle 5: Lagerfugendicke und Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit des Mörtels

Stein	Lagerfugendicke [mm]	Wärmeleitfähigkeit des verwendeten Mörtels [W/(m·K)]
AAC 0,08	1 bis 2	0,24 bis 1,0
AAC 0,09	1 bis 2	0,24 bis 1,0
AAC 0,12	1 bis 2	0,24 bis 1,0
VZ 0,07	1 bis 2	0,27 bis 1,0
VZ 0,09	1 bis 2	0,27 bis 1,0
HLZ 0,12	12	0,16 bis 1,0

Füllung

Die Füllung der Hohlräume der Ziegel VZ 0,07 und VZ 0,09 besteht aus Mineralwolle der WLG 035 mit einer Rohdichte von etwa 50 kg/m³ und dem Anwendungstyp WAB (Außendämmung der Wand hinter Bekleidung – Bezeichnung nach [DIN 4108-10]). Berechnet werden die Steine mit vollständiger Füllung der Kammern mit Wärmedämmstoff, ohne Luftspalte aufgrund der Ausrundungen der Kammern.

Proben aus Mineralwolle Stecklingen, die aus den VZ 0,09-Steinen entnommen wurden, zeigten im Plattengerät einen Messwert der Wärmeleitfähigkeit von 0,0327 W/(m·K) bei einer Rohdichte von 56 kg/m³. In den Berechnungen, die dem Vergleich zwischen Messung und Berechnung dienen wird jedoch der Grenzwert der Wärmeleitfähigkeit von 0,0337 W/(m·K) verwendet, der zum Erreichen eines Bemessungswerts von 0,035 W/(m·K) ausreicht.

Steinmaterial

Zum Vergleich mit den gemessenen Werten der Wand- und Halbsteinprobekörper werden die am jeweiligen Material gemessenen Wärmeleitfähigkeitswerte in der Berechnung angesetzt. In den numerischen Simulationen zur Nachstellung der Messungen werden bei den Ziegeln unterschiedliche Werte für den Scherben aus den Längs- und Querstegen angesetzt, um die Anisotropie abzubilden.

Luftkammern

Vorhandene Luftkammern (z.B. die Lochung des HLZ 0,12) und Lufteinschlüsse (Griffhilfen, Luftschlitze in der Nut- und Feder-Ausbildung, unverfüllte Teile der Kammern beim VZ 0,07) werden durch ein Material abgebildet, das die äquivalente Wärmeleitfähigkeit einer Luftschicht für die vorliegende Abmessung besitzt. Hierbei werden unterschiedliche Abmessungen in den drei Raumrichtungen durch unterschiedliche äquivalente Wärmeleitfähigkeiten abgebildet. Die Berechnung erfolgt somit unter Beachtung der Anisotropie der Luft und für die jeweils vorliegende Wärmestromrichtung. Die Ermittlung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit erfolgt für die Mitteltemperatur 10°C mit den in DIN EN ISO 6946 angegebenen Näherungsformeln.

3 Durchführung der Untersuchung

Nachfolgend ist der Ablauf und Umfang des Mess- und Berechnungsprogrammes der vorliegenden Forschungsarbeit beschrieben.

Die Wärmestrommessplatten wurden vor der Messreihe einer vollständigen Neukalibrierung unterzogen. Zusätzlich werden in kürzeren Abständen Vergleichsmessungen mit Referenzmaterialien durchgeführt. Darüber hinaus unterliegen alle verwendeten Messmittel einer regelmäßigen Kalibrierpflicht durch das Qualitätsmanagement entsprechend den Vorgaben nach DIN EN ISO/IEC 17025.

3.1 Messprogramm

Porenbeton

1. Wandmessungen nach DIN EN 1934 an allen Porenbeton-Planblöcken im trockenen Zustand (mit Mörtel und Griffhilfen in senkrechter Orientierung)
2. Untersuchung der Wärmeleitfähigkeit des Materials im Plattengerät
3. Lagerung der Wärmeleitfähigkeitsproben im Klima 23°C/80%
4. Erneute Messung der Wärmeleitfähigkeit des Materials bei Ausgleichsfeuchte und parallel Bestimmung des Ausgleichsfeuchtegehalten durch Sorption $u_{m,80}$
5. Halbsteinmessungen nach DIBt-Richtlinie an trockenen Proben:
 - a. Messung als Trockenmauerwerk mit Griffhilfen an den Steinen
 - b. Messung als Trockenmauerwerk mit Griffhilfen in senkrechter Orientierung der Probekörper (waagrechter Wärmestrom – analog der Messung an ganzen Wänden)
 - c. Absägen der Griffhilfen und erneute Messung als Trockenmauerwerk in senkrechter Orientierung
 - d. Vermörtelung mit System Plansteinkleber oder geeignetem Dünnbettmörtel in der Lagerfugendicke 1 mm und erneute Trocknung der Probekörper
 - e. Erneute Messung in senkrechter Orientierung

Ziegel

1. Wandmessungen nach DIN EN 1934 an allen drei Ziegeltypen im trockenen Zustand (mit geeignetem Mörtel oder Dünnbettmörtel; in senkrechter Orientierung)
2. Untersuchung der Wärmeleitfähigkeit des Ziegelscherbens im Plattengerät im trockenen Zustand an Probekörpern aus den Längsstegen aller drei untersuchten Ziegeltypen in Haupt-Wärmestromrichtung für das Mauerwerk

3. Untersuchung der Wärmeleitfähigkeit des Ziegelscherbens im Plattengerät im trockenen Zustand an Probekörpern aus den Querstegen aller drei untersuchten Ziegeltypen in Haupt-Wärmestromrichtung für das Mauerwerk
4. Halbsteinmessungen nach DIBt Richtlinie an trockenen Proben:
 - a. Messung als Trockenmauerwerk ohne Mörtelfuge mit Folie zur Verhinderung der Konvektion zwischen den Steinen
 - b. Messung als Trockenmauerwerk ohne Mörtelfuge mit Folie zur Verhinderung der Konvektion zwischen den Steinen in senkrechter Orientierung
 - c. Vermörtelung mit DBM in der Lagerfugendicke 1 mm bzw. mit LM 21 in der Lagerfugendicke 12 mm und erneute Trocknung der Probekörper
 - d. Messung der Wärmeleitfähigkeit mit Mörtel in senkrechter Orientierung
5. Kontrollmessung der Wärmeleitfähigkeit der Mineralwolle aus den Kammern eines VZ 0,09 Ziegels

Die Probekörper zur Messung der Wärmeleitfähigkeit im Plattengerät (Scherben) aus verklebten Querstegen waren je nach Lochbild etwa 15 – 25 mm dick, die Probekörper aus Längsstegen in allen Fällen etwa 15 mm. Die Scherben im Falle der Längsstege wurden aufgrund der Stegabmessungen aus 2 Einzellagen hergestellt. In der Regel wurde der zweite oder zweitletzte Innenlängssteg verwendet. Die Scherben aus Querstegen sind je aus einer Lage der verklebten Stegstreifen hergestellt.

Der Einfluss von Sprühkleber bzw. Klebebändern zwischen den einzelnen Ziegelscherben-Streifen ist vernachlässigbar: Diese belegen nur maximal 5 % der Messfläche, haben jeweils eine Dicke von unter 0,5 mm und zudem eine Wärmeleitfähigkeit, die in der Größenordnung des Scherbens selbst liegt.

Bei den Mauerwerksmessungen am Fassadenprüfstand nach DIN EN 1934 ergaben sich Verzögerungen im Ablauf aufgrund der enorm langen Trocknungszeiten des Mauerwerks. Insbesondere die Porenbetonprüfkörper zeigen ein schwieriges Trocknungsverhalten, das damit erklärt werden kann, dass der Wasserfilm in den Kapillaren durch die erhöhte Luftgeschwindigkeit bei der Trocknung abreißt, was dazu führt, dass ein feuchter Kern im Mauerinneren verbleibt. Ein Ausgleich der Feuchte innerhalb der Prüfkörper erfolgt nur zögerlich. Die übliche Trocknung bei erhöhter Lufttemperatur erwies sich hier als schwer handhabbar und nicht immer zielführend.

Bessere Ergebnisse und eine Beschleunigung der Trocknung konnte durch einseitig aufgebrachte Heizmatten erreicht werden. Die Wände standen hierbei in einer Trockenkammer bei erhöhter Temperatur mit Zumischung von trockener Luft. Die Oberflächentemperatur auf einer Seite der Wand wurde dann durch die Heizmatten zusätzlich erhöht und ein Temperaturgradient aufgeprägt. Auch bei den Halbsteinmessungen wurde der geplante Zeitrahmen überschritten. Ursächlich waren hier der hohe Aufwand für Kalibriermessungen des neuen Prüfstandes und

Lieferschwierigkeiten bei den Maschinenteilen der Fräse für die planparallelen Oberflächen.

3.2 Numerische Berechnungen

Porenbeton

1. Numerische Berechnungen der gemessenen Kombinationen der Wand- und Halbsteinmessungen zum direkten Vergleich – Berechnung mit Trockenwerten für das Steinmaterial und den jeweiligen Mörtel unter Berücksichtigung der Griffhilfen; Vergleich mit den Werten der Messungen und den Umrechnungen nach DIN EN ISO 6946 (vereinfachtes Verfahren), der flächenanteiligen Umrechnung und dem Tabellenverfahren in DIN 4108-4
2. Untersuchung des Mörtel einflusses
 - a. Berechnung mit Griffhilfen und Mörtel im Vergleich zum Stein mit Griffhilfen ohne Mörtel
 - b. Untersuchung des Einflusses der Mörtel-Wärmeleitfähigkeit
 - c. Untersuchung des Einflusses der Lagerfugendicke an einer Fuge der Dicke 1 - 2 mm mit verschiedenen Mörtel Wärmeleitfähigkeiten
3. Untersuchung des Feuchteinflusses des Materials an Planblöcken ohne Mörtel für die jeweils gemessene Wärmeleitfähigkeit bei der Ausgleichsfeuchte nach Lagerung im Klima 23°C/80% r.F.
4. Untersuchung des Einflusses der Griffhilfen an Planblöcken ohne Mörtel
5. Untersuchung des Einflusses der Steinbreiten an Planblöcken mit DBM in 1 mm Lagerfugendicke und Wanddicken von 30 cm und 36,5 cm

Ziegel

1. Numerische Berechnungen der gemessenen Kombinationen der Wand- und Halbsteinmessungen zum direkten Vergleich – Berechnung mit Trockenwerten für das Steinmaterial und den jeweiligen Mörtel, sowie Messwerten bzw. dem Grenzwert der Wärmeleitfähigkeit für den Dämmstoff; Vergleich mit den Werten der Messungen und den Umrechnungen nach DIN EN ISO 6946 (vereinfachtes Verfahren), der flächenanteiligen Umrechnung und dem Tabellenverfahren in DIN 4108-4
2. Untersuchung des Mörtel einflusses
 - a. Berechnung mit Mörtel im Vergleich zum Ziegel ohne Mörtel
 - b. Untersuchung des Einflusses der Mörtel-Wärmeleitfähigkeit mit drei Wärmeleitfähigkeiten (0,27; 0,40; 1,0)
3. Untersuchung des Feuchteinflusses des Materials unter Ansatz eines Feuchtekorrekturfaktors F_m für den Ziegelscherben von ca. 1,07. Der Feuchtekorrekturfaktor wird nach DIN EN ISO 10456 aus dem Feuchteumrechnungskoeffizient $f_\psi = 10$ und einem für Ziegelscherben nicht

unüblichen massebezogenen Feuchtegehalt von $u_{m,80} = 0,5 \%$ bestimmt. Für die Umrechnung wird die Scherbenrohddichte aus der Messung der Wärmeleitfähigkeit im trockenen Zustand verwendet. Es wird der gleiche F_m -Wert für die Längssteigscherben und für die Quersteigscherben verwendet.

4. Untersuchung des Einflusses der Steinbreiten an den Planziegeln mit DBM 0,27 in 1 mm Lagerfugendicke und Wanddicken von 36,5 cm und 49 cm für den VZ 0,07 und 30 cm; 36,5 cm und 49 cm für den VZ 0,09. Die entsprechenden Steinbilder wurden den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen entnommen.
5. Untersuchung des Einflusses der Anisotropie durch vergleichende Berechnung mit anisotropem Ziegelscherben (Längsstege und Querstege) und isotropem Scherben (niedrigerer Wert der Längsstege auch für die Querstege angesetzt). Die Untersuchung der dritten Raumrichtung mit Wärmetransport in die Mörtel Ebene und der auch hier gegebenen Anisotropie ist sehr aufwändig und konnte im Rahmen dieser Studie nicht untersucht werden.

Bei den numerischen Berechnungen wurden alle wärmeschutztechnischen Materialparameter der Steine realitätsnah erfasst. Gleichwohl erfolgt die Modellierung immer an einem idealen System unter Vernachlässigung der Imperfektionen, die gerade bei Mauersteinen im Millimeterbereich liegen können. Die Anwendung der numerischen Berechnungsverfahren ist nach der DIN EN ISO 10211 geregelt und wurde entsprechend durchgeführt. Die vorliegenden Berechnungen wurden nach der Finite-Elemente-Methode mit dem Programmsystem NASTRAN durchgeführt, welches mit den Validierungsbeispielen in DIN EN ISO 10211 validiert wurde. Die Lösung des dreidimensionalen Temperaturfeldes erfolgt an einem für den Wärmestrom repräsentativen Ausschnitt des zu berechnenden Mauerwerks.

4 Ergebnisse und Auswertung

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Messungen und der numerischen Berechnungen dargestellt.

4.1 Messergebnisse

Wandmessungen nach DIN EN 1934 – trocken

In Tabelle 6 und Abbildung 13 sind die Ergebnisse der Wandmessung an den untersuchten Mauersteinen dargestellt. Die Wandmessung erfolgte an trockenen Probekörpern.

Bei allen untersuchten Ziegeln ist der angegebene Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit bereits durch die gemessenen Trockenwerte teilweise deutlich überschritten.

Beim Porenbeton überschreitet vor allem das Ergebnis des AAC 0,08 den angegebenen Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit von $0,08 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Die Trockenwerte des AAC 0,09 und des AAC 0,12 liegen unter den maximal zulässigen Werten für die Bemessungswerte für die Einstufung. Der maximal zulässige Wert von $0,094 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ für die Einstufung des AAC 0,09 in den Bemessungswert $0,09 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ wird auch bei Ansatz eines Zuschlagsfaktors von 1,05 mit $0,096 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ nur geringfügig überschritten. Das Ergebnis der Wandmessung des AAC 0,12 von $0,119 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ reicht bei einem Zuschlagsfaktor von 1,05 für die Einstufung als Bemessungswert $0,12 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

Eine detaillierte Messunsicherheitsanalyse wurde für die verwendeten Messmittel und den verwendeten Prüfstand als Hot-Box für die Wärmedurchgangsprüfung an Fenstern und Türen nach Anhang F in DIN EN ISO 12567-1 durchgeführt. Die rechnerische Messunsicherheit für die Verwendung des Prüfstands als Hot-Box mit Wärmestrommesser liegt für alle Messungen zwischen 4,2 und 4,8 % des R-Wertes. Nachfolgend wird für alle Wandmessungen eine mittlere Unsicherheit von 4,5% angesetzt, da unterschiedliche kalibrierte Wärmestrommessplatten für die diversen Messungen eingesetzt wurden.

Tabelle 6: Wandmessungen nach DIN EN 1934 – Ergebnisse mit Messunsicherheit für den R-Wert und daraus resultierenden Ergebnis-Spannen für die Wärmeleitfähigkeit und den U-Wert

	R-Wert [m ² ·K/W]	Nenn- Wanddicke [m]	$\lambda_{10, dry, mas}$ [W/(m·K)]	U-Wert [W/(m ² ·K)]
AAC 0,08	4,05 ± 0,18	0,365	0,090 (0,086 – 0,094)	0,237 (0,227 – 0,248)
AAC 0,09	3,27 ± 0,15	0,300	0,092 (0,088 – 0,096)	0,291 (0,279 – 0,304)
AAC 0,12	2,52 ± 0,11	0,300	0,119 (0,114 – 0,125)	0,372 (0,357 – 0,388)
VZ 0,07	3,72 ± 0,17	0,365	0,098 (0,094 – 0,103)	0,257 (0,246 – 0,269)
VZ 0,09	2,92 ± 0,13	0,365	0,125 (0,120 – 0,131)	0,324 (0,311 – 0,338)
HLZ 0,12	2,57 ± 0,12	0,365	0,142 (0,136 – 0,149)	0,365 (0,350 – 0,381)

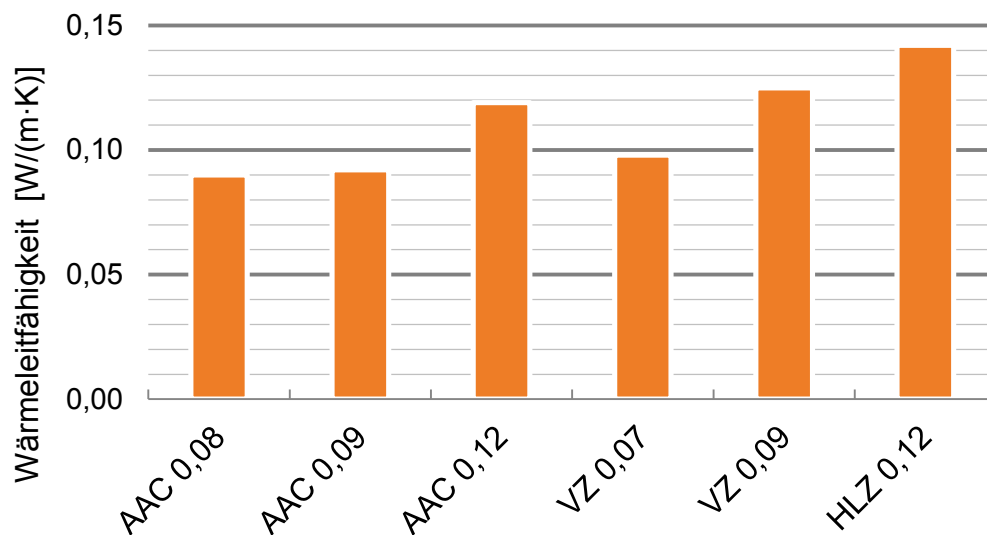


Abbildung 13: Ergebnis der Wandmessung nach DIN EN 1934 - äquivalente Wärmeleitfähigkeit

Halbsteinmessungen nach DIBt Richtlinie – trocken

Der Aufwand für die Halbsteinmessungen mit gehobenen Ansprüchen an die Ebenheit und Rechtwinkligkeit der Probekörper wurde in der Planungsphase der Forschungsarbeit deutlich unterschätzt. Die Vorbereitung der Mauersteine erforderte ein weitaus höheres Maß an Genauigkeit als z.B. für die Messung ganzer Wände nach DIN EN 1934. Da die Maßtoleranzen vor allem der Ziegel wesentlich größer sind als die Möglichkeit zum Dickenausgleich im Messgerät durch den Einsatz von dünnen Matten aus Schaumkunststoff, mussten alle Halbsteinprobekörper erst rechtwinklig gesägt und plangefräst werden. Dann wurden die Mauerwerke zusammengesetzt, mit einem Holzrahmen verspannt und nochmals als ganzer Probekörper plangefräst (siehe Fotodokumentation). Erst durch diese Maßnahmen konnte eine vollständige thermische Ankopplung an die Kühlplatten des Messgeräts gewährleistet werden.

Die gelieferten Porenbeton Planblöcke wiesen nur eine Griffhilfe in jeder Stoßfuge auf. Für die Halbsteinmessungen mussten daher die Steine entlang beider Längsseiten abgesägt werden, da bei einer Halbierung sonst die Griffhilfen offen an den Kühlplatten angelegen wären. Die untersuchten Probekörper sind somit nicht mehr vollständig repräsentativ für die Porenbeton-Planblöcke. Der Einfluss der Griffhilfen in der Messung wird dadurch etwas überschätzt.

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Messungen an den Halbsteinprobekörpern dargestellt. Tabelle 7 enthält die Ergebnisse der Messungen am Porenbeton. Die Untersuchungen wurden in der Reihenfolge der Zeilen in Tabelle 7 durchgeführt. In Abbildung 14 ist der Vergleich der Messungen in waagrechter Orientierung (Wärmestromrichtung nach oben und nach unten) und senkrechter Orientierung (Wärmestromrichtung horizontal) an den drei Probekörpern aus Porenbeton Plansteinen dargestellt. Diese Messungen wurden durchgeführt um den Einfluss der Konvektion in den Griffhilfen zu untersuchen. Wie erwartet stellt sich bei der senkrechten Orientierung der Probekörper (horizontaler Wärmestrom) eine geringfügig höhere äquivalente Wärmeleitfähigkeit ein. Luftzirkulation zwischen den einzelnen Halbsteinen wurde durch die Anordnung einer dünnen PE-Folie (Frischhaltefolie) vermieden.

Eine detaillierte Messunsicherheitsanalyse wurde für die verwendeten Messmittel und den verwendeten Prüfstand als Wärmestrom-Messplattengerät für die Messung von homogenen Materialien durchgeführt. Die rechnerische Messunsicherheit für die Verwendung des Prüfstands liegt hierbei bei etwa 2,5 % des λ -Wertes. Für die Halbstein-Probekörper sind jedoch erhöhte Unsicherheiten aus der Probenvorbereitung, Inhomogenität der Probekörper und aus der Dickenmessung zu erwarten. Nachfolgend wird für alle Halbsteinmessungen eine Unsicherheit von 3,5 % angesetzt.

Porenbeton

Tabelle 7: Ergebnisse der Halbsteinmessung an Porenbeton im trockenen Zustand

Messung und Orientierung	Wärmeleitfähigkeit trocken $\lambda_{10,dry}$ [W/(m·K)]		
	AAC 0,08	AAC 0,09	AAC 0,12
Trockenmauerwerk mit Griffhilfen waagrecht	0,0876 ± 0,0031	0,0892 ± 0,0031	0,1159 ± 0,0041
Trockenmauerwerk mit Griffhilfen senkrecht	0,0876 ± 0,0031	0,0899 ± 0,0031	0,1166 ± 0,0041
Trockenmauerwerk ohne Griffhilfen senkr.	0,0836 ± 0,0029	0,0870 ± 0,0030	0,1132 ± 0,0040
Vermörtelt ohne Griffhilfen senkrecht	0,0867 ± 0,0030	0,0903 ± 0,0032	0,1160 ± 0,0041

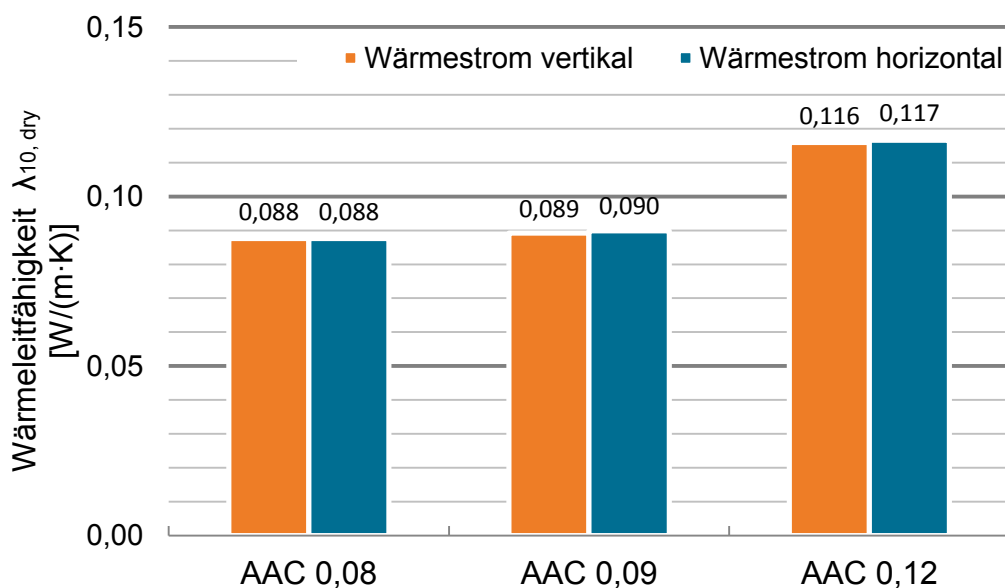


Abbildung 14: Ergebnis der Halbsteinmessung nach DIBt-Richtlinie - äquivalente Wärmeleitfähigkeit der Porenbeton-Planblöcke ohne Mörtel in waagrechter und senkrechter Orientierung

Um zu untersuchen welchen Einfluss die Griffhilfen auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit der Porenbeton Planstein-Mauerwerke haben, wurden die Probekörper wie oben beschrieben zugesägt. Der Einfluss der Griffhilfen in der Messung wird dadurch überschätzt. Messungen in senkrechter Orientierung wurden mit und ohne Griffhilfen (trocken abgesägt) durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 und Abbildung 15 dargestellt.

Der Unterschied in der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit der Probekörper liegt bei 0,0041 W/(m·K) beim AAC 0,08 und 0,0029 W/(m·K) beim AAC 0,09 und 0,0034 W/(m·K) beim AAC 0,12. Bezogen auf das Messergebnis ohne Griffhilfen erhöht sich die Wärmeleitfähigkeit beim AAC 0,08 um 4,8 %, um 3,3 % beim AAC 0,09 und um 3,0 % beim AAC 0,12. Der Einfluss der Griffhilfen liegt somit etwa im Bereich der rechnerischen Messunsicherheit von 3,5 %, konnte jedoch trotzdem reproduzierbar gemessen werden.

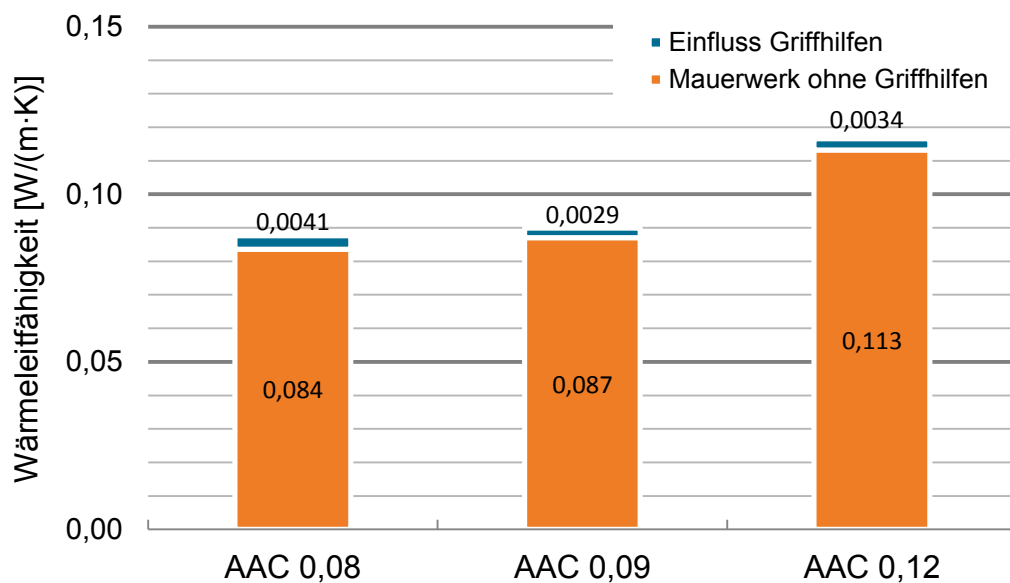


Abbildung 15: Halbsteinmessung nach DIBt-Richtlinie - äquivalente Wärmeleitfähigkeit - Einfluss der Griffhilfen

Nach der Messung des Einflusses der Griffhilfen wurden die Halbsteinprobekörper auseinandergenommen, in einer Schablone mit dem System-Plansteinkleber vermörtelt, nochmals plangefräst und bei erhöhter Temperatur getrocknet. Die Ergebnisse der Messung des Mörtel einflusses sind in Abbildung 16 dargestellt. Der verwendete Plansteinkleber führt zu einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit der Probekörper von 0,0031 W/(m·K) (AAC 0,08); 0,0033 W/(m·K) (AAC 0,09) und 0,0028 W/(m·K) (AAC 0,12).

Relativ erhöht sich die äquivalente Wärmeleitfähigkeit durch den Mörtel einfluss etwa in der gleichen Größenordnung wie durch die Griffhilfen (3,7 % beim AAC 0,08; 3,8 % beim AAC 0,09 und 2,5 % beim AAC 0,12). In Tabelle 8 sind die absoluten und prozentualen Einflüsse der untersuchten Parameter zusammengefasst. Der Mörtel einfluss liegt ebenfalls in etwa in der Größenordnung der rechnerischen Unsicherheit bei der Messung, konnte jedoch trotzdem zuverlässig gemessen werden.

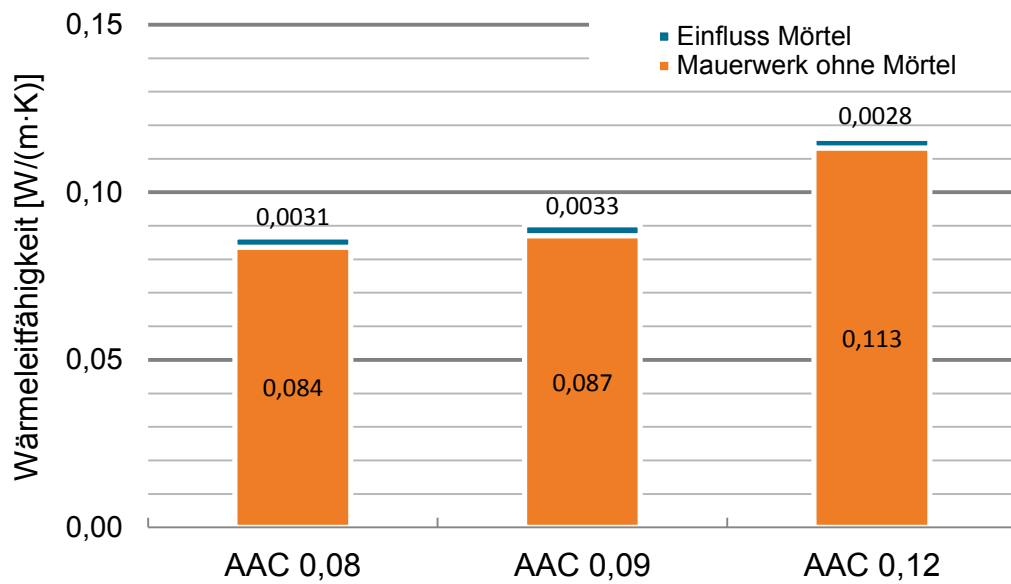


Abbildung 16: Halbsteinmessung nach DIBt-Richtlinie - äquivalente Wärmeleitfähigkeit - Einfluss des Mörtels

Tabelle 8: Porenbeton – Messungen an Halbsteinen nach der DIBt-Richtlinie – Änderung bei der Wärmeleitfähigkeit und beim U-Wert

Einflussgröße in der Messung		$\Delta\lambda$		ΔU	
		[W/(m·K)]	[%]	[W/(m ² ·K)]	[%]
Messungen senkrecht ohne Griffhilfen mit und ohne Mörtel	AAC 0,08	0,0031	3,7	0,0079	3,6
	AAC 0,09	0,0033	3,8	0,0099	3,6
	AAC 0,12	0,0028	2,5	0,0084	2,4
Messungen mit Griffhilfen ohne Mörtel senkrecht und waagrecht	AAC 0,08	0,0001	0,1	0,0002	0,1
	AAC 0,09	0,0007	0,7	0,0010	0,3
	AAC 0,12	0,0007	0,6	0,0011	0,3
Messungen senkrecht ohne Mörtel mit und ohne Griffhilfen	AAC 0,08	0,0041	4,8	0,0101	4,6
	AAC 0,09	0,0029	3,3	0,0088	3,2
	AAC 0,12	0,0034	3,0	0,0100	2,8

Ziegel

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Messungen an den Halbsteinprobekörpern dargestellt. Tabelle 9 enthält die Ergebnisse der Messungen an den Ziegeln. Die Untersuchungen wurden in der Reihenfolge der Zeilen in Tabelle 9 durchgeführt. In Abbildung 17 ist der Vergleich der Messungen in waagrechter Orientierung (Wärmestromrichtung nach oben und nach unten) und senkrechter Orientierung (Wärmestromrichtung horizontal) an den drei Probekörpern aus Ziegeln dargestellt. Diese Messungen wurden durchgeführt um den Einfluss der Konvektion in den Luftkammern des HLZ 0,12 zu untersuchen. Wie erwartet stellt sich bei der senkrechten Orientierung des HLZ 0,12 (horizontaler Wärmestrom) eine geringfügig höhere äquivalente Wärmeleitfähigkeit ein. Luftzirkulation zwischen den einzelnen Halbsteinen wurde durch die Anordnung einer dünnen PE-Folie (Frischhaltefolie) vermieden. Die Messergebnisse der beiden Füllziegel VZ 0,07 und VZ 0,09 sind in horizontaler und vertikaler Orientierung identisch.

Tabelle 9: Ergebnisse der Halbsteinmessungen an Ziegeln im trockenen Zustand

Messung und Orientierung	Wärmeleitfähigkeit trocken $\lambda_{10,dry}$ [W/(m·K)]		
	VZ 0,07	VZ 0,09	HLZ 0,12
Trockenmauerwerk waagrecht	0,0907 ± 0,0032	0,1125 ± 0,0039	0,1350 ± 0,0047
Trockenmauerwerk senkrecht	0,0911 ± 0,0032	0,1125 ± 0,0039	0,1358 ± 0,0048
Vermörtelt senkrecht	0,0925 ± 0,0032	0,1248 ± 0,0044	0,1369 ± 0,0048

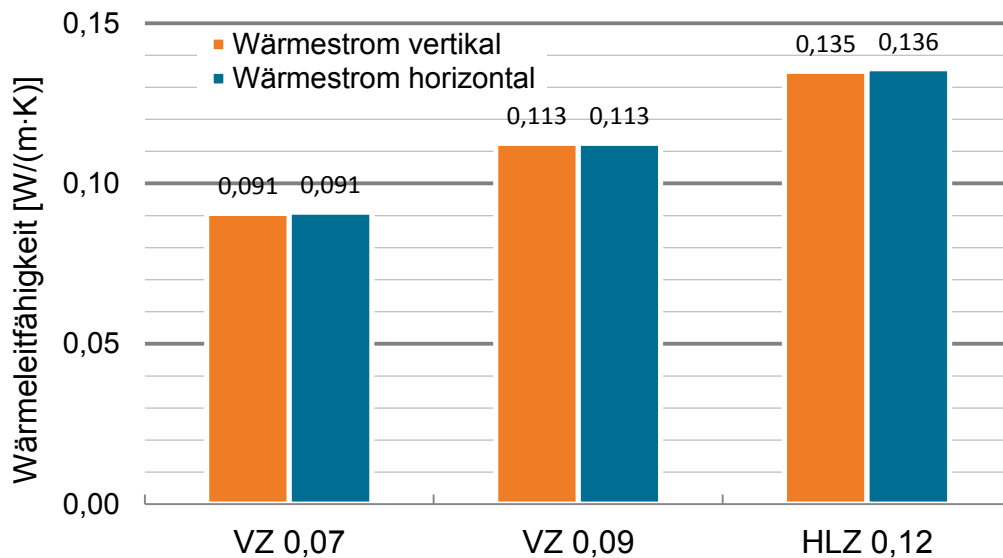


Abbildung 17: Ergebnis der Halbsteinmessung nach DIBt-Richtlinie – äquivalente Wärmeleitfähigkeit für die Ziegel ohne Mörtel in waagrechter und senkrechter Orientierung

Das Messergebnis des VZ 0,09 mit Mörtel liegt wesentlich über dem Messergebnis ohne Mörtel. Hier lag eine Verwechslung der Datensätze bei der Anwendung des Abbruchkriteriums vor, weswegen die Messung beendet wurde, ohne dass hier brauchbare Daten für die Auswertung generiert wurden. Der Fehler wurde erst bei der abschließenden Auswertung der Messungen entdeckt und konnte mangels einer ausreichenden Anzahl an Rückstellproben nicht durch eine Wiederholungsmessung korrigiert werden. Das Messergebnis ist in der Ergebnistabelle der Halbsteinmessung enthalten, die Berechnung des Anstiegs der Wärmeleitfähigkeit aufgrund des Vermörtelns der Probekörper ist jedoch nicht sinnvoll.

In Tabelle 10 sind die absoluten und prozentualen Einflüsse der untersuchten Parameter auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit und den U-Wert zusammengefasst. Die Unterschiede zwischen den Messungen in waagrechter und senkrechter Orientierung sowie mit und ohne Mörtel sind deutlich kleiner als die rechnerische Messunsicherheit für die Halbsteinmessung von etwa 3,5 %.

Tabelle 10: Ziegel – Messungen nach DIBt Richtlinie – Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeit

Einflussgröße in der Messung		$\Delta\lambda$		ΔU	
		[W/(m·K)]	[%]	[W/(m ² ·K)]	[%]
Messungen senkrecht mit und ohne Mörtel	VZ 0,07	0,0014	1,5	0,0035	1,4
	VZ 0,09	-	-	-	-
	HLZ 0,12	0,0011	0,8	0,0027	0,9
Messungen ohne Mörtel waagrecht und senkrecht	VZ 0,07	0,0004	0,4	0,0010	0,4
	VZ 0,09	0,0000	0,0	0,0000	0,0
	HLZ 0,12	0,0010	0,7	0,0024	0,7

Messungen am Steinmaterial

Die Messunsicherheit bei der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit im Plattengerät wurde für das Wärmeleitfähigkeitslabor des FIW München nach dem Leitfaden für die Bestimmung der Unsicherheit von Messwerten „ISO GUM“ durchgeführt und liegt für die verwendeten Geräte und Messmittel zwischen 1,5 und 2,5 %. Für die im Zweiplattenverfahren gemessenen Wärmeleitfähigkeitswerte kann aufgrund der Beschaffenheit der Probekörper und der vorhandenen Inhomogenitäten (Porengrößen und Porengrößenverteilung; Mikrostruktur und Presstexturen; Ebenheit und Planparallelität, etc.) von einer Messunsicherheit von etwa 2,0 % ausgegangen werden. Die Ebenheit und die Planparallelität der Probenplatten wurden geprüft und lagen innerhalb der in DIN EN 12667 erlaubten Toleranzen. Für die Messungen bei Ausgleichsfeuchte beträgt die Messunsicherheit etwa 2,5 %.

Porenbeton

In Tabelle 11 und Abbildung 18 sind die Ergebnisse der Untersuchungen im Zweiplattengerät nach DIN EN 12664 an Porenbeton dargestellt. Untersucht wurden

Platten im trockenen Zustand und bei Ausgleichsfeuchte nach Lagerung im Klima 23°C/80%r.F. bis zur Massekonstanz. Durch die Ausgleichsfeuchte erhöht sich die Wärmeleitfähigkeit um 0,0078 W/(m·K) beim AAC 0,08, was einem Anstieg von etwa 9,5 % entspricht. Der Anstieg ist beim AAC 0,09 mit 0,0062 W/(m·K) (ca. 7,0 %) und beim AAC 0,12 mit 0,008 W/(m·K) (ca. 7,1 %) etwas niedriger. Der massebezogene Feuchtegehalt ist nicht dargestellt, da dieser üblicherweise auf das Rücktrocknungsgewicht bezogen wird um die Karbonatisierung während der Feuchtlagerung zu berücksichtigen. Die recht großen Rohdichteunterschiede (siehe Tabelle 11) können somit nicht ausschließlich dem Feuchtegehalt zugeordnet werden.

Tabelle 11: Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessung an Porenbeton

Messung	AAC 0,08	AAC 0,09	AAC 0,12
	Materialrohddichte ρ [kg/m ³]		
	Wärmeleitfähigkeit λ_{10} [W/(m·K)]		
im trockenen Zustand $\lambda_{10,dry}$	345 0,0821 ± 0,0016	346 0,0879 ± 0,0018	457 0,113 ± 0,0023
Bei Ausgleichsfeuchte nach Lagerung bei 23°C/80%r.F. $\lambda_{10,u80}$	379 0,0899 ± 0,0022	370 0,0941 ± 0,0024	488 0,121 ± 0,0030
Anstieg der Wärmeleitfähigkeit	0,0078	0,0062	0,0079
Anstieg in %	9,5 %	7,0 %	7,1

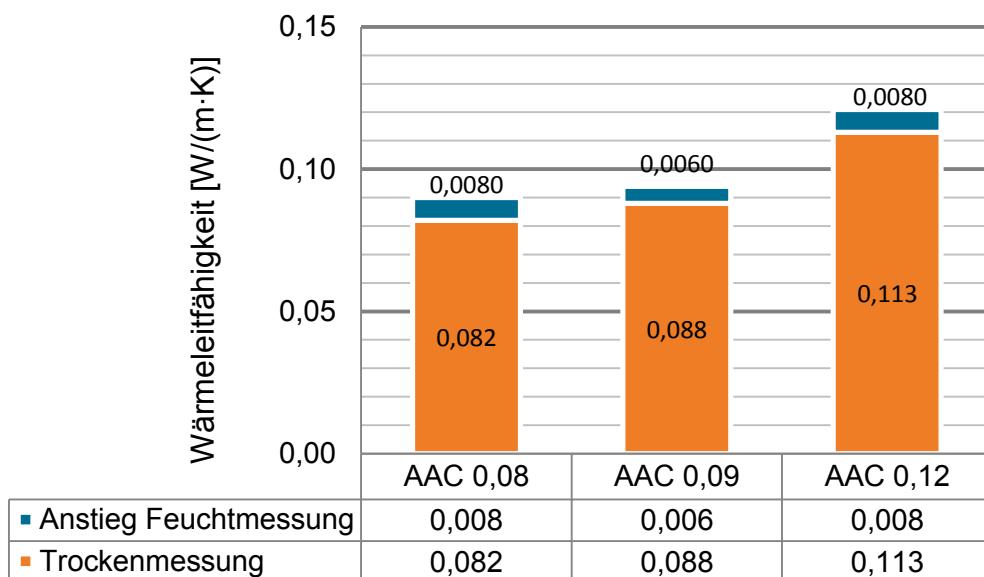


Abbildung 18: Ergebnisse der Messung an Porenbeton Platten im Zweiplattengerät - Wärmeleitfähigkeit trocken und Anstieg der Wärmeleitfähigkeit durch den Ausgleichsfeuchtegehalt

Ziegel

Die Ergebnisse der Messungen am Ziegelscherben sind nachfolgend in Tabelle 12 und Abbildung 19 dargestellt. Auffällig ist die Wärmeleitfähigkeit des Ziegelscherbens des VZ 0,09, der bei der geringsten Trockenrohddichte die höchste Wärmeleitfähigkeit der untersuchten Proben aufweist. Hier zeigt sich, dass der alleinige Rohdichtebezug beim Ziegelscherben mit einer großen Ungenauigkeit verbunden sein kann. Bei identischer Rohdichte kann ein Ziegelscherben mit günstigen Porengrößen und einer guten Porengrößenverteilung mitunter deutlich niedrigere Wärmeleitfähigkeitswerte zeigen als ein Ziegelscherben mit ungünstigerer Porengröße und –Verteilung.

In Querstegrichtung ist die Wärmeleitfähigkeit der untersuchten Scherbenproben zwischen 27 % beim Scherben mit der größten Stegdicke VZ 0,09 und 43 % beim dünnen Scherben des HLZ 0,12 höher als für die Längsstege in Haupt-Wärmestromrichtung des Mauerwerks. Der Scherben des VZ 0,07 liegt mit einem Unterschied von 35 % zwischen der Wärmeleitfähigkeit der Längsstege und der Querstege in der Mitte. Der beim Porenbeton für die Zweiplattengerätmessung im trockenen Zustand angesetzte Wert für die Messunsicherheit von 2,0 % wird auch bei der Messung des Ziegelscherbens angesetzt.

Tabelle 12: Messungen der Wärmeleitfähigkeit nach DIN EN 12664 am Ziegelscherben

Messung	VZ 0,07	VZ 0,09	HLZ 0,12
	Scherbenrohddichte ρ [kg/m ³]		
	Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, dry}$ [W/(m·K)]		
Längsstege	1390	1340	1418
	0,297 ± 0,0059	0,331 ± 0,0066	0,294 ± 0,0059
Querstege	1382	1368	1390
	0,401 ± 0,0080	0,422 ± 0,0084	0,421 ± 0,0084

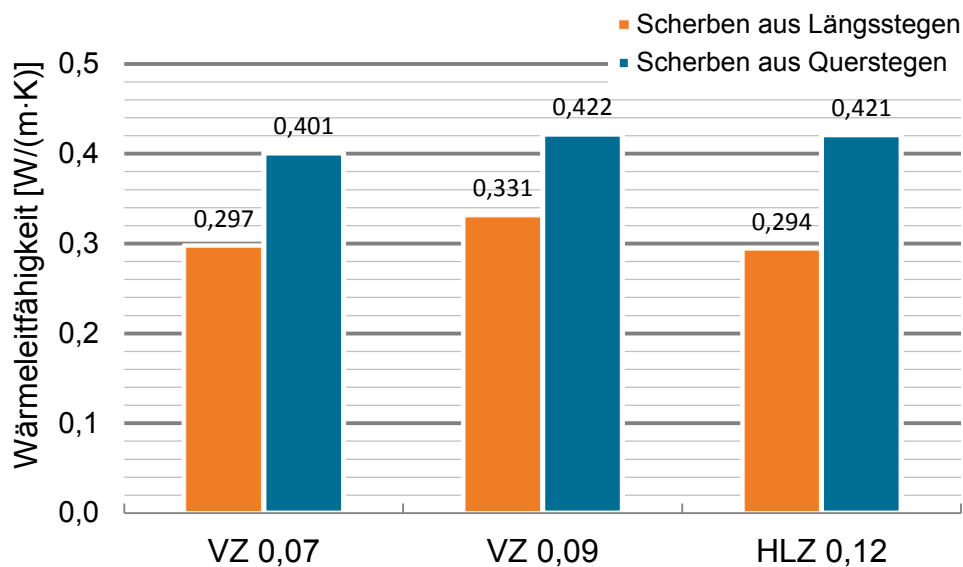


Abbildung 19: Ergebnisse der Messung der Wärmeleitfähigkeit im Zweiplattengerät an Prüfkörpern aus den Längsstegen und den Querstegen

4.2 Berechnungsergebnisse

Nachrechnung der Messergebnisse

Für die Porenbeton- und Ziegel-Probekörper der Wandmessungen und der Halbssteinmessungen werden numerische Berechnungen mittels dreidimensionaler FE-Methode durchgeführt, um die gemessenen Werte in der Berechnung nachzustellen und mögliche Abweichungen zu ermitteln. Bei der Nachrechnung der gemessenen Werte werden die vermörtelten Varianten mit dem Trockenwert der Wärmeleitfähigkeit für den jeweiligen Mörtel berechnet, damit die Ergebnisse mit den Messungen verglichen werden können. Angesetzt wurde für die Vergleichsberechnung für den Dünnbettmörtel ein Trockenwert der Wärmeleitfähigkeit von 0,21 W/(m·K), wie er aus einem Bemessungswert von 0,27 W/(m·K) unter Berücksichtigung des in DIN 4108-4 angegebenen F_m -Werts von 1,27 ermittelt werden kann und ein Trockenwert von 0,18 W/(m·K), wie er mit einem F_m -Wert von 1,15 aus dem Bemessungswert von 0,21 W/(m·K) für den LM 21 ermittelt werden kann.

Porenbeton

Für die Porenbeton-Probekörper sind die Messergebnisse und die Berechnungsergebnisse in Tabelle 13 zusammengestellt. Zu beachten ist, dass die Messung der Halbssteine mit Mörtel beim Porenbeton ohne Griffhilfen ist, da diese vorher zur Bestimmung des Einflusses entfernt wurden. Die Messwerte der Halbssteine mit Mörtel sind somit nicht direkt vollständig vergleichbar mit den numerischen Berechnungen und der Wandmessung.

Tabelle 13: Ergebnisse der Simulation für die Porenbeton-Probekörper im Vergleich mit den Messergebnissen der Wand und der Halbsteine

Messung, Berechnung und Orientierung	Wärmeleitfähigkeit trocken $\lambda_{10,dry}$ [W/(m·K)]		
	AAC 0,08	AAC 0,09	AAC 0,12
Wandmessung nach DIN EN 1934 – mit Griffhilfen, vermörtelt und senkrecht	0,090	0,092	0,119
Halbsteinmessung, vermörtelt ohne Griffhilfen senkrecht	0,0867	0,0903	0,1160
Numerische Simulation 3d nach DIN EN ISO 10211 – mit Griffhilfen und vermörtelt	0,0836	0,0895	0,1145
Vereinfachtes Verfahren nach DIN EN ISO 6946 – vermörtelt ^{*)}	0,0835	0,0895	0,1145
Flächenanteilige Mittelung der U-Werte der verschiedenen Bereiche – vermörtelt ^{*)}	0,0835	0,0895	0,1145
Umrechnungstabelle für Mauerwerk aus DIN 4108-4	k.A.	k.A.	0,11
^{*)} Als Eingangswert für den ungestörten Bereich wird der dreidimensional nach DIN EN ISO 10211 am Leichtbetonblock (ohne Mörtel aber mit Griffhilfen) ermittelte Wert eingesetzt. ^{**)} Zum Vergleich mit den Messergebnissen erfolgt hier die Berechnung mit Trockenwerten für den Mörtel.			

Auffällig ist, dass für alle Porenbeton-Planblöcke die Wärmeleitfähigkeit von der Wandmessung hin zur flächenanteiligen Berechnung abnimmt (Abbildung 20). Die Werte für die numerische Simulation liegen dabei nur unwesentlich über den Werten aus dem vereinfachten Verfahren (DIN EN ISO 6946) und der flächenanteiligen Mittelung. Die gemessenen Werte sind jedoch deutlich höher.

Der wahrscheinlichste Grund dafür ist eine nicht vollständige Trocknung der Wand-Probekörper. Weitere Gründe für die gegenüber der numerischen Berechnung hohen Messwerte können eine größere Lagerfugendicke (u.U. erfolgt hier schon eine deutliche Vergrößerung alleine durch das Füllen der angeschnittenen Poren der Steine während des Vermörtelns und damit eine Erhöhung der wirksamen Dicke der Mörtelschicht in wärmetechnischer Hinsicht) und/oder ein Mörtel mit einer höheren Wärmeleitfähigkeit als im System angegeben sein. Systemübliche Plansteinkleber zeigen hier mitunter deutlich höhere Wärmeleitfähigkeiten von 0,5 bis 0,7 W/(m·K).

Die Wärmeleitfähigkeit des Mörtels wurde nicht untersucht. Eine solche Messung ist mit großen Unsicherheiten verbunden, da die Proben für die Messung der Wärmeleitfähigkeit deutlich dicker sein müssen als die letztendlich zwischen den Steinen eingesetzte Dünnbettfuge.

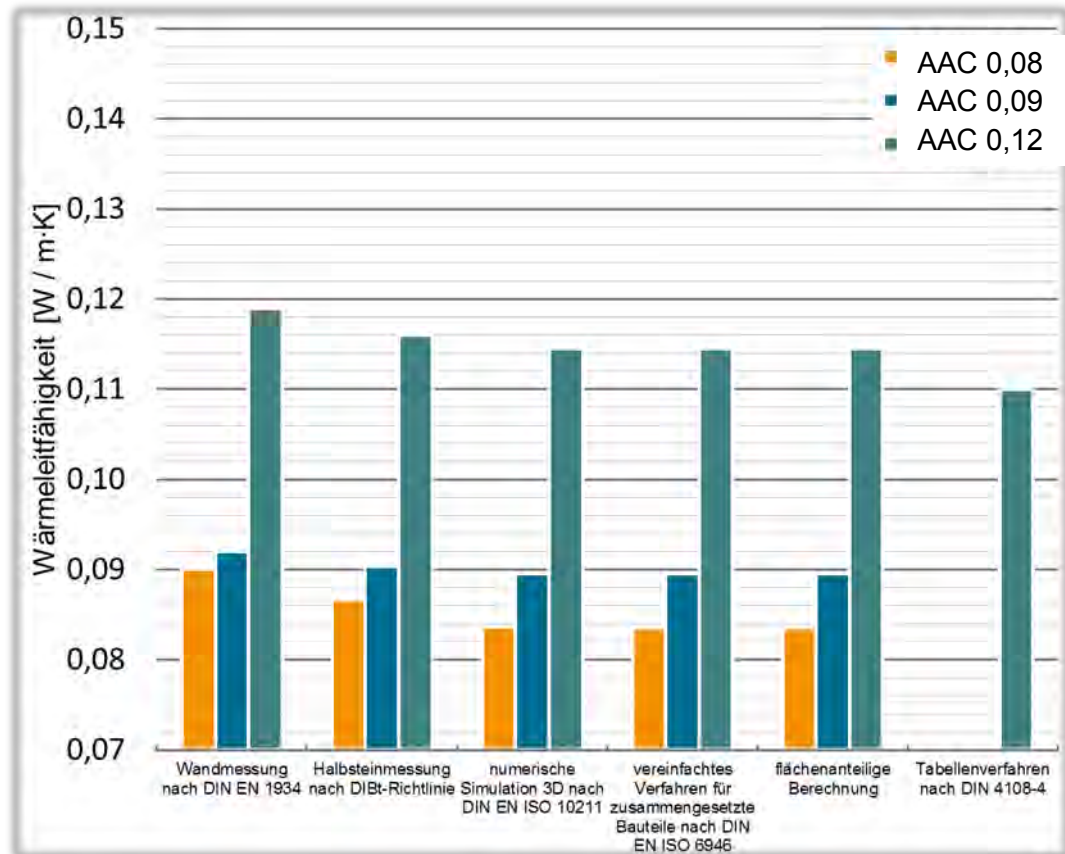


Abbildung 20: Vergleich der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks aus Porenbeton-Planblöcken nach den untersuchten Methoden (Halbsteinmessung nicht vollständig direkt vergleichbar, da ohne Griffhilfen)

Ziegel

Bei den Ziegel-Probekörpern ist der Unterschied zwischen Messung, numerischer Simulation und vereinfachten Berechnungen noch wesentlich deutlich ausgeprägt (Tabelle 14 und Abbildung 21). Aus dem Vergleich der Messungen mit und ohne Mörtel nach der Halbsteinmethode, wird – wie oben dargestellt – abgeleitet, dass der Messwert des VZ 0,09 mit Mörtel deutlich zu hoch ist. Dieser wird in den nachfolgenden Auswertungen daher nicht gewertet. Auch bei den Ziegeln liegen die Werte für die numerische Simulation nur unwesentlich über den Werten aus dem vereinfachten Verfahren (DIN EN ISO 6946) und der flächenanteiligen Mittelung.

Ein möglicher Grund dafür ist ebenfalls eine nicht vollständige Trocknung der Wand-Probekörper. Weitere Gründe für die gegenüber der numerischen Simulation hohen Messwerte können eine größere Lagerfugendicke und/oder ein Mörtel mit einer höheren Wärmeleitfähigkeit als im System angegeben sein.

Die Kontrollmessung für die Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs ergab einen Wert von 0,0327 W/(m·K), der sogar noch etwas unter dem zulässigen Grenzwert von 0,0338 W/(m·K) liegt. Eine deutlich zu hohe Wärmeleitfähigkeit für den Dämmstoff scheidet also als Erklärung für die hohen Werte der Füllziegel aus. Die

Wärmeleitfähigkeit des Mörtels wurde ebenfalls aus den im vorigen Kapitel angegebenen Gründen nicht untersucht.

Das Tabellenverfahren nach DIN 4108-4 liefert hier nur Werte für den VZ 0,09 und HLZ 0,12, die etwas über den Werten der Simulation, des vereinfachten Verfahrens und der flächenanteiligen Mittelung liegen.

Tabelle 14: Ergebnisse der Berechnung für die Ziegel-Probekörper im Vergleich mit den Messergebnissen der Wand und der Halbsteine (für Messunsicherheiten siehe vorheriges Kapitel)

Messung, Berechnung und Orientierung	Wärmeleitfähigkeit trocken $\lambda_{10, dry}$ [W/(m·K)]		
	VZ 0,07	VZ 0,09	HLZ 0,12
Wandmessung nach DIN EN 1934 – vermörtelt und senkrecht	0,098	0,125	0,142
Halbsteinmessung, vermörtelt und senkrecht	0,0925	0,1248	0,1369
Numerische Simulation 3d nach DIN EN ISO 10211 – anisotroper Scherben, vermörtelt	0,0793	0,1058	0,1187
Vereinfachtes Verfahren nach DIN EN ISO 6946 – vermörtelt ^{*)}	0,0785	0,1055	0,1182
Flächenanteilige Mittelung der U-Werte der verschiedenen Bereiche – vermörtelt ^{*)}	0,0785	0,1055	0,1181
Umrechnungstabelle für Mauerwerk aus DIN 4108-4	k.A.	0,11	0,12
^{*)} Als Eingangswert für den ungestörten Bereich wird der dreidimensional nach DIN EN ISO 10211 am Ziegel (anisotroper Scherben, ohne Mörtel) ermittelte Wert eingesetzt. ^{**)} Zum Vergleich mit den Messergebnissen erfolgt hier die Berechnung mit Trockenwerten für den Mörtel.			

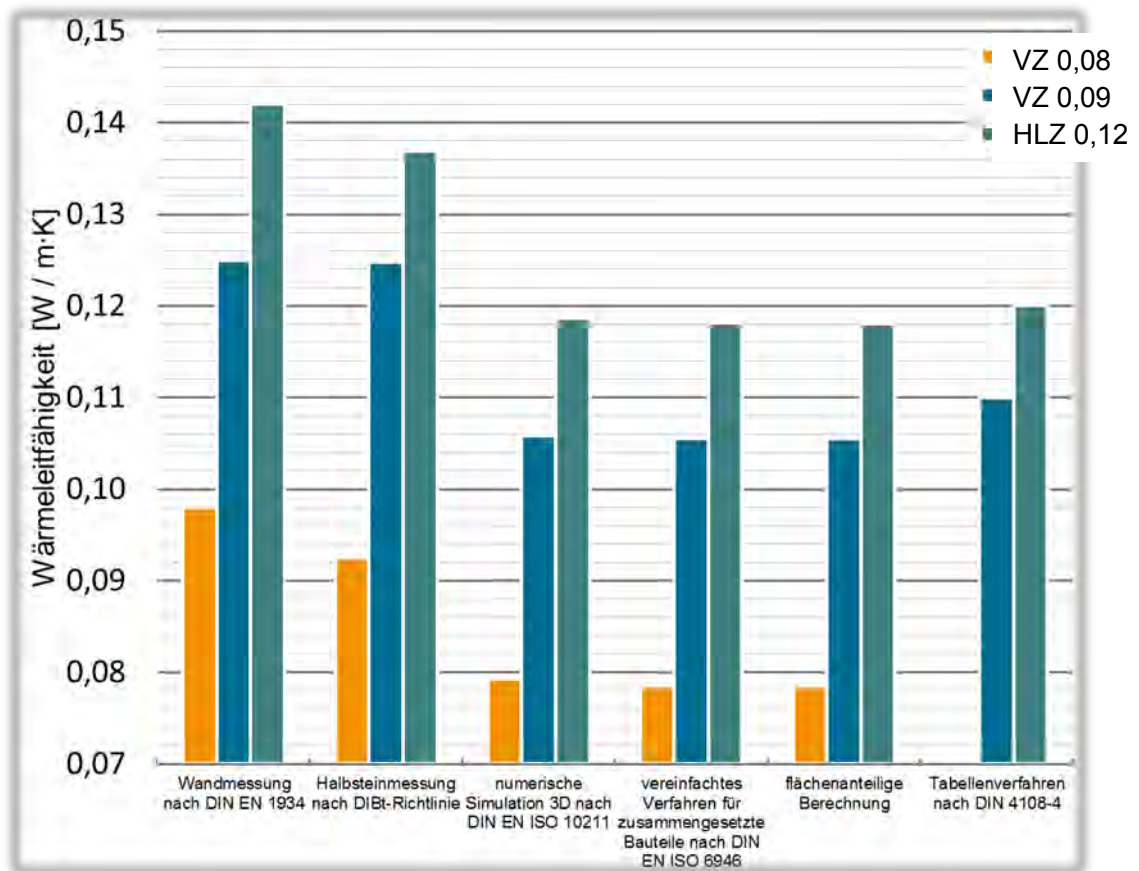


Abbildung 21: Vergleich der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks aus Ziegeln nach den untersuchten Methoden

Einfluss der Mörtelart und Lagerfugendicke

Die Ergebnisse der Halbsteinmessungen, der numerischen Berechnungen und der geometrischen Verfahren sind nachfolgend für die Mörtel einflüsse dargestellt.

Porenbeton

Ergebnisse der Berechnungen für die Porenbeton-Probekörper im Vergleich mit den Messergebnissen der Halbsteine und den geometrischen Verfahren sind in Tabelle 15 dargestellt. Verglichen wird jeweils der Wert mit und ohne Mörtel für den Standardmörtel in der Lagerfugendicke 1 mm. Zu beachten ist beim Vergleich, dass die Halbsteinmessung ohne Griffhilfen durchgeführt wurde. Deutlich wird der große Einfluss des Mörtels in der Messung bei der Betrachtung der Abbildung 22. Der gemessene Wert liegt mit etwa 3 mW/(m·K) etwa beim sechsfachen des berechneten Einflusses.

Hier liegt die Vermutung nahe, dass der verwendete Dünnbettmörtel eine deutlich höhere Wärmeleitfähigkeit hatte als der in der Berechnung angesetzte Trockenwert eines DBM 024. Zudem dürften die angeschnittenen Poren in der Messung

zumindest teilweise mit Mörtel gefüllt gewesen sein, was in wärmetechnischer Hinsicht einer dickeren Mörtelschicht gleichkäme.

Tabelle 15: Ergebnisse der Berechnungen für die Porenbeton-Probekörper im Vergleich mit den Messergebnissen der Halbsteine. (für Messunsicherheiten der einzelnen Ergebnisse der Halbsteinmessung siehe Tabelle 8)

Messung, Berechnung und Orientierung	Wärmeleitfähigkeit trocken $\lambda_{10,dry}$ [W/(m·K)]					
	AAC 0,08		AAC 0,09		AAC 0,12	
	DBM 024 ^{***}) trocken ^{**}) 1 mm	Ohne Mörtel	DBM 024 ^{***}) trocken ^{**}) 1 mm	Ohne Mörtel	DBM 024 ^{***}) trocken ^{**}) 1 mm	Ohne Mörtel
Halbsteinmessung, ohne Griffhilfen senkrecht	0,0867	0,0836	0,0903	0,0870	0,1160	0,1132
Numerische Simulation 3d nach DIN EN ISO 10211 – mit Griffhilfen	0,0836	0,0829	0,0895	0,0889	0,1145	0,1140
Vereinfachtes Verfahren nach DIN EN ISO 6946^{*)}	0,0835	0,0829	0,0895	0,0889	0,1145	0,1140
Flächenanteilige Mittelung der U- Werte der verschiedenen Bereiche^{*)}	0,0835	0,0829	0,0895	0,0889	0,1145	0,1140
Umrechnungstabelle für Mauerwerk aus DIN 4108-4	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	0,11	0,11

^{*)} Als Eingangswert für den ungestörten Bereich wird der dreidimensional nach DIN EN ISO 10211 am Leichtbetonblock (ohne Mörtel aber mit Griffhilfen) ermittelte Wert eingesetzt.
^{**}) Zum Vergleich mit den Messergebnissen erfolgt hier die Berechnung mit Trockenwerten für den Mörtel.
^{***}) für die Berechnung wurde von einem DBM 024 ausgegangen. Vermutlich hatte der für die Probekörper verwendete Mörtel jedoch eine höhere Wärmeleitfähigkeit.

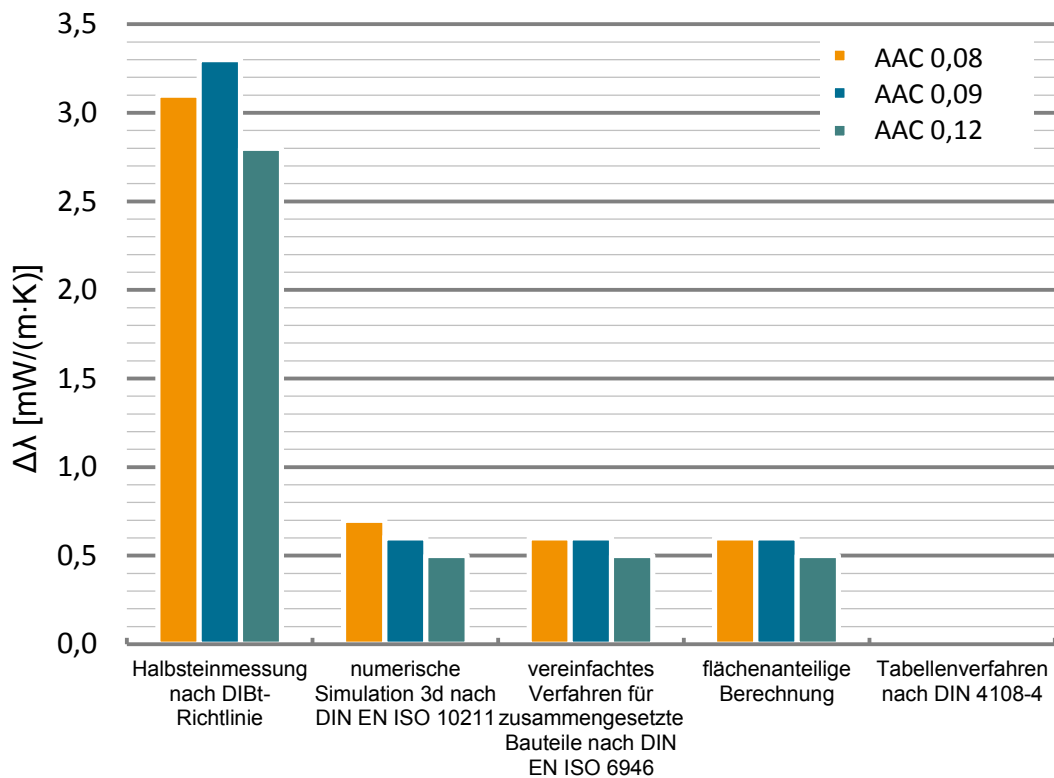


Abbildung 22: Einfluss des Mörtels auf die Wärmeleitfähigkeit der Porenbeton-Planblöcke im Vergleich der Messung und Berechnung

Weitere Gründe für diese großen Unterschiede könnten eine nicht ausreichende Trocknung der Halbsteinprobekörper nach dem Vermörteln sein, oder wie bereits mehrfach beschrieben eine größere Lagerfugendicke und eventuell eine deutlich höhere Mörtel Wärmeleitfähigkeit bei der Messung im Vergleich mit den Berechnungen.

Um die Abweichungen näher einzugrenzen wurden anschließend mittels numerischer Berechnungen Sensitivitätsuntersuchungen an Porenbeton mit unterschiedlichen Mörtel Wärmeleitfähigkeiten und Mörtelschichtdicken durchgeführt. In Tabelle 16 und Abbildung 23 ist der Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des verwendeten Mörtels dargestellt. Der Einfluss ist für die drei untersuchten Porenbeton-Planblöcke für die Mörtelwärmeleitfähigkeiten von 0,24 bis 1,0 W/(m·K) in der Lagerfugendicke 1 mm annähernd linear. Wie vermutet ist der Wärmebrückeneinfluss des Mörtels beim Porenbeton mit der niedrigsten Wärmeleitfähigkeit am größten. Die in der Halbsteinmessung festgestellten Einflüsse der Mörtelfugen lassen sich für die 1 mm Fuge erst bei einer Wärmeleitfähigkeit des Mörtels von etwa 0,80 W/(m·K) nachstellen.

Tabelle 16: Ergebnisse der Berechnung für die Porenbeton-Probekörper mit unterschiedlichen Mörtelarten

Mörtel Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]	Wärmeleitfähigkeit trocken λ_{10} [W/(m·K)]					
	AAC 0,08		AAC 0,09		AAC 0,12	
	DBM 1 mm	Ohne Mörtel	DBM 1 mm	Ohne Mörtel	DBM 1 mm	Ohne Mörtel
0,24	0,0836	0,0829	0,0895	0,0889	0,1145	0,1140
0,40	0,0842		0,0902		0,1152	
1,0	0,0866		0,0925		0,1175	
-	-					

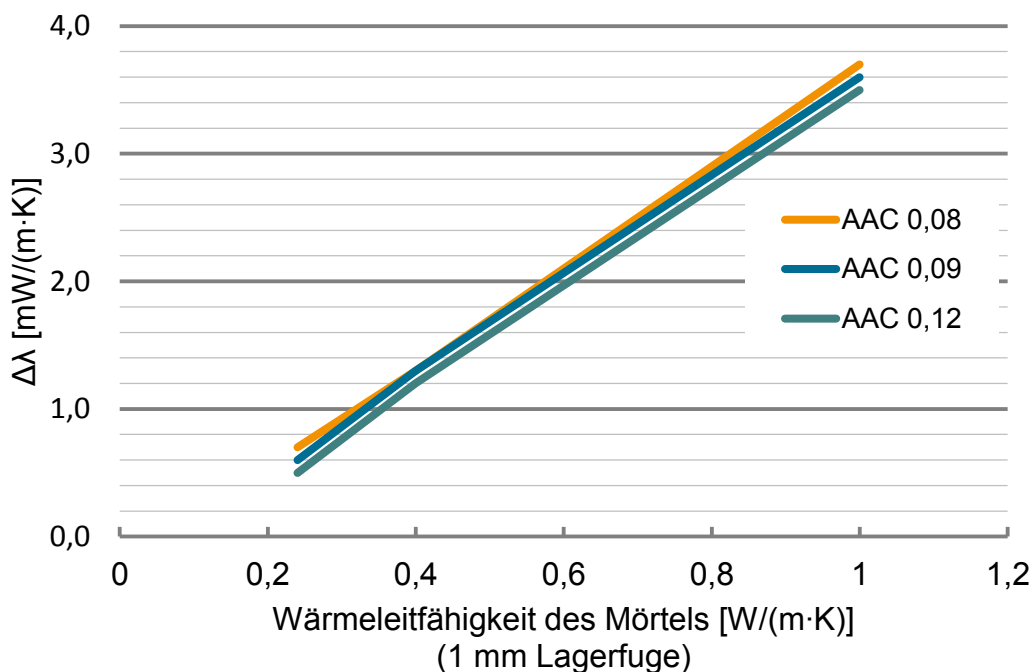


Abbildung 23: Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Mörtels (Mörtelsorte) auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit einer Wand aus Porenbeton Planblöcken in mW/(m·K)

Aus diesem Grund wurden weitere Untersuchungen an dickeren Mörtelschichten durchgeführt. Die Simulationsergebnisse der Variation der Lagerfugendicke von 1 mm auf 2 mm sind in Tabelle 17 und Abbildung 24 dargestellt. Die Untersuchung wurde für den Porenbeton mit der niedrigsten und der höchsten Wärmeleitfähigkeit durchgeführt. Die Unterschiede zwischen 1 mm Lagerfugendicke und 2 mm Lagerfugendicke sind deutlich. Der Anstieg der Wärmeleitfähigkeit bei 2 mm Lagerfuge ist etwa doppelt so hoch wie durch eine 1 mm dicke Mörtelfuge. Die bei der Messung der Halbsteine ohne und mit Mörtel gefundenen Anstiege der Wärmeleitfähigkeit von etwa 0,003 W/(m·K) können auch durch die numerische Simulation nachgestellt werden, falls die Lagerfugendicke 2 mm verwendet wird und die Wärmeleitfähigkeit des Mörtels zwischen 0,4 und 0,5 W/(m·K) liegt. Um die

Messergebnisse auch bei der 1 mm Mörtelfuge zu erreichen wäre eine Mörtel Wärmeleitfähigkeit von etwa 0,8 W/(m·K) notwendig (s.o.).

Tabelle 17: Ergebnisse der Berechnung für die Porenbeton-Probekörper mit unterschiedlichen Mörtelarten in zwei Lagerfugendicken

Mörtel Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]	Wärmeleitfähigkeit trocken λ_{10} [W/(m·K)]					
	AAC 0,08		AAC 0,09		AAC 0,12	
	DBM 1 mm	DBM 2 mm	DBM 1 mm	DBM 2 mm	DBM 1 mm	DBM 2 mm
0,24	0,0836	0,0842	-	-	0,1145	0,1150
0,40	0,0842	0,0855	-	-	0,1152	0,1163
1,0	0,0866	0,0901	-	-	0,1175	0,1209
-						

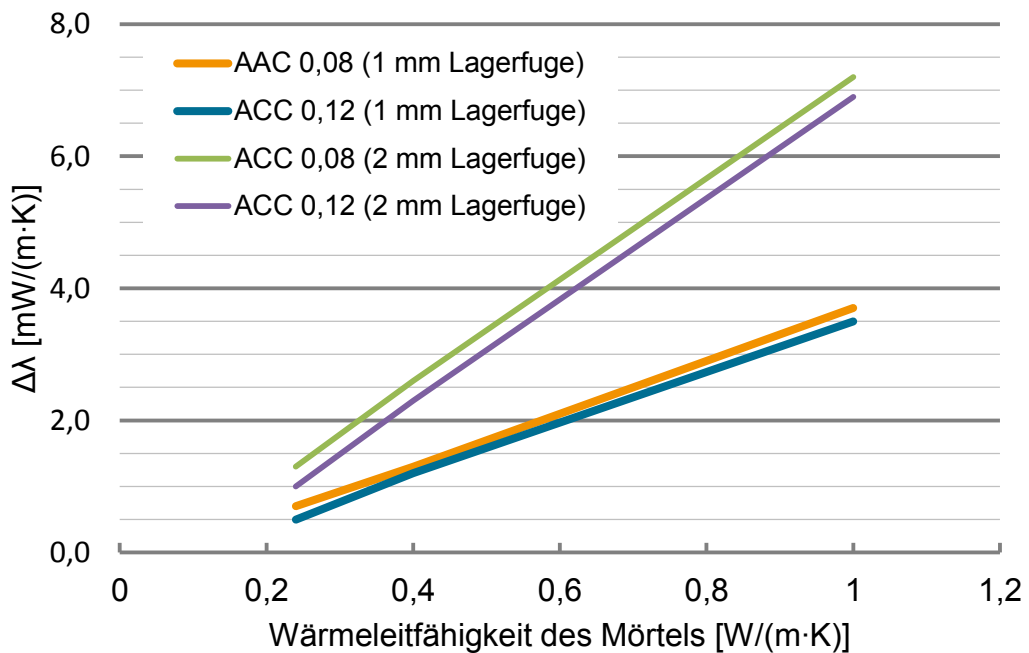


Abbildung 24: Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Mörtels und der Lagerfugendicke auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit einer Wand aus Porenbeton Planblöcken in mW/(m·K)

Ziegel

Die Ergebnisse der Berechnungen für die Ziegel-Probekörper im Vergleich mit den Messergebnissen der Halbsteine und den geometrischen Verfahren sind in Tabelle 18 dargestellt. Die Auswertung erfolgt hier für den Vergleich mit und ohne Mörtel (für den Standardmörtel DBM 027 in der Lagerfugendicke 1 mm bzw. LM 21 in der Lagerfugendicke 12 mm) d.h. es werden in jeder Zeile für jeden Stein die Spalten mit und ohne Mörtel miteinander verglichen. Der Vergleich der Messungen mit den Berechnungen ist in Tabelle 14 und der zugehörigen Auswertung beschrieben.

Das Ergebnis der numerischen Berechnung mit und ohne Mörtel passt beim VZ 0,07 sehr gut zum Ergebnis der Halbsteinmessung mit und ohne Mörtel (Abbildung 25). Die Halbsteinmessung des vermörtelten VZ 0,09 kann leider wie oben beschrieben nicht für die Auswertung herangezogen werden. Anders als beim Porenbeton liegen die mit dem vereinfachten Verfahren und der flächenanteiligen Mittelung berechneten Ergebnisse für alle drei Ziegel unter denen der genauen dreidimensionalen numerischen Berechnung. Hier wirkt sich die Querleitung in den Stegen in die Mörtelfugen deutlich aus.

Der Unterschied (mit vs. ohne Mörtel) zwischen den geometrischen Verfahren und der 3d- Berechnung beträgt zwischen 0,5 mW/(m·K) und 1,0 mW/(m·K). Beim HLZ 0,12 liegen die Ergebnisse des Mörtel einflusses deutlich über dem gemessenen Wert der Halbsteinmessung. Möglicherweise waren die Mörtelfugen der Halbsteinprobekörper etwas dünner als die in der Berechnung angesetzten 12 mm. Versehentlich wurden die Probekörper nach der Messung vernichtet, eine Kontrolle der Lagerfugendicke konnte daher nicht mehr erfolgen. Weiterhin könnte auch die Wärmeleitfähigkeit des Mörtels etwas niedriger als der in der Berechnung angesetzte Trockenwert gewesen sein. Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des Mörtels wurde in der Versuchsplanung nicht berücksichtigt. Nachdem für die Berichtserstellung die Diskrepanzen zwischen den gemessenen und den berechneten Werten auffielen, waren die Rückstellproben für den Mörtel gehärtet und nicht mehr verwendbar.

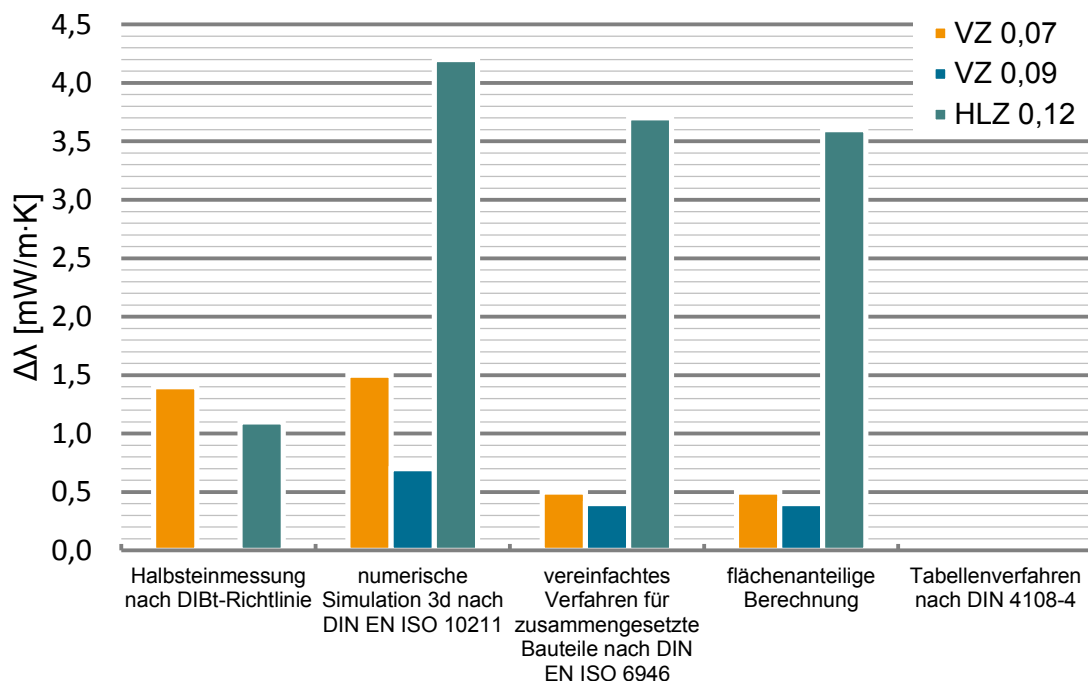


Abbildung 25: Einfluss des Mörtels auf die Wärmeleitfähigkeit der Ziegel im Vergleich der Messung und Berechnung – die Halbsteinmessung des VZ 0,09 ist fehlerhaft und wird nicht zur Auswertung herangezogen

Tabelle 18: Ergebnisse der Berechnung für die Ziegel-Probekörper im Vergleich mit den Messergebnissen der Halbsteine (Messunsicherheit der Halbsteinmessung siehe Tabelle 10).

Messung, Berechnung und Orientierung	Wärmeleitfähigkeit trocken $\lambda_{10,dry}$ [W/(m·K)]					
	VZ 0,07		VZ 0,09		HLZ 0,12	
	DBM 027 trocken ^{**} 1 mm	Ohne Mörtel	DBM 027 trocken ^{**} 1 mm	Ohne Mörtel	LM 21 trocken ^{**} 12 mm	Ohne Mörtel
Halbsteinmessung, senkrecht	0,0925	0,0911	0,1248	0,1125	0,1369	0,1358
Numerische Simulation 3d nach DIN EN ISO 10211	0,0793	0,0778	0,1058	0,1051	0,1187	0,1145
Vereinfachtes Verfahren nach DIN EN ISO 6946 ^{*)}	0,0783	0,0778	0,1055	0,1051	0,1182	0,1145
Flächenanteilige Mittelung der U- Werte der verschiedenen Bereiche ^{*)}	0,0783	0,0778	0,1055	0,1051	0,1181	0,1145
Umrechnungstabelle für Mauerwerk aus DIN 4108-4	k.A.	k.A.	0,11	0,11	0,12	0,12
*) Als Eingangswert für den ungestörten Bereich wird der dreidimensional nach DIN EN ISO 10211 am Ziegel (anisotroper Scherben ohne Mörtel) ermittelte Wert eingesetzt. **) Zum Vergleich mit den Messergebnissen erfolgt hier die Berechnung mit Trockenwerten für den Mörtel.						

Auch für die Ziegel wurde der Mörtel einfluss ausführlicher in numerischen Berechnungen untersucht. In Tabelle 19 und Abbildung 26 ist der Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des verwendeten Mörtels dargestellt. Der Einfluss ist für die drei untersuchten Ziegel für die Mörtel-Wärmeleitfähigkeiten von 0,21 (HLZ 0,12 ab 0,16) bis 1,0 W/(m·K) in der Lagerfugendicke 1 mm bzw. 12 mm annähernd linear. Wie vermutet ist der Wärmebrückeneinfluss des Mörtels im Vergleich der beiden Füllziegel VZ 0,07 und VZ 0,09 beim Ziegel mit der niedrigeren Wärmeleitfähigkeit größer. Deutlich wird, dass auch bei Verwendung von Dünnbettmörtel eine niedrige Wärmeleitfähigkeit des Mörtels anzustreben ist, um die Wärmebrückeneinflüsse der Lagerfuge zu minimieren. Zum Vergleich der Mörtel einflüsse ist auch der HLZ 0,12 mit der 12 mm Lagerfuge aufgetragen. Der Einfluss des Mörtels ist hier natürlich deutlich größer als bei der 1 mm Lagerfuge.

Tabelle 19: Ergebnisse der Berechnungen für die Ziegel mit unterschiedlichen Mörtelarten

Mörtel Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]	Wärmeleitfähigkeit trocken λ_{10} [W/(m·K)]					
	VZ 0,07		VZ 0,09		HLZ 0,12	
	DBM 1 mm	Ohne Mörtel	DBM 1 mm	Ohne Mörtel	LM 12 mm	Ohne Mörtel
0,27	0,0799	0,0778	0,1061	0,1051	-	0,1145
0,40	0,0811		0,1067			
1,0	0,0865		0,1096			
0,16	-		-		0,1172	
0,21	-		-		0,1197	
0,36	-		-		0,1255	
1,0	-		-		0,1530	
-	-					

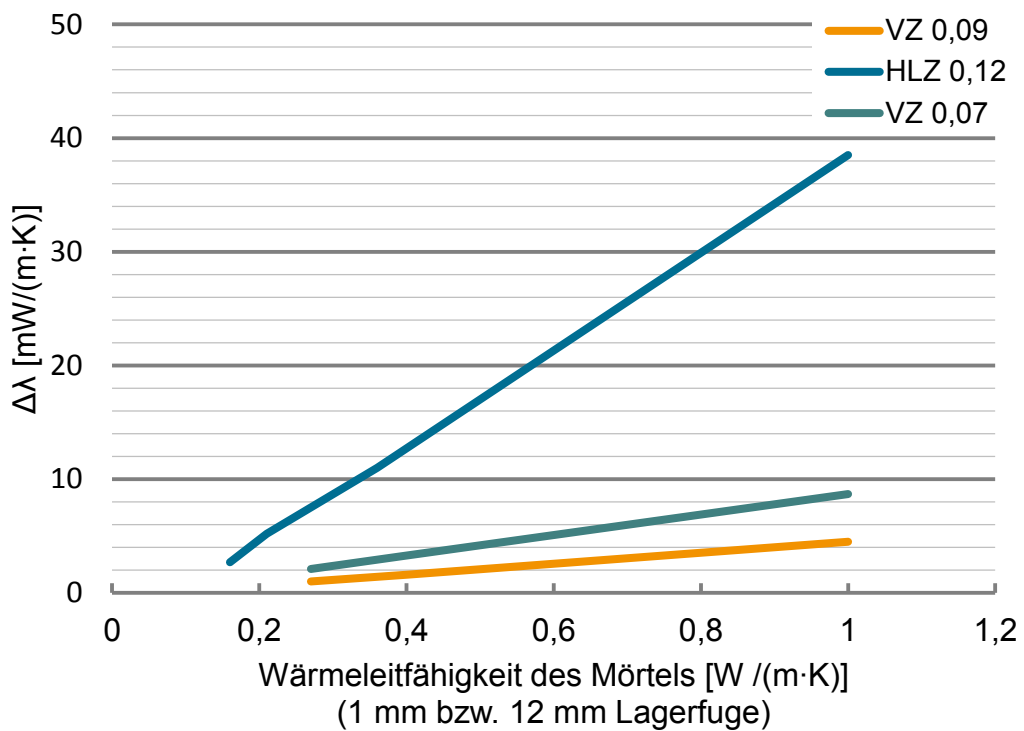


Abbildung 26: Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Mörtels (Mörtelsorte) auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit einer Wand aus Ziegeln in mW/(m·K)

Einfluss der Feuchte

Die Ergebnisse der Untersuchung des Feuchteinflusses auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks sind in Tabelle 20 für den Porenbeton und Tabelle 21 für die Ziegel dargestellt. Die exakte dreidimensionale numerische Berechnung erfolgte für den Porenbeton mit den für den Ausgleichsfeuchtegehalt

nach Lagerung im Klima 23°C/80%r.F. gemessenen Werten. Für die numerische Simulation der Ziegel im feuchten Zustand wurde der Feuchtekorrekturfaktor F_m wie im Kapitel zu den Eingangswerten dargestellt eingesetzt. Die Ermittlung erfolgte mit dem Feuchteumrechnungskoeffizient $f_\psi = 10$ und der am trockenen Scherben ermittelten Rohdichte für einen Ausgleichsfeuchtegehalt von 0,5 Masse-%. Dieser F_m -Wert wurde für die Längsstege und die Querstege gleichermaßen angesetzt.

Tabelle 20: Ergebnisse der Berechnungen für die Porenbeton-Planblöcke trocken und bei Ausgleichsfeuchte

Messung, Berechnung und Orientierung	Wärmeleitfähigkeit λ_{10} [W/(m·K)]		
	AAC 0,08	AAC 0,09	AAC 0,12
Numerische Simulation 3d nach DIN EN ISO 10211 – mit Griffhilfen trocken	0,0829	0,0889	0,1140
Numerische Simulation 3d nach DIN EN ISO 10211 – mit Griffhilfen bei Ausgleichsfeuchte nach Lagerung bei 23°C/80%r.F	0,0908	0,0951	0,1220

Tabelle 21: Ergebnisse der Berechnungen für die Ziegel trocken und bei Ausgleichsfeuchte

Messung, Berechnung und Orientierung	Wärmeleitfähigkeit λ_{10} [W/(m·K)]		
	VZ 0,07	VZ 0,09	HLZ 0,12
Numerische Simulation 3d nach DIN EN ISO 10211 – anisotrop und ohne Mörtel trocken	0,0778	0,1051	0,1145
Numerische Simulation 3d nach DIN EN ISO 10211 – anisotrop unter Berücksichtigung des F_m -Werts ^{*)} und ohne Mörtel	0,0804	0,1099	0,1181
<p>^{*)} Ansatz eines Feuchtekorrekturfaktors F_m für den Ziegelscherben von ca. 1,07. Der Feuchtekorrekturfaktor wird nach DIN EN ISO 10456 aus dem Feuchteumrechnungskoeffizient $f_\psi = 10$ und einem für Ziegelscherben üblichen massebezogenen Feuchtegehalt von $u_{m,80} = 0,5 \%$ bestimmt (Erfahrungswerte FIW München). Für die Umrechnung wird die Scherbenrohichte aus der Messung der Wärmeleitfähigkeit im trockenen Zustand verwendet. Es wird der gleiche F_m-Wert für die Längsstege und für die Querstege verwendet. Für zukünftige genauere Untersuchungen sollten die spezifischen Feuchtegehalte der einzelnen Scherben berücksichtigt werden.</p>			

Bei den Ziegeln wurde nur für den Ziegelscherben ein Feuchtezuschlag in der numerischen Berechnung angesetzt. Es ist davon auszugehen, dass der Anstieg der Wärmeleitfähigkeit für die Mineralwolle in den Kammern aufgrund des baupraktischen Feuchtegehalts vernachlässigbar ist.

Der Anstieg der Wärmeleitfähigkeit des Steinmaterials wirkt sich beim Porenbeton wie erwartet vollständig auf die Wärmeleitfähigkeit der Planblöcke aus (Abbildung 27). Der Anstieg beim Porenbeton ist mit 0,006 bis 0,008 W/(m·K) auch deutlich größer als bei den Ziegeln mit 0,0025 bis 0,005 W/(m·K). Der VZ 0,09 zeigt hier durch die im Vergleich mit den anderen beiden Ziegeln größeren Stegflächen (Lochbild ähnlich dem VZ 0,07, aber ca. 17 mm dicke Querstege beim VZ 0,09 gegenüber ca. 15 mm beim VZ 0,07) einen größeren Anstieg der Wärmeleitfähigkeit aufgrund der Ausgleichsfeuchte.

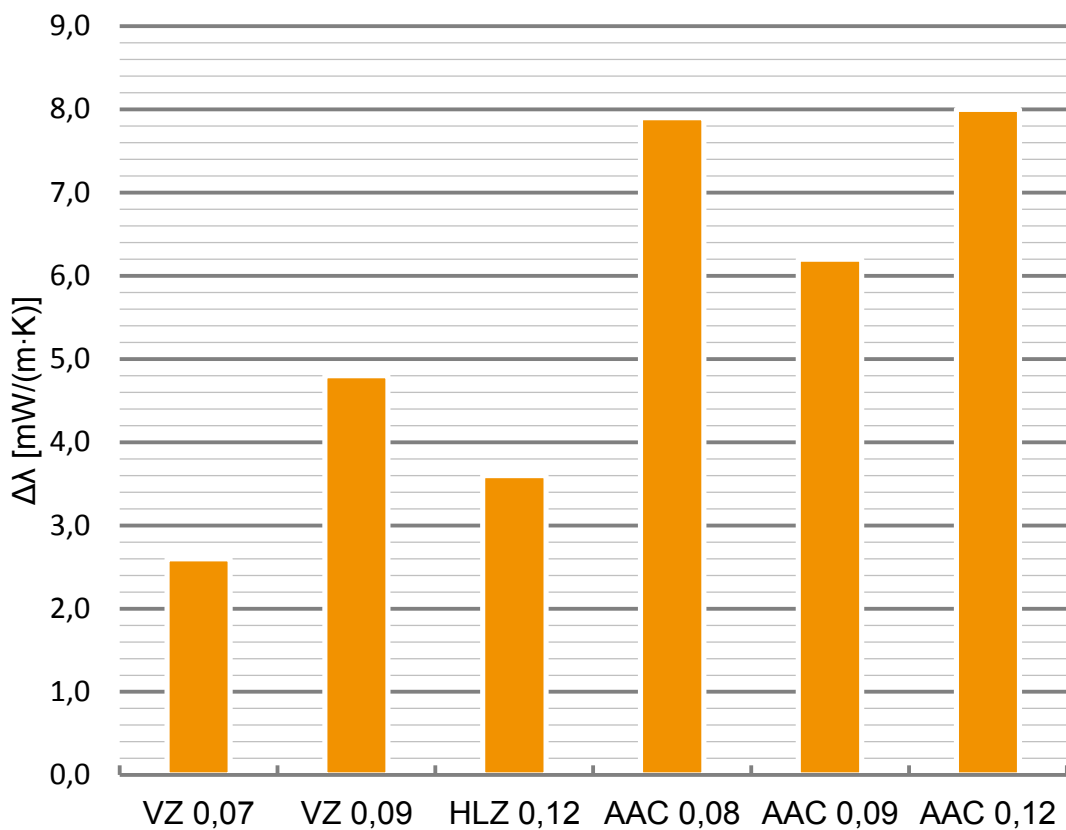


Abbildung 27: Erhöhung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit der Porenbeton Planblöcke mit Griffhilfen und der Ziegel aufgrund der Ausgleichsfeuchte des Steinmaterials in mW/(m·K)

Einfluss der Steinabmessungen

Untersucht wurde, ob die Steinabmessungen, d.h. die Wanddicke, beim Porenbeton zu einem unterschiedlichen Einfluss durch die Griffhilfen auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks führen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 22 und Abbildung 28 dargestellt. Die Darstellung der Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks in Prozent zeigt, dass mit zunehmender Wanddicke der prozentuale Einfluss der Griffhilfen sinkt, was bei Griffhilfen identischer Größen zu erwarten war. Der Einfluss einer Griffhilfe in jeder Stoßfuge liegt zwischen 0,7 % für die Wanddicke von 36,5 cm und etwa 1,2 % für die 30 cm Wanddicke beim AAC 0,08.

Tabelle 22: Ergebnisse der Berechnungen für die Porenbeton-Probekörper in zwei Wanddicken ohne Mörtel – mit und ohne Griffhilfen

Wanddicke [m]	Wärmeleitfähigkeit trocken λ_{10} [W/(m·K)]					
	AAC 0,08		AAC 0,09		AAC 0,12	
	Mit Griffhilfe	Ohne Griffhilfe	Mit Griffhilfe	Ohne Griffhilfe	Mit Griffhilfe	Ohne Griffhilfe
0,30	0,0831	0,0821 ^{*)}	-	-	0,1140	0,1130
0,365	0,0829		-		0,1138	

*) für Porenbeton-Planblöcke ohne Mörtel und Griffhilfen wird der Messwert für den Porenbeton aus dem Zweiplattenverfahren verwendet

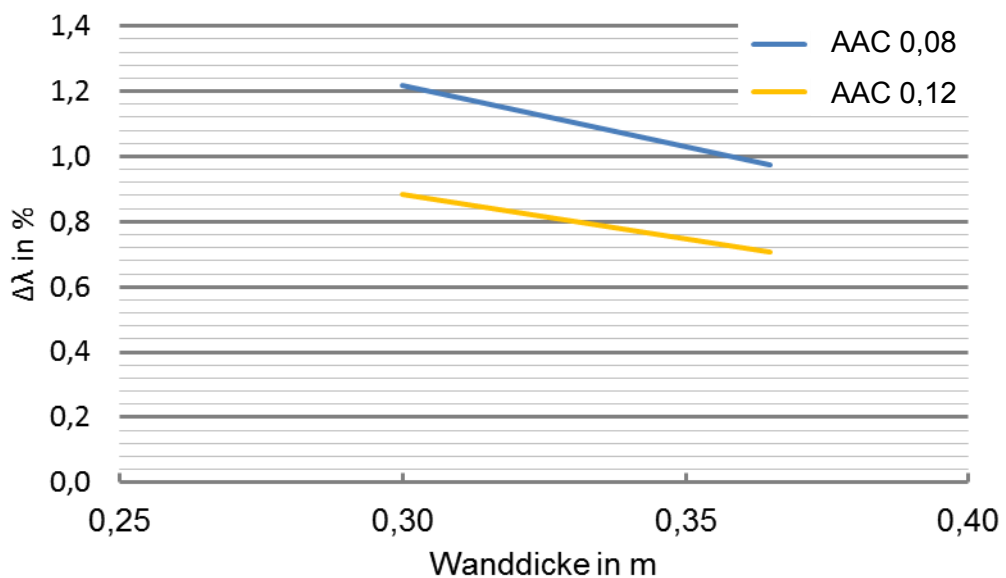


Abbildung 28: Einfluss der Griffhilfen auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit bei Wanddicken 0,30 und 0,365 m in %

Die Ergebnisse bei den Ziegeln für den Mörtel einfluss bei Wanddicken zwischen 30 cm, 36,5 cm und 49 cm zeigen einen gleichbleibenden Einfluss von 0,001 W/(m·K) für die 1 mm Lagerfuge beim VZ 0,09 (Tabelle 23). Der Mörtel einfluss ist somit für die untersuchten Steinbilder unabhängig von der Wanddicke.

Tabelle 23: Ergebnisse der Simulation für die Ziegel in zwei bzw. drei Wanddicken mit und ohne Mörtel

Wanddicke [m]	Wärmeleitfähigkeit trocken λ_{10} [W/(m·K)]					
	VZ 0,07		VZ 0,09		HLZ 0,12	
	DBM 027 1 mm	Ohne Mörtel	DBM 027 1 mm	Ohne Mörtel	LM 21 12 mm	Ohne Mörtel
0,30	-	-	0,1078	0,1068	-	-
0,365	-	-	0,1061	0,1051	-	-
0,49	-	-	0,1049	0,1039	-	-

Einfluss der Griffhilfen in Messung und Berechnung

In Tabelle 24 und Abbildung 29 wird der Einfluss der Griffhilfen in der Messung der Halbsteine mit der numerischen Simulation verglichen. Der Einfluss ist in der Messung deutlich größer als in der Simulation. Mögliche Gründe hierfür könnten fortschreitende Austrocknung der Probekörper in der Messung, bzw. Luftbewegungen in den Steinen bei der Messung mit den Griffhilfen sein. Möglicherweise sind auch die vereinfachten Berechnungsformeln in DIN EN ISO 6946 für Luftkammern mit ähnlich großen Abmessungen in allen Raumrichtungen nicht zutreffend.

Tabelle 24: Ergebnisse der Simulation für die Porenbeton-Probekörper in zwei Wanddicken ohne Mörtel – mit und ohne Griffhilfen

Messung, Berechnung, Mörtel eininsatz und Orientierung	Wärmeleitfähigkeit λ_{10} [W/(m·K)]					
	AAC 0,08		AAC 0,09		AAC 0,12	
	Mit Griffh.	Ohne Griffh.	Mit Griffh.	Ohne Griffh.	Mit Griffh.	Ohne Griffh.
Halbsteinmessung, ohne Griffhilfen senkrecht	0,0876	0,0836	0,0899	0,0870	0,1166	0,1132
3d-Simulation nach DIN EN ISO 10211 ohne Mörtel	0,0829	0,0821	0,0889	0,0879	0,1140	0,1130

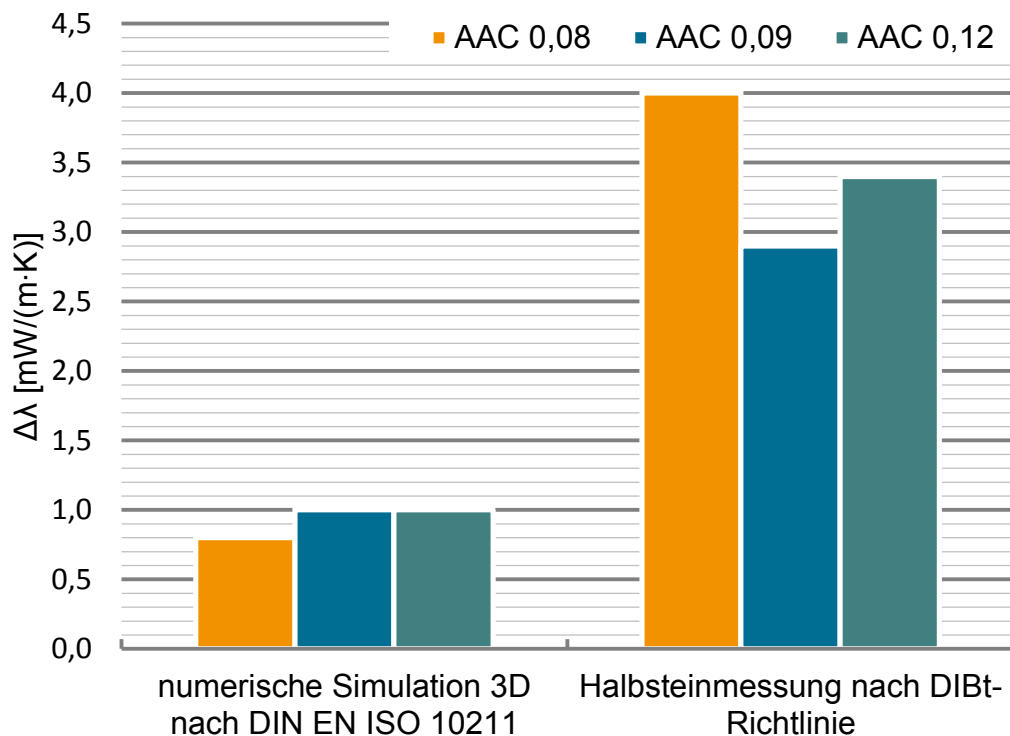


Abbildung 29: Änderung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit durch die Griffhilfen der Porenbeton-Planblöcke in mW/(m·K) - Vergleich der Halbsteinmessung und der numerischen Simulation

Einfluss der Anisotropie

Bei den Ziegeln wird in einem Vergleich der numerischen Simulationen ohne Mörtel der Einfluss der Anisotropie des Ziegelscherbens auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit des Steins untersucht. Zum Vergleich wird für die Spalten „isotrop“ in Tabelle 25 die Wärmeleitfähigkeit der Längsstege auch für die Querstege angesetzt. Durch diese isotrope Scherbenwärmeleitfähigkeit verringert sich die Wärmeleitfähigkeit der Ziegel (ohne Mörtel) um 6,6 % beim VZ 0,09; 7,5 % beim VZ 0,07 und 8,6 % beim HLZ 0,12. Abbildung 30 zeigt, dass dieser Unterschied nicht vernachlässigt werden sollte, da sonst die durch numerische Berechnung der Ziegel inklusive Mörtel, d.h. des Mauerwerks, ermittelten äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten auf der unsicheren Seite liegen können. Die in allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen angegebenen Werte, die über Berechnungen ermittelt wurden, liegen damit nicht auf der sicheren Seite.

Die Ergebnisse decken sich auch für die hier untersuchten hochwärmedämmenden Ziegel mit Füllung weitgehend mit den von König et al festgestellten Einflüssen der Anisotropie, vgl. [König et al 2000]. Die Anisotropie im Scherben selber liegt im Bereich der von A. Erker 1998 beschriebenen Größenordnung [Erker 1998], zeigt jedoch nicht die dort gefundenen Extremwerte von bis zu 87 % höherer Wärmeleitfähigkeit in Richtung der Querstege. Hier macht sich womöglich die

höhere Porosierung des Ziegelscherbens der Füllziegel und des HLZ 0,12 bemerkbar.

Tabelle 25: Ergebnisse der Simulation für die Ziegel ohne Mörtel – mit anisotropem und isotropem Ziegelscherben

Messung, Berechnung und Orientierung	Wärmeleitfähigkeit λ_{10} [W/(m·K)]					
	VZ 0,07		VZ 0,09		HLZ 0,12	
	An- isotrop	Isotrop	An- isotrop	Isotrop	An- isotrop	Isotrop
3d-Simulation nach DIN EN ISO 10211 ohne Mörtel	0,0778	0,0720	0,1051	0,0982	0,1145	0,1046
Abweichung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit durch isotrope Betrachtung	-7,5 %		-6,6 %		-8,6 %	

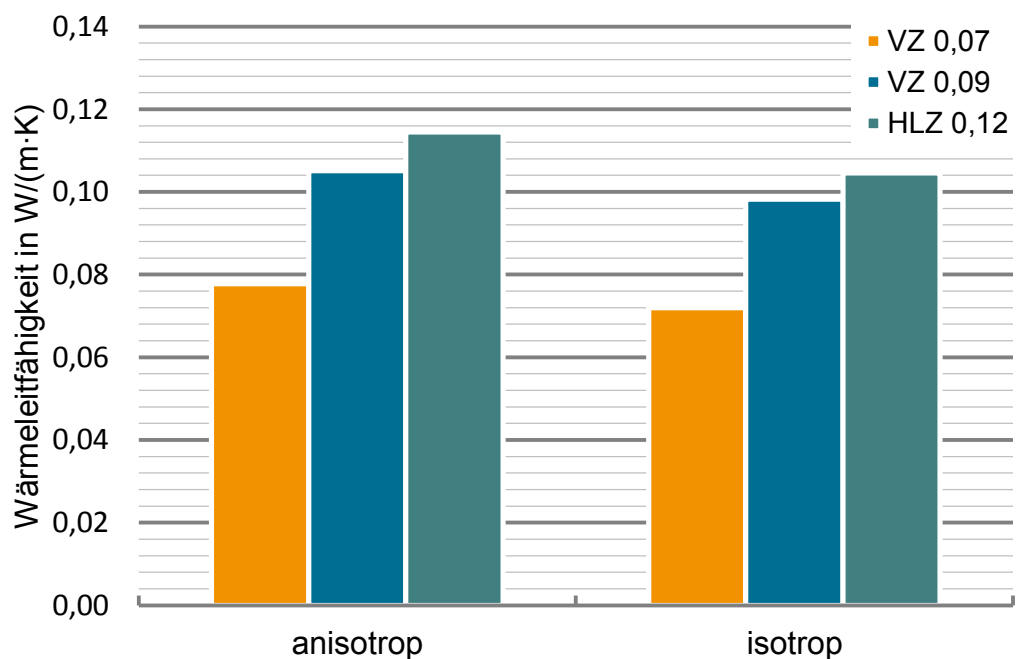


Abbildung 30: äquivalente Wärmeleitfähigkeit des Ziegelmauerwerks bei Ansatz anisotroper und isotroper Wärmeleitfähigkeitswerte für den Ziegelscherben

5 Beurteilung und Diskussion

5.1 Vergleich der Messungen und der Berechnungen

Die Wandmessungen aller Ziegel und des AAC 0,08 weisen deutlich höhere Werte auf, als bei der numerischen Simulation der Mauersteine mit den Eingangswerten aus der Messung des Materials zu erwarten gewesen wäre. Das trifft mit Einschränkungen auch auf die Halbsteinmessungen nach der DIBt-Richtlinie zu. Nachfolgend sind die möglichen Ursachen hierfür zusammengestellt.

Messungen an ganzen Wänden und an Wand-Probekörpern aus Halbsteinen bilden immer alle Imperfektionen der Steine, der eventuell enthaltenen Dämmstoffe und der Probenherstellung für die Messung ab. Inhomogenitäten in der Porengrößenverteilung des Porenbetons werden somit ebenso erfasst wie beispielsweise Abweichungen bei den Stegdicken der untersuchten Ziegel.

Die in den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen der Ziegel angegebenen Stegdicken und Steinabmessungen sind Mindestwerte für neue Mundstücke der Extruder in der Ziegelproduktion. Durch den Betrieb der Extruder nutzen sich auch die gehärteten Kerne der Mundstücke ab, was zu einer Verkleinerung der Kammern und damit zu einer Vergrößerung der Stege führt. Die Abnutzung ist nicht an allen Bereichen der Kerne gleich groß und kann bis zu 10 % in der Dicke der Kerne betragen bevor diese ausgetauscht werden müssen. Vergrößerungen der Stegdicken können in der Produktion durch Veränderungen der Scherbenrohichte in gewissen Grenzen kompensiert werden, so dass die Steinrohichte annähernd gleich bleibt. Es verändert sich durch die dickeren Stege jedoch die äquivalente Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks. Das könnte ein Grund sein, warum speziell bei den Ziegeln die Unterschiede zwischen den Messungen und den numerischen Berechnungen besonders groß sind.

Die Abnutzung der Mundstücke kann in der numerischen Berechnung auf einfache Art und Weise durch eine Erhöhung der Stegdicken berücksichtigt werden. Für Zulassungsuntersuchungen sollte ein sinnvoller Abnutzungsgrad und die damit verbundenen Stegdicken festgelegt werden.

Weitere Ungenauigkeiten aus der Probenherstellung lassen sich auch im Labor nicht ganz vermeiden. So kann es auch bei sorgfältigem Aufbau der Probekörper zu Mörtelbatzen in den Hohlräumen kommen – z.B. beim HLZ 0,12 oder in den Griffhilfen der Porenbeton-Planblöcke.

Das unvermeidliche Ausfüllen der angeschnittenen Poren beim Porenbeton mit Mörtel erhöht faktisch die Lagerfugendicke der Mauerwerksprobekörper. Bei der numerischen Simulation hingegen wird eine idealisierte Mörtelschicht in exakt der angestrebten Dicke betrachtet. Die Untersuchungen zur Lagerfugendicke beim

Mörteleinfluss zeigen die Effekte schon kleiner Abweichungen in der Dicke und Wärmeleitfähigkeit des Mörtels deutlich auf (Abbildung 22 bis Abbildung 24). Schon durch den Ansatz einer Lagerfugendicke von 2 mm und einer Mörtel-Wärmeleitfähigkeit von 0,4 bis 0,5 W/(m·K) anstelle eines wärmedämmenden Dünnbettmörtels von 0,24 W/(m·K) ergeben sich Erhöhungen der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks aus Porenbeton die mit denen aus der Halbsteinmessung vergleichbar sind.

Nicht auszuschließen ist ein nennenswerter Anteil an Restfeuchte in den Proben für die Wandmessung, da vor allem bei den Porenbeton-Wänden die Trocknung sehr langwierig war. Das kann damit erklärt werden, dass der Wasserfilm in den Kapillaren durch die erhöhte Luftgeschwindigkeit bei der Trocknung abreißt, was dazu führt, dass ein feuchter Kern im Mauerinneren verbleibt. Ein Ausgleich der Feuchte innerhalb der Prüfkörper erfolgt nur zögerlich. Die übliche Trocknung bei erhöhter Lufttemperatur erwies sich hier als nicht ausreichend. Bessere Ergebnisse und eine Beschleunigung konnte durch einseitig aufgebrachte Heizmatten erreicht werden. Die Trocknung mit den zusätzlichen Heizmatten fand in Trockenkammern statt, aber auf der den Heizmatten abgewandten Seite der Probekörper wurde zur Sicherstellung eines Temperaturgradienten eine etwas niedrigere Trocknungstemperatur wie bei der freien Trocknung mit Belüftung gewählt, was im Vergleich zu den Probenplatten für die Messung im Wärmeleitfähigkeits-Plattengerät auf einen höheren Restfeuchtegehalt des Materials schließen lässt.

Ein weiterer Unterschied zwischen Messung und Berechnung findet sich in der Luftdichtheit der Stoßfugen. Bei der Berechnung wird hier von abgeschlossenen Luftkammern im Bereich der Nut- und Feder-Ausbildungen ausgegangen. In der Messung kann es jedoch aufgrund der zulässigen Abweichungen von der Rechtwinkligkeit der Steine mitunter zu nennenswerten Spalten zwischen zwei Steinen kommen. In diesen Bereichen kommt es über die Spalte dann zu einer direkten Verbindung zwischen der warmen und kalten Seite der Wand. Auch in engen Spalten ist hier Konvektion nicht vollständig auszuschließen, auch wenn die gängigen Vereinfachungsformeln z.B. in DIN EN ISO 6946 hier die Konvektion bei Spaltbreiten von weniger als 5 mm vernachlässigen.

Nachfolgend wird am Beispiel des AAC 0,09 der kumulierte Einfluss aus den Griffhilfen und dem Mörtel mit dem Ergebnis der Wandmessung verglichen. Hier zeigt sich, dass mittels Messung der Wärmeleitfähigkeit am Steinmaterial und nachfolgender Berücksichtigung der Griffhilfen und des Mörtels mit der Wandmessung vergleichbare Werte erhalten werden können.

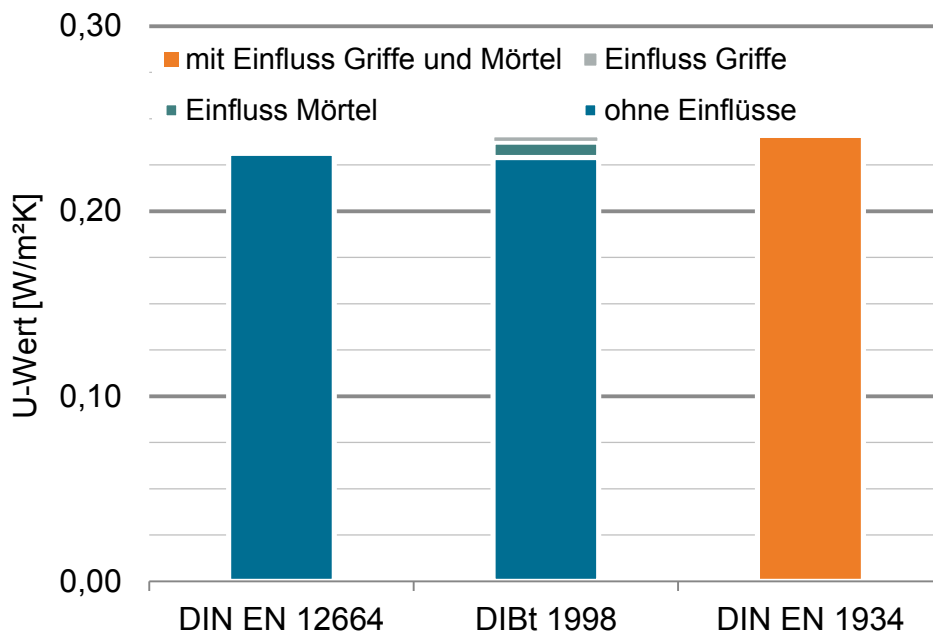


Abbildung 31: Wärmeleitfähigkeiten der Probe AAC0,09 – Methodenvergleich

Der Vergleich der Ergebnisse aus Methoden der Halbsteinmessung nach DIBt 1998 und nach DIN EN 1934 zeigt relativ gute Übereinstimmung der berechneten U-Werte der Mauern. Die untere Abbildung zeigt die Änderungen der U-Werte ganzer Wände durch die gemessenen Wärmeleitfähigkeiten als grafische Gegenüberstellung der Verfahren. Als Null-Prozent Niveau wurde die Wärmeleitfähigkeit der Halbsteinproben ohne Störeinflüsse durch Mörtelfugen und Griffhilfen festgelegt.

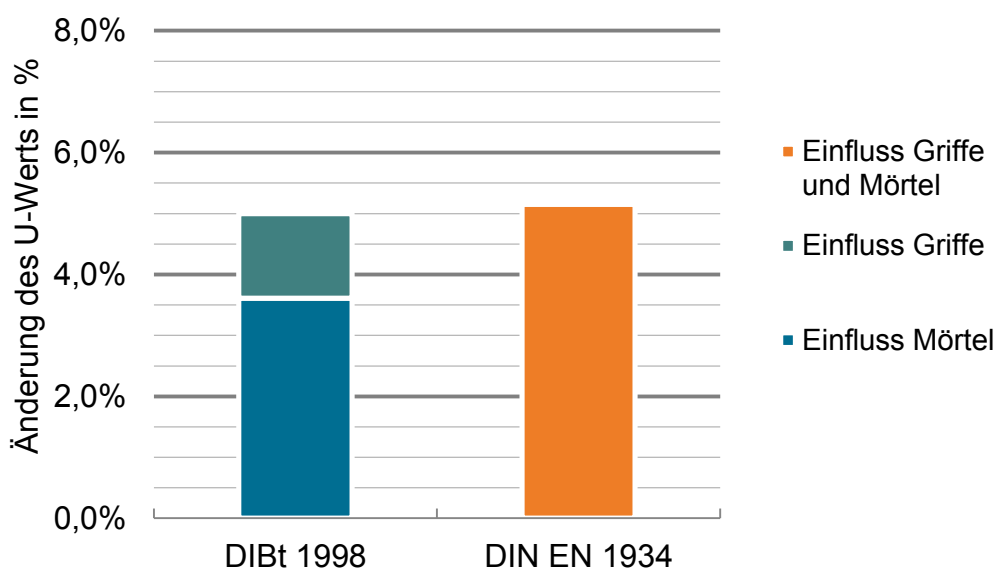


Abbildung 32: Änderungen des U-Werts von Wänden aus AAC 0,09 – Methodenvergleich

5.2 Einfluss des Mörtels

Der Einfluss des Mörtels im Vergleich der Messungen an den Halbsteynen und den Berechnungen mittels 3D-FE-Methode, vereinfachtem Verfahren und flächenanteiliger Mittelung auf den U-Wert sind in Abbildung 33 dargestellt. Mögliche Gründe für den großen Einfluss des Mörtels in der Messung sind im vorangehenden Abschnitt beschrieben. Deutlich wird, dass der Mörtel einfluss auf den U-Wert der Wände keinesfalls vernachlässigbar ist. Schon Lagerfugendicken von 2 mm mit wärmedämmendem Dünnbettkleber (z.B. $\lambda = 0,4 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) führen bereits zu Anstiegen des U-Werts des Mauerwerks von etwa 3 % (Abbildung 34). Auch die Gleichstellung des Mauerwerks mit LM 21 gegenüber den Steinen alleine in Tabelle A.2 in DIN 4108-4 kann so nicht bestätigt werden, da die Erhöhung beim HLZ 0,12 durch die Berücksichtigung des Mörtels in der numerischen Simulation etwa 3,5 % und durch die geometrischen Berechnungen etwa 3 % beträgt. Hier führt schon der Leichtmörtel mit einem Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit von 0,21 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ zu einer Erhöhung des U-Werts die auch schon für den Mörtel alleine über dem Bagatellkriterium von 3 % der DIN EN ISO 6946 liegt.

Dem gegenüber muss man die rechnerische Unsicherheit bei der Messung stellen, die in allen Fällen etwa in der gleichen Größenordnung wie die Einflüsse des Mörtels oder der Griffhilfen liegt.

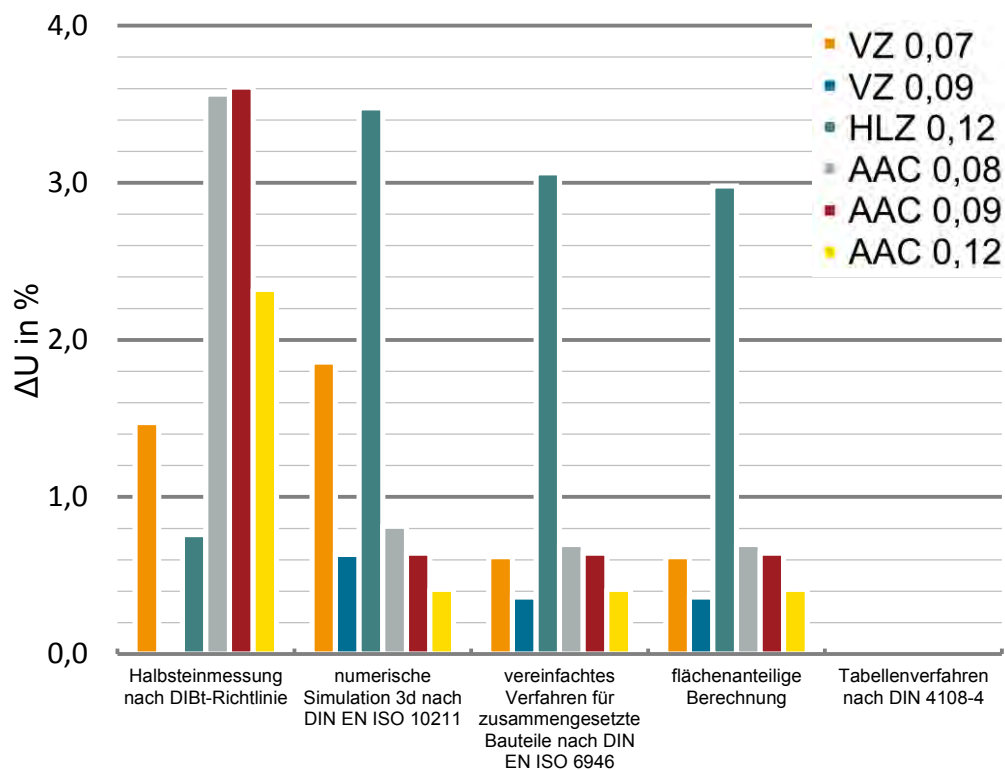


Abbildung 33: Mörtel einfluss auf den U-Wert in Halbsteinmessungen und Berechnungen im Vergleich in Prozent Erhöhung des U-Werts für ein Mauerwerk aus Steinen ohne Mörtel

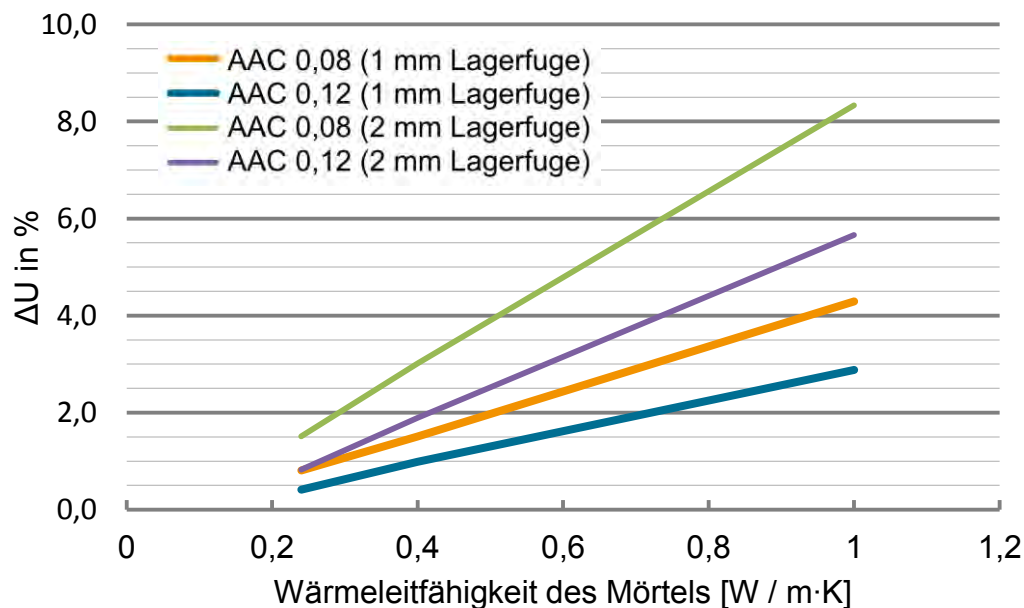


Abbildung 34: Erhöhung der U-Werte beim Porenbeton durch Berücksichtigung des Mörtels für verschiedene Wärmeleitfähigkeiten und Lagerfugendicken von 1 mm und 2 mm

5.3 Einfluss des Ausgleichsfeuchtegehaltes

Die Ergebnisse der Untersuchung des Feuchteinflusses auf den U-Wert des Mauerwerks sind in Abbildung 35 dargestellt. Die dreidimensionale numerische Berechnung erfolgte für den Porenbeton mit den für den Ausgleichsfeuchtegehalt nach Lagerung im Klima 23°C/80%r.F. gemessenen Werten. Für die numerische Simulation der Ziegel im feuchten Zustand wurde der Feuchtekorrekturfaktor F_m wie im Kapitel zu den Eingangswerten dargestellt eingesetzt. Bei den Ziegeln wurde nur für den Ziegelscherben ein Feuchtezuschlag in der numerischen Simulation angesetzt. Es ist davon auszugehen, dass der Anstieg der Wärmeleitfähigkeit für die Mineralwolle in den Kammern aufgrund des baupraktischen Feuchtegehaltes vernachlässigbar ist.

Der Anstieg der Wärmeleitfähigkeit des Steinmaterials wirkt sich beim Porenbeton wie erwartet vollständig auf den U-Wert aus (Abbildung 27 und Abbildung 35). Der Anstieg beim Porenbeton ist 6,5 % bis 9 % auch deutlich größer als bei den Ziegeln mit 3 % bis etwa 4 %. Der VZ 0,09 zeigt hier durch die im Vergleich mit den anderen beiden Ziegeln größeren Stegflächen einen größeren Anstieg beim U-Wert durch die Ausgleichsfeuchte. Im Rahmen der Festlegung der Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit für Mauerwerk für die Anwendung in Deutschland wird der Anstieg der Wärmeleitfähigkeit bzw. des U-Wertes mittels Feuchtekorrekturfaktoren berücksichtigt.

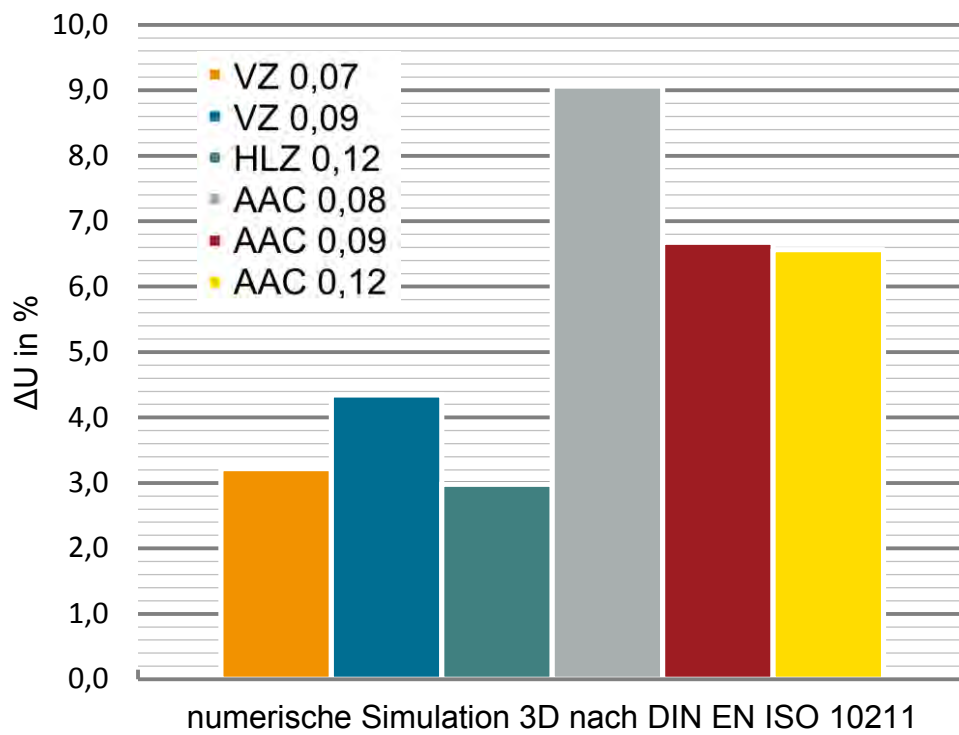


Abbildung 35: Einfluss der Ausgleichsfeuchte auf den U-Wert des Mauerwerks

5.4 Einfluss der Steinbreiten bei Mörtel und Griffhilfen

Der Einfluss der Steinbreiten (Wanddicke) wurde für Dünnbettmörtel DBM 027 in der Lagerfugendicke 1 mm beim VZ 0,09 Ziegel untersucht. Der Mörtel einfluss liegt etwas unter 1 % für den betrachteten Dickenbereich von 30 cm; 36,5 cm und 49 cm. Die Wärmebrückenwirkung steigt mit niedrigerem U-Wert etwas an, wie es für Wärmebrücken in hochwärmegeprägten Konstruktionen zu erwarten ist. Absolut gesehen sinkt der Einfluss des Mörtels, d.h. ΔU in $W/(m^2 \cdot K)$ wird kleiner. Der Unterschied für die untersuchten Steinbilder 30er 10 DF; 36,5er 12 DF und 49er 16 DF ist vernachlässigbar. Das Ergebnis ist für die anderen Steintypen ähnlich zu erwarten.

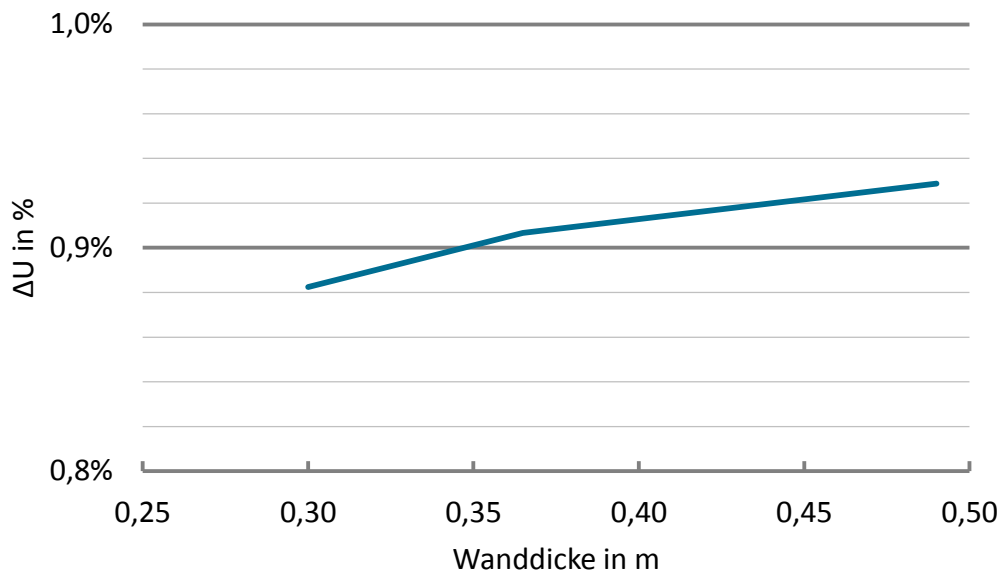


Abbildung 36: Einfluss der Steinbreite (Wanddicke) beim VZ 0,09 mit Dünnbettmörtel DBM 027 auf den U-Wert der Wand

Für den Porenbeton wurde der Einfluss der Griffhilfen in zwei Steinbreiten (Wanddicken) untersucht. Der Einfluss auf den U-Wert der Wand wird mit zunehmender Wanddicke kleiner, was vor allem durch die feste Größe der Griffhilfen bedingt ist. Beim 30er und beim 36,5er Porenbeton ist gleichermaßen jeweils eine Griffhilfe in der Stoßfuge angeordnet. Das Volumen der Hohlräume ist bei beiden Steinen gleich, weswegen der Einfluss bei der dickeren Wand geringer ist. In Abbildung 37 ist der Einfluss der Griffhilfen für den PP 2 035 und den AAC 0,12 dargestellt.

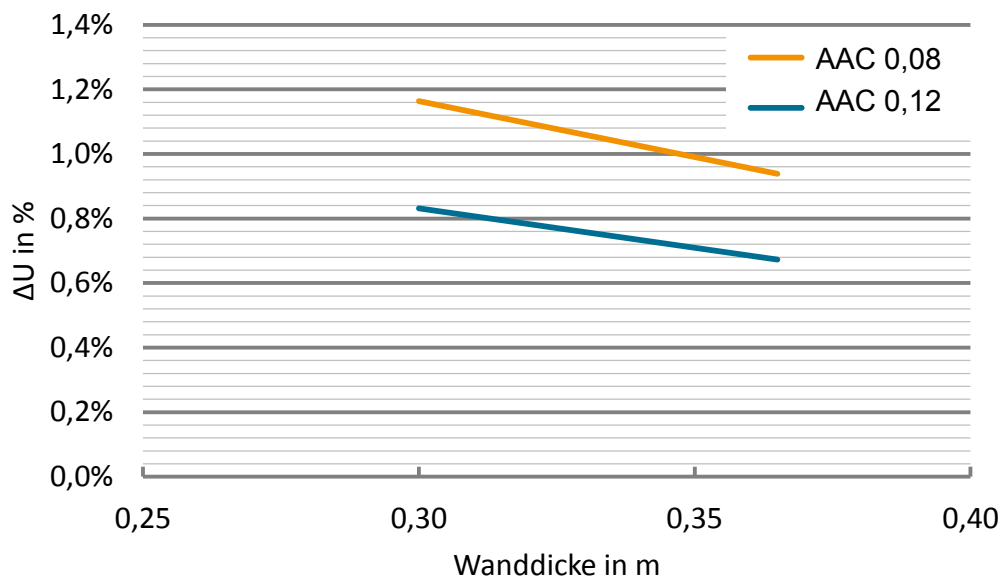


Abbildung 37: Einfluss der Griffhilfen abhängig von der Steinbreite (Wanddicke) bei Porenbeton

5.5 Einfluss der Anisotropie

Für die Ziegel wurde der Einfluss der Anisotropie des Scherbens untersucht. Die Veränderungen durch die Nicht-Berücksichtigung der Anisotropie sind in Abbildung 38 dargestellt.

Genauere Aussagen zur Frage, ob bei Festlegungen der Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit für Ziegel durch numerischen Simulationen die Anisotropie des Scherbens berücksichtigt werden muss, setzen weitere Untersuchungen voraus. Für die Berücksichtigung der Anisotropie ist jedoch eine hinreichend genaue Messung der Scherben-Wärmeleitfähigkeit in Wärmestromrichtung der Längs- und Quersteigscherben erforderlich. Hierbei muss die Probenpräparation für die oft dünnen Querstege sehr sorgfältig erfolgen und auch die Messung im Plattengerät erfordert viel Erfahrung. Ob andere Messverfahren (z.B. Heizstreifenmethode wie in [König et al 2000] beschrieben) hier zuverlässige Ergebnisse liefern sollte in Anschlussprojekten untersucht werden. Bei der Festlegung der Bemessungswerte aus Wandmessungen ist die Anisotropie bereits in den Messergebnissen enthalten.

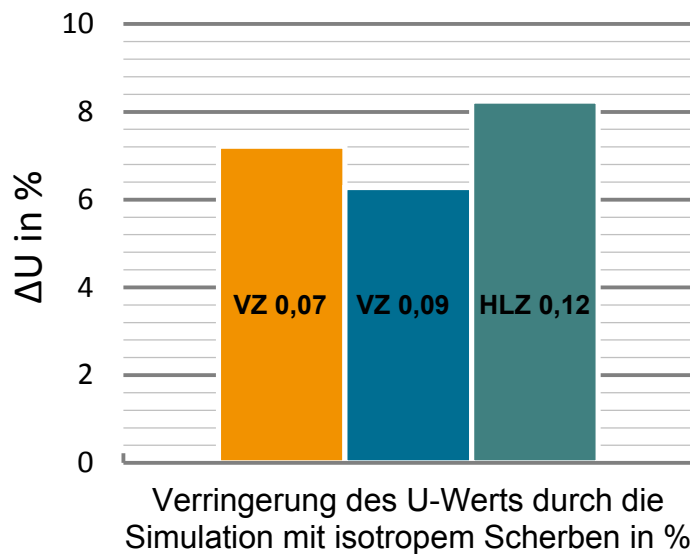


Abbildung 38: Einfluss der Nicht-Berücksichtigung der Anisotropie des Ziegelscherbens beim U-Wert der betrachteten Ziegel in Prozent (ohne Mörtel)

5.6 3 % Kriterium beim U-Wert aus DIN EN ISO 6946

Zu untersuchen war, ob sich eventuell „Schwellen-U-Werte“ für die Berücksichtigung bzw. Vernachlässigung der Beeinträchtigung des Wärmedurchgangs durch die einzelnen Einflüsse festlegen lassen. Im Sinne der DIN EN ISO 6946 gilt das 3 % Kriterium für die Summe der Einflüsse, d.h. es sind die Einflüsse danach zu bewerten, ob sie zusammengenommen die 3 % Erhöhungsregel aus DIN EN ISO 6946 überschreiten: „Der Wärmedurchgangskoeffizient ist gegebenenfalls [...] zu korrigieren. Ist jedoch die Gesamtkorrektur geringer als 3 % von U, braucht keine Korrektur vorgenommen zu werden.“ (Quelle: DIN EN ISO 6946:2008-04 S.16)

Der Abschnitt verweist auf Korrekturmethode für Einflüsse durch Luftspalte im Bauteil, durch mechanische Befestigungselemente und im speziellen auf Niederschlag auf Umkehrdächern. Mittlerweile wird die Norm jedoch sinngemäß auf andere Bereiche, wie z.B. Griffhilfen bei Porenbeton und auch auf Mörtelschichten im Mauerwerk angewendet. Wie die vorliegenden Untersuchungen deutlich zeigen, wird das 3 % Kriterium bereits durch einzelne Einflussfaktoren deutlich überschritten. Beispielsweise führt bereits eine Mörtel-Wärmeleitfähigkeit von 0,40 W/(m·K) bei einer Lagerfugendicke von 2 mm zu einem Anstieg des U-Werts von etwa 3 %. Werden für die Erteilung der bauaufsichtlichen Zulassungen numerische Berechnungen durchgeführt oder Wandmessungen gemacht, dann ist der Einfluss der Mörtelschicht i.d.R. bereits in der ermittelten äquivalenten Wärmeleitfähigkeit für das Mauerwerk enthalten.

Zusammen mit dem Einfluss aufgrund der beim Porenbeton vorhandenen Griffhilfen ist das Kriterium bereits deutlich überschritten. In Abbildung 39 sind die Änderungen beim U-Wert durch einen beliebigen Störeinfluss der Größe 0,002 bzw. 0,004

$W/(m \cdot K)$ über dem U-Wert der ungestörten Wand aufgetragen. Die eingetragenen Kurven für die Wärmeleitfähigkeit der Steine bilden Steinbreiten (Wanddicken) von 0,30 bis 0,49 m ab.

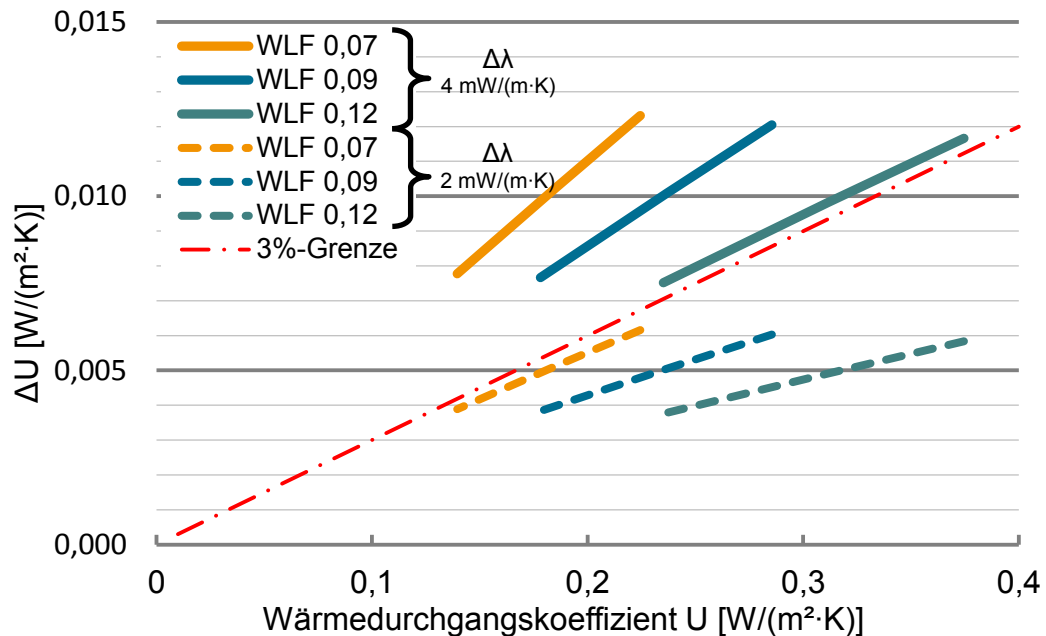


Abbildung 39: Änderung des U-Wertes aufgrund eines Störeinflusses von 0,002 bzw. 0,004 W/(m·K) über dem U-Wert der ungestörten Wand - mit Darstellung des 3-% Kriteriums

Die nachfolgenden Diagramme zeigen den Einfluss der Änderung der Wärmeleitfähigkeit über der Wanddicke für die Stein-Wärmeleitfähigkeiten 0,07 W/(m·K); 0,09 W/(m·K) und 0,12 W/(m·K). Das 3-% Kriterium aus DIN EN ISO 6946 ist als gestrichelte rote Linie eingezeichnet. Werte oberhalb der gestrichelten roten Linie führen zu Änderungen im U-Wert von mehr als 3 % gegenüber der Betrachtung ohne Störeinfluss. Um auf einfache Art zu untersuchen, ob ein gefundener Einfluss (z.B. Griffhilfen) auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit zu einer Berücksichtigung im U-Wert führen muss, muss das zur Wärmeleitfähigkeit der Steine passende Diagramm (Abbildung 40; Abbildung 41; Abbildung 42) gewählt werden. Die Ablesung erfolgt dann mit der Änderung der Wärmeleitfähigkeit aufgrund des Störeinflusses über der geplanten Wanddicke. Werte zwischen den Diagrammwerten dürfen interpoliert werden.

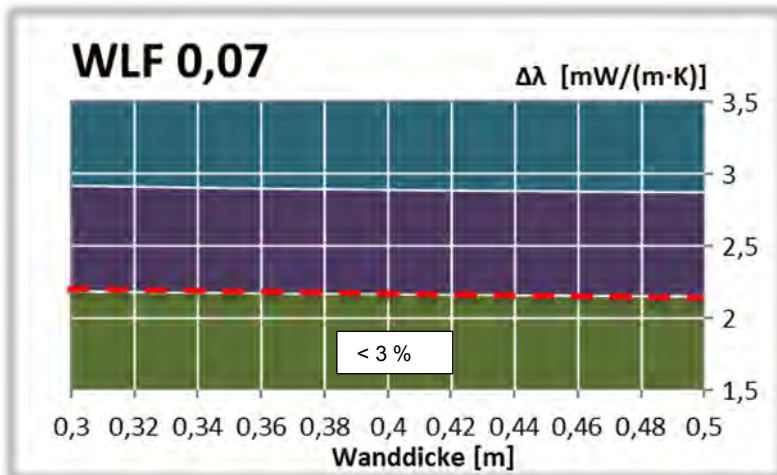


Abbildung 40: 3-% Kriterium für Stein-Wärmeleitfähigkeit 0,07 W/(m·K)

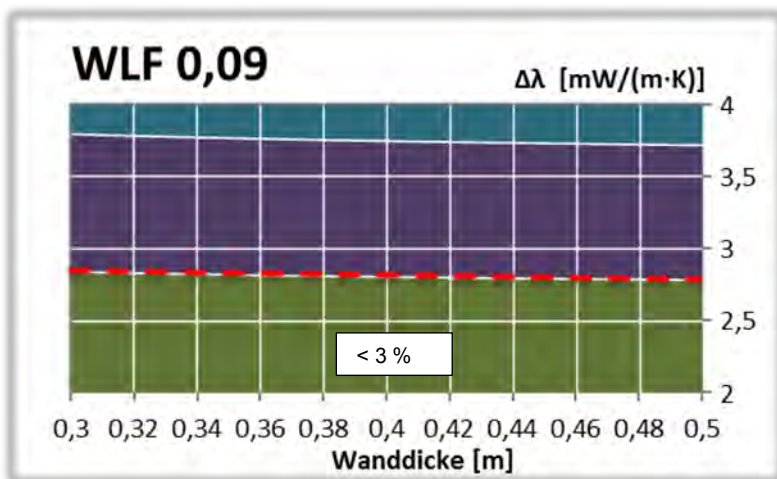


Abbildung 41: 3-% Kriterium für Stein-Wärmeleitfähigkeit 0,09 W/(m·K)

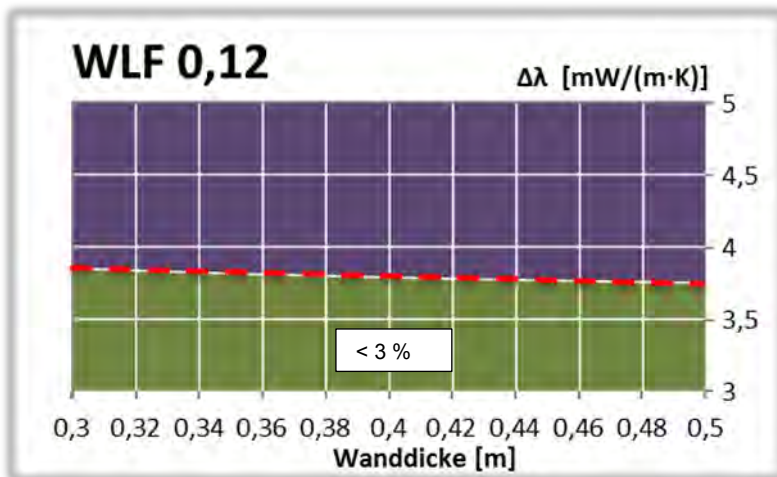


Abbildung 42: 3-% Kriterium für Stein-Wärmeleitfähigkeit 0,12 W/(m·K)

5.7 Gegenüberstellung der genormten Verfahren

Es sollte sauber zwischen Wärmeleitfähigkeitswerten mit unterschiedlichem Bezug getrennt werden. Dafür müssen die Indizes der verwendeten Formelzeichen normübergreifend einheitlich sein, um Verwechslungen und Unklarheiten zu vermeiden. Dieses sollte sich auch auf der Etikettierung wiederfinden, die sauber, nachvollziehbar und auch unter Baustellenbedingungen lesbar sein muss.

Die deklarierten statistischen Werte für Mauerwerksprodukte z.B. $\lambda_{90/90}$ oder $\lambda_{50/90}$ entsprechen nicht statistisch gesicherten Werten der Wärmeleitfähigkeit im Vertrauensintervall von 90 % mit einer Wahrscheinlichkeit von 90%, wie es z.B. im Sinne der DIN EN ISO 10456 wäre oder auch z.B. in den Produktnormen der Hochbau-Dämmstoffe angegeben ist. Die statistische Angabe bezieht sich lediglich auf die Bandbreite der Rohdichteklasse die frei gewählt werden kann. Zur Absicherung der Angaben muss deshalb ein anderer Ansatz (beispielsweise das in Deutschland bekannte Grenzwertkonzept) gewählt werden, bei dem - wie bei der über lange Jahre gewohnten Extrapolation auf die obere Grenze der Rohdichteklasse – die Werte der Wärmeleitfähigkeit für den ungünstigsten Fall angegeben werden.

Damit kann auch überprüft werden, ob die Steine oder Mauerwerksmaterialien die als Grenze angegebene Rohdichteklasse einhalten. Zudem ist hier der Begriff 100 % der Produktion fragwürdig gewählt – gemeint ist hier die „obere Grenze der selbst deklarierten Rohdichtespanne“. Dasselbe gilt für den „Mittelwert der Produktion“ – es ist der Mittelwert der für die Deklaration selbst gewählten Rohdichtespanne. Weiterhin legt DIN EN 1745 nicht fest ob die Steigung der Kurven für den 90 % - Wert oder den 50 % - Wert zu verwenden sind.

[Aktualisierung Juli 2015: Nach der Erstellung des Schlusssentwurfs dieses Forschungsberichts sind einige Produktnormen für Mauerwerk in neuen Ausgaben erschienen, die einige der hier festgestellten Ungenauigkeiten beseitigen; z.B. wird jetzt in den Produktnormen festgelegt, dass der 50 %-Wert deklariert werden sollte, was zur Folge hat, dass dann natürlich auch die entsprechende Steigung der Kurve für den 50 %-Wert aus DIN EN 1745 zu verwenden ist. Die beschriebene Unbestimmtheit, welche Kurve mit welcher Steigung zu verwenden ist, wurde damit behoben.]

Auf der Basis der folgenden Überlegungen sollte die Umrechnung nach Tabelle A.2 überarbeitet werden. Wenn die äquivalente Wärmeleitfähigkeit eines Steines ohne Mörtel $0,113 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ beträgt, dann wird das Mauerwerk mit LM21 in 12 mm Lagerfugendicke entgegen der Angaben der Tabelle nicht mehr $0,11 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ einhalten. Wie die vorliegende Untersuchung zeigt, steigt auch die äquivalente Wärmeleitfähigkeit von Mauersteinen die mit Dünnbettmörtel vermörtelt werden deutlich an. Da die Tabelle beim Dünnbettmörtel auch die Lagerfugendicke 2 mm

abdecken soll (Steinhöhe 248 mm), müssen auch die Werte für die Dünnbettmörtelfuge angepasst werden.

Andererseits werden mit den breiten Klassen Steine schlechter gestellt, die z.B. weit unter den Werten für die nächsthöhere Klasse von DIN 4108-4 liegen. So wäre z.B. nur eine Höherstufung für die diejenigen Steine notwendig, die mit Mörtel einfluss die Rundungsgrenze überschreiten.

Der folgende Entwurf wurde mit dem vereinfachten Verfahren aus DIN EN ISO 6946 berechnet und gibt Umrechnungswerte für das Mauerwerk an, die auf der sicheren Seite liegen (Tabelle 26).

Tabelle 26: Entwurf für eine Umrechnungstabelle für die Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit für die verschiedenen Mörtelsorten

Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit in W/(m·K)^{a)}				
Steinprodukte (ohne Mörtel)	Mauerwerk mit Mörtel ohne Stoßfugenvermörtelung			
	$\lambda_{design,mas,100\%}$			
$\lambda_{design,unit,100\%}$	LM 21	LM 36	NM	DBM
0,08	b)	b)	b)	b)
0,09	b)	b)	b)	b)
0,10	0,11	0,12	0,16	0,11
0,11	0,12	0,13	0,17	0,12
0,12	0,13	0,14	0,18	0,13
0,13	0,14	0,14	0,19	0,14
0,14	0,15	0,15	0,19	0,15
0,15	0,16	0,16	0,20	0,16
0,16	0,17	0,17	0,21	0,17
0,18	0,19	0,19	0,23	0,19

a) Diese Tabelle gilt für die Steinhöhen ≥ 238 mm (Dickbettmörtel) und ≥ 248 mm (Dünnbettmörtel) und für die Steinlänge 250 mm.
 b) im Einzelfall nachzuweisen

5.8 Empfehlungen zur Harmonisierung

Die Bemessungsnormen DIN 4108-4 und DIN EN 1745 wurden bereits in früheren Untersuchungen verglichen und auf Übereinstimmung geprüft (vgl. [Anton 2006a]). In Anlehnung daran werden die vorliegenden Ergebnisse interpretiert. Aus den Untersuchungen ergeben sich Vorschläge zur Umsetzung der Ergebnisse in bauaufsichtlichen Regelwerken und in der Normung.

Schlussfolgerungen bezüglich der DIN 4108-4

Anhang A

Um Verwechslungen vorzubeugen werden eindeutige Indizes für die Bezeichnung der Wärmeleitfähigkeitswerte vorgeschlagen. Für ganze Steine sollte *unit* verwendet

werden, für Wände mit Mörtel *mas*, für das Steinmaterial *mat* und für den Mörtel *mor*. Die Bezeichnungen wären dann konsistent mit DIN EN 1745:2012-07.

Das in DIN 4108-4 Anhang A.2 für Mauersteine dargestellte Verfahren ist aus DIN EN 1745 übernommen. Bild A.1 sollte sich eindeutig auf Steine beziehen, wie es auch aus dem Text in Abschnitt A.2 hervorgeht. Die Verwendung des grafischen Verfahrens für Mauerwerk mit Mörtel ist nicht abgedeckt.

Die Bezeichnungen $\lambda_{90/90}$ und $\lambda_{50/90}$ sind in diesem Fall falsch (s.o.), da es sich um eine Spanne der Rohdichte in der selbst gewählten Rohdichteklasse handelt und nicht um statistisch abgesicherte Werte einer Messreihe von Lambda-Werten die mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit in Untersuchungen ermittelt wurde, wie es im Sinne der DIN EN ISO 10456 ist. Die Bezeichnung sollte so gewählt werden, dass die fragwürdigen Begriffe vermieden werden. Beispielsweise könnte $\lambda_{90/90}$ in λ_{p90} und λ_{p50} geändert werden, ggf. mit den Zusätzen „10,dry“. Dass die Bezeichnungen $\lambda_{90/90}$ und $\lambda_{50/90}$ falsch sind, trifft auch dann zu, wenn die Rohdichtewerte mit entsprechender statistischer Sicherheit ermittelt wurden. Liegen für Steinmaterialien „echte“ $\lambda_{90/90}$ Werte aus Erstprüfungen in Kombination mit der werkseigenen Produktionskontrolle vor, könnte die Bezeichnung weiter verwendet werden, da sie sich dann nachvollziehbar von den o.g. Werten unterscheidet.

Um aus dem Bemessungswert des Steins einen Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit für das Mauerwerk zu machen, muss noch der Einfluss des Mörtels berücksichtigt werden. Das kann entweder durch numerische Simulationen erfolgen oder flächenanteilig, wie in DIN EN 1745 beschrieben. Die Anwendung des vereinfachten Verfahrens für zusammengesetzte Bauteile aus DIN EN ISO 6946 sollte auch möglich sein. Die vorliegenden Untersuchungen zeigen, dass für Porenbeton die Unterschiede der Umrechnungsverfahren vernachlässigbar sind. Lediglich bei den Ziegeln kommt es aufgrund der Querleitung aus den Stegen in die Mörtelfugen zu einer geringfügigen Unterschätzung des Wärmetransports beim vereinfachten Verfahren nach DIN EN ISO 6946 bzw. durch die flächenanteilige Umrechnung.

Unterschieden werden muss unbedingt ob Trockenwerte umgerechnet werden oder Bemessungswerte. Wichtig ist, dass stets die entsprechenden F_m -Werte (Zuschlagswerte für Feuchtigkeit) für die einzelnen beteiligten Komponenten berücksichtigt werden. Die Umrechnungstabelle (Tabelle A.2) in DIN 4108-4 weist derzeit noch identische äquivalente Wärmeleitfähigkeiten für Steinprodukte ohne Mörtel, für Mauerwerk mit Leichtmörtel LM 21 und für Mauerwerk mit Dünnbettmörtel auf.

Die Umrechnungsmethoden sollten in eine Reihenfolge gebracht werden, die der Wertigkeit und der Genauigkeit der Umrechnung entspricht – z.B. könnte man Anhang A.4 auflösen und unter A.3 unterbringen und die vier Methoden in der

folgenden Reihenfolge aufnehmen, die einer abnehmenden Genauigkeit entspräche.

1. Numerisch nach DIN EN ISO 10211 mit der größten Genauigkeit
2. das vereinfachte Verfahren nach DIN EN ISO 6946
3. flächenanteilige Umrechnung
4. Tabellenverfahren mit entsprechender Sicherheit

Ein weiterer Punkt betrifft die Rundung bei der Einstufung der umgerechneten und mit dem Umrechnungsfaktor beaufschlagten Wärmeleitfähigkeiten:

Die in DIN EN 1745 vorgeschlagene Rundung für Wärmeleitfähigkeitswerte größer $0,08 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ könnte auch in Deutschland verwendet werden. Die Rundungsregeln entsprechen hier in DIN EN 1745 denen der DIN EN ISO 10456. Eine deutsche Norm zu Bemessungswerten der Wärmeleitfähigkeit darf zwar eigene Regeln festlegen, wobei dazu jedoch keine Notwendigkeit besteht. Durch eine entsprechende Anpassung der Rundungsregeln sollte auch im Anschluss die Umrechnungstabelle in A.2. nochmal geprüft werden, ob die unsichere Seite für die pauschale Umrechnung der Steine mit unterschiedlichen Mörtelsorten noch besteht.

Sehr niedrige Werte der Wärmeleitfähigkeit (z.B. unter $0,08 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$), sollten weiterhin ausschließlich für allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen reserviert bleiben und bedürfen besonders großer Sorgfalt bei der Messung und der numerischen Simulation.

Bei der Extrapolation auf das obere Ende der Rohdichtespanne ist darauf zu achten, dass die richtige Steigung für das entsprechende Produkt aus Werkskurven (wenn nachgewiesen) oder aus dem Anhang in DIN EN 1745 verwendet wird. Eine Verwechslung der Kurven muss durch genaue Angabe welcher Wert deklariert wurde ausgeschlossen werden.

Anhang B

Der Hinweis zum Umrechnungskoeffizienten für die Hochlochziegel bedarf der Ergänzung, dass er für den Feuchtegehalt des Steinmaterials $f_u=10 \text{ kg/kg}$ gedacht ist, sonst könnte dieser fälschlicherweise auch für Hochlochziegel mit Füllung verwendet werden.

Für Hochlochziegel mit Füllungen aus hydrophobierter Mineralwolle wäre dieser Koeffizient sogar nicht einmal falsch, da die Mineralwolle nur in vernachlässigbarem Umfang Feuchte aufnimmt. Nicht zutreffend ist die Verwendung jedoch für andere, womöglich hygroskopische Dämmstoffe als Füllung.

Für die Überwachung eines individuellen Feuchteumrechnungsfaktors F_m ist es nicht ausreichend nur den Sorptionsfeuchtegehalt nach Lagerung bei $23 \text{ }^\circ\text{C}$ und

80 % relative Luftfeuchte zu überwachen – hierzu gehört immer auch die Wärmeleitfähigkeit und Rohdichte – der entsprechende Abschnitt sollte eindeutiger formuliert werden. Ein nachgewiesener individueller Umrechnungsfaktor für den Feuchtegehalt sollte mindestens einmal jährlich durch eine anerkannte Prüfstelle überwacht werden. Hierzu sind die Wärmeleitfähigkeit im trockenen Zustand und der Sorptionsfeuchtegehalt an Proben aus derselben Produktionscharge zu bestimmen.

Angleichung der Verfahren für Mauerwerks- und Dämmstoffprodukte

Die Vorgehensweise für Dämmstoffe für das CE-Zeichen mit einer ständigen (u.U. mehrmals täglich) Eigenüberwachung der Wärmeleitfähigkeit ist für viele Mauerwerksmaterialien nicht möglich, bzw. unverhältnismäßig aufwändig. Möglich ist jedoch das für Dämmstoffe nach DIN 4108-4 in Deutschland durchgeführte Verfahren über den Grenzwert der Wärmeleitfähigkeit, der in einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung beschrieben ist, auch für Mauerwerk anzuwenden. Hierfür müsste der nach Produktnorm des jeweiligen Materials in Verbindung mit DIN EN 1745 deklarierte Nennwert für den Trockenwert des Steines $\lambda_{10,dry,unit}$ mittels des grafischen Verfahrens in DIN 4108-4 auf die obere Grenze des selbst gewählten Rohdichtebereiches extrapoliert werden. Dieser Wert der Wärmeleitfähigkeit für den jeweiligen Stein könnte als Grenzwert für die Überwachung in der Zulassung verankert werden.

[Aktualisierung Juli 2015: Vor dem Hintergrund des EuGH-Urteils gegen Deutschland im Oktober 2014 sollte die Einführung eines Grenzwertkonzeptes für harmonisierte Bauprodukte nochmals genau geprüft werden inwiefern das europäischem Recht entspricht.]

Der Nachweis könnte dann in Anlehnung an die Methoden und Vorgehensweisen der DIN EN 1745 mittels Messung einer Wand mit Mörtel im trockenen Zustand und anschließender Rückrechnung auf den Stein erfolgen. Alternativ wäre die Vorgehensweise über die Messung des Steinmaterials mit anschließender numerischer Simulation zur Überprüfung des Grenzwertes für den Stein möglich.

Als weitere Alternative könnte auch direkt der Grenzwert für die Trocken-Wärmeleitfähigkeit des Steinmaterials in der Zulassung verankert werden. Speziell für Ziegelscherben ist hier aber die verlässliche Messung schwierig und die Probenpräparation und der Ablauf der Messung müssten sehr exakt festgelegt werden.

Falls ein spezifischer Feuchtekorrekturfaktor für die betrachteten Steine verwendet wird, muss dieser auch durch eine Fremdüberwachung überprüft werden. Hierfür muss an der identischen Charge zur Überwachung des Grenzwertes der

Wärmeleitfähigkeit auch der Ausgleichsfeuchtegehalt über Sorption nach Lagerung im Klima 23°C/80%r.F bestimmt werden.

Um eine gleichmäßige Produktqualität sicherzustellen sollte die Fremdüberwachung – ähnlich wie z.B. bei den Dämmstoffen - mindestens zweimal pro Jahr unangekündigt stattfinden. Zum Bemessungswert für die Anwendung in Deutschland als Mauerwerk mit Mörtel kommt man dann über die Verfahren der DIN 4108-4 zur Berücksichtigung der Feuchteinflüsse und Mörtelarten.

Formulierter Entwurfsvorschlag für den Anhang der DIN 4108-4

Anhang A (normativ)

Bestimmung von Bemessungswerten der Wärmeleitfähigkeit λ_{BW} für Mauerwerk aus Mauersteinen nach DIN EN 771

A.1 Allgemeines

Die in diesem Anhang beschriebenen Verfahren sind anzuwenden für die Bestimmung von Bemessungswerten der Wärmeleitfähigkeit für Mauerwerk anhand des im CE-Kennzeichen / in der Leistungserklärung deklarierten Wertes der Wärmeleitfähigkeit des Mauersteins. Sie gelten, wenn die Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks nicht anhand der Rohdichte nach Tabelle 1 dieser Norm eingestuft wird. Dieser Anhang gilt nur für die Bestimmung von Bemessungswerten der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{BW} \geq 0,08 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.

Für die Bestimmung der Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit von Mörtel sowie Mauersteinen aus Vollmaterial kann das Vorgehen analog angewendet werden.

Der auf der CE-Kennzeichnung / in der Leistungserklärung nach der Normenreihe DIN EN 771 in Verbindung mit DIN EN 1745 deklarierte Wert der Wärmeleitfähigkeit ist der Trockenwert $\lambda_{10,dry,unit}$ für die Steine ohne Mörtel. Deklariert wird die Wärmeleitfähigkeit für die angegebene Trockenrohichte zusammen mit den Werten für die Abweichung dieser Rohdichte nach oben und nach unten (z.B. $830 \text{ kg/m}^3 \pm 5\%$).

Für die Anwendung in Deutschland wird üblicherweise eine Rohdichteklasse festgelegt und es wird der Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit für Mauerwerk dieser Rohdichteklasse benötigt. Für die Einstufung in eine Rohdichteklasse wird der angegebene Wert der Rohdichte inklusive der Abweichung nach oben benötigt, welcher dann in die passende Rohdichteklasse eingestuft wird.

Anschließend wird nach A.2 der Trockenwert des Steins $\lambda_{10,dry,unit}$ auf die obere Grenze der passenden Rohdichteklasse extrapoliert ($\lambda_{10,dry,unit,100\%}$) und anschließend nach A.3 der Einfluss der Feuchte auf die Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Steine erfasst ($\lambda_{design,unit,100\%}$). Diese Feuchtekorrektur der Wärmeleitfähigkeit wird nach A.3 analog für den Mörtel durchgeführt, um den Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit des Mörtels $\lambda_{design,mor,100\%}$ zu bekommen. Feuchtekorrekturfaktoren für die Wärmeleitfähigkeit von Steinmaterialien und Mörtel können Tabelle 5 entnommen oder nach Anhang B ermittelt werden. Ausgehend von den Bemessungswerten der Wärmeleitfähigkeit für die Steine und den Mörtel wird die Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks $\lambda_{design,mas,100\%}$ nach A.4 ermittelt.

Die so ermittelte Wärmeleitfähigkeit für das Mauerwerk $\lambda_{design,mas,100\%}$ wird nach A.5 eingestuft und somit zum Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit für das Mauerwerk λ_{BW} für die Anwendung in Deutschland.

A.2 Extrapolation der Trockenwerte der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10,dry,unit}$ der Steine auf die obere Grenze der Rohdichteklasse und Ermittlung von $\lambda_{10,dry,unit,100\%}$

Für die Umrechnung der Trockenwerte der Wärmeleitfähigkeit der Steine $\lambda_{10,dry,unit}$ auf die obere Grenze der Rohdichteklasse sind die folgenden Angaben erforderlich:

- Die deklarierte Trocken-Wärmeleitfähigkeit der Steine $\lambda_{10,dry,unit}$
- Die zugehörige Trocken-Rohdichte mit den Abweichungen nach unten und oben $\rho_D \pm x\%$
- Die obere Grenze der Rohdichteklasse (festgelegt über die Einordnung des deklarierten Trocken-Rohdichtewerts inklusive der Abweichung nach oben) ρ_{grenz} , auf die extrapoliert wird.

Der Wert $\lambda_{10,dry,unit,100\%}$ ergibt sich aus der Steigung der Geraden m und dem Trockenwert der Wärmeleitfähigkeit zu:

$$\lambda_{10,dry,unit,100\%} = \lambda_{10,dry,unit} + \Delta\rho \cdot m \quad (W/(m \cdot K)) \quad (A.1)$$

mit $\Delta\rho = \rho_{grenz} - \rho_D$

ρ_{grenz} obere Grenze der Rohdichteklasse

ρ_D deklarierte Trockenrohddichte

Die Steigung der Geraden ergibt sich nach DIN EN 1745, Anhang A, in Abhängigkeit des Steinmaterials. Es ist die Gerade für den Wert bei 90 % der Produktion zu verwenden. Näherungsweise können folgende Werte nach Tabelle A.1 angesetzt werden:

Tabelle A.1 — Steigungen der Wärmeleitfähigkeits-Rohdichte-Geraden

Steinmaterial	Steigung m^a
Ziegelscherben (gebrannter Ton)	0,0005
Kalksandstein mit $\rho_{max} \leq 1\,500\text{ kg/m}^3$	0,0008
Kalksandstein mit $\rho_{max} > 1\,500\text{ kg/m}^3$	0,0012
Betonsteine aus Normalbeton und Betonwerksteine	0,0010
Betonsteine mit Bims als einzigem Zuschlag	0,0003
Betonsteine mit Polystyrol-Zuschlag, wenn der $\lambda_{90/90}$ -Wert vorliegt	0,0003
Betonsteine mit Polystyrol-Zuschlag, wenn der $\lambda_{50/90}$ -Wert vorliegt	0,0002
Betonsteine mit Blähton-Zuschlag	0,0004
Betonsteine mit mehr als 70 % geschäumter Hochofenschlacke (Hüttenbims) als Zuschlag	0,0006
Betonsteine mit getempertem Bergmaterial als überwiegendem Zuschlag	0,0002
Betonsteine mit anderen leichten Zuschlägen, $\rho_{max} \leq 1000\text{ kg/m}^3$	0,0004
Betonsteine mit anderen leichten Zuschlägen, $1000\text{ kg/m}^3 < \rho_{max} \leq 1500\text{ kg/m}^3$	0,0008
Betonsteine mit anderen leichten Zuschlägen, $\rho_{max} > 1500\text{ kg/m}^3$	0,0012

^a Genauere Werte für den Geradenverlauf können DIN EN 1745 Anhang A entnommen werden.

A.3 Einfluss des Feuchtegehalts und Ermittlung von $\lambda_{design,unit,100\%}$

Der Einfluss des Feuchtegehalts auf die Wärmeleitfähigkeit wird durch den Umrechnungsfaktor F_m berücksichtigt:

$$\lambda_{design,unit,100\%} = \lambda_{10,dry,unit,100\%} \cdot F_m \quad (W/(m \cdot K)) \quad (A.2)$$

Dabei ist F_m der Umrechnungsfaktor für den Feuchtegehalt nach Tabelle 5 oder gemäß Leistungserklärung, ermittelt nach Anhang B. Der Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit des Steins $\lambda_{design,unit,100\%}$ ist für das Endergebnis auf zwei wertanzeigende Ziffern mathematisch zu runden. Wenn der Wert für weitere Berechnungen verwendet wird, ist er auf drei wertanzeigende Ziffern zu runden.

Die Berücksichtigung des Feuchtegehaltes auf die Wärmeleitfähigkeit von Mörtel zur Ermittlung von $\lambda_{\text{design,mor},100\%}$ erfolgt nach dem gleichen Prinzip.

A.4 Berücksichtigung des Fugeneinflusses und Ermittlung von $\lambda_{\text{design,mas},100\%}$

A.4.1 numerische Berechnungen

Wurden die λ -Werte für die Deklaration mittels numerischer Methoden nach DIN EN ISO 10211 berechnet, bietet sich für die Berücksichtigung der Fugeneinflüsse ebenfalls die numerische Berechnung an. Diese ist genauer als die folgenden genannten Verfahren, da sie die Lochgeometrie des Steins berücksichtigt, jedoch auch aufwändiger. Die Berechnung des Finite-Elemente- oder Finite-Differenzen-Modells erfolgt mit Bemessungswerten der Wärmeleitfähigkeit für das Steinmaterial $\lambda_{\text{design,mat},100\%}$ und den Mörtel $\lambda_{\text{design,mor},100\%}$. Der Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit des Steinmaterials $\lambda_{\text{design,mat},100\%}$ wird iterativ aus der Berechnung des Steinmodells unter Verwendung des Bemessungswerts der Wärmeleitfähigkeit für den Stein $\lambda_{\text{design,unit},100\%}$ (siehe Abschnitt A.3) ermittelt.

A.4.2 Vereinfachtes Verfahren für zusammengesetzte Bauteile aus DIN EN ISO 6946

Mittels des vereinfachten Verfahrens für zusammengesetzte Bauteile (siehe DIN EN ISO 6946:2008-04 Abschnitt 6.2) kann $\lambda_{\text{design,mas},100\%}$ aus den Bemessungswerten für den Stein $\lambda_{\text{design,unit},100\%}$ und den Mörtel $\lambda_{\text{design,mor},100\%}$ ermittelt werden. Dieses Verfahren berücksichtigt nicht die Lochgeometrie des betrachteten Steins, sondern nur die äquivalente Wärmeleitfähigkeit des Steins in Form des $\lambda_{\text{design,unit},100\%}$ -Werts für den einzelnen Stein aus A.3 und die Abmessungen von Stein und Fugen in der Ansicht. Die Genauigkeit ist aus diesem Grund vermindert gegenüber dem numerischen Verfahren in A.4.1. Bei Mauerwerk mit Dünnbettfugen ist auch eine einfache flächenanteilige Mittelung der U-Werte der einzelnen Bereiche (Mörtel und Stein) ausreichend genau.

A.4.3 Tabellenverfahren

Die folgende Tabelle A.2 enthält $\lambda_{\text{design,mas},100\%}$ -Werte für Mauerwerk mit unterschiedlichem Fugenmaterial für Steine der Höhe ≥ 238 mm (Dickbettmörtel) und ≥ 248 mm (Dünnbettmörtel), ausgehend von $\lambda_{\text{design,unit},100\%}$ und $\lambda_{\text{design,mor},100\%}$. Die Werte sind mathematisch auf 2 wertgebende Ziffern gerundet. Die Tabelle kann auch für die Umrechnung zwischen den genannten Fugenmaterialien verwendet werden. Für diese Umrechnung können die unter A.4.1 und A.4.2 angegebenen Verfahren mit höherer Genauigkeit ebenfalls verwendet werden.

Tabelle A.2 — Ermittlung von $\lambda_{\text{design,mas},100\%}$ für Mauerwerk mit verschiedenen Fugenmaterialien

Wärmeleitfähigkeit in $W/(m \cdot K)^{a)}$				
Steinprodukte (ohne Mörtel) $\lambda_{design,unit,100\%}$	Mauerwerk mit Mörtel ohne Stoßfugenvermörtelung $\lambda_{design,mas,100\%}$			
	LM 21	LM 36	NM	DBM
0,10	0,11	0,12	0,16	0,11
0,11	0,12	0,13	0,17	0,12
0,12	0,13	0,14	0,18	0,13
0,13	0,14	0,14	0,19	0,14
0,14	0,15	0,15	0,19	0,15
0,15	0,16	0,16	0,20	0,16
0,16	0,17	0,17	0,21	0,17
0,18	0,19	0,19	0,23	0,19

^{a)} Diese Tabelle gilt für die Steinhöhen ≥ 238 mm (Dickbettmörtel) und ≥ 248 mm (Dünnbettmörtel) und für die Steinlänge 250 mm (Nennmaße).

Bei Anwendung der Tabellenwerte entfällt die Einstufung nach A.5.

A.5 Einstufung der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{design,mas,100\%}$ und Ermittlung des Bemessungswerts λ_{BW}

Die Einstufung der Werte $\lambda_{design,mas,100\%}$ ist wie folgt vorzunehmen:

$0,08 \leq \lambda_{design,mas,100\%} \leq 0,99$	gerundet auf	0,01 $W/(m \cdot K)$
$1,0 \leq \lambda_{design,mas,100\%} \leq 3,0$	gerundet auf	0,1 $W/(m \cdot K)$

Der so eingestufte Wert ist der Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit λ_{BW} für die Anwendung in Deutschland.

Anmerkung: Hierbei steht der Index „BW“ für den eingestuftten Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks für die Anwendung in Deutschland.

Anhang B (normativ)

Bestimmung eines individuellen Umrechnungsfaktors für den Feuchtegehalt F_m für das jeweilige Steinmaterial

B.1 Allgemeines

Ist für das jeweilige Steinmaterial kein Umrechnungsfaktor F_m bekannt oder soll ein anderer Umrechnungsfaktor F_m verwendet werden als nach Tabelle 5 dieser Norm, so ist dieser für den nach DIN EN ISO 12571 gemessenen Absorptionsfeuchtegehalt durch eine Prüfstelle wie folgt zu bestimmen.

B.2 Vorgehensweise zur individuellen Ermittlung des Umrechnungsfaktors für den Feuchtegehalt F_m

Der Umrechnungskoeffizient für den Feuchtegehalt f_u bzw. f_ψ nach DIN EN ISO 10456:2010-05, Tabelle 4, ist zu verwenden. Für Mauerwerk aus Hochlochziegeln darf als Umrechnungskoeffizient für den Feuchtegehalt des Ziegelscherbens $f_u = 10 \text{ kg/kg}$ angesetzt werden.

Alternativ kann der Umrechnungskoeffizient für den Feuchtegehalt f_u bzw. f_ψ durch jeweils drei Messungen der Wärmeleitfähigkeit für jeden Rohdichtebereich nach Lagerung bei 23 °C/80 % relativer Luftfeuchte bis zur Massekonstanz in Anlehnung an DIN EN ISO 12571 sowie durch vergleichende Messung derselben Proben im trockenen Zustand unter Berücksichtigung des gemessenen Absorptionsfeuchtegehaltes (Mittelwert aus mindestens 3 Messungen) bestimmt werden.

Die Berechnung des Umrechnungsfaktors F_m für den massebezogenen Feuchtegehalt erfolgt nach DIN EN ISO 10456:2010-05, Abschnitt 7.3, bei 23 °C/80 % relativer Luftfeuchte. Der Mindestwert für F_m beträgt 1,03.

Ein nachgewiesener individueller Umrechnungsfaktor für den Feuchtegehalt muss mindestens zweimal jährlich durch eine Prüfstelle überwacht werden. Hierzu sind die Wärmeleitfähigkeit nach Lagerung bei 23 °C/80 % relativer Luftfeuchte sowie im trockenen Zustand und der Sorptionsfeuchtegehalt an Proben aus derselben Produktionscharge zu bestimmen.

6 Fazit und Ausblick

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, den Einfluss von Steingeometrie, Mörtel und Feuchte auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit von wärmetechnisch hochwertigem Mauerwerk im fertigen Zustand zu untersuchen. Dazu werden sowohl Messungen, als auch rechnerische Untersuchungen für verschiedene Mauerwerkstypen durchgeführt. Durch den direkten Vergleich zwischen den Messmethoden und den numerischen Berechnungen kann der Einfluss der einzelnen Parameter ermittelt werden. Ein Schwerpunkt der Untersuchungen liegt auch im Vergleich der Bestimmung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit durch unterschiedliche Messmethoden in verschiedenen Maßstäben. Dazu werden Wandmessungen in der Hot-Box mit Wärmestrommesser (im 1:1 Maßstab) verglichen mit Messungen an Halbstein-Probekörpern. Zusätzlich werden Messungen am Steinmaterial im Plattengerät durchgeführt. Diese liefern die Eingangswerte für die numerischen Berechnungen. Dabei zeigt sich, dass je nach verwendeter Methode Unterschiede in der bestimmten äquivalenten Wärmeleitfähigkeit ergeben.

Messungen

Die Wandmessungen im 1:1 Maßstab nach DIN EN 1934 lieferten bei allen Mauerwerken für die äquivalente Wärmeleitfähigkeit die höchsten Ergebnisse aller hier verwendeten Methoden. Vorteile der Wandmessung liegen beim integrierenden Erfassen aller Einflussfaktoren auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks, direkt in einer Messung. Bedingt durch die Größe kommen die Probekörper einer Wand im Gebäude am nächsten. Die Messung „von Luft zu Luft“ ist Jahrzehnte erprobt und liefert auch bei hochwärmedämmenden Steinen plausible Ergebnisse. Ein Grund dafür ist, dass im Gegensatz zum Plattengerät keine vollständige Planparallelität für die Ankopplung von Kühlplatten erforderlich ist und dadurch die Fehler beim Wärmeübergangskoeffizienten ausgeschlossen werden.

Gemessen wird die Wärmestromdichte und daraus der Wärmedurchlasswiderstand des gesamten Mauerwerks bestimmt. Es kann nur die Summe aller Einflüsse auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit erfasst werden, nicht jedoch die Größe der einzelnen Einflüsse. Die Wandprobekörper benötigen auch einen längeren Vorlauf in der Probenpräparation (Trocknungszeiten) und eine längere Messdauer bis zum Erreichen des stationären Zustands. Zudem sind ganze Wände schwierig zu handhaben, aufwändig und teuer in der Herstellung.

Die rechnerische Messunsicherheit für die Verwendung des Prüfstands als Hot-Box mit Wärmestrommesser liegt für alle Messungen zwischen 4,2 und 4,8 % des R-Wertes. In der Auswertung wird mit einer mittleren Unsicherheit von 4,5% gearbeitet.

Als einfachere und schnellere Alternative zur Wandmessung sind Messungen an Probekörpern aus halbierten Steinen, die sogenannte Halbsteinmessung, möglich. Im Vergleich mit der Wandmessung hat die Halbsteinmessung deutlich mehr mögliche Fehlerquellen in der Probenpräparation. Vorteilhaft ist jedoch die Messung im Plattengerät und die Zeitersparnis bei der Trocknung der einzelnen Steine. Zusammengefasst liegt die Unsicherheit bei der Halbsteinmessung im Mittel bei etwa 3,5 %.

Gemessen wird für diese Untersuchungen in einem Wärmestrommessplattengerät ebenfalls die Wärmestromdichte und daraus der Wärmedurchlasswiderstand der Halbstein-Probekörper bestimmt. Diese Art der Messung erlaubt die Bestimmung der individuellen Einflussparameter wie Griffhilfen oder Mörtel einfluss.

Die mit der Halbsteinmethode gemessene äquivalente Wärmeleitfähigkeit ist für alle 6 untersuchten Mauersteintypen niedriger als bei der Wandmessung.

Eine weitere Alternative zur Ermittlung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit ist die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Materialien im Zweiplattengerät mit anschließender Berechnung des Mauerwerks durch numerische Methoden.

Im Vergleich zur Wand- und Halbsteinmessung ist die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des Materials im Zweiplattengerät eine einfache und schnelle Methode mit niedriger Messunsicherheit von etwa 2,0 % bis 2,5 %. Die Trocknungszeiten sind bei diesem Verfahren gering. Die Messung des Steinmaterials nach DIN EN 12664 liefert Eingangswerte für die numerischen Berechnungen mit geringer Unsicherheit beim Messergebnis.

Numerische Berechnungen

In den dreidimensionalen numerischen Berechnungen werden die Steinbilder und die Mörtelfugen idealisiert abgebildet. Dabei werden standardmäßig keine Imperfektionen (z.B. Risse im Ziegelscherben, luftdurchlässige Stoßfugen, Schwankungen in der Dicke der Stege) berücksichtigt. Im Vergleich zu den beiden vorher beschriebenen Messmethoden liefert dieses kombinierte Verfahren aus Einzel-Messung und numerischer Berechnung für alle Wandbildner nochmals niedrigere Werte für die äquivalente Wärmeleitfähigkeit. Wobei der Unterschied beim Ziegelmauerwerk deutlich ausgeprägter ist als beim Porenbeton.

Die Abweichungen können unterschiedliche Gründe haben. Eine Erklärung ist das der bei der Berechnung angesetzte Wärmeleitfähigkeitswert für den Dünnbettmörtel (Herstellerangaben) nicht mit dem tatsächlichen Wert für den Mörtel in der Messung übereinstimmt. Ein weiterer Grund könnte die in der Praxis schwankende Dicke der Dünnbettmörtelschicht (zwischen 1 und 2 mm) sein. Der deutlichere Unterschied bei der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit des Ziegelmauerwerks zwischen rein

gemessener und „berechneter“ Wärmeleitfähigkeit bei den Füllziegeln kann nicht durch eine höhere Wärmeleitfähigkeit des Füllmaterials erklärt werden. Die Kontrollmessung der Wärmeleitfähigkeit der Mineralwolle-Stecklinge aus dem VZ 0,09 liefert die Wärmeleitfähigkeit $0,0327 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, die etwa $1 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ unter dem für den Bemessungswert von $0,035 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ maßgeblichen Grenzwert von $0,0338 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ liegt.

Weitere Verfahren

Das vereinfachte Verfahren für zusammengesetzte Bauteile aus DIN EN ISO 6946 liefert Ergebnisse, die gut mit der numerischen Simulation übereinstimmen, wenn als Eingangswert für den Stein vergleichbare Werte verwendet werden. Umrechnungen nach dem vereinfachten Verfahren sind somit ausreichend genau. Lediglich bei Mauerwerk mit verstärkter Querleitung aus dem Stein in die Mörtelfuge – z.B. bei Ziegelmauerwerk - wird der Wärmetransport mit dem vereinfachten Verfahren unterschätzt.

Die reine flächenanteilige Berücksichtigung des Mörtels ist gegenüber dem vereinfachten Verfahren annähernd gleichwertig. Vor allem bei Dünnbettmörtel sind kaum Unterschiede feststellbar.

Das Umrechnungsverfahren nach der Tabelle in DIN 4108-4 ist in seiner derzeitigen Form nicht auf der sicheren Seite. Wenn die im vorangehenden Kapitel vorgestellten Änderungen übernommen werden, ist die Umrechnung mittels einer Tabelle möglich.

Bewertung der Einflüsse

Die äquivalente Wärmeleitfähigkeit eines hochdämmenden Mauerwerks hängt neben der Art der Bestimmung auch unter Anderem vom verwendeten Mörtel und der vorliegenden Lagerfugendicke ab. Weitere Faktoren sind beim Porenbeton die Griffhilfen und beim Ziegelmauerwerk die Anisotropie des Ziegelscherbens. Durch die Kombination der verschiedenen Bestimmungsmethoden kann der Einfluss der verschiedenen Faktoren ermittelt werden. Da die Einflüsse kumuliert zu betrachten sind, kann das 3 % Kriterium aus DIN EN ISO 6946 überschritten werden.

Für den Porenbeton zeigt sich, dass der Einfluss der Griffhilfen zwar im Bereich der rechnerischen Messunsicherheit von 3,5 % liegt, sich allerdings bei Wiederholungsmessungen bestätigt. Die Orientierung der Griffhilfen in der Halbsteinmessung hat hingegen keinen messbaren Einfluss. Ähnliche Beobachtungen kann man für den Einfluss des verwendeten Dünnbettmörtels in der Dicke von 1 mm machen. Allerdings hängt dieser Einfluss auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit deutlich von der Wärmeleitfähigkeit des Mörtels und dessen

Lagerfugendicke ab. Sichtbaren Einfluss auf die Messung der Wärmeleitfähigkeit hat auch die Vorkonditionierung des Probenmaterials. So ist z.B. die Wärmeleitfähigkeit nach der Lagerung im Klima 23°C/80% r.F. zwischen 7 und 9,5 % höher als im trockenen Zustand.

Für die hochwärmedämmenden Ziegel ist eine deutliche Anisotropie am Scherben hinsichtlich der Wärmeleitfähigkeit messbar. Das erklärt zum Teil die gemessenen höheren äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten in der Wand- und Halbsteinmessung. Damit zeigt sich, dass die bisher in bauaufsichtlichen Zulassungsverfahren aufgrund numerischer Simulationen von Ziegel-Lochbildern vernachlässigten Einflüsse der Anisotropie berücksichtigt werden müssen. Wird die Anisotropie nicht berücksichtigt, liegen die Berechnungsergebnisse für die äquivalente Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks signifikant niedriger als das tatsächliche Verhalten des Mauerwerks erwarten lässt. Die gemessenen Abweichungen stellen jedoch nur einen einzelnen Wert dar, der durch weitere Messungen statistisch untermauert werden sollte.

Hinweise und Erklärungen

Die Steine und der verwendete Mörtel wurden im Baustoffhandel bzw. im Direktvertrieb der Hersteller erworben.

Alle die in diesem Bericht beschriebenen Messungen sind einzelne Messungen ohne statistische Absicherung der Messwerte. Um mit hinreichender Sicherheit verlässliche Aussagen für die Normung abzuleiten, sind weitere Stichproben und weitergehende Untersuchungen sinnvoll.

Die untersuchten Einflüsse (Griffhilfen, Mörtel einfluss, Orientierung der Probekörper in der Messung, Feuchte etc.) liegen oft in derselben Größenordnung wie die rechnerische Unsicherheit bei den Messungen. Hier ist es u.U. sinnvoll weitere Untersuchungen zur Absicherung der gemessenen und berechneten Werte zu machen. Der recht große Unterschied zwischen den in der Halbsteinmessung ermittelten Mörtel einflüssen beim Porenbeton und den rechnerisch ermittelten Einflüssen könnte auf eine Wärmeleitfähigkeit des Mörtels in der Messung hindeuten, die deutlich über der in der Berechnung angesetzten Wärmeleitfähigkeit des Trockenwerts eines DBM 024 liegt. Weitere Hinweise zu den Abweichungen und möglichen Ursachen sind in den entsprechenden Kapiteln 4.1 für die Messungen, 4.2 für die Berechnungen und 5.2 beschrieben.

Die Unsicherheit bei den wärmetechnischen Berechnungen selber liegt bei den verwendeten und nach DIN EN ISO 10211 validierten Programmen bei weniger als 1 % des Wärmestroms. Zusätzliche Unsicherheiten resultieren aus den idealisierten Annahmen für die Modellentwicklung, v.a. bei der Modellierung der Mörtelschichten, die z.B. die Füllung der angeschnittenen Poren nicht berücksichtigt.

Der Vorschlag für die Überarbeitung der Tabelle zur pauschalen Umrechnung der Bemessungswerte der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit von Mauerwerk im Anhang A von DIN 4108 basiert auf der folgenden Überlegung: Wenn die äquivalente Wärmeleitfähigkeit eines Steines ohne Mörtel z.B. $0,113 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ beträgt, dann wird das Mauerwerk mit LM21 in 12 mm Lagerfugendicke entgegen der Angaben der Tabelle nicht mehr $0,11 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ einhalten. In ähnlicher Form gilt das auch für Dünnbettmörtel, v.a. da die Tabelle beim Dünnbettmörtel auch die Lagerfugendicke 2 mm abdecken soll (Steinhöhe 248 mm).

Andererseits werden mit den breiten Klassen und der pauschalen Höherstufung Steine schlechter gestellt, die z.B. weit unter den Werten für die nächsthöhere Klasse von DIN 4108-4 liegen. So wäre z.B. nur eine Höherstufung für die diejenigen Steine notwendig, die mit Mörtel einfluss die Rundungsgrenze überschreiten.

Zukünftiger Forschungsbedarf

Der Umfang der Berechnungen ist jederzeit beliebig erweiterbar (z.B. auf weitere Bauprodukte etc.), auch im Rahmen von möglichen Anschlussvorhaben. Der Einfluss der Anisotropie beim Ziegelscherben sollte eingehender untersucht werden, vor allem fehlen hier noch die Betrachtung der dritten Raumrichtung und die Untersuchung der Produktionsparameter. Diese Untersuchungen zeigen eine größere Anisotropie, je dünner die Stege der untersuchten Ziegel sind.

Interessant wäre auch eine vertiefende Parameterstudie zu den Imperfektionen der Messungen mittels numerischer Simulation. Beispielsweise die Abnutzung der Kerne der Mundstücke wirkt sich direkt auf die Dicke der Stege und damit auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks aus. Die Abnutzung könnte beispielsweise auf einen Grenzwert (z.B. mittlerer Wert für die Benutzungszeit) festgelegt werden. Die damit erreichten Stegdicken sollten dann für Zulassungsberechnungen verwendet werden. Weitere Untersuchungsfelder sind die Imperfektionen im Stein selber (z.B. Risse im Scherben) und der Einfluss von Luftspalten in der Stoßfuge.

Problematisch ist auch das Austrocknungsverhalten von Wänden – vor allem beim Porenbeton- und sinnvoll wäre ein Vergleich der Trocknungsmethoden und Trocknungsdauern, verbunden mit einer Untersuchung, ob das Konvergenzkriterium aus DIN EN ISO 12570 (0,1- Masse-% in 24 h bei drei aufeinanderfolgenden Messungen) für massives Mauerwerk (z.B. aus Porenbeton) immer zutreffend ist.

Forschungsbedarf gibt es auch bei den Randbedingungen für die Messung feuchter Materialien im Plattengerät und damit bei der korrekten Ermittlung der F_m -Werte. Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Einflüsse der Feuchte am Porenbeton müssen auch auf den Ziegelscherben erweitert werden.

7 Literatur und Normen

- [Anton 1996] Anton H., „Bestimmungen der Wärmeleitfähigkeit von Ziegelmauerwerk – Vergleich Messen – Rechnen. Sachbericht im Auftrag D.A.CH.-Ziegelindustrie“, Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München, 1996
- [Anton 2006a] Anton H., „Bestimmung der Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit für Mauerwerk durch Messung und durch Berechnungen – Festlegung nationaler Randbedingungen zur Anwendung der DIN EN 1745“. Forschungsbericht, Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München, 2006
- [Anton 2006b] Anton H., „Festlegung von Bemessungswerten der Wärmeleitfähigkeit von Mauerwerk – Umrechnung von Messwerten für Mauerwerk auf andere Mörtelarten“, Forschungsbericht, Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München, 2006
- [Erker 1998] Erker A., „Anisotropie der Wärmeleitfähigkeit von Ziegelscherben im Zusammenhang „Messen und Rechnen“ von Ziegelmauerwerk“, Bauphysik 20, 1998, Heft 4, Seite 122 bis 125
- [Erker 2002] Erker A., „Die Wärmeleitfähigkeit des Ziegelscherbens (Teil1)“. In: Ziegelindustrie International 10/2002, Bauverlag, Gütersloh, 2002

- [Hauck et al. 2000] Hauck D., Ruppik M., Hörnschemeyer S., Richter F., „Erhöhung der Scherbenfestigkeit und Absenkung der Wärmeleitfähigkeit durch rohstoffseitige Maßnahmen“. In: Ziegelindustrie Jahrbuch, Bauverlag, Gütersloh, 2000
- [König et al 2000] König N., Achtziger J., Hammerschmidt U., Zeus K., „Überprüfung der Festlegung der Bauregelliste zur Wärmeleitfähigkeit von Ziegelmauerwerk“, Bauphysik, Heft 3, 2000, S. 191-199
- [Reinders 1981] Reinders R., „Wärmetechnisch optimale Querschnittsgestaltung von Hochlochziegeln“. Ziegelleittechnisches Jahrbuch, IZF Essen, 1981
- [DIBt 1998] Fuhrmann G., „DIBt-Richtlinie zur Messung der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, tr}$ von Mauerwerksprobekörpern“. In: Mitteilungen DIBt 3/1998, Deutsches Institut für Bautechnik, Ernst und Sohn, Berlin, 1998
- [DIN 4108-4] DIN 4108-4:2013-02 „Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte“. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth, Berlin, 2013
- [DIN 4108-10] DIN 4108-10:2008-06 „Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 10 Anwendungsbezogene Anforderungen an Wärmedämmstoffe - Werkmäßig hergestellte Wärmedämmstoffe“. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth, Berlin, 2008



- [DIN EN 771-1] DIN EN 771-1:2011 „Festlegungen für Mauersteine - Teil 1: Mauerziegel; Deutsche Fassung EN 771-1:2011“. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth, Berlin, 2011
- [DIN EN 1745] DIN EN 1745:2012-07 „Mauerwerk und Mauerwerksprodukte – Verfahren zur Bestimmung von wärmeschutztechnischen Eigenschaften; Deutsche Fassung EN 1745:2012“. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth, Berlin, 2012
- [DIN EN 1934] DIN EN 1934:1998-04 „Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Messung des Wärmedurchlaßwiderstandes; Heizkastenverfahren mit dem Wärmestrommesser - Mauerwerk; Deutsche Fassung EN 1934:1998“. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth, Berlin, 1998
- [DIN EN 12667] DIN EN 12667:2001-05 „Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät - Produkte mit hohem und mittlerem Wärmedurchlasswiderstand; Deutsche Fassung EN 12667:2001“. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth, Berlin, 2001
- [DIN EN ISO 6946] DIN EN ISO 6946:2008-04 „Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren (ISO 6946:2007); Deutsche Fassung EN ISO 6946:2007“. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth, Berlin, 2008




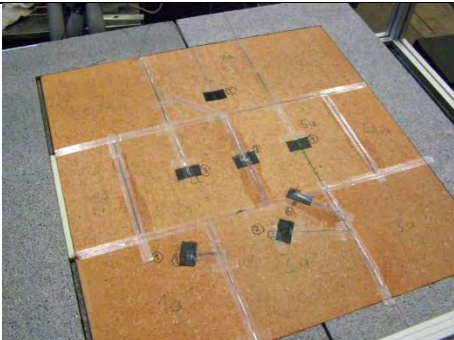





[DIN EN ISO 10211]	DIN EN ISO 10211:2008-04 „Wärmebrücken im Hochbau - Wärmeströme und Oberflächentemperaturen - Detaillierte Berechnungen (ISO 10211:2007); Deutsche Fassung EN ISO 10211:2007“. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth, Berlin, 2008
[DIN EN ISO 10456]	DIN EN ISO 10456:2010-05 „Baustoffe und Bauprodukte - Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften - Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte (ISO 10456:2007 + Cor. 1:2009); Deutsche Fassung EN ISO 10456:2007 + AC:2009“. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2010
[DIN ISO 16269-6]	DIN ISO 16269-6:2009-10 „Statistische Auswertung von Daten - Teil 6: Ermittlung von statistischen Anteilsbereichen (ISO 16269-6:2005); Text Deutsch und Englisch“ DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth, Berlin, 2009
[DIN V 20000-404]	DIN V 20000-404:2006-01 „Anwendung von Bauprodukten in Bauwerken - Teil 404: Regeln für die Verwendung von Porenbetonsteinen nach DIN EN 771-4:2005-05“ DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth, Berlin, 2006
[DIN V 4165-100]	DIN V 4165-100:2005-10 „Porenbetonsteine - Teil 100: Plansteine und Planelemente mit besonderen Eigenschaften“ DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth, Berlin, 2005



8 Anhang

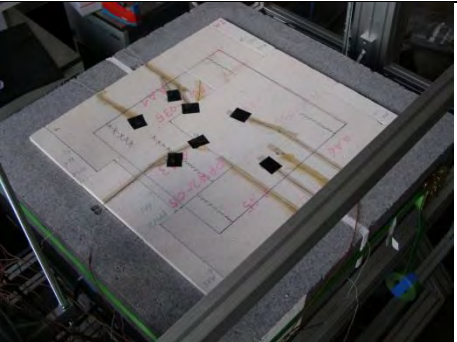
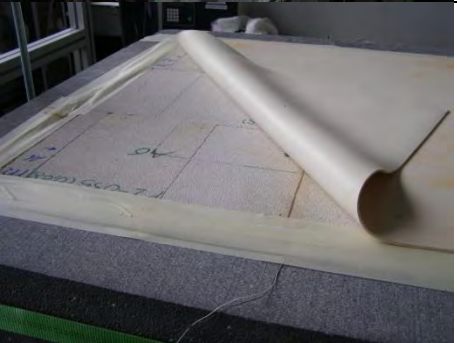


<p>Das Planfräsen der Oberflächen garantierte gleichmäßigen Kontakt der Proben mit den Kühlplatten im Wärmestrom-Messplattengerät</p>	
<p>Die Kabel der am Probekörper angebrachten Thermoelemente wurden in eingefrästen Schlitzen geführt, um die thermische Ankopplung an die Kühlplatten nicht zu stören</p>	
<p>Kabel der Thermoelemente auf der Unterseite konnten entlang der flexiblen Dämmschicht verlegt werden.</p>	
<p>Zur Fixierung und thermischen Entkopplung der Proben von der Umgebung im Labor wurden diese in einen Rahmen aus Dämmstoff eingepasst und mittels eines Holzrahmens verspannt.</p>	
<p>An den Grenzflächen zur Kühl- und Heizplatte wurden Ausgleichsschichten aus Silikonschaumstoff angebracht, um die minimalen, verbliebenen Abweichungen in der Ebenheit auszugleichen.</p>	



<p>Der Probeneinbau in das drehbare Wärmestrom-Messplattengerät erfolgte von oben. Dann wurden die beiden mittleren Kühlplatten eingesetzt und das Gerät um 180° gedreht um den zweiten Probekörper einzubauen.</p>	
<p>Platten aus Vinylkautschuk dienen der zusätzlichen Dämmung und thermischen Entkopplung aber auch dem Feuchteschutz bei kurzzeitigen Unterschreitungen des Taupunktes an den Kühlplatten</p>	
<p>Problematisch erwies sich die Trocknung des Porenbetons. Durch zu schnelle Trocknung und hohe Luftgeschwindigkeiten bekam der Porenbeton Risse. Durch einseitiges Aufbringen von Heizmatten konnte die Trocknungsdauer reduziert werden.</p>	
<p>Vermörtelung eines Halbsteinprobekörpers in einer „Mauerlehre“ aus Spanplatten zur Sicherstellung der Planparallelität und der Rechtwinkligkeit.</p>	





<p>Die Probenpräparation erfolgte analog zum Verfahren mit den Ziegeln. Nebenstehendes Bild zeigt die Anordnung der Thermoelemente auf einem Porenbeton Halbstein-Probekörper.</p>	
<p>Zum Ausgleich der Rest-Unebenheiten und besseren thermischen Ankopplung wurde eine dünne Schicht aus Silikonkautschuk in der Messung verwendet.</p>	
<p>Quadratische Wandprobekörper der Abmessungen 1,5 m x 1,5 m werden hergestellt und mittels eines beidseitigen Glatstrichs luftdicht gemacht.</p>	
<p>Die Prüfung erfolgte in der Hotbox nach dem Heizkastenverfahren mit dem Wärmestrommesser nach der Trocknung</p>	





Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München
Lochhamer Schlag 4 | DE-82166 Gräfelfing

T+49 89 85800-0 | F +49 89 85800-40
info@fiw-muenchen.de | www.fiw-muenchen.de