

Forschungsbericht

Festlegung von Bemessungswerten für die Wärmeleitfähigkeit

T 2728

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

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

© Copyright by Fraunhofer IRB Verlag

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

Fraunhofer IRB Verlag
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau
Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08
e-mail irb@irb.fhg.de
URL <http://www.irb.fhg.de>

Fraunhofer-Institut für Bauphysik

Institutsleiter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Dr. E.h. Karl A. Gertis

Amtlich anerkannte Prüfstelle für die Zulassung neuer Baustoffe, Bauteile und Bauarten
Forschung · Entwicklung · Prüfung · Demonstration · Beratung

GB 116/1994

Festlegung von Bemessungswerten für die Wärmeleitfähigkeit

Forschungsvorhaben Nr. IV-5-463/86
im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik

Der Bericht umfaßt:

36 Seiten Text

4 Tabellen

7 Bilder

1 Anhang

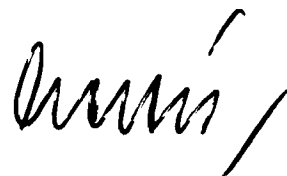
Stuttgart, 26. September 1994

Bearbeiter und
Abteilungsleiter:



Dipl.-Phys. N. König

Institutsleiter:



Prof. Dr. Dr. h. c.
Dr. E. h. K. Gertis

Fraunhofer-Institut für Bauphysik

IBP-Bericht B-GB 116/1994

Festlegung von Bemessungswerten für die Wärmeleitfähigkeit

von
N. König

(Leitung: Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. sc. techn. h. c. Dr.-Ing. E. h. Karl A. Gertis)

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	4
2. Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen unter Prüfbedingungen	6
2.1 Allgemeines	
2.2 Stichproben, Probekörper	
2.3 Auswertung von Versuchsergebnissen	
2.4 Rechnerische Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit	
2.5 Wärmeleitfähigkeitsgruppen	
3. Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen im eingebauten Zustand	12
3.1 Allgemeines	
3.2 Physikalische Parameter	
3.3 Alterung, Dauerhaftigkeit	
4. Wärmedurchlaßwiderstand von Bauteilen	17
4.1 Regelquerschnitt	
4.2 Sicherheitsniveau	
4.3 Bemessungswert des Durchlaßwiderstandes	
4.4 Transmissionsverluste an Bauteil-Stößen	
4.5 Rechnerischer Nachweis	
4.6 Konstruktionsregeln	
5. Heizwärmebedarf von Räumen und Gebäuden	25
6. Überwachung	26
6.1 Herstellung, Prüfpläne	
6.2 Einbau	
7. Umsetzung	28
8. Zusammenfassung	28
9. Literatur	30
10. Verwendete Formelzeichen	33
11. Anhang	34

1. Einleitung

Ziel dieses Vorhabens ist die Entwicklung eines Sicherheitskonzepts für die Festlegung des Wärmedurchlaßwiderstandes von Bauteilen und damit für die Einhaltung der Anforderungen an den Wärmeschutz. Der Schwerpunkt liegt auf der Bestimmung logisch abgeleiteter Bemessungswerte für die Wärmeleitfähigkeit der Bauprodukte oder des Wärmedurchlaßwiderstandes von Bauteilen unter Labor- und Praxisbedingungen.

Im Hinblick auf die Bauproduktenrichtlinie, in Deutschland umgesetzt durch das Bauproduktengesetz [1], werden derzeit in CEN TC 88 "Wärmedämmstoffe" und TC 89 "Wärmeschutz" die in den einzelnen Mitgliedsstaaten der EG geltenden Regeln für die Festlegung von Rechenwerten der Wärmeleitfähigkeit verglichen. Es ist festzustellen, daß ein mathematisch nachvollziehbares Gesamtkonzept für die Verknüpfung aller Einflußparameter zum Wärmeschutz von Bauteilen und Gebäuden nicht existiert; die hier vorgestellte Methode soll dazu einen Beitrag leisten.

Im Rahmen dieses Bemessungskonzeptes werden folgende Stufen unterschieden:

- Stufe 1: Wärmeleitfähigkeit von Baustoff-Proben unter Prüfbedingungen
- Stufe 2: Wärmeleitfähigkeit von Baustoff-Schichten unter baupraktischen Bedingungen
- Stufe 3: Wärmedurchlaßwiderstand von Bauteilen (unendlicher Ausdehnung) als Regelquerschnitt
- Stufe 4: Wärmedurchlaßwiderstand an Bauteilrändern und anderen Unregelmäßigkeiten
- Stufe 5: Heizwärmebedarf von Räumen und Gebäuden

Die Beurteilung von Bauprodukten erfolgt versuchsmäßig auf Stufe 1, mit nachfolgender Festlegung der Baustoffspezifikation. In Stufe 2 geht es um das Verhalten von Baustoff-Schichten im eingebauten Zustand, d. h. unter Bedingungen, die von den Prüfbedingungen abweichen, jedoch der Praxis

nachgestellt sind, und die auch die Dauerhaftigkeit bestimmen. Stufe 3 entspricht dem Bauteilnachweis hinsichtlich Mindestwärme- und Tauwasserschutz sowie energiesparendem Wärmeschutz. Stufe 4 betrifft im wesentlichen die konstruktive Ausführung und Ausführungsqualität und beeinflußt wesentlich den Mindestwärmeschutz und die Tauwasserfreiheit an Schwachstellen. In Stufe 5 wirken Bauteileigenschaften und alle Parameter, welche die Energiebilanz beeinflussen, zusammen, wie z.B. der Wohnbetrieb (Nutzer) und die Solarenergienutzung; sie führen zur Auslegung der Heizungsanlage.

Für das Sicherheitskonzept gelten grundsätzlich die Festlegungen der "Grundlagen zur Beurteilung von Bauprodukten, Bauteilen und Bauarten" des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) [2] in Verbindung mit den "Grundlagen" des NABau [3]. Im Rahmen dieser Ausarbeitung erfolgt eine Umsetzung der in [2] und [3] verankerten Konzepte auf den Wärmeschutz von Bauteilen. Hinsichtlich der analogen internationalen Dokumente wird auf Eurocode 1 [4], ISO 2394 [5], den Kommentar hierzu [6] sowie die Grundlagen für die Qualitätssicherung seitens des JCSS [7] verwiesen.

Bei diesen Grundlagen wirkte Frau Dr.-Ing. M. Kersken-Bradley, München, mit; deshalb erging ein Teilauftrag zur Anpassung des probabilistischen Bemessungskonzepts an sie. Für die engagierte Mitarbeit und die wertvollen Hinweise zur Verwendung von Beiwerten und Verteilfunktionen bedankt sich der Verfasser sehr.

2. Wärmeleitfähigkeit von Bauprodukten unter Prüfbedingungen

2.1 Allgemeines

Aufgrund festgelegter Prüfbedingungen wird für eine Probenmitteltemperatur von 10 °C die Wärmeleitfähigkeit an trockenen Bauprodukten $\lambda_{10, tr}$, oder bei verschiedenem Feuchtegehalt nach DIN 52612 [8] als λ_z bestimmt. Die Festlegung von Rechenwerten der Wärmeleitfähigkeit erfolgt auf 3 Wegen [9], nämlich:

- a) Für gebräuchliche, genormte Stoffe werden die praktischen Feuchtegehalte an ausgeführten Bauten gemessen und genormt. Der Arbeitsausschuß DIN 4108 des NABau legt die Zuschlagswerte Z für den Einfluß des praktischen Feuchtegehalts, der Alterung und der unvermeidbar auftretenden Beschädigungen oder sonstigen Unzulänglichkeiten auf den Rechenwert der Wärmeleitfähigkeit sowie die Rechenwerte λ_R fest. Diese Werte sind in DIN 4108 [10], T. 4, wärme- und feuchteschutztechnische Kennwerte, veröffentlicht.
- b) Für gebräuchliche, genormte Bauprodukte, die nicht in [10] enthalten sind, erfolgt nach einer Beratung im Sachverständigenausschuß (SVA) eine Festlegung der Rechenwerte λ_R durch den Bundesminister für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau. Der im Bundesanzeiger veröffentlichte Wert λ_R darf für Berechnungen nach der Wärmeschutzverordnung verwendet werden.
- c) Neue Bauprodukte, Bauteile und Bauarten im Sinne der Landesbauordnungen bedürfen eines Verwendbarkeitsnachweises, z.B. durch eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung des DIBt. Die Untersuchungsergebnisse werden im SVA beraten, die festgesetzten Rechenwerte in der Zulassung verankert und im Bundesanzeiger veröffentlicht.

Die meßtechnisch ermittelte Wärmeleitfähigkeit (s.o.) gilt für Baustoff-Proben bestimmter Abmessungen und wird anhand vereinbarter (bzw. entsprechend kalibrierter) Meßverfahren ermittelt.

Bei der Stichprobenentnahme und -auswertung zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit sind folgende Unsicherheiten zu berücksichtigen:

- a) produktionsbedingte Streuungen von Baustoffeigenschaften bei Herstellung innerhalb eines Werkes oder im Freien auf der Baustelle, ggf. auch unter Berücksichtigung der Auswirkung saisonaler Fertigung
- b) systematische und/oder zufällige Unterschiede zwischen verschiedenen Werken/Herstellern
- c) statistische Unsicherheiten aufgrund eines beschränkten Stichprobenumfanges, die durch Vorinformation aufgrund früherer Messungen und ggf. verfügbare Rechenmodelle vermindert werden können.

Die unter a) genannten Unsicherheiten sind auch bei der Festlegung von Stichprobenentnahme und -auswertung für die Güteüberwachung zu berücksichtigen (siehe [11], dort Ziffer 6). Dies gilt auch für Unsicherheiten hinsichtlich eines Wechsels von Grundmaterialien im Zuge der Produktion, die sinnvoll nur im Rahmen der Güteüberwachung erfaßt werden können.

Die Auswertung der Meßergebnisse erfolgt mit dem Ziel, eine Kenngröße der Wärmeleitfähigkeit zu bestimmen

- a) für die Produktspezifikation im Rahmen der Normung oder Zulassung
- b) für die Güteüberwachung (siehe Ziffer 6),
- c) als Eingangsgröße für die Stufe 2 oder 3.

Als Kenngröße wird i. a. ein Schätzwert als 90 %-Fraktile der Wärmeleitfähigkeit unter Prüfbedingungen in der erwarteten Produktion vereinbart. Er wird im folgenden mit $\lambda_{b,k}$ bezeichnet.

2.2 Stichproben, Probekörper

Die Stichprobe soll repräsentativ sein für den vorgesehenen Geltungsbereich der Produktbeschreibung und somit mehrere Lose umfassen. Dabei sind die Betrachtungseinheiten "Bauprodukte eines Loses", "Lose aus einem Werk", "Lose aus verschiedenen Werken oder Herstellbetrieben" zu unterscheiden. Eine zufällige Probenentnahme ist immer korrekt im Sinne der Statistik. Bei Vorliegen von weiteren Informationen über die "Struktur", d.h. Art und Weise der Produktion sind auch andere Entnahmeverfahren möglich, vgl. [11].

2.3 Auswertung von Versuchsergebnissen

2.3.1 Allgemeines

Als Kenngröße der Wärmeleitfähigkeit wird der 90 %-Fraktilewert in der vorgesehenen Produktion statistisch geschätzt. Für die Ermittlung von Fraktilewerten von Bauprodukteigenschaften sind Annahmen hinsichtlich der statistischen Verteilung erforderlich. Es wird vereinbart, die Gesamtheit $X = \ln(\lambda_b)$ als normalverteilt anzunehmen. Ein Beispiel hierzu ist als gemessene Häufigkeitsverteilung in Bild 1 und als Regressionskurve über der Rohdichte für Bimsleichtbeton in Bild 2 dargestellt.

Der 90 %-Fraktilewert ist unter Berücksichtigung der in Ziffer 2.1 genannten Unsicherheiten zu bestimmen. Die statistischen Verfahren zur Berücksichtigung statistischer Unsicherheiten sind z. B. [12, 13] zu entnehmen und in Anlage 1 zusammengestellt. Erfolgte die Stichprobenentnahme nur an einem Los, muß die beobachtete Stichprobenstreuung $s^2 = s_{x,L}^2$ empirisch vergrößert werden:

$$S_X^2 = S_{X,L}^2 + S_{M,L}^2 = S_{X,L}^2(1 + 1/n_e) \quad (2.1)$$

$s_{M,L}$ ist die Streuung der Losmittelwerte zwischen verschiedenen Losen in der vorgesehenen Gesamtproduktion; $s_{M,L}$ oder n_e muß für verschiedene Stoffgruppen aufgrund von Erfahrung festgelegt oder vereinbart werden.

Liegen nur Ergebnisse aus einem Herstellwerk vor, sollte die beobachtete Streuung $s^2 = s_{x,H}^2$ ebenfalls empirisch nach gleichem Schema vergrößert werden:

$$s_X^2 = s_{x,H}^2 + s_{M,H}^2 = s_{x,H}^2(1 + 1/n_E) \quad (2.2)$$

wobei $n_E > n_e$ ist und analog festgelegt wird. Bei Annahme, daß $x = \ln(\lambda)$ normalverteilt ist, beziehen sich Gleichung (2.1 u. 2) auf die Streuung von $x = \ln(\lambda)$ und gelten dann näherungsweise für die entsprechenden Variationskoeffizienten von λ .

Liegen auch Ergebnisse aus vorangegangenen Versuchen an Baustoffproben vor, die hinsichtlich Mittelwert und/oder Streuung mit dem aktuellen Baustoff vergleichbar sind, dürfen diese Ergebnisse nach den üblichen statistischen Methoden bei der Auswertung berücksichtigt werden (siehe z. B. [1]). Bei der Festlegung von Kennwerten zur Baustoffbeschreibung wird angenommen, daß die Auswirkung eines Wechsels von Grundmaterial (z.B. eine andere Leichtzuschlagsorte) entweder im Rahmen der "normalen" Streuung zwischen Losen liegt, oder aber im Rahmen der Güteüberwachung identifiziert (und aussortiert) wird, falls daraus systematisch ungünstigere Wärmeleitfähigkeiten erreicht werden. Der Hersteller kann sich eine größere Freiheit hinsichtlich des verwendeten Grundmaterials sichern, wenn er über eine vergrößerte Streuung s_x einen höheren Kennwert (nächste Wärmeleitfähigkeitsgruppe) akzeptiert.

2.3.2 Bauprodukte mit nur einer Spezifikation

Verfahren für die Auswertung von Versuchsergebnissen von Bauprodukten, die planmäßig nur für einen Parametersatz hergestellt werden (beispielsweise nur mit einer Rohdichte) sind im Anhang angegeben. Aufgrund des so ermittelten Kennwerts $\lambda_{b,k}$ erfolgt die Einordnung in Wärmeleitfähigkeitsgruppen nach Ziffer 2.4/2.5 und/oder EN 30456 (ISO 10456) [14].

2.3.3 Bauprodukte mit verschiedenen Spezifikationen

Die folgenden Regeln gelten für Bauprodukte, die mit variierten Parametersätzen hergestellt werden, beispielsweise mit verschiedenen Rohdichteklassen mit geänderten Stoffmischungen. Für die Stichprobenentnahme gilt dann:

- Stichproben sollen über den vorgesehenen Geltungsbereich so verteilt sein, daß Unsicherheiten in den Regressionsbeziehungen möglichst gering sind.
- Ist bekannt, daß bestimmte Rohdichteklassen häufiger verwendet werden als andere, sollen diese Klassen entsprechend häufiger in der Stichprobe vertreten sein.

Die Meßwerte der Wärmeleitfähigkeit sind gegenüber dem variierten Parameter y (z. B. $y = \rho$) aufzutragen (Bild 2). Die Ermittlung von Kennwerten als Fraktilwerte $\lambda_{b,k}$ in Abhängigkeit vom Parameter y ist im Anhang für eine lineare Regression gezeigt. Es darf über den Parameterbereich, der durch die Stichproben abgedeckt wurde, hinaus extrapoliert werden, was jedoch unwirtschaftlich sein kann, weil außerhalb des (abgesicherten) Wertebereichs die „Sicherheitszuschläge“ deutlich höher sind. Werden zu einem späteren Zeitpunkt zusätzliche Versuche durchgeführt, um Wärmeleitfähigkeiten für z.B. höhere oder niedrigere Rohdichteklassen festzulegen (statt vorgenannter Extrapolation), so werden in der Regel auch für den Bereich, der bis dato durch Stichproben abgedeckt war, günstigere Wärmeleitfähigkeiten ermittelt, da sich die Toleranz- oder Vertrauensbereiche verkleinern.

2.4 Rechnerische Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit

Wird die Wärmeleitfähigkeit von Produkten, die aus verschiedenen Stoffen zusammengesetzt sind und komplexere geometrische Strukturen aufweisen, rechnerisch als sogenannte äquivalente oder effektive Wärmeleitfähigkeit ermittelt, so sind die Randbedingungen des rechnerischen Nachweises so zu wählen, daß die Rechnung der versuchsmäßigen Bestimmung entspricht. Liegen Vergleiche zwischen rechnerisch und experimentell ermittelter Wärmeleitfähigkeit vor, sind - ggf. produktabhängige - Korrekturen des Rechenmodells vorzunehmen, um die Kompatibilität zwischen Versuch und Rechnung sicherzustellen [15, 16] und um systematische Unterschiede zwischen Versuch und Rechnung zu vermeiden. Für die Eingangsgrößen in die Computer-Berechnungen nach der Finiten-Differenzen-Methode gilt folgendes:

- Die einzelnen Bauprodukte werden hinsichtlich der Rohdichte mit dem jeweiligen Mittelwert, bezogen auf die Steinrohrichteklassengrenzen ohne Hohlkammern und hinsichtlich der Wärmeleitfähigkeit mit dem Kennwert $\lambda_{b,k}$ berücksichtigt.
- Geometrische Größen (Schichtdicken, Abmessungen von Hohlräumen und Fugen) dürfen mit ihren Nennwerten angesetzt werden, außer daß erhebliche Abweichungen bei der Herstellung zu erwarten wären; in diesem Fall sind die Toleranzgrenzen anzunehmen.

Der so ermittelte Wert für die äquivalente Wärmeleitfähigkeit gilt als Kennwert $\lambda_{b,k,(eff)}$ analog zu einem Kennwert, der aufgrund Auswertung experimenteller Daten ermittelt wurde.

2.5 Wärmeleitfähigkeitsgruppen

Durch Bildung von Wärmeleitfähigkeitsgruppen soll eine vernünftige Handhabung zahlenmäßiger Angaben der Wärmeleitfähigkeit in der Praxis erreicht werden. Bei den Vorschlägen nach [17,18] handelt es sich nicht um eine Klassifizierung von Stoffen im Sinne der Zuverlässigkeit, sondern um ein Kriterium für die zweckmäßige Rundung, um z. B. dem Eindruck vorzubeugen,

daß ein Stoff mit Kennwert $\lambda_{b,k} = 0.0329$ besser sei als ein Stoff mit Kennwert $\lambda_{b,k} = 0.0331$. Hierdurch ist sichergestellt, daß nur deutliche Produktverbesserungen sich in Kennwerten "vermarkten" lassen. Die in DIN 4108 enthaltenen Klassenschranken bei Dämmstoffen von 5 mW/m·K sollen im europäischen Regelwerk auf 3 oder 2 mW verkleinert werden, abhängig von der Zahl der Stichproben (Meßergebnisse) und deren Streuung (Standardabweichung, Toleranzgrenzen) [19]. Allerdings muß gemäß Grundlagendokument 6 [1] bei allen Meß- und Auswerteprozeduren die Genauigkeit angegeben werden. Klasseneinteilungen dürfen nicht feiner als die Genauigkeit gewählt werden.

3. Wärmeleitfähigkeit von Bauprodukten im eingebauten Zustand

3.1 Allgemeines

Im eingebauten Zustand ist die Wärmeleitfähigkeit des Baustoffs (oder Bauproduktes) abhängig von

- der aktuellen "Beanspruchung" durch Stoff-Temperatur und -Feuchtigkeit, Luftanströmung, Druckspannung (Perimeter, Parkdecks)
- der Einwirkungsdauer und der "Beanspruchungs-Geschichte"
- der Probengröße und ggf. der anteiligen Fugenfläche an Baustoff-Stößen in Schichtebene.

Die Beanspruchungen unterliegen systematischen Unterschieden, zufälligen Streuungen und werden auch von der Ausführungsqualität bestimmt. Die Wärmeleitfähigkeit im eingebauten Zustand (λ_p) ist unter Berücksichtigung der vorgesehenen Einsatzdauer und der zu erwartenden Beanspruchung und der damit verbundenen Unsicherheiten zu ermitteln. Als Eingangsgröße in die folgenden Stufen ist die Wärmeleitfähigkeit als 90 %-Fraktilwert definiert und wird dann als charakteristischer Wert $\lambda_{p,k}$ bezeichnet. Grundsätzlich sollen die genannten Beanspruchungen so angesetzt werden, daß sie für die vorgesehene Verwendung als repräsentativ gelten können. Hinsichtlich der Modellbildung ist zu unterscheiden zwischen Beanspruchungen, die als physikalische Parameter (z) die Wärmeleitfähigkeit (Feuchte, Temperatur,

Konvektion, Strahlung u. a.) und die Dauerhaftigkeit bestimmen (Druckbelastung, Hydrolyse u. a.). $\lambda_{p,k}$ wird aus $\lambda_{b,k}$ wie folgt ermittelt:

$$\lambda_{p,k} = \lambda_{b,k} \times f(z) \times f(k) \times f(T_o) \times f(A) \quad (3.1)$$

wobei

$\lambda_{b,k}$ der Kennwert der Wärmeleitfähigkeit nach Stufe 1

$f(\cdot)$ Umrechnungsfaktoren zur Erfassung der Beanspruchungen im eingebauten Zustand.

3.2 Physikalische Parameter

3.2.1 Funktionale Abhängigkeit

Es wird davon ausgegangen, daß der Zusammenhang zwischen λ oder $x = \ln(\lambda)$ und den physikalischen Parametern (z) zur Beschreibung der aktuellen Beanspruchung aufgrund empirischer Regressionsmodelle oder physikalisch begründeter Rechenmodelle näherungsweise bekannt ist [14, 15]. Unsicherheiten in der Regressionsbeziehung brauchen in der Regel nicht berücksichtigt zu werden. Die Streuung von $x = \ln(\lambda)$ darf über den gesamten Parameterbereich als konstant angesetzt werden. Mit diesen Annahmen bestimmt man für gegebene Parameter z dann $\lambda_k(z)$ bzw. $f(z)$; Beispiel siehe Bild 2.

3.2.2 Ermittlung der Parameter

Die maßgebenden Parameter können rechnerisch im Einzelfall, aufgrund von Meßdaten an eingebauten Stoffen oder aufgrund von Meßdaten in Verbindung mit Rechnung bestimmt werden. Im folgenden werden diese Möglichkeiten erläutert.

Rechnerische Ermittlung

Die aktuelle Beanspruchung des Stoffes ergibt sich aus den zeitlich veränderlichen klimatischen "Einwirkungen" auf beiden Seiten des Raumabschlusses: (Lufttemperatur, -feuchte und -druck), die wiederum von Art und Ort der Anwendung abhängen z. B. als Dämmstoff relativ ungeschützt unter

Putz auf einer Außenwand oder "trocken" unter einer Dachhaut (vgl. ISO 9774 [20]). Für die verschiedenen Anwendungen könnten (normierte) Zeitverläufe dieser Einwirkungen vorgegeben werden die aufgrund klimatischer Meßdaten festgelegt sind oder die sich zu Mittelwerten "integrieren" lassen. Für einen gegebenen Schichtaufbau und eine gegebene Anwendung kann mittels iterativer Rechnung die aktuelle Beanspruchung z zu einem beliebigen Zeitpunkt t als Funktion von $F(t)$ und $\lambda(\underline{z})$ ermittelt werden, und zwar je Stoffschicht [21]. Unter Berücksichtigung der maßgebenden Übergangswiderstände entspricht diese Vorgehensweise einem Modell des zeitlich veränderlichen Transmissionsverlustes von Bauteilen. Als generelles Verfahren für die Bauteilbemessung ist diese Vorgehensweise zu aufwendig. Ferner sind die Unsicherheiten bei der Beschreibung der Feuchte als Einwirkung und bei der Bestimmung der resultierenden Stoff-Feuchte erheblich [22] und deshalb nur in Sonderfällen (z. B. Perimeterdämmung) zweckmäßig.

Messungen an eingebauten Stoffen

Für verschiedene Stoffgruppen und Schichtaufbauten können die Parameter \underline{z} (je Stoffschicht) durch Messungen im eingebauten Zustand ermittelt werden, z. B. nach [8]. Dabei wird vorausgesetzt, daß die Messungen wärmetechnisch maßgebende Zeiträume erfassen und gleichzeitig die zugehörigen klimatischen Einwirkungen im Labor registriert werden. Ebenso wird angenommen, daß die jeweiligen Durchlaßwiderstände unter Verwendung der Meßergebnisse hinreichend genau bestimmt werden können. Sofern die untersuchten Anwendungen und Schichtaufbauten für die betrachtete Stoffgruppe (z. B. Mehrschichtplatte) als repräsentativ gelten kann, werden zunächst aufgrund aller Daten Parameter-Werte z_p so festgelegt, daß sie nur in etwa 10 % der Fälle zur ungünstigen Seite hin unterschritten werden. Nun werden für die untersuchten Fälle die Durchlaßwiderstände jeweils mit z_p berechnet und dann mit den meßtechnisch ermittelten Durchlaßwiderständen verglichen. Ist der relative Fehler größer als q (Vorschlag: 10 %), so ist \underline{z}_p bzw. $\lambda(\underline{z}_p)$ für verschiedene Anwendungskategorien nach Ziffer 3.3 anzupassen; andernfalls genügt es, nur einen Parametersatz \underline{z}_p für die Bemessung zu berücksichtigen.

Rechnung in Verbindung mit Messungen

Umfassende Messungen, wie sie an eingebauten Stoffen für alle wesentlichen Stoffgruppen erforderlich wären, sind in der Regel nicht vorhanden. Daher gilt es, anhand ausgesuchter Fälle gemessene und rechnerisch ermittelte Parameter (\underline{z}) zu vergleichen und erforderlichenfalls die rechnerische Ermittlung zu korrigieren. Analog zu Messungen werden für diese Fälle die Durchlaßwiderstände jeweils mit \underline{z}_p und den "genauen" rechnerisch ermittelten Parametern \underline{z} korrigiert. Ist der relative Fehler größer als q , so ist \underline{z}_p bzw. $\lambda(\underline{z}_p)$ für besonders kritische Anwendungskategorien [20] anzupassen. Andernfalls genügt es wiederum, nur einen Parametersatz \underline{z}_p zu berücksichtigen.

3.3 Alterung, Dauerhaftigkeit

Die Beurteilung des zeitabhängigen Verhaltens der Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen erfordert die Kenntnis aller wesentlichen Einflußgrößen bei speziellen Anwendungen; Beispiele sind in [20] gegeben. Eine Gebrauchstauglichkeit wird von der Dauerhaftigkeit der Baustoffe bestimmt; bei den zeitlichen Veränderungen sind zu unterscheiden:

- Veränderungen, die relativ unabhängig von der Beanspruchung (durch Temperatur, Feuchte usw.) auftreten, Alterung, Veränderungen sind ausschließlich zeitabhängig, z. B. beim Gasaustausch in Hartschäumen (bei mittlerem Temperaturniveau).
- Veränderungen, die vom mittleren Beanspruchungsniveau abhängen, z.B. von der durchschnittlichen Temperatur und Feuchte ("Dauerstandverhalten" bei Perimeterdämmung).
- Veränderungen, die durch wechselnde Beanspruchung hervorgerufen werden ("Ermüdung": abhängig von der Anzahl der Beanspruchungs-Amplituden, bei Frost-Tauwechsel-empfindlichen Stoffen).
- Veränderungen, die durch einmalige (oder erstmalige) Extrembeanspruchung hervorgerufen werden, z. B. Bruch beim Verlegen des Stoffes.

Im zeitlichen Verlauf kann die Veränderung quasi kontinuierlich sein (z. B. bei Ausgasen in Hartschäumen oder zu einem bestimmten Zeitpunkt spontan erfolgen. Im zweiten Fall bestimmt dieser Zeitpunkt die Lebensdauer. Aufgrund der zeitlichen Veränderlichkeit ist es erforderlich, den Wärmeschutz für die Nutzungsdauer des Bauwerks zu sichern. Hierzu gibt es verschiedene Möglichkeiten:

1. Korrektur (Erhöhung) der Wärmeleitfähigkeit für die Bemessung
2. Vorgabe von Anwendungsbedingungen zur Vermeidung planmäßig kritischer Beanspruchungen
3. Qualitätssicherungsmaßnahmen zur Vermeidung unplanmäßig kritischer Beanspruchungen beim Einbau und während der Nutzung (Instandhaltung)
4. Begrenzung der Einsatzdauer ggf. in Verbindung mit planmäßiger Erneuerung

Das Vorgehen basiert im wesentlichen auf einer wirtschaftlichen Entscheidung, abhängig von der vorgesehenen Lebensdauer des Bauwerks, den Material- und Einbaukosten und insbesondere von den Instandhaltungs- und Erneuerungskosten. Technische Kriterien hierbei sind die Ursache für die zeitliche Veränderung und der zeitliche Verlauf. Eine Korrektur der Wärmeleitfähigkeit für die Bemessung ist nur sinnvoll bei Veränderungen, die quasi kontinuierlich verlaufen. In diesem Fall kann eine mittlere Wärmeleitfähigkeit (Zeitmittel) für einen Bezugszeitraum T_0 geschätzt werden:

$$\bar{\lambda}(T_0) = \int_0^{T_0} \lambda(t) dt = \lambda_b f(T_0) \quad (3.2)$$

Hinsichtlich des Zeitraumes T_0 wird vorgeschlagen, 50 Jahre anzusetzen. Für Anwendungen von Dämmstoffen, die sehr leicht ausgewechselt werden können, dürften auch kleinere Bezugszeiträume angesetzt werden, etwa 20 Jahre.

Mit dem Umrechnungsfaktor $f(T_0)$ kann auch ein Schwinden senkrecht zur Schichtebene erfaßt werden. Demgegenüber ist bei Baustoffen, bei denen die Wärmeleitfähigkeit mehr oder minder spontan zu einem Zeitpunkt T_c auf ein Vielfaches ansteigen kann, im Prüfbescheid eine der Möglichkeiten 2 bis 4 vorzusehen, d. h. entweder durch die Vorgabe von Anwendungsbedingungen oder einer Überwachung des Einbaus oder mit einem Hinweis auf begrenzte Lebensdauer. Diese Möglichkeiten gelten auch für Fälle, bei denen ein plötzlicher Verlust der Formstabilität nicht ausgeschlossen werden kann (z. B. bei Wasserzutritt in eine Zellulosedämmschicht).

4. Wärmedurchlaßwiderstand von Bauteilen

4.1 Regelquerschnitt

Ziel der Bauteilbeschreibung ist die Bestimmung des Wärmedurchlaßwiderstandes - im folgenden mit R bezeichnet (Wärmeleitwiderstand) - für den Bauteilnachweis als Regelquerschnitt und als Eingangsgröße für Stufe 4 und 5, d. h. für Bauteile mit Bauteilrändern und für ganze Räume. Die Bauteilnachweise betreffen den Mindestwärmeschutz von Einzelbauteilen als

$$R \geq \min R \quad (4.1)$$

und dabei speziell den Tauwasserschutz von Einzelbauteilen auf Oberflächen mit:

$$R \geq S \quad \text{mit } S = R(\tau) \text{ bzw. } \min R \quad (4.2)$$

sowie im Bauteil-Innern mit

$$p_s(R, \dots) \geq p(\varphi, \dots) \text{ bzw.} \quad (4.3)$$

$$W_t(R, \dots) < \text{zul } W_t \quad (4.4a)$$

$$W_v(R, \dots) \geq W_t(R, \dots) \quad (4.4b)$$

Anhand der Bedingungen (4.1) bis (4.4b) ist nachzuweisen, daß die Grenzzustände "Unterschreiten festgelegter Durchlaßwiderstände" und "Bildung

von Tauwasser" nicht erreicht werden. Dabei sind den Bedingungen (4.2), (4.3) und (4.4b) speziellen physikalischen Zustände zugeordnet; die Bedingungen (4.1) und (4.4a) entsprechen hingegen vereinbarten oder anderweitig abgeleiteten Grenzen. Daher muß bei Sicherheitsbetrachtungen hinsichtlich der Bedingungen (4.1) und (4.4b) auch die statistische Interpretation der Grenzwerte R_{\min} und Wt_{zul} berücksichtigt werden [23].

4.2 Sicherheitsniveau

Betrachtet man den Mindestwärmeschutz zunächst unabhängig vom Tauwasserschutz, d. h. nur das zugrundeliegende Behaglichkeitskriterium [10], so gelten folgende Überlegungen: Für eine gegebene Außenwand ist die Varianz in der Oberflächentemperatur eine tageszeitlich veränderliche Größe und abhängig vom Zustand der Wandbaustoffe (vgl. Bild 3), d. h. von der relativen Änderung der Wärmeleitfähigkeit. Aufgrund der Bedingung (4.1) kann die Summe der Zeitintervalle T_i begrenzt werden, während der die Taupunkttemperatur überschritten wird. Die der Bemessung zugrundeliegende Wahrscheinlichkeit

$$P(R > R_{\min}) = \Sigma T_i / T = p \quad (4.5)$$

entspricht somit der anteiligen Zeitdauer, während der eine Unterschreitung der Taupunkttemperatur stattfindet. Das bedeutet, daß implizit R_{\min} so festgelegt ist, daß dieser Wert nur in p % der Fälle unterschritten wird: Der Bemessungswert von R (R_d) entspricht mithin einem p %-Fraktilwert.

Betrachtet man nun den Mindestwärmeschutz in Verbindung mit dem Tauwasserschutz (zunächst nur vereinfachend die Bauteiloberflächen betreffend), so sind im Falle, daß Bedingung (4.2) nicht eingehalten wird, die Folgen in der Regel weitreichender:

1. Das Behaglichkeitskriterium wird weit überschritten.
2. Bleibende Tauwassermassen beeinträchtigen die Bausubstanz bis hin zu den tragenden Bauteilen.

3. Bleibende Tauwassermassen verschlechtern weiter den Wärmeschutz und das Raumklima und können zur Beschädigung von Sachgütern führen.

Somit sollte die Wahrscheinlichkeit

$$P(R > S) = p_f \quad (4.6)$$

kleiner sein als für das reine Behaglichkeitskriterium nach Gleichung (4.5). Sie muß an der bisherigen Praxis kalibriert werden. Vorläufig wird von $p_f = 10^{-3}$ ausgegangen, was einem Sicherheitsindex von $\beta = \phi^{-1}(p_f) = 3.0$ entspricht, vgl. [3].

Der Empfindlichkeitsbeiwert oder Wichtungsfaktor α_R für den Durchlaßwiderstand kann analog zum Widerstand gegenüber mechanischen Einwirkungen mit $\alpha_R = 0.8$ angesetzt werden. Mithin ist der entsprechende Bemessungswert über die Verteilfunktion $\phi(+0.8 \times 3.0)$ als 99 % oder 1 % Fraktile festgelegt. Sofern aufgrund der Kalibrationsrechnungen $\beta = 2.0$ genügt (z. B. bei untergeordneten Bauteilen), hätte dies den Vorteil, daß der Teilsicherheitsbeiwert γ_m nach Abschnitt 4.3 zu 1.0 wird; aus der Zuordnung $\phi(+0.8 \times 2.0)$ wird die 95 % oder 5 % -Schranke d. h. der charakteristische Wert ist gleichzeitig Bemessungswert. Bei einem Fraktilwert 90 % wäre alternativ $\beta = 1,6$.

Das gleiche Sicherheitsniveau wie für die Bedingung (4.2) ist auch für (4.4a) und (4.4b) anzusetzen. Anders könnte der Grenzzustand, der Bedingung (4.3) zugrundeliegt, bewertet werden: auch wenn der Wasserdampfteildruck den Sättigungsdruck erreicht, ist dieser Zustand noch zulässig - sofern Bedingung (4.4), keine unzulässige Wasseransammlung eingehalten wird. Insofern könnte der Bedingung (4.3) eine größere Wahrscheinlichkeit zugeordnet werden, z.B. $p_f = 10^{-2}$ d.h. nur 1% Unsicherheit.

4.3 Bemessungswert des Durchlaßwiderstandes

4.3.1 Allgemeines

Je nach Bauteilart wird die Wärmeleitfähigkeit oder der Wärmedurchlaßwiderstand eines homogenen oder geschichteten Bauteils rechnerisch ein- oder mehrdimensional oder durch Messung ermittelt; dies kann auch rechnerisch anhand von Regressionsbeziehungen, die aufgrund von Messung oder Berechnungen abgeleitet wurden, erfolgen. Dabei gilt es, den Bemessungswert λ_d bzw. R_d so festzulegen, daß die in Ziffer 4.2 genannte Wahrscheinlichkeit eingehalten wird. Vereinfachende Verfahren sollen dabei auf der sicheren Seite liegen.

4.3.2 Rechnerische Ermittlung, eindimensional

Für einfache Schichtbauteile, die nach [10] hinreichend zutreffend berechnet werden können, gilt

$$\begin{aligned}
 R_d &= R_{1d} + R_{2d} + \dots \quad (4.7) \\
 &= \frac{S_1}{\lambda_{bk1} \cdot \gamma_{M1}} + \frac{S_2}{\lambda_{bk2} \cdot \gamma_{M2}} + \frac{S_3}{\lambda_{bk3} \cdot \gamma_{M3}}
 \end{aligned}$$

wobei

$\lambda_{bk,i}$ charakteristischer Wert der Wärmeleitfähigkeit nach Ziffer 3.1.

γ_M Teilsicherheitsbeiwert, der zusammen mit $\lambda_{bk,i}$ folgende Unsicherheiten abdeckt:

- Streuungen der Schichtdicke
- ungünstige Abweichungen der Wärmeleitfähigkeit gegenüber dem 90 % Fraktilwert
- extreme Empfindlichkeit gegenüber der Ausführungsgenauigkeit ($\gamma_M = \gamma_m \times \gamma_{sys}$; $\gamma_{sys} = 1.0 \dots 1.2$).

Mit Bezug auf Ziffer 4.2 wird der Bemessungswert R_d für eine Unterschreitungswahrscheinlichkeit von $\phi(-\alpha_R \beta)$ bestimmt, wobei $(\alpha_R \beta) = 0.8 \times 3.0 = 2.4$. Genaugenommen könnten bei mehreren Schichten die Einzelwider-

stände für kleinere Unterschreitungswahrscheinlichkeiten $p_i = \Phi(\alpha_R \alpha_i \beta)$ bestimmt werden, wobei α_i abhängig wäre von der Art und Zahl der weiteren Schichten. Dies erscheint aber nicht praktikabel; daher wird - auf der sicheren Seite liegend - auch R_{iD} für $\Phi(\alpha_R \beta)$ bestimmt.

Der Teilsicherheitsbeiwert γ_m (ohne γ_{sys}) kann näherungsweise wie folgt berechnet werden:

$$\gamma_m = \exp(\alpha_R \beta s_\lambda - k s_\lambda - \alpha_S \beta V_S)$$

wobei

$$\alpha_S \equiv 0.8 \times 0.4 = .0,32$$

$$\alpha_\lambda \equiv 0.8 \times 1.0 = .0,80$$

und

$s_\lambda =$ die äquivalente Streuung von $\ln(\lambda)$ aufgrund des durchschnittlichen Stichprobenumfanges nach Anhang

$V_S =$ Variationskoeffizient der Schichtdicke

Für $k = 1,282$ (d. h. R_k entspricht einer 90 % Fraktile) und, $\beta = 3.0$ erhält man somit Teilsicherheitsbeiwerte aus $\gamma_M = \gamma_m \times \gamma_{sys}$ mit $\gamma_{sys} = 1.0 \dots 1.2$ (je nach Empfindlichkeit gegenüber der Ausführungsgenauigkeit) im Bereich von 0,8/0,9 für untergeordnete und von bis 1,2 für wesentliche Bauteile.

4.3.3 Ausschließlich versuchsmäßige Bestimmung

Wird der Durchlaßwiderstand von Bauteilen ausschließlich anhand von Versuchen ermittelt (ohne Rechenmodelle), sind die Versuche nach Ziffer 1.3 auszuwerten. Dabei ist $x = \ln(\Lambda)$ oder $\ln(R)$ zu setzen (vgl. auch [2]).

4.3.4 Rechnerische Ermittlung, mehrdimensional

In Ziffer 4.3.2 wurden aus Gründen der Praktikabilität die Bemessungswerte der Einzelwiderstände R_{iD} ungeachtet der Art und Anzahl der weiteren Schichten jeweils für eine Unterschreitungswahrscheinlichkeit von $p_i = \Phi(-\alpha\beta)$ ($= 0.01$) bestimmt. Interpretiert man "kompliziertere" Bauteile (z. B. mit Hohlkammern oder feuchten Schichten) dahingehend, daß der Gesamtwiderstand

anstatt einer Summe von Einzelwiderständen eine beliebige Funktion darstellt, $g(R_i)$ so ist die analoge Vereinfachung zu Ziffer 4.2.2 $g(R_{id})$ die mehrdimensionale Rechnung wird also mit den Bemessungswerten der Einzelwiderstände durchgeführt, die etwa der 1 % Fraktile entsprechen. Bei vielen Einzelwiderständen ist diese Vorgehensweise zu konservativ. In diesem Fall kann der maßgebende Einzelwiderstand mit $\alpha_{R1} = 0.8$, alle weiteren mit $\alpha_{Ri} = 0.32$ angesetzt werden, wobei der maßgebende Einzelwiderstand erst durch sukzessive Belegung aller Widerstände einmal mit 0.8, im übrigen mit 0.32 gefunden werden kann (der ungünstigste Gesamtwiderstand R_d ist maßgebend) [24].

4.3.5 Regressionsbeziehungen

Am Beispiel einer Außenwand aus quasihomogenen Mauersteinen ohne und mit einer zusätzlichen Außendämmschicht (siehe Bild 4) wird die Berechnung der Unterschreitens- oder Versagenswahrscheinlichkeit P_f und der Wichtungsfaktoren α gezeigt. Hierbei soll der Einfluß einer Putzschicht mit unterschiedlicher wasserabweisender Eigenschaft (Hydrophobierung, Schlagregenschutz) in Form des Empfindlichkeitsbeiwertes γ_u sowie die erhöhte Feuchte bei Regenperioden in der Außenzone des Wandbaustoffs durch eine Schichtdicke S_u und eine höhere Wärmeleitfähigkeit $\lambda_u (> \lambda_g)$ charakterisiert sein. In ähnlicher Weise lassen sich weitere Terme in die Gleichung einfügen, z. B. für erhöhte Druckbelastung bei Perimeterdämmung oder Veränderungen der Wärmeleitfähigkeit durch Gasdiffusion bei Hartschäumen. Die Erfüllung der Wärmeschutzanforderungen ergibt sich für die einschalige Wand als Modellgleichung zu:

$$g \geq R - \left[\frac{S_W}{\lambda_W} - \frac{S_u}{\lambda_u} \cdot \gamma_u \right],$$

und für die gedämmte Wand zu:

$$g \geq R - \left[\left(\frac{S_{D\ddot{a}}}{\lambda_{D\ddot{a}}} - \frac{S_p}{\lambda_p} \right) \gamma + \frac{S_W}{\lambda_W} \right]$$

Analog Ziffer 4.3 kann der Beiwert oder Sicherheitsindex β sowie die Versagenswahrscheinlichkeit P_f mit Hilfe der Rackwitz-Fiesler-Methode berechnet werden [25]. Hierzu sind Computerprogramme einsetzbar, die die notwendige Mehrfachiteration zur Ermittlung der Wichtungsfaktoren α erleichtern [26, Anhang 10.5], [27].

Mit den Zahlenwerten nach Tabelle 1 ergeben sich Ergebnisse für die monolithische Wand gemäß Bild 5. Unter Sollbedingungen, d. h. mit einem Einflußbereich $\gamma = 1$ der Feuchtezone, ergibt sich ein Sicherheitsindex β von ca. 2, was einer Versagenswahrscheinlichkeit von ca. 2 % zum Wärmedurchlaßwiderstand $1,0 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ entspricht. Ändert sich jedoch dieser Zustand durch einen weniger regendichten Putz (z. B. $\gamma = 1,3$) oder durch Putzrisse und große Streuung in der Standardabweichung (z. B. $\sigma = +60 \%$), dann läßt sich eine Versagensquote von $> 5 \%$ ablesen.

Wand mit Außendämmung

Entsprechende Ergebnisse sind für das Beispiel der Wand mit 80 mm Außendämmung in Tabelle 2 und Bild 6 für den Einfluß der Schichtdicke und in Tabelle 3 für die Wärmeleitfähigkeit dargestellt. Bei der Dämmschicht ist eine Verminderung der Dicke von bis -30% unkritisch zum Sollwert von $2,0 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$. Erst ein stärkerer Einfluß des (Feuchte-)Beiwertes mit $\gamma = 0,8$ ergibt eine Versagenswahrscheinlichkeit um ca. 3 %. Dies drückt sich auch in einem zunehmenden Wichtungsfaktor α aus.

Der Einfluß des Absolutwertes und der Streuung bei der Wärmeleitfähigkeit ist in Tabelle 3 gezeigt. Bei der Standardqualität (Wärmeleitfähigkeitsgruppe 040) sinkt bei großer Streuung von $\pm 30 \%$ die Erfüllungswahrscheinlichkeit um den Faktor 100 bei $\gamma = 1$ und ebenso bei einer Zunahme des Absolutwertes um $+70 \%$ auf die (schlechte Qualität) $\lambda_{D\ddot{a}} = 0,068 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$. Auch hier ist aus den jeweiligen Wichtungsfaktoren α , die in den Ergebnisdateien für jeden Parameter getrennt ablesbar sind, deren Einfluß auf das Gesamtergebnis zu erkennen.

4.4 Transmissionsverluste an Bauteilstößen

In Ziffer 3, Stufe 3 wurden Bauteile im Regelquerschnitt, d. h. mit unendlicher Ausdehnung untersucht. Die in der Praxis endliche Ausdehnung bedingt, daß Stöße von Bauteilen so auszuführen sind, daß der Transmissionswärmeverlust im Bereich der Stöße nicht wesentlich größer ist als im ungestörten Bauteil. Dies ist nicht immer konstruktiv möglich: Bei Mauersteinen sind Mörtelfugen in traditioneller Vermörtelung meist Wärmebrücken, jedoch im Rechenwert der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit (als Mittelwert) berücksichtigt. Bei Wandpanelen mit Dämmstoffeinlage oder im Metall-Fassadenbau sind Bauteilränder als "eigene Bauteile" (z. B. Rahmenprofile) im Wärmeschutz berücksichtigt. Auch hierfür gelten die üblichen Bedingungen für die Erfüllung der Anforderungen an den Mindestwärme- und Tauwasserschutz.

4.5 Rechnerischer Nachweis

Der Transmissionsverlust an Bauteil-Stößen, z. B. Ecken, Fugen, auskragenden Elementen, kann im Einzelfall rechnerisch simuliert werden. Hierfür stehen mehrdimensionale Computerprogramme zur Verfügung. Die Ergebnisse sind in ausführlichen Wärmebrückenkatalogen veröffentlicht und werden derzeit im Rahmen von CEN-Regeln harmonisiert. Als generelles Bemessungsverfahren sind derartige Rechnungen zu aufwendig. Die Wärmebrückenkoeffizienten können jedoch als ein Term in der allgemeinen Bemessungsgleichung $g_j = R-S$ berücksichtigt werden. Daher dienen sie vor allem zur Ableitung von Konstruktionsregeln, wobei es gilt, insbesondere Empfindlichkeiten gegenüber Ausführungsvarianten bis hin zu Ausführungsfehlern zu verfolgen. Ein Beispiel für den (vielfach vernachlässigten) Einfluß von Luftspalten in Stoßfugen auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit einer Außenwand ist in Tabelle 4 dargestellt. Der bei mittlerem Wärmeschutz geringe Spalteffekt ($\pm 1 \%$) steigt bei sehr gutem Mauerwerk auf $+ 7 \%$ und bei "Kühlhauswänden" auf $+ 36 \%$ an.

4.6 Konstruktionsregeln

Konstruktionsregeln im Bauwesen werden aufgrund mehrdimensionaler Rechnungen und Versuche abgeleitet. Da es auch im Bereich der Tragfähig-

keit noch keine Sicherheitskonzepte für das Konstruieren gibt, werden Konstruktionsregeln hier nicht im Einzelnen verfolgt.

5. Heizwärmebedarf von Räumen und Gebäuden

Der rechnerische Heizwärmebedarf oder Heizenergieverbrauch von Gebäuden ist zunächst auf eine energiepolitische oder privatwirtschaftliche Optimierung ausgerichtet. Dabei ist die korrekte statistische Behandlung von wärmetechnischen Kennwerten (und aller anderen Daten) von ähnlicher Bedeutung wie bei Nachweisen von Mindest-Anforderungen, wobei der Schwerpunkt allerdings auf Erwartungswert-Bildungen liegt, unter Verwendung von Randbedingungen, die zumeist per Konvention festgelegt sind.

Der erforderliche Wärmedurchlaßwiderstand kann aus dem Transmissionsverlust q_t je Flächeneinheit abgeleitet werden, der energiepolitisch als zulässig erachtet wird. Dabei ist q_t eine zeitlich veränderliche Größe, abhängig von den klimatischen Einwirkungen (vgl. $\Delta\delta$ in Ziffer 4.2), so daß gilt:

$$\int \Delta\delta(t) k(\Lambda) dt \leq \text{zul} \int q_t dt \quad (5.1)$$

Da energetisch letztlich nur der Gesamtverlust aus den Umschließungsbauteilen der Gebäude interessiert, können hieraus auch nur Anforderungen an den durchschnittlichen Transmissionsverlust und somit an den Mittelwert von R abgeleitet werden: ($\bar{R} \geq \min \bar{R}^*$). Streut allerdings R innerhalb eines Bauteils oder von Bauteil zu Bauteil stark, könnte aus Gründen des Verbraucherschutzes die Wahrscheinlichkeit, daß minderwertige Umschließungsbauteile verwendet werden, begrenzt werden: ($R_d \geq \min R^*$). Transmissionswärmeverluste sind alleine nicht maßgebend, zusätzlich zum traditionellen Wärmeschutz mittels entsprechend qualifizierter Bauteile oder -systeme Solarenergienutzung erfolgen kann, z. B. mit lichtdurchlässigen Baustoffen oder hybriden, luftdurchströmten Bauteilen. Weiterhin ist der

Nutzereinfluß auf die Wärmebilanz von Gebäuden dominant, daß ein Bemessungskonzept für die geplante Stufe 2 noch zu adaptieren ist.

6. Überwachung

6.1 Herstellung, Prüfpläne

Durch entsprechende Überwachung bei der Herstellung ist sicherzustellen, daß die (Werks-)Produktion nicht schlechter ist als jene Grundgesamtheit, die der Baustoffbeurteilung in Stufe 1 zugrunde lag. Es wird davon ausgegangen, daß eine Produktionskontrolle im Sinne einer Produktionssteuerung immer stattfindet. Darüber hinaus ist eine Eigenüberwachung durch den Hersteller anhand von Stichproben nach festgelegtem Prüfplan erforderlich. Sofern die Wärmeleitfähigkeit eines Baustoffes bzw. Bauproduktes empfindlich ist gegenüber der Qualität des Grundmaterials, muß die Eigenüberwachung auch das Grundmaterial erfassen. Die Notwendigkeit einer Fremdüberwachung durch eine zugelassene Überwachungsstelle, ist nach Art und Umfang der Fremdüberwachung, abhängig von der Empfindlichkeit der Wärmeleitfähigkeit gegenüber Produktionsschwankungen, festzulegen [23]. Dabei spielt auch das Verfahren zur Direktzertifizierung durch Hersteller zukünftig eine Rolle [1].

Für die Güteüberwachung bei der Herstellung anhand von Stichproben-Prüfungen kann zunächst auf [2, dort Anhang 4] sowie auf [11] verwiesen werden. Hinsichtlich der Prüfgröße besteht die Möglichkeit

- a) der direkten Prüfung, d. h. es wird die Wärmeleitfähigkeit geprüft, und zwar mit dem gleichen Meßverfahren wie bei der Beurteilung in Stufe 1
- b) der indirekten Prüfung
 - b1) wobei ebenfalls die Wärmeleitfähigkeit, jedoch mit einem anderen schnelleren Meßverfahren ermittelt wird, oder
 - b2) wobei nur Merkmale geprüft werden, die eng mit der Wärmeleitfähigkeit λ_D (nach Stufe 1) korreliert sind
- c) der Identitätsprüfung, bei der nur Merkmale gemessen werden, die zur Produktidentifikation dienen.

Sofern eine direkte Prüfung der Wärmeleitfähigkeit (a) erfolgt, sollte der kritische Wert für die Überwachung identisch sein mit dem Kennwert $\lambda_{b,k}$, der gemäß Ziffer 1.3 ermittelt wurde. Dort wurde schon die Möglichkeit angedeutet, durch Vergrößerung der Streuung einen höheren Wert $\lambda_{b,k}$ zu berechnen (und somit einen höheren kritischen Wert), um so bei der Güteüberwachung entweder

- eine größere Annahmewahrscheinlichkeit bei - gegenüber dem Beurteilungszeitpunkt - unveränderter Produktion
- oder bei Änderungen bei der Produktion, die eine geringfügige Verschlechterung der Wärmeleitfähigkeit zur Folge haben, noch eine akzeptable Annahmerate

zu erhalten. Wird die Wärmeleitfähigkeit indirekt geprüft (b), ist der entsprechende kritische Wert der geprüften Eigenschaft (y) aufgrund der Regressionsbeziehung zwischen λ und y festzulegen, sowie der zugehörige äquivalente Stichprobenumfang [11]. In Anlehnung an [2] sollten nur (x, σ)- oder (x,s)-Pläne verwendet werden, wobei letzteres zutrifft, wenn mit unterschiedlichen Losstreuungen zu rechnen ist oder aber bei neuen Baustoffen.

6.2 Einbau

Ist gemäß Ziffer 3.3 die Lebensdauer von Baustoffen in Bezug auf ihre Wärmeleitfähigkeit sehr empfindlich gegenüber der Ausführungsgenauigkeit beim Einbau, sollten detaillierte Anforderungen an den Einbau oder ggf. eine Überwachung des Einbaus im Bescheid oder der Stoffnorm vorgeschrieben werden. Hierbei geht es weniger um aufwendige Kontrollprozeduren, als um eine Möglichkeit, im Rahmen des Baustellenbetriebes auf die Empfindlichkeit des Baustoffs oder Bauteils hinzuweisen, z. B. bei Kerndämmung von mehrschaligem Mauerwerk mittels Schüttdämmstoff oder bei Perimeterdämmung im Keller- und Fundamentbereich.

7. Umsetzung

Das hier beschriebene Bemessungskonzept für den Wärmeschutz basiert auf den allgemein anerkannten technischen Sicherheitsregeln und der Kenntnis eines hohen Standards im wärmetechnischen Messen. Die derzeit in CEN TC 89 "Wärmeschutz von Bauteilen" diskutierte Übernahme der ISO-Standards zur Festlegung von Meßverfahren der Wärmeleitfähigkeit als europäische Norm stellt eine fundierte Grundlage dar mit den notwendigen Fehler- und Toleranzbetrachtungen. Die in CEN TC 88 "Wärmedämmstoffe" zur Zeit geführte Diskussion um Regularien zur Güteprüfung [19] und die Festlegung in prEN 30456 [14] zur Weiterbehandlung von Meßwerten der Wärmeleitfähigkeit in Nenn- (oder Design-) Werte sind weitere Baustoffe für eine Erprobung des neuen Bemessungskonzeptes.

Wie in der Vorhabensbeschreibung erwähnt, ist nunmehr in Zusammenarbeit mit z.B. Industrieverbänden und Normungsgremien die weitere Umsetzung an konkreten Bauprodukten vorzunehmen. Hierzu wird vorgeschlagen, solche Baustoffe und Bauteile als erstes auszusuchen, die empfindlicher auf Produktions- und Klimaeinflüsse reagieren und die derzeit in der Erprobung sind. Mögliche Beispiele sind Dämmstoffe aus Naturstoffen, die gegen biologische Verwertbarkeit und Feuchteinflüsse mit Schutzmitteln ausgerüstet sind. Zur Dauerhaftigkeit der Schutzmittel und somit der neuen Dämmstoffe bei verschiedenen Anwendungen ist noch wenig bekannt; aus diesen Gründen könnten statistische Verfahren, hergeleitet aus Kurzzeittests, zu vernünftigen Vorhersagewerten führen.

8. Zusammenfassung

Die Anforderungen an den wirtschaftlichen Wärmeschutz von Gebäuden sind bauaufsichtlich verbindlich in der Wärmeschutzverordnung (WSchV) festgelegt und werden sich mit der Neufassung zum 1. Januar 1995 um ca. 30% erhöhen. Hierbei ist i.a. der Heizwärmebedarf von Räumen als Maximalwert (in kWh/m²a) vorgeschrieben. Die Bemessungswerte für die

wesentlichen wärmeschutztechnischen Kennwerte der Baustoffe sind - z.B. als amtlich bekanntgemachte Rechenwerte der Wärmeleitfähigkeit - nach den üblichen Rechenregeln der DIN 4108 zu verwenden. Diese ergeben sich aus Versuchsergebnissen an Probekörpern oder aus Finite-Differenzen-Berechnungen mit Hilfe von Regressionsanalysen. Eine statistisch vergleichbare Bewertung für die Festlegung solcher "Bemessungs-Werte" unter Berücksichtigung der wesentlichen Einflußgrößen (Mittelwerte, Streuungen) wie Rohdichte, Abmessungen der Bauteile, Feuchtegehalt bei der Anwendung u.a. findet nach unterschiedlichen Regeln bei den Beratungen in den Sachverständigenausschüssen statt.

In dem hier vorgestellten Bemessungskonzept werden die für statistische Verfahren wesentlichen Schritte bei der Ermittlung des Heizwärmebedarfs von der Rohstoffschwankung bei der Herstellung bis zum Einbau in das Bauteil am Beispiel einer Außenwand diskutiert und die charakteristischen Vorhersagewerte beschrieben. Mit den im Bereich der Standsicherheit und Tragwerksplanung von Gebäuden anerkannten Grundlagen der Statistik können die für den Wärmeschutz notwendigen Teilsicherheitsfaktoren ermittelt werden, je nach Lage der Baustoffe und Wichtigkeit für den Gesamtwert. Die Basisvariablen für die Umwelt-, Bauwerk- und Nutzungseinflüsse ergeben die Faktoren R für die Beanspruchung und S für die Belastungen im klassischen Wahrscheinlichkeitsmodell $G = R - S$. Aus den gemessenen und zu erwartenden Mittelwerten, den unterschiedlichen Streubreiten und den Modellunschärfen errechnet sich durch eine Mehrfachregression mit Tail-Approximation die Erfüllungs- oder Versagenswahrscheinlichkeit und die Gewichtungsfaktoren einzelner Einflußgrößen. Durch ein Iterationsverfahren kann nun, je nach Umfang und Kenntnis der wesentlichen und vorliegenden Basiswerte zum Baustoff und Bauteil ein mit vergleichbarer Sicherheit vorher-sagbarer, charakteristischer Wert zum Wärmedurchlaßwiderstand unterschiedlicher Konstruktionsvarianten ermittelt werden. Aus den für die jeweilige Anwendung typischen Streuungen für die Abmessungen ergeben sich dann Rechenwerte der Wärmeleitfähigkeit für einzelne Baustoffe.

Ob diese künftig stärker an die Lage der Baustoffe im Bauteil und damit an die Belastung gekoppelt werden muß, ist zu vermuten und soll durch weitere Beispiele in der nächsten Projektphase gezeigt werden. Nur so lassen sich dann Gesamtenergiebilanzen für unterschiedliche Gebäudekonzepte hinsichtlich Wärmeverlusten und Wärmegewinnen aus Solarenergie und internen Lasten etc. unter Einbezug von Investitions- und Wartungsaufwand gewichten und Aussagen zur Gebrauchstauglichkeit von Bau- und Dämmstoffen erstellen.

9. LITERATUR

- [1] Grundlagen zur Beurteilung von Bauprodukten, Bauteilen und Bauarten im Prüfzeichen- und Zulassungsverfahren; Institut für Bautechnik, Berlin - Mai 1986
- [2] Grundlagen zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen für bauliche Anlagen, NABau im DIN, 1981
- [3] Stellungnahme der Fachbereiche VII und VIII des NABau im DIN zu den Eurocode-Entwürfen, 1985
- [4] Eurocode Nr. 1; Gemeinsame einheitliche Regeln für verschiedene Bauarten und Bauprodukte, Bericht EUR 8847, 1984.
- [5] ISO 2394: General Principles on Reliability of Structures, Beuth-Verlag, Berlin, 1984.
- [6] JCSS: General Principles on Reliability for Structures - a commentary on ISO 2394; CEB Bulletin d'information no. 191, 1985.

- [7] JCSS: General Principles on Quality Assurance for Structures; IABSE, Reports of the Working Commissions, Vol. 35, 1981.
- [8] DIN 52612, Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät, T.1, Durchführung und Auswertung, T. 2, Weiterbehandlung der Meßwerte, Beuth-Verlag, Berlin (1979/1984).
- [9] Lühr, H. P., Meyer, H. G., Wärmeschutztechnische Eigenschaften von Baustoffen und Bauteilen, Bauphysik 2 (1978), H. 2, S. 75/76.
- [10] DIN 4108, Wärmeschutz im Hochbau, T. 1-5, Beuth-Verlag, Berlin, 1981/1991.
- [11] Grundlagen zur Festlegung von Anforderungen und Prüfplänen für die Überwachung von Baustoffen und Bauteilen, NABau im DIN, 1985.
- [12] Schrupp, K., Rackwitz, R.: Prädiktive Verteilungen und ihre Anwendungen in der Zuverlässigkeitstheorie der Bauwerke; Berichte zur Zuverlässigkeitstheorie der Bauwerke, TU München, Heft 71/1984
- [13] Sachs, L., Angewandte Statistik, Springer-Verlag, Berlin, 1984.
- [14] pr EN 30456 (ISO 10456), Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte, Beuth-Verlag, Berlin, 1993.
- [15] König, N., Plöger, G. und Schüle, M.: Einfluß der Abmessungen und der Hohlkammerausbildung von Hohlblocksteinen auf die Wärmedämmung von Mauerwerk aus Bimsbaustoffen; Bericht BW 171/84 des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik.
- [16] König, N.: Hohlräume in Mauersteinen - wärmetechnisch optimiert; IBP-Mitteilung 12 (1985), H. 98.

- [17] Kirtschig, K.: Zur Frage der Einteilung von Baustoffen in Wärmeleitfähigkeitsgruppen, .Bauphysik 8 (1983), H. 3, S. 88-90.
- [18] Struck, W., Klassenbreiten mit statistisch gesicherter Unterscheidbarkeit für die Klassifizierung von Materialien durch Eignungsversuche. Materialprüf. 24 (1982), H. 8, S. 272 - 276.
- [19] CEN, TC 88, WG 2, N 252 E: Declaration of Lambda, Minutes of 4th meeting, AHG, March 1994, London.
- [20] ISO DTR 9774: Properties of Thermal Insulating Products for Buildings according to their application, Sep. 1987.
- [21] Kießl, K.: Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen; Diss. Univ. Essen, 1983.
- [22] Künzel, H.: Zur Frage des Zuschlags auf Meßwerte der Wärmeleitfähigkeit zur Ermittlung des Wärmeschutzes in Bauteilkonstruktionen; wksb 30 (1985), Sonderausgabe, S. 50-53.
- [23] Wilrich, P., Grenzwerte - Festlegung und Erfüllung der Forderungen; DIN Fachbericht 6, Beuth Verlag 1986
- [24] Kersken-Bradley, M.: Sicherheit von Baukonstruktionen; Handbuch der Sicherheitstechnik Kap. 1.7; Hrsg.: Peters, Meyna. Carl-Hanser Verlag, München, 1984.
- [25] Spaethe, G.: Zuverlässigkeitskonzeption für tragende Baukonstruktionen; Bauforschung - Baupraxis, H. 227 (1988), Bauakademie, Berlin.
- [26] Schneider, J.: Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen; Verlag der Fachvereine, Zürich und Teubner, Stuttgart, 1993.

[27] COMREL - STRUREL, Reliability Consulting Programs (RCP), München, 1992.

10. Verwendete Formelzeichen

α	Empfindlichkeitsbeiwert, Wichtungsfaktor
β	Sicherheitsindex
γ_m	Sicherheitsbeiwert für Materialeigenschaften
γ_M	Sicherheitsbeiwert einschließlich γ_{sys}
λ_b	Basiswert der Wärmeleitfähigkeit (gemessene Wärmeleitfähigkeit)
$\lambda_{b,k}$	Kennwert von λ_b , als 95 %-Fraktilwert bestimmt
λ_p	praktische Wärmeleitfähigkeit
$\lambda_{p,k}$	charakteristischer Wert von λ_p , als 95 %-Fraktilwert bestimmt
δ	Temperatur
$\phi(x)$	Wert p der Standard-Normalverteilung an der Stelle x
$\phi^{-1}(p)$	Inverse der Standard-Normalverteilung an der Stelle x für Wert p
$f(.)$	Umrechnungsfaktor zur Bestimmung von λ_p aus λ_b
F	Einwirkungen; hier klimatische Einwirkungen
F(t)	zeitlicher Verlauf von F
p	dem Bemessungswert zugeordnete Wahrscheinlichkeit
p_f	Versagenswahrscheinlichkeit
R	Wärmeleitwiderstand, -durchlaßwiderstand
R_d	Bemessungswert von R
S_{min}	R, bei dem mit Tauwasserbildung zu rechnen ist
t	Zeit
T	bestimmter Zeitraum, z. B. 1 Jahr
T_0	Bezugszeitraum
y	Parameter zur Beschreibung der Stoff-Spezifikation, z. B. Rohdichte
z	Parameter zur Beschreibung der "Beanspruchung", z. B. Stoff-Temperatur
\underline{z}	Parameter-Vektor
z_p	maßgebender Parameter zur Ermittlung von λ_p

Anhang

Statistische Verfahren zur Schätzung von Fraktilwerten der Wärmeleitfähigkeit

1.1 Baustoffe mit nur einer Spezifikation

Die folgenden Regeln gelten für Baustoffe, die planmäßig nur für einen Parametersatz hergestellt werden, beispielsweise nur mit einer Rohdichte. Liegen aus vorangegangenen Versuchen keine Vorinformationen vor, so gilt nach [2, 13]:

$$x_i = \ln(\lambda_{b,i})$$

$$\bar{x} = \sum x_i/n \quad n \dots \text{Anzahl der Meßwerte} \quad (1.1a)$$

$$s = (\sum x_i^2 - n \bar{x}^2)/(n-1) \quad (1.1b)$$

Sofern die Stichprobe die maßgebende Gesamtproduktion erfaßt, ist $s^2 = s_x^2$, andernfalls siehe Abschn. 1.3.1. Mit der maßgebenden Streuung s_x^2 wird:

$$x_k = \bar{x} + t_{p,v} \sqrt{1 + 1/n} s_x \quad (1.2a)$$

$$\lambda_{b,k} = \exp(x_k) \quad (1.2b)$$

wobei $t_{p,v}$ Fraktilfaktor der zentralen t-Verteilung für $p = 0,90$ und $v = n-1$ gemäß [13].

Anmerkung:

Abweichend von [1] wird hier die Prediktorverteilung angesetzt (und nicht die nicht-zentrale t-Verteilung in Verbindung mit entsprechenden Aussagewahrscheinlichkeiten), da anderenfalls eine umständliche oder nur stark genäherte Bestimmung charakteristischer Regressionsbeziehungen

möglich ist (Ziffer 1.3.3). Für die Verwendung der Prediktorverteilung in diesem Zusammenhang, siehe [12]. Der Einfluß der statistischen Unsicherheit kann durch eine äquivalente Streuung s' veranschaulicht werden:

$$t_{p,v} \sqrt{1 + 1/n} s_x = k_p s' \quad (1.3)$$

wobei $k_p = 1,282$ der Fraktillfaktor der Normalverteilung für $p = 0,90$ ist.

1.2 Baustoffe mit verschiedenen Spezifikationen

Die folgenden Verfahren gelten für Baustoffe, die mit variierten Parametersätzen hergestellt werden, beispielsweise mit verschiedenen Rohdichteklassen.

Es bezeichnen $x = \ln(\lambda_b)$ und y den variierten Parameter, z. B. die Rohdichte: $y = \rho$, oder eine Funktion des variierten Parameters: $y = h(\rho)$.

Eine Auswertung für die lineare Regressionsbeziehung, wobei E das Residuum (die Reststreuung) erfaßt:

$$X = A + B Y + E$$

unter Berücksichtigung der statistischen Unsicherheiten in den Koeffizienten A und B ergibt:

$$x_k = a + b y + t_{p,v} \sqrt{1 + (1/n)(1 + \frac{(y - \bar{y})^2}{S_y^2})} sE \quad (1.4)$$

mit

$$a = \bar{x} - b \quad b = r s_x / s$$

$$s_x^2 = (\sum x_i^2 - n \bar{x}^2) / (n - 1)$$

$$s_y^2 = (\sum y_i^2 - n \bar{y}^2) / (n - 1)$$

$$sE = n(1 - r^2) s_x / (n - 2)$$

$t_{p,v}$ Fraktillfaktor der zentralen t-Verteilung für $p = 0.95$ und $v = n - 2$ nach [13].

Hieraus wird,

$$\lambda_{b,k} = \exp(x_k)$$

wobei die erforderliche Vorhaltung aufgrund statistischer Unsicherheiten desto kleiner ist, je größer s_y ist.

Analog zu Gl. (1.3) kann auch hier der Einfluß der statistischen Unsicherheit durch eine äquivalente Streuung s' dargestellt werden:

$$t_{p,v} \sqrt{1 + (1/n) \left(1 + \frac{(y - \bar{y})^2}{S_y^2}\right)} sE = k_p s'(x) \quad (1.5)$$

1.3 Toleranzwerte

Nach [19] wird derzeit in CEN TC 88 die Festlegung der vom Hersteller zu deklarierenden Nennwerte der Wärmeleitfähigkeit

$$\lambda_{\text{Nenn}} = \lambda + K \cdot s$$

diskutiert. Hierbei ist der Mittelwert um die Streuung s (Standardabweichung) mit dem Korrekturfaktor je nach Anzahl der Meßergebnisse zu erhöhen.

Anzahl Meßergebnisse	Korrekturfaktor 1)
3	4.26
5	2.74
7	2.33
10	2.07
15	1.87
20	1.77
50	1.56
100	?

1) für normalverteilte, einseitige Toleranzgrenzen mit $s = 0,95$ und $\gamma = 0,95$.

Fraunhofer-Institut für Bauphysik

Tabelle 1: Stoffwerte und Verteilfunktion der Modellwände

Baustoff	Schichtdicke	Wärmeleitfähigkeit	Verteilfunktion
	Min/Mittel/Max	Min/Mittel/Max	
	mm	W/m·K	-
"trocken", bei praktischem Feuchtegehalt:			
Mauerwerk	300	- 0,21 -	Normal
Dämmstoff	56 / 80 / 88	0,028/0,040/0,068	Normal/Extrem
Putz	20	0,87	
"naß", bei Schlagregen:			
Mauerwerk	50	0,32	Normal
Putz	20 ¹⁾	0,87 ¹⁾	

1) Rechenwert für baupraktischen Zustand berücksichtigt "nach Norm" üblichen Regenschutz

Fraunhofer-Institut für Bauphysik

Tabelle 2: Einfluß von Schichtdicke, Qualität (Standardabweichung) und Feuchte auf den Sicherheitsindex und Versagenswahrscheinlichkeit bei einer Mauerwerkswand mit Außendämmung

Schicht		Gesamtkonstruktion				
Dicke		Streuung	Beiwert γ	Wichtungsfaktor α	Sicherheitsindex β	Versagenswahrscheinlichkeit P_f
Wert	Differenz					
mm	%	%	-	-	-	-
80	-	10	1,0	0,46	4,1	$2,0 \cdot 10^{-5}$
72	-10	10	1,0	0,49	3,6	$1,4 \cdot 10^{-4}$
56	-30	10	1,0	0,55	2,6	$4,7 \cdot 10^{-3}$
88	+10	10	1,0	0,42	4,5	$2,7 \cdot 10^{-6}$
88	+10	10	0,9	0,41	4,1	$1,7 \cdot 10^{-5}$
80	-	10	0,9	0,44	3,7	$1,0 \cdot 10^{-4}$
72	-10	10	0,9	0,47	3,3	$5,6 \cdot 10^{-4}$
56	-30	10	0,9	0,53	2,3	$1,2 \cdot 10^{-2}$
88	+10	10	0,8	0,40	3,7	$1,1 \cdot 10^{-4}$
80	-	10	0,8	0,42	3,3	$5,2 \cdot 10^{-4}$
72	-10	10	0,8	0,45	2,8	$2,2 \cdot 10^{-3}$
56	-30	10	0,8	0,50	1,9	$2,9 \cdot 10^{-2}$ (= 3 %)

Fraunhofer-Institut für Bauphysik

Tabelle: 3: Einfluß von Wärmeleitfähigkeit, Qualität (Standardabweichung) und Feuchte auf den Sicherheitsindex und Versagenswahrscheinlichkeit bei einer Mauerwerkswand mit Außendämmung

Schicht		Gesamtkonstruktion				
Wärmeleitfähigkeit		Streuung STD	Beiwert γ Feuchte	Wichtungsfaktor α Dämmung	Sicherheitsindex β	Versagenswahrscheinlichkeit Pf
Wert	Diff.					
W/m·K	%	%	-	-	-	-
0,040	-	10	1,0	0,33	4,1	$2,0 \cdot 10^{-5}$
0,052	+30	10	1,0	0,27	3,2	$6,4 \cdot 10^{-4}$
0,068	+70	10	1,0	0,20	2,3	$1,1 \cdot 10^{-2}$
0,028	-30	10	1,0	0,40	5,2	$1,0 \cdot 10^{-7}$
0,040	-	1	1,0	0,01	4,4	$6,0 \cdot 10^{-6}$
0,040	-	30	1,0	0,58	3,2	$5,8 \cdot 10^{-4}$
0,040	-	70	1,0	0,74	2,2	$1,2 \cdot 10^{-2}$
0,040	-	10	0,8	0,33	3,3	$5,2 \cdot 10^{-4}$
0,052	+30	10	0,8	0,26	2,4	$8,2 \cdot 10^{-3}$
0,068	+70	10	0,8	0,19	1,5	$6,5 \cdot 10^{-2}$
0,028	-30	10	0,8	0,41	4,4	$6,0 \cdot 10^{-6}$
0,040	-	1	0,8	0,01	3,5	$2,4 \cdot 10^{-4}$
0,040	-	30	0,8	0,59	2,6	$5,0 \cdot 10^{-3}$
0,040	-	70	0,8	0,76	1,7	$4,1 \cdot 10^{-2}$

Fraunhofer-Institut für Bauphysik

Tabelle 4: Einfluß von Luftspalten in Stoßfugen auf die äquivalente Wärmeleitfähigkeit einer Außenwand (Dicke 0,3 m) bei unterschiedlichen Grundmaterialien. Die Außenwand besitzt das Elementformat:

Länge 250 mm
 Breite 300 mm
 Höhe 238 mm

Stoßfugen		äquivalente Wärmeleitfähigkeit					
		Mauerwerk				Dämmstoff sehr gut ¹⁾	
Breite	Flächen- anteil	mittel ¹⁾		gut ¹⁾			
mm	%	W/m·K	%	W/m·K	%	W/m·K	%
0	0	0,300	0	0,120	0	0,040	0
5	2	0,298	-1	0,122	+2	0,043	+8
10	4	0,304	+1	0,131	+7,5	0,054	+36

1) Gruppeneinteilung (fiktiv):

mittel: 0,30 W/m·K

gut: 0,12 W/m·K

sehr gut: 0,04 W/m·K

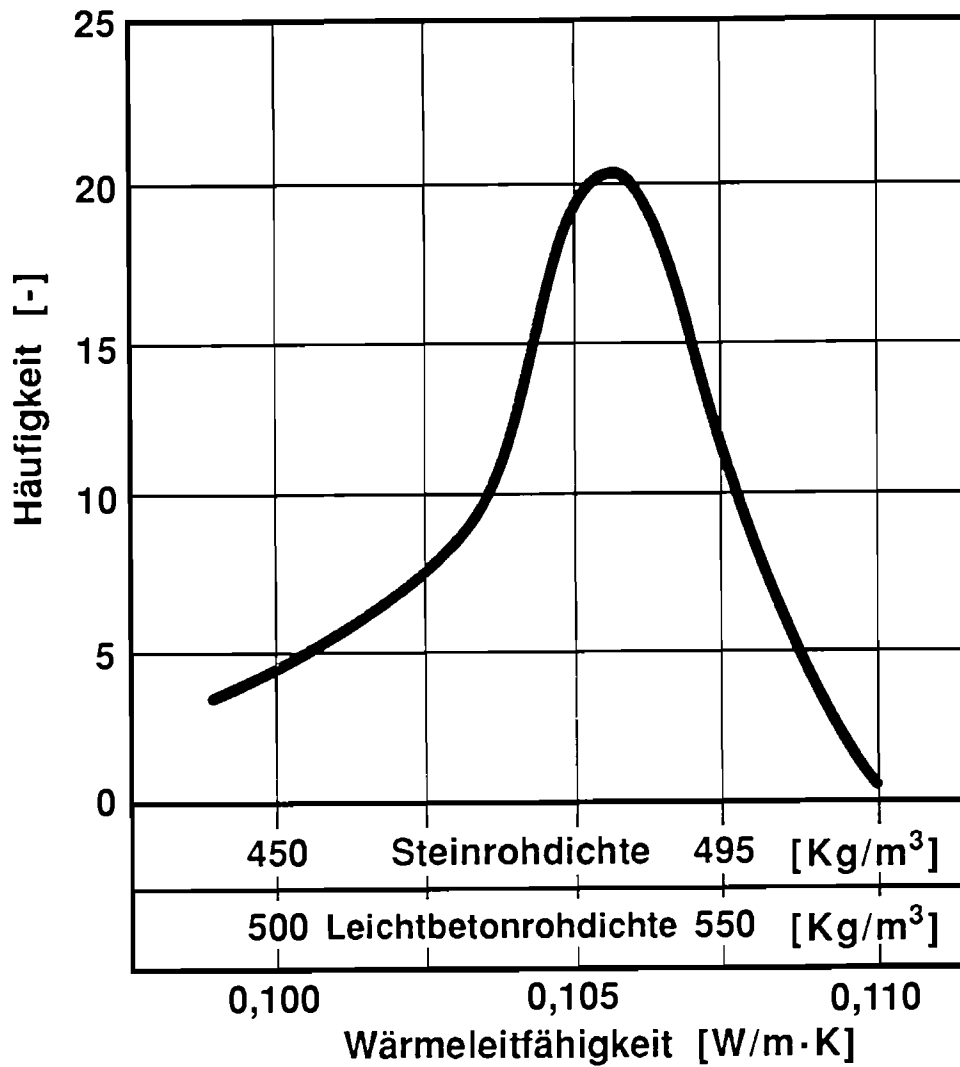


Bild 1: Beispiel für gemessene Häufigkeit von Stein-/Betonrohddichte an Bims-Leichtbeton-Vollblöcken und Relation zu Wärmeleitfähigkeit:

$$\lambda_{10, tr} = 0,043 \cdot 5,239^p$$

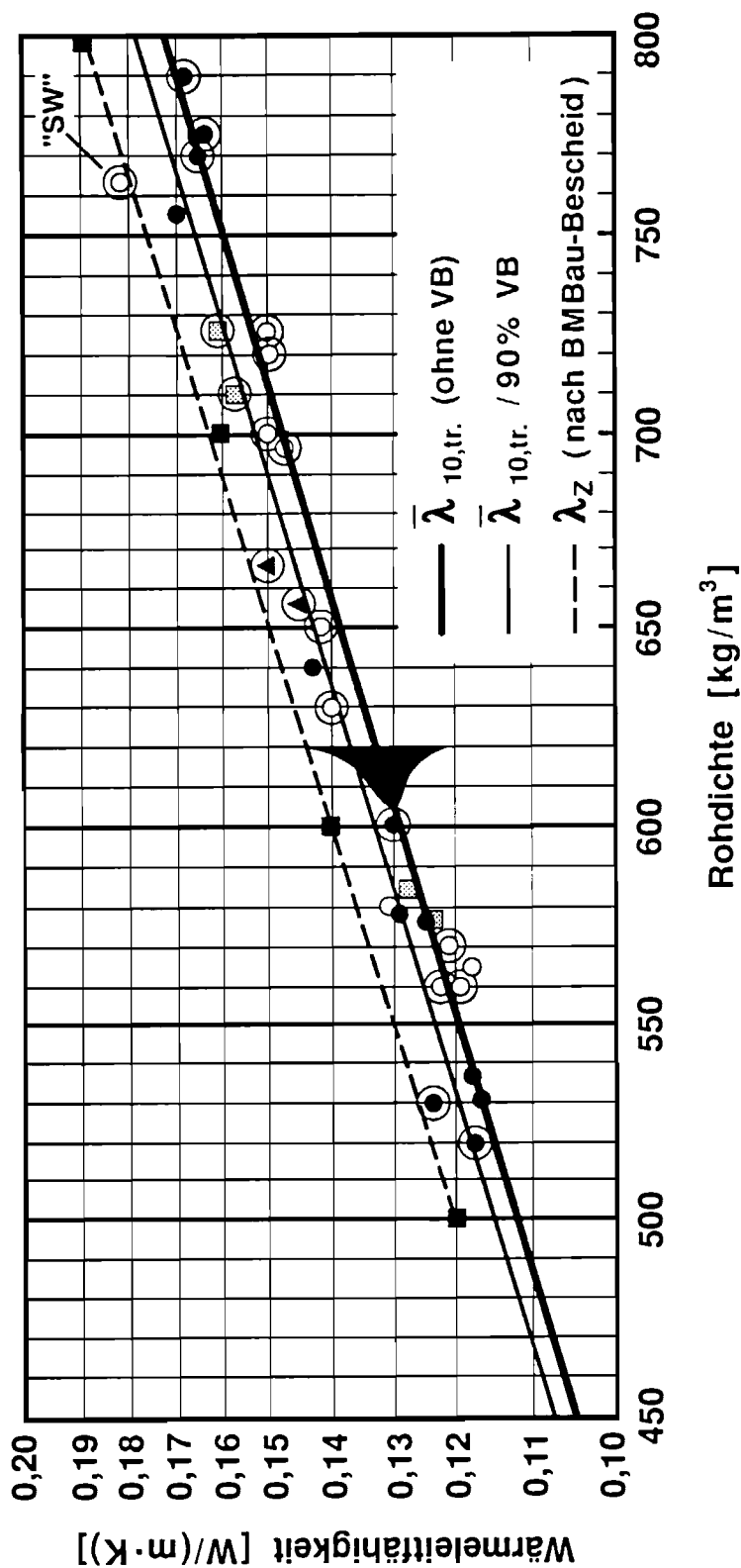


Bild 2: Wärmeleitfähigkeit von Leichtbeton, gemessen im Plattenapparat nach DIN 52612 in Abhängigkeit von der Rohdichte. Die logarithmische Darstellung zeigt eine schematisierte Verteilfunktion.

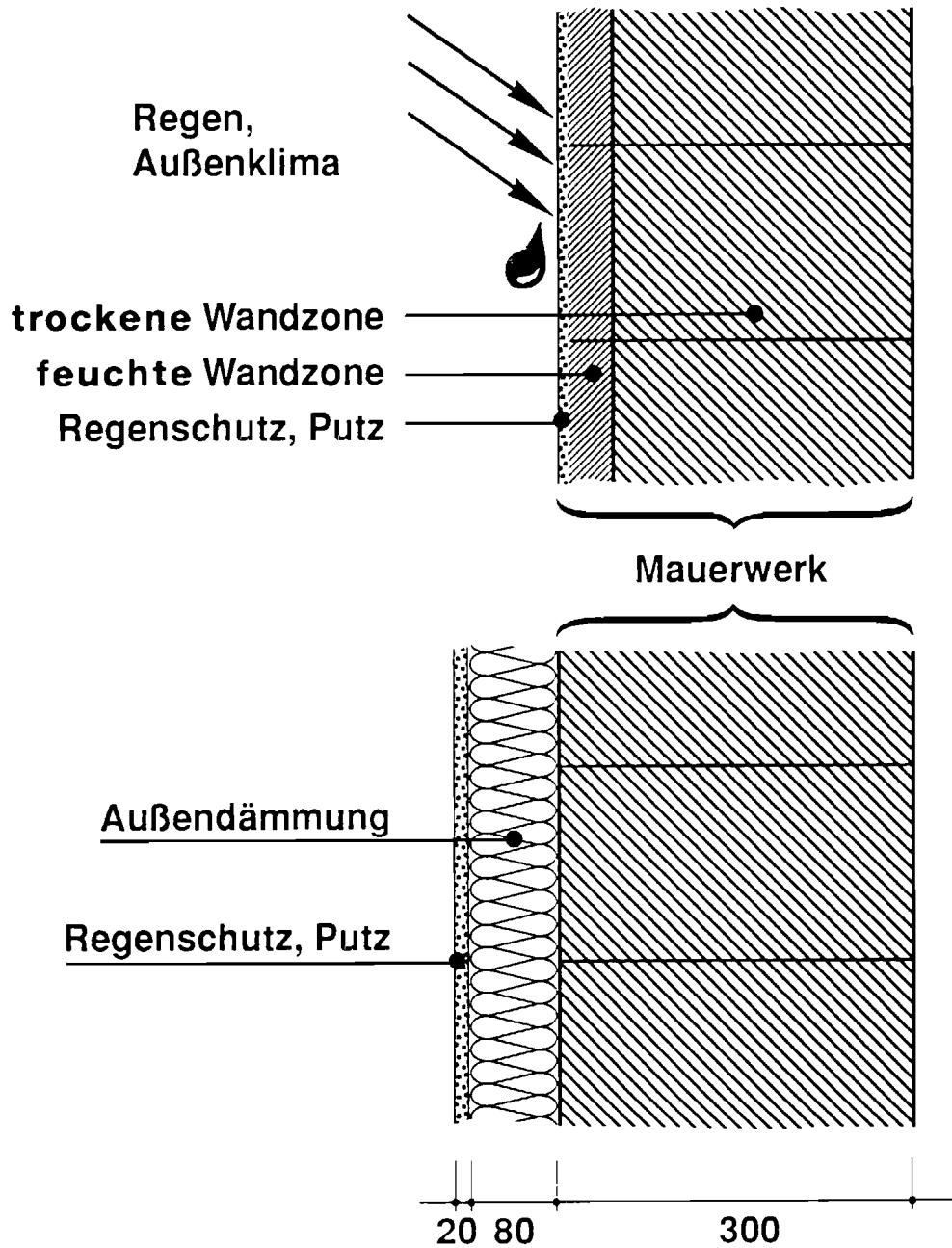


Bild 4: Schematische Darstellung der Außenwand-Regelquerschnitte ohne (oben) und mit (unten) Außendämmung (Zahlenangaben in mm).

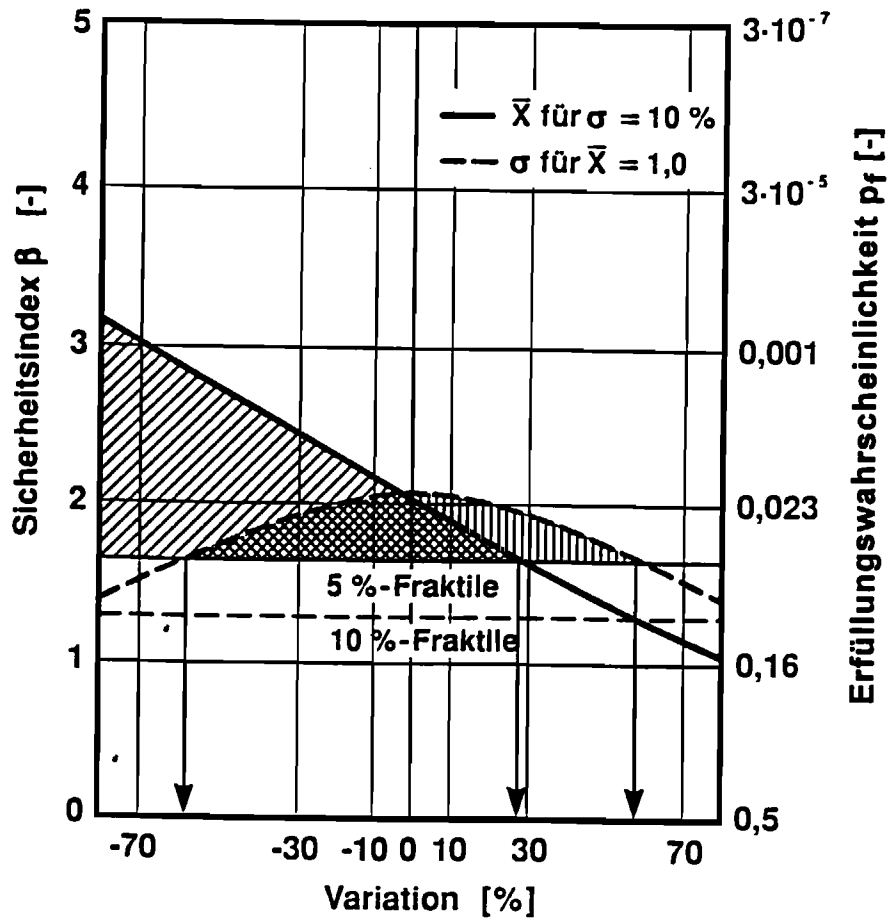


Bild 5: Auswirkung des Variationskoeffizienten von Mittelwert und Streuung für den Parameter γ im Fallbeispiel "Monolithische Wand" auf den Sicherheitsindex β und die Erfüllungswahrscheinlichkeit p_f .

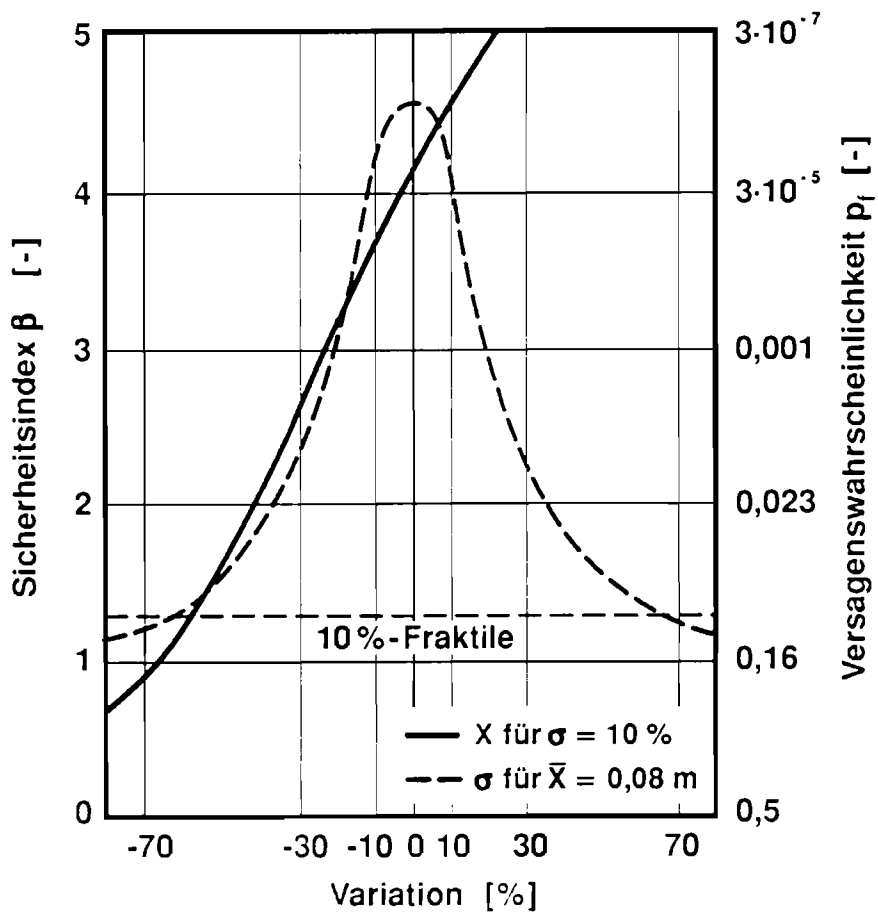


Bild 6: Auswirkung des Variationskoeffizienten von Mittelwert und Streuung für die Dämmschichtdicke im Beispiel "Wand mit Außendämmung" auf den Sicherheitsindex β und die Versagenswahrscheinlichkeit p_f .

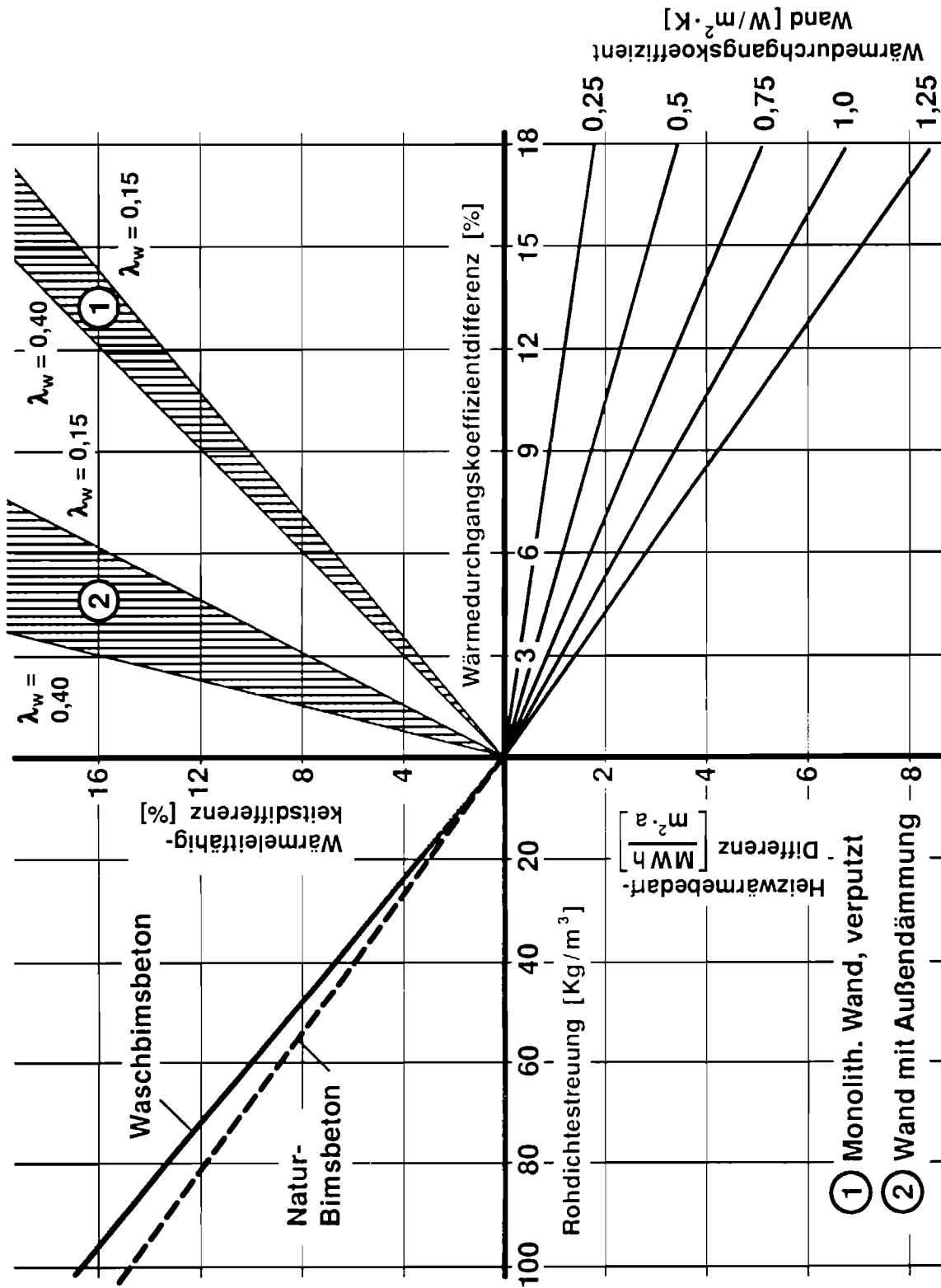


Bild 7: Beispiel für die Auswirkung von Rohdichtestreuungen bei Leichtbetonwänden auf relative Änderungen beim Wärmedurchgangskoeffizienten und Heizwärmebedarf.