



Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München

MITTEILUNGEN

Reihe I:

Allgemeine Fragen des Wärme- und Kälteschutzes

Zur Messung der Wärmeleitfähigkeit feuchter Stoffe

o. Prof. (em.) Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. mult. Dr. E.h. mult. Karl Gertis
Prof. Dr.-Ing. Andreas H. Holm

Zur Messung der Wärmeleitfähigkeit feuchter Stoffe

Die Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen hängt von einer Vielzahl von Einflussgrößen ab, über die ebenfalls eine Vielzahl von Publikationen erschienen ist. Die wohl gründlichste und sachkundigste Zusammenstellung all dieser Einflüsse ist von *W. F. Cammerer* [1] gegeben worden. Man beschäftigt sich fast schon 100 Jahre mit der Problematik des Feuchteinflusses. Trotzdem sind die Abläufe und Wirkungszusammenhänge bei der Wärmeleitung, wenn gleichzeitig Feuchte vorhanden ist, bis heute nicht wirklich geklärt. Das liegt daran, dass die Gesetzmäßigkeiten des gekoppelten instationären Transportes von Wärme und Wasser, das sich in den Poren des Stoffes in Bewegung setzt, sobald ein Temperaturgefälle anliegt, erst in den letzten Jahrzehnten durch numerische Ansätze mittels Computerberechnung präziser behandelt werden können. Die für die Berechnung nötigen Stoffwerte sind ebenfalls erst in den letzten Jahren komplettiert worden. Man kann jetzt das schon lange bekannte Problem mit besseren Ansätzen angehen, z. B., indem die in den Wärmeleitfähigkeits-Apparaturen während der Messung auftretenden Feuchtwanderungsprozesse theoretisch nachgebildet werden. Daraus lässt sich dann auch der Feuchteinfluss ableiten, der aufgrund der anwesenden und sich während der Messung verlagernden Feuchte entsteht.

On the measurement of thermal conductivity of humid substances.

The thermal conductivity of building materials depends on a wide range of influencing variables, and a large number of articles have been published. The most thorough and knowledgeable compilation of these influences have probably been collected by W. F. Cammerer [1]. There has been a focus on the problem of moisture influence for nearly a hundred years. Until today the processes and correlating effects of thermal conductivity with simultaneous presence of dampness have not become fully clear. The reason for this is that the laws of coupled transient transportation of heat and water, which starts in the pores of the substance as soon as there is a thermal gradient, have only been treated in a more precise way in the last century. Also the properties necessary for calculation have only been completed recently. This allows a much better approach to the problem well known for a long time. This shall be demonstrated in the present study by theoretically reproducing, in the thermal conductivity apparatus, the moisture migration process during measurement. Thus, it is possible to work out the effects of moisture resulting from the dampness already present and the one which results from the moisture shifting during measurement.

1 Ausgangssituation

Die Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen hängt von einer Vielzahl von Einflussgrößen ab, über die ebenfalls eine

Vielzahl von Publikationen erschienen ist. Die wohl gründlichste und sachkundigste Zusammenstellung all dieser Einflüsse ist von *W. F. Cammerer* [1] gegeben worden. Bei denjenigen Baustoffen, die Feuchte aufnehmen können, hängt die Wärmeleitfähigkeit auch vom Feuchtegehalt ab. Die erste Arbeit über den Feuchteinfluss auf die Wärmeleitfähigkeit wurde bereits 1924 von *J. S. Cammerer* publiziert [2]. Man beschäftigt sich also fast schon 100 Jahre mit der Problematik des Feuchteinflusses. Trotzdem sind die Abläufe und Wirkungszusammenhänge bei der Wärmeleitung, wenn gleichzeitig Feuchte vorhanden ist, bis heute nicht wirklich geklärt. Das liegt daran, dass die Gesetzmäßigkeiten des gekoppelten instationären Transportes von Wärme und Wasser, das sich in den Poren des Stoffes in Bewegung setzt, sobald ein Temperaturgefälle anliegt, erst in den letzten Jahrzehnten durch numerische Ansätze mittels Computerberechnung präziser behandelt werden können (z. B. mittels des WUFI-Programms [3]). Die für die Berechnung nötigen Stoffwerte sind ebenfalls erst in den letzten Jahren komplettiert worden. Man kann jetzt also das schon lange bekannte Problem mit besseren Ansätzen als früher angehen. Das soll in der vorliegenden Arbeit geschehen, indem die in den Wärmeleitfähigkeits-Apparaturen während der Messung auftretenden Feuchtwanderungsprozesse theoretisch nachgebildet werden. Daraus lässt sich dann auch der Feuchteinfluss ableiten, der aufgrund der anwesenden und sich während der Messung verlagernden Feuchte entsteht.

2 Messmethoden für die Wärmeleitfähigkeit

Als wichtigste wärmeschutztechnische Eigenschaft von Stoffen hat die Wärmeleitfähigkeit im Laufe vieler Jahre eine starke Beachtung gefunden, die sich in zahlreichen nationalen und internationalen Normen niedergeschlagen hat [4] bis [16]. Die intensive Normenbefassung, bei der mehr oder weniger dezidiert auch auf die Wärmeleitfähigkeitsmessung feuchter Stoffe eingegangen wird, zeigt, dass der Einfluss der Stoff-Feuchte erkannt worden ist. Die Norm [11] und ihre Anhänge A, E und F sagen beispielsweise aus, dass

- die wärmetechnischen Eigenschaften des trockenen und des feuchten Stoffes von besonderem Interesse seien.
- die im hygroskopischen Gleichgewicht anwesende Feuchte, die sich während der Messung verlagernde Feuchte und die dabei auftretenden Phasenänderungswärmen von Einfluss seien.

- die Wärmeleitfähigkeit (feuchter Stoffe) unter Umständen keine „stoffeigene Eigenschaft“ ist, da sie von den Prüfungsbedingungen abhängt; sie sollte deshalb besser als „Übertragungsfaktor“ bezeichnet werden.

In der Norm [10] wird deshalb nicht mehr von „Thermal Conductivity“, sondern von „Thermal Transmissivity“ gesprochen. Man hat bei der Normenbearbeitung die hygri-schen Phänomene also richtig erkannt, war aber damals nicht in der Lage, sie quantitativ zu beschreiben. Dies führte zu näherungsweise Abschätzungen und vielfältigen Hilfs-hinweisen bei den einzelnen Messverfahren. Im Kern kon-zentrieren sich die Hinweise

- vor der Messung auf die Probenvorbehandlung (Trock-nung – je nach Material – bei 40, 70 und 105 °C bis zur Massekonstanz)
- während der Messung auf die Konstanzhaltung der Feuchte (mittels Folien-Umhüllung) bzw. die Tauwasser-vermeidung
- nach der Messung auf die Weiterbehandlung der Mess-werte mittels Zuschlägen, die auf den trockenen Mess-wert zur Festlegung des Rechenwertes der Wärmeleit-fähigkeit aufgeschlagen werden. Wurden die Proben „aus-nahmsweise“ in feuchtem Zustand geprüft [15, Teil 2], so wird ein prozentualer Feuchtezuschlag ermittelt, der vom volumen- oder vom massebezogenen Feuchtege-halt abhängt.

Über den Volumen- oder den Massebezug des Zuschlags sind akribische Überlegungen angestellt worden [17], [18]. Künzel [19] fordert eine Bereinigung der Zuschlagswerte und eine pauschalere Betrachtung. Dabei sei zu bedenken, dass es weniger auf die „Wahrheit“ des einzelnen Zu-schlagswertes ankomme, sondern auf einfache, reprodu-zierbare und praktikable Kennwerte, die für die Bewertung und einfache Überwachung geeignet seien. Achtziger und Cammerer [20] stellen dies anhand von Beispielen außen-, innen- und kerngedämmter Außenwandkonstruktionen nicht so pauschal dar; sie differenzieren die Zuschlagswerte genauer. Sie stellen ferner fest, dass bei einem Berechnungs-ansatz – außer der Verdampfungsenthalpie – eine „zusätz-liche Sorptionswärme“ berücksichtigt werden müsse. Hie-rauf wird später eingegangen.

Die wichtigsten Verfahren zur Messung der Wärme-leitfähigkeit sind schematisch in Bild 1 dargestellt, und zwar in der Weise, dass die feuchtetechnischen Randbedingun-gen zu Tage treten, wenn feuchte Proben gemessen werden. Bei der Messung der Wärmeleitfähigkeit mit Wärmefluss-messplatten (MP), die auf der warmen oder kalten Seite des Prüflings aufgebracht werden können (Bild 1, oben), muss diejenige Oberfläche, auf der die Messplatte angebracht ist, als feuchtedicht angesehen werden. Das Material der Mess-platte ist nämlich in der Regel feuchteundurchlässig. Die andere Oberfläche ist verdunstungsfähig. Bei der Heizkasten-Methode (HK) sind beide Oberflächen feuchtedurchlässig. Die Stoff-Feuchte kann während der Messung in den Heiz-kasten hinein und in die Kühlkammer verdunsten. Bei der Plattengeräts-Messung (Bild 1, unten) sind beide Proben-Oberflächen – sowohl beim Ein-Plattengerät (P1) als auch beim Zwei-Plattengerät (P2) – feuchtedicht. Die Probe kann während der Messung keine Feuchte abgeben oder aufnehmen; die Feuchte kann sich aber innerhalb der

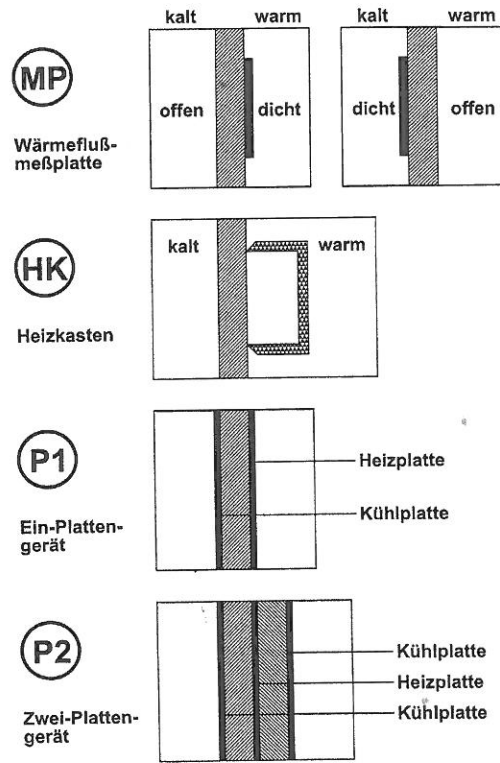


Bild 1. Schematische Darstellung der Wärmeleitfähigkeits-Messverfahren mit der Wärmeflussmessplatte (MP), dem Heizkasten (HK), dem Ein-Plattengerät (P1) und dem Zwei-Plattengerät (P2)
 Fig. 1. Diagram showing measurement methods of thermal conductivity with measuring plate of heat flow (MP), heater box (HK), and wafer devices single type (P1) and double type (P2)

Probe verlagern. Dies gilt auch bei der Wärmefluss-messplatten-Methode MP, wenn an beiden Seiten je ein Wärmeflussmesser angebracht wird. Prinzipiell ergeben sich für den gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport während der Messung daraus die in Bild 2 veranschaulichten vier Fälle:

- Fall A 1: einseitig dichter Abschluss auf der warmen Seite
- Fall A 2: einseitig dichter Abschluss auf der kalten Seite
- Fall B: beidseitig offen
- Fall C: beidseitig dicht.

Der Fall C (beidseitig dicht) bei den Plattengerätsmessungen P1 und P2 kann auch bei anderen Messverfahren auftreten, wenn die Probe zum Schutz vor Austrocknung oder zum Tauwasserschutz allseitig in eine Folie gehüllt wird und die Folie dicht anliegt.

Bei der Messung wird die Probe einem Temperaturge-fälle unterworfen, das einen Feuchtetransport auslöst. In Bild 3 sind die Feuchteverteilungen – ausgehend von einer konstanten Anfangs-Feuchteverteilung über den Proben-querschnitt zum Zeitpunkt $t = 0$ – für die Fälle A bis C schematisch dargestellt. Am schnellsten trocknet die Probe im Fall B, weil hier beide Oberflächen verdunstungsfähig sind (unterste Kurve). In den Fällen A1 und A2 trocknet die Probe nur jeweils zu einer Oberfläche hin aus; die andere ist dicht. An einer dichten Oberfläche muss der Gradient der Feuchtekurve Null sein; d. h. die Kurven müssen dort unter einem rechten Winkel einmünden (bei A1 auf

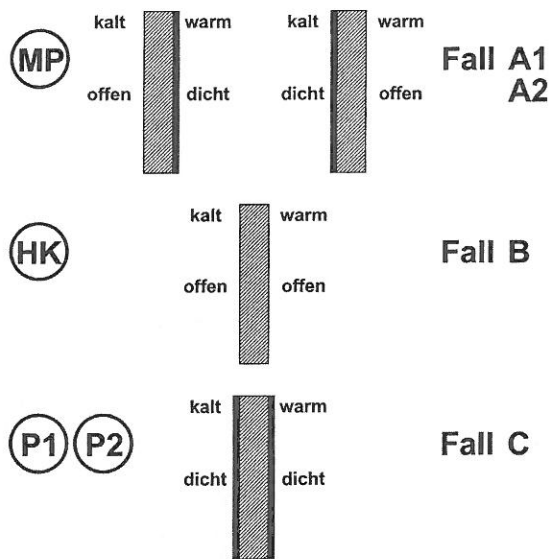


Bild 2. Feuchtetechnische Abschlüsse der Probenoberfläche bei Wärmeleitfähigkeitsmessungen; A1 – außen offen, innen dicht; A2 – außen dicht, innen offen; B – beidseitig offen; C – beidseitig dicht

Fig. 2. Hygric properties of sample surface during thermal conductivity measurements; A1 – open outside, tight inside; A2 – tight outside, open inside; B – open on both sides; C – tight on both sides

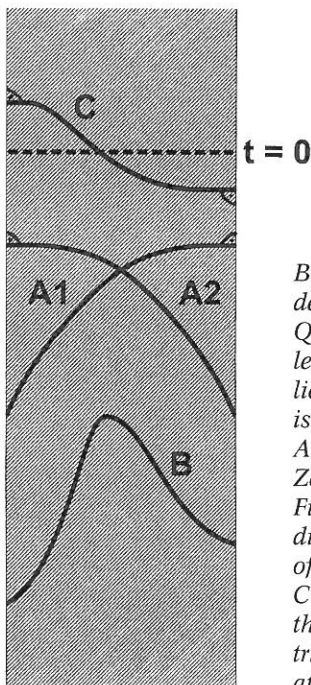


Bild 3. Schematische Darstellung der Feuchteverteilung über den Querschnitt der Probe in den Fällen, A1, A2, B und C, zu einem beliebigen Zeitpunkt; zum Vergleich ist gestrichelt auch die konstante Anfangs-Feuchteverteilung zum Zeitpunkt $t = 0$ eingezeichnet
Fig. 3. Diagram showing humidity distribution over the cross-section of the sample cases A1, A2, B, and C at any given time; for comparison the initial constant moisture distribution is shown (dashed line) at the instant time $t = 0$

der rechten Seite im Bild und bei A2 auf der linken Seite). Im Fall C sind beide Oberflächen dicht. Dies bedeutet, dass die Probe in summa nicht austrocknen kann. Die Feuchte kann sich aber innerhalb der Probe verlagern, z. B. zur kalten Seite hin. Dann steigt der Wassergehalt dorthin an. Er muss aber – weil im Mittel gleichbleibend – dann zur anderen Seite hin abfallen. Dies führt auf Kurve C in Bild 3, die dadurch gekennzeichnet ist, dass sie in beide Oberflächen links und rechts wegen des feuchtedichten Abschlusses unter einem rechten Winkel einmünden muss.

Neben den erläuterten vier Hauptmethoden der Wärmeleitfähigkeitsmessung (MP, HK, P1, P2) gibt es Kurzzeit-

Messverfahren [21] bis [23], mit denen man den Feuchte-transport „überlisten“ wollte, indem diese Verfahren so schnell ablaufen sollen, dass die Feuchte quasi keine Zeit hat, sich merklich zu verlagern. Ob der Feuchteinfluss hierdurch wirklich eliminiert werden kann, muss später überprüft werden.

3 Zum Begriff der Wärmeleitfähigkeit feuchter Stoffe

Feuchte Stoffe bestehen aus einem mit Poren durchsetzten Festkörpergerüst, in das sich, wenn der Stoff hygroskopisch ist, Wasser einlagern kann. Meist sind die Poren zunächst mit Luft gefüllt. Sie können – teilweise oder ganz – auch mit anderen Gasen bzw. mit Wasser in dampfförmigem oder flüssigem Zustand gefüllt sein. Wenn auf solche Stoffe ein Temperaturgefälle einwirkt, kann dies neun verschiedene Wärmetransportarten auslösen, nämlich eine:

- molekulare Wärmeleitung im Feststoff-Gerüst
- molekulare Wärmeleitung in ruhender, trockener Porenluft
- molekulare Wärmeleitung in ruhendem Porenwasser
- molekulare Wärmeleitung in ruhendem Dampf-Luft-Gemisch in der Pore
- langwellige Strahlung von Porenwand zu Porenwand
- Konvektion in den Poren (Wärmetransport durch sich in Bewegung setzende Gase)
- Anwesenheit und ggf. Verlagerung von Feuchte ohne Phasenänderung und ohne Sorptionsvorgänge (keine De- oder Adsorption)
- Anwesenheit und ggf. Verlagerung von Feuchte mit Phasenänderung des Wassers und mit Sorptionsvorgängen
- Auflösung des Festkörpergerüsts, wenn das anliegende Temperaturgefälle den Festkörper „angreift“. Dies kann vor allem bei höheren Temperaturen eintreten (Dehydratation von zementgebundenen Baustoffen oder Abspaltung von Zellwasser und Zellzerstörung bei zellulosehaltigen organischen Stoffen und dgl.).

Die Voraussetzung von in Ruhe bleibenden Komponenten, wie sie den Fällen b, c und d zugrunde liegen, stellt eigentlich nur eine (theoretische) Idealisierung dar, weil der Ruhezustand von Fluiden durch das bei Wärmeleitung anliegende Temperaturgefälle grundsätzlich gestört wird. Dennoch hat es sich eingebürgert, Werte der Wärmeleitfähigkeit ruhender Gase zu definieren. Bild 4 veranschaulicht die Wärmeleitfähigkeit von ruhendem Wasser, ruhender Luft und ruhendem Wasserdampf jeweils in Abhängigkeit von der Temperatur. Man ersieht, dass die Wärmeleitfähigkeit von Wasser etwa 25mal größer ist als diejenige von Luft oder Wasserdampf. Man ersieht ferner, dass Wasserdampf eine etwas niedrigere Leitfähigkeit besitzt als Luft. Deshalb „dämmt“ feuchte Luft überraschenderweise besser als trockene (Ruhezustand ohne Phasenänderung vorausgesetzt).

Ferner hat sich eingebürgert, den Einfluss der langwelligeren Strahlung (Fall e) und der Konvektion (Fall f) im Begriff der Wärmeleitfähigkeit zu subsumieren (vgl. [1. dort S. 144]). Dies führt dann – im Gegensatz zur „molekularen“ oder „echten“ oder auch „wahren“ Wärmeleitfähigkeit – zu einem „effektiven bzw. äquivalenten“ Wärmeleitfähigkeitsbegriff, der die Strahlungs- und Konvektionsbeiträge in den Poren mitenthält. *Krischer* und *Kast* haben sogar versucht, auch die Feuchtetransportvorgänge ge-

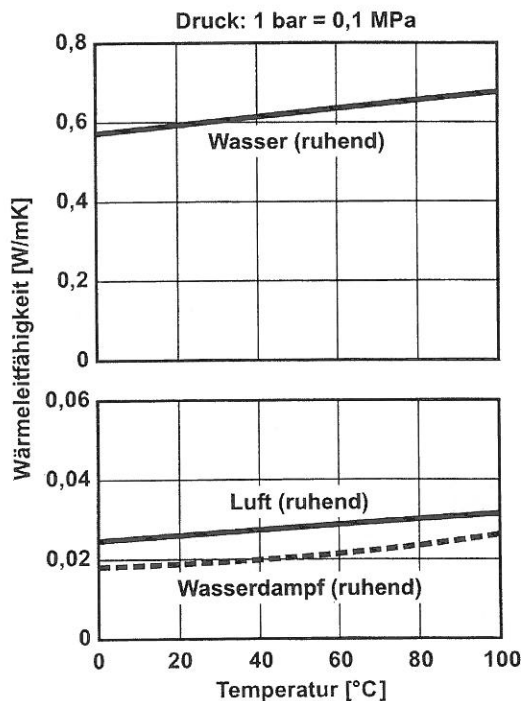


Bild 4. Wärmeleitfähigkeit von ruhendem Wasser, ruhender Luft und von ruhendem Wasserdampf in Abhängigkeit von der Temperatur, nach [24]

Fig. 4. Thermal conductivity of stagnant water, stagnant air, and stagnant water vapor as a function of temperature, [24]

mäß Fall g und h in den Wärmeleitfähigkeitswert hineinzuzeichnen, indem sie eine „Wärmeleitfähigkeit per Diffusionstransport“ definierten (vgl. [25, dort S. 273]). Dies wäre prinzipiell zielführend gewesen, wenn zum damaligen Zeitpunkt (1978) der gekoppelte instationäre Wärme- und Feuchtetransport besser behandelbar gewesen wäre. Ein 1984 unternommener Versuch, näheren Aufschluss über die Auswirkung des Feuchtegehaltes auf die Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen zu gewinnen [26], ist ebenfalls daran gescheitert, dass zum damaligen Zeitpunkt die Stoffwerte (vor allem die Sorptionsisothermen im überhygroscopischen Bereich) nicht hinreichend bekannt waren. Der theoretische Ansatz von Kießl [27] hätte damals schon gute Voraussetzungen für eine Berechnung geboten. Die Sorptionsisothermen im Bereich hoher Feuchten (> 98 % r. F) wurden durch Krus befriedigend erfassbar, der die in der Bodenmechanik schon länger gebräuchliche Saugspannungsmessung 1995 auf Baustoffe übertragen hat [28].

Die vorliegende Arbeit beschränkt sich auf den Feuchteinfluss, d. h. auf die Fälle g und h. Dabei kommt dem Fall h (Feuchteverlagerung mit Phasenänderung und Sorption) die Hauptbedeutung zu, weil in porösen Stoffen praktisch immer Phasenänderungs- und Sorptionsvorgänge vorhanden sind. Fall i mit Zerstörung des Festkörpergefüges ist bei den hier vorausgesetzten kleinen Temperaturdifferenzen und niedrigen Temperaturen, die von der sog. Anwendungsgrenztemperatur (vgl. [1, dort S. 393 ff]) weiter entfernt liegen, unwichtig. Er spielt aber bei der Festlegung der zulässigen Trocknungstemperatur eine Rolle.

4 Durchführung der Untersuchungen

4.1 Zugrundegelegte Stoffwerte

Die geschilderten Feuchteübertragungsvorgänge während einer Wärmeleitfähigkeitsmessung werden mit dem WUFI-Verfahren [3] berechnet. Die Stoffwerte für die hier untersuchten Materialien entstammen der WUFI-Datenbank [29], soweit im Folgenden nicht anderweitige Daten genannt und begründet werden. Aus den vielen Bau- und Dämmstoffen wird Porenbeton ausgewählt, weil sich wegen seiner relativen Homogenität an ihm der Ablauf der einzelnen Phänomene deutlich analysieren und anschaulich erklären lässt (Tabelle 1). Beim Wassertransport in Porenbeton wirken zudem Diffusions- und Kapillartransporteigenschaften zusammen.

Die Feuchtetransportvorgänge und die damit verbundene Phasenänderung bzw. Sorption benötigen Latentwärme oder setzen sie frei (endo- bzw. exotherme Reaktion). Wird beim Trocknen eines Stoffes flüssiges Wasser in ein Dampf-Luft-Gemisch hinein übergeführt, also verdunstet*, so ist wegen der Phasenänderung zunächst die Verdampfungsenthalpie und dann weiterhin – wegen der Loslösung der sorbierten Wassermoleküle – auch die sorptive Bindungsenergie aufzubringen. Krischer und Kast [25, dort S. 64] stellen fest, dass die Bindungsenthalpie – gegenüber der Verdampfungswärme – im Bereich höherer Feuchtegehalte vernachlässigbar klein ist. Künzel [30] verallgemeinert diese Feststellung an Hand einiger Beispiele, was dazu führt, dass bei WUFI-Berechnungen gemäß [3] bislang keine Bindungsenergie in Ansatz gebracht wird. Bei den üblichen WUFI-Berechnungen unter Real-Bedingungen mag dies auch zulässig sein, weil es sich dort meist um höhere Wassergehalte handelt.

Bei der Nachrechnung der Messbedingungen für die Wärmeleitfähigkeit feuchter Stoffe, um die es im vorliegen-

Tabelle 1. Zusammenstellung der für Porenbeton zugrunde gelegten Stoffwerte

Table 1. Compilation of material parameters used for aerated concrete

Stoffwert und physikalische Einheit		Porenbeton
Rohdichte (trocken)	kg/m ³	400
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	-	7,9
Flüssigkeitstransportkoeffizient	m ² /s	variabel gemäß [29]
spezifische Wärmekapazität (trocken)	J/kg	850
Wärmeleitfähigkeit (trocken, 10 °C)	W/mK	0,100
Temperaturzuschlag	mW/mK ²	0,2
Sorptionsisotherme	-	variabel gemäß [29]

* Im Deutschen wird ein Unterschied zwischen Verdunsten und Verdampfen gemacht. Phasenumwandlungen von Wasser in reinen Dampf heißen Verdampfung, in ein Dampf-Luft-Gemisch hinein heißen sie Verdunstung. Im Englischen gibt es diese verbale Unterscheidung nicht. Für die Größe der Enthalpie ist die Unterscheidung belanglos.

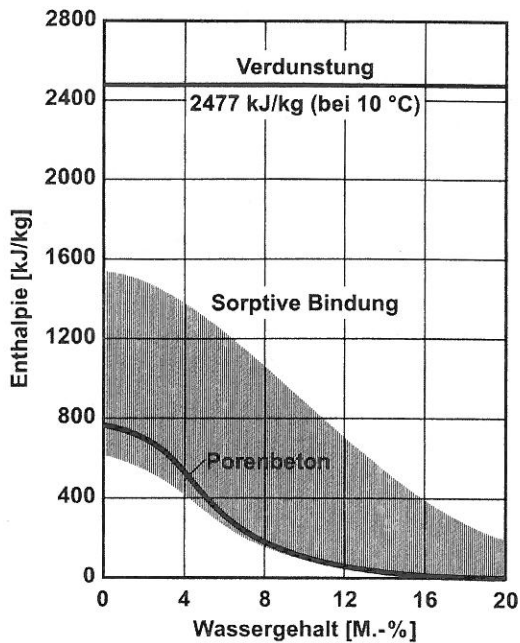


Bild 5. Abhängigkeit der Latent-Enthalpie (Verdunstungs- und sorptive Bindungsenergie) vom Wassergehalt für verschiedene Stoffe; der schraffierte Bereich fasst verschiedene Stoffe (Kartoffel, Holz, Aktiv-Tonerde, Molekularsieb) nach [25] zusammen. Die ausgezogene Kurve gilt für Porenbeton (Rohdichte: 700 kg/m^3), nach [31].

Fig. 5. Dependency of latent enthalpy (evaporation and sorptive bond energy) of the water content of various substances; the shaded section summarizes various substances (potato, wood, active alumina, molecular sieve) [25]. The full curve applies for aerated concrete (bulk density: 700 kg/m^3) [31].

den Fall geht, spielen jedoch relativ niedrige Feuchtegehalte, die im hygroskopischen Bereich um die 80 % relative Feuchte oder noch niedriger liegen, eine wichtige Rolle. In Bild 5 ist deshalb die Abhängigkeit der Bindungsenthalpie vom Feuchtegehalt für Porenbeton und für einige andere Stoffe (schraffierter Bereich) wiedergegeben.

Zum Vergleich ist oben im Bild auch die Verdunstungsenthalpie eingetragen, die – unabhängig vom Wassergehalt – für 10 °C bei 2477 kJ/kg liegt. Die Verläufe zeigen, dass die Bindungsenergie – im Verhältnis zur Verdunstungsenthalpie – bei kleinen Wassergehalten nicht vernachlässigbar ist; sie kann unterhalb einer Feuchte von ca. 4 Masse-% ein Viertel bis zur Hälfte der Verdunstungswärme ausmachen. Bei höheren Feuchtegehalten wird sie dann allerdings wirklich vernachlässigbar klein. Wie stark die sorptive Bindungsenergie die Feuchteausgaben in der vorliegenden Arbeit beeinflusst, muss später noch genauer überprüft werden.

Leider sind Angaben zur Bindungswärme für poröse Baustoffe in der Literatur nur spärlich zu finden. Dies liegt daran, dass die Sorptionsisothermen meist nur für eine bestimmte Temperatur gemessen worden sind. Man bräuchte zur Ermittlung der Bindungswärmen aber eine ganze Schar von Sorptionsisothermen bei jeweils verschiedenen Temperaturen. Wenn diese Kurvenscharen vorlägen, ließe sich daraus, wie Kast [32, dort S. 38–39] aufzeigt, leicht auch die Abhängigkeit der Bindungsenthalpie für beliebige andere Materialien ermitteln.

4.2 Zugrundegelegte Randbedingungen

Die Untersuchungen werden zunächst an Hand eines Standardfalles durchgeführt, für den sich Porenbeton besonders eignet. Tabelle 2 zeigt die für diesen Standardfall zugrundegelegten Randbedingungen. Ausgegangen wird vom Fall A1 gemäß Bild 2; das entspricht einer Porenbetonprobe, die außenseitig offen und auf der warmen Seite feuchtedicht abgeschlossen ist. Die Probendicke beträgt 20 cm . Es liegt ein Temperaturgefälle von 20 K an, wobei der Innenoberfläche 20 °C aufgeprägt werden und im Kühlraum eine Lufttemperatur von 0 °C vorhanden ist. Dort herrsche eine Luftfeuchte von 50 % r. F. Der Gesamtwärmeübergangskoeffizient auf der kalten Seite beträgt $18 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, wobei $5 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ auf Strahlung und 13 W/

Tabelle 2. Zusammenstellung der zugrundegelegten Randbedingungen für den Standardfall (Porenbeton)
Table 2. Default case parameters (aerated concrete)

Parameter	Nähere Bezeichnung	Wert
Material	Porenbeton	–
Oberflächenabschluss	Fall A1, gemäß Bild 2; innen dicht, außen offen	–
Probendicke	–	20 cm
Temperatur	innen (warme Oberfläche)	20 °C
	außen (kalte Luft im Kühlraum)	0 °C
Luftfeuchte	im Kühlraum	50 % r. F.
Wärmeübergang (außen)	Wärmeübergangskoeffizient	
	gesamt	$18 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Strahlung Konvektion	$5 \text{ W/m}^2\text{K}$ $13 \text{ W/m}^2\text{K}$
Stoffübergang (außen)	Stoffübergangskoeffizient	$9,1 \cdot 10^{-8} \text{ kg/m}^2\text{sPa}$
Startzustand ($t = 0$)	gleichmäßige Temperaturverteilung	20 °C
	gleichmäßige Feuchteverteilung	20 Vol.-%
Bindungsenergie vernachlässigt		0 kJ/kg

(m²K) auf Konvektion entfallen mögen. Dies entspricht den normativen Messbedingungen, die im Kühl- und Heizkasten – über Leitbleche gelenkt – eine ungefähre Strömungsgeschwindigkeit von 2 m/s und eine langwellige Emissionszahl von 0,8 vorschreiben. Mittels der Lewis-Analogie erhält man nach [30] und [33] aus dem konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten unter diesen Bedingungen einen Stoffübergangskoeffizienten von $9,1 \cdot 10^{-8}$ kg/m²s Pa im Kühlkasten.

Bei Beginn der Wärmeleitfähigkeitsmessung, die durch Rechnung nachgebildet werden soll, herrschen zum Zeitpunkt $t = 0$ thermische und hygrische Startbedingungen. Die Temperatur des vorbehandelten und im Labor gelagerten Probekörpers betrage gleichmäßig über den ganzen Querschnitt verteilt 20 °C (isothermer Ausgangszustand). Der Anfangsfeuchtegehalt belaufe sich beim Start der Berechnung – ebenfalls gleichmäßig über den Querschnitt verteilt – auf 20 Vol.-%. Die sorptive Bindungsenergie wird vernachlässigt.

5 Ergebnisse der Untersuchung von Porenbeton

5.1 Rechen- und Messgrößen

Auf der Basis der zugrunde gelegten Daten und Randbedingungen lassen sich die instationär-gekoppelten Wärme- und Feuchtevorgänge, die während der Wärmeleitfähigkeitsmessung im Probekörper ablaufen, mittels des WUFI-Verfahrens nachrechnen. Für die Untersuchung wird eine Platte aus Porenbeton von zunächst 20 cm Dicke ausgewählt (Standardfall gemäß Tabelle 2). Hierbei werden – jeweils für den trockenen und feuchten Ausgangszustand der Probe – folgende Größen ermittelt:

- (1) zeitlicher Verlauf des Wassergehaltes an der kalten Oberfläche
- (2) zeitlicher Verlauf der Feuchtestromdichte an der kalten Oberfläche
- (3) zeitlicher Verlauf der relativen Luftfeuchte an der kalten Oberfläche. Die Oberflächen-Luftfeuchte ist veränderlich; fest vorgegeben ist die Luftfeuchte im Kühlkasten mit 50 % r. F. bei 0 °C.
- (4) zeitlicher Verlauf der Temperatur der kalten Oberfläche. Diese Temperatur ist veränderlich; fest vorgegeben ist die Lufttemperatur im Kühlkasten mit 0 °C.
- (5) zeitlicher Verlauf der Wärmestromdichte an der warmen Oberfläche im Heizkasten. Mit dem WUFI-Verfahren könnte die Wärmestromdichte an jeder beliebigen Stelle zu jeder Zeit berechnet werden. Die Wärmestromdichte an der warmen Oberfläche ist aber deshalb wichtig, weil bei den Norm-Messungen der Wärmestrom immer auf der warmen Seite gemessen wird. Bei der Heizkastenmethode ist dies die dem Heizkasten zugeführte elektrische Leistung, beim Plattengerät die Leistung der Heizplatte.
- (6) zeitlicher Verlauf des Wärmedurchlasskoeffizienten, errechnet aus (5)
- (7) zeitlicher Verlauf der Wärmeleitfähigkeit, errechnet aus (5)
- (8) Einfluss der Feuchte auf die Wärmeleitfähigkeit, errechnet aus der Wärmeleitfähigkeit gemäß (5) für den feuchten und trockenen Zustand. Hier interessiert der Feuchte-Einflussfaktor F , der bei der Messung der Wärmeleitfähigkeit λ_f eines feuchten Stoffes gegenüber der

Wärmeleitfähigkeit λ_{tr} des trockenen Gutes nach folgender Gleichung entsteht:

$$F = (\lambda_f - \lambda_{tr})/\lambda_{tr}$$

Der Feuchte-Einflussfaktor F kennzeichnet den Einfluss der Feuchte auf die Wärmeleitung feuchter Stoffe. Der Feuchteeinfluss ist system-immanent, weil sich das im Material vorhandene Wasser grundsätzlich in Bewegung setzt, sobald ein Temperaturgefälle an die Probe angelegt wird; man kann die Feuchte nämlich nicht „festzurren“. Allerdings stellt der durch das anliegende Temperaturgefälle ausgelöste Feuchtetransport einen quasi eigenständigen Vorgang dar, der eigentlich nicht der Wärmeleitfähigkeit zugeordnet werden sollte. Wie oben erwähnt, wird deshalb in der ISO-Norm [10] nicht mehr von „Conductivity“, sondern von „Transmissivity“ gesprochen. In der vorliegenden Arbeit wird der Feuchteeinfluss auf die Wärmeleitfähigkeit durch den Feuchte-Einflussfaktor F erfasst. Bei Wärmeleitfähigkeitsmessungen können viele weitere Einflüsse auftreten, die zu zufälligen und systematischen Messfehlern führen. *Albrecht* [34] hat hierzu eine allgemeine Fehlerbeurteilung angestellt und eine hochgenaue Messapparatur entwickelt. Der durch Feuchtwirkung entstehende Einfluss wurde von *Albrecht* aber nicht behandelt.

5.2 Thermohygrische Abläufe in der Porenbetonprobe

Anhand einer Porenbetonprobe (Standardfall 0 gemäß Tabelle 2 und weitere Fälle 1 bis 15 gemäß Tabelle 3) lassen sich die aufgeführten Messgrößen (1) bis (8) per Rechnung ermitteln und genauer analysieren. Bild 6 illustriert den Zeitverlauf des Wassergehaltes der kalten Oberfläche während der ersten fünf Tage einer Wärmeleitfähigkeitsmessung. Man er-

Tabelle 3. Zusammenstellung der Untersuchungsvarianten (Fall 0 bis Fall 15) sowie Angabe der Variationsparameter und der variierten Werte bei der Porenbetonprobe
Table 3. Compilation of examination types (cases 0 to 15) and varied parameters of aerated concrete

Fall-Nr.	Variationsparameter	Variierte Werte
0 (Standard)		20 Vol.-%
1		10 Vol.-%
2	Anfangsfeuchtegehalt	5 Vol.-%
3		95 r. F. (3,7 Vol.-%)
4		80 r. F. (0,9 Vol.-%)
5		10 cm
6	Probendicke	5 cm
7		2 cm
8		1 cm
9		10 K
10	Temperaturgefälle	5 K
11		2 K
12		1 K
13	Feuchteabschluss (Oberfläche)	A2 dicht, kalte Seite
14		B beidseitig offen
15		C beidseitig dicht

kennt, wie die Oberfläche in den Kühlraum hinein trocknet. Nach unendlich langer Zeit (rechts im Bild vermerkt) würde die Oberfläche dem hygroscopischen Gleichgewichtszustand bei 50 % r. F. zustreben (0,2 Vol.-%). Bild 7 veranschaulicht die Zeitverläufe der Feuchtestromdichte durch die kalte Oberfläche einer feuchten und trockenen Porenbetonprobe. Man ersieht, dass die feuchte Probe anfangs viel Wasser abgibt, während die trockene Probe aus dem Kühlraum, der auf 0 °C und 50 % r. F. klimatisiert wird, einen ganz geringen Feuchtestrom aufnimmt. Die Feuchteströme streben (rechts im Bild) nach sehr langer Zeit dem Grenzwert Null zu.

Analog hierzu zeigt Bild 8 die zeitlichen Verläufe der relativen Oberflächenfeuchte. Beide Verläufe besitzen als Asymptote den Grenzwert von 50 % r. F. (rechts im Bild), welcher im Kühlkasten als Randbedingung vorgehalten wird.

Interessant ist der Temperaturzeitverlauf an der äußeren Probenoberfläche, die dem Kühlkasten zugewandt ist (Bild 9). Man erkennt, wie sich die Oberflächentemperatur der trockenen Probe – ausgehend von 20 °C beim Start des Versuchs – relativ rasch dem asymptotischen Endwert von 0,5 °C nähert. Die feuchte Probe wird aufgrund der Phasenänderungsenthalpie zunächst auf Minus-Werte unterkühlt und nähert sich dann – von unten her – der Asymptote, aber wesentlich langsamer als bei der trockenen Probe. Die Feuchte bremsst die Wärmewelle praktisch aus.

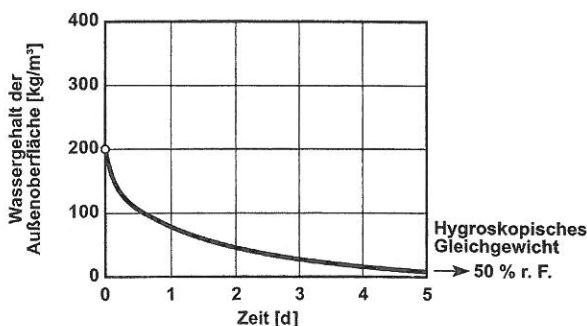


Bild 6. Zeitlicher Verlauf des Wassergehaltes der kalten, zum Kühlkasten gewandten Oberfläche während der Messung einer Porenbetonprobe; Standardfall gemäß Tabelle 2
Fig. 6. Time history of water content of the cold sample surface, turned to the cooling box, during measurement; data from default case according to Table 2

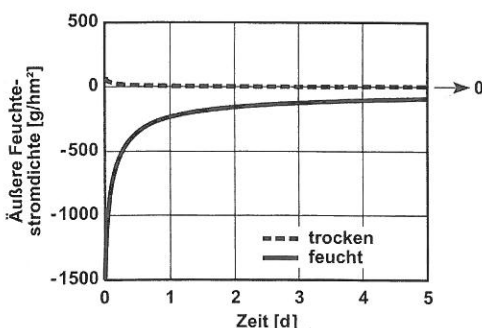


Bild 7. Zeitlicher Verlauf der äußeren Feuchtestromdichte durch die kalte, zum Kühlkasten gewandte Oberfläche während der Messung einer feuchten und einer trockenen Porenbetonprobe; Standardfall gemäß Tabelle 2
Fig. 7. Time history of the external moisture flow density through the cold sample surface, turned to the cooling box; measurement of a humid and dry sample; data from default case according to Table 2

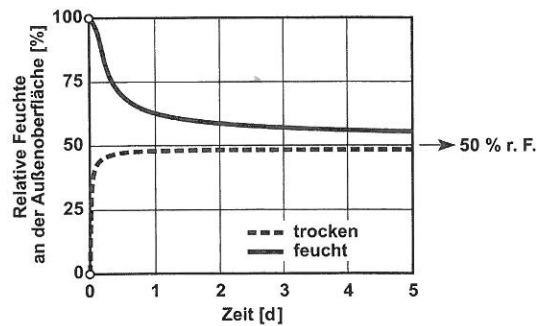


Bild 8. Zeitlicher Verlauf der relativen Oberflächenfeuchte (kalte Oberfläche zum Kühlkasten hin) während der Messung einer feuchten und einer trockenen Porenbetonprobe; Standardfall gemäß Tabelle 2

Fig. 8. Time history of relative humidity of the cold sample surface, turned to the cooling box; measurement of a humid and a dry sample; data from default case according to Table 2

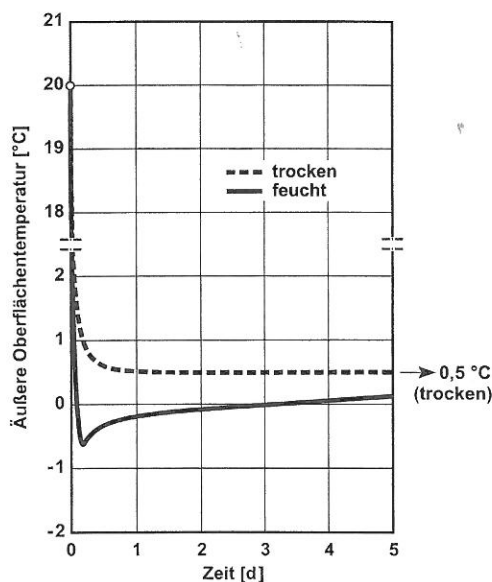


Bild 9. Zeitlicher Temperaturverlauf der dem Kühlkasten zugewandten Oberfläche während der Messung einer feuchten und einer trockenen Porenbetonprobe; Standardfall gemäß Tabelle 2

Fig. 9. Time history of the surface temperature of the cold sample surface, turned to the cooling box; measurement of a humid and a dry sample; data from default case according to Table 2

Wirkung zeigt die Verdunstungskühlung auch bei der Wärmestromdichte auf der Innenseite (Bild 10). Dort tut sich bei der feuchten Probe etwa sechs Stunden lang quasi nichts, erst danach beginnt die eindringende Wärme dort spürbar zu werden. Die Wärmestromdichte der feuchten Probe hinkt derjenigen der trockenen Probe knapp zwei Tage nach. Dann übersteigt sie den Strom der trockenen Probe, weil das feuchte Material mehr Wärme aus dem Heizkasten abzieht als das trockene.

Qualitativ ähnlich verlaufen auch die an der feuchten und trockenen Probe zu messenden Wärmedurchlasskoeffizienten, die in Bild 11 dargestellt sind. Sie nähern sich dem trockenen Asymptoten-Wert von 0,5 W/(m²K).

Einen gleichartigen Verlauf zeigen auch die Wärmeleitfähigkeiten der feuchten und trockenen Probe in Bild 12. Der Verlauf bei den feuchten Proben liegt zunächst unterhalb der Kurve der trockenen Probe. Nach Überschneiden

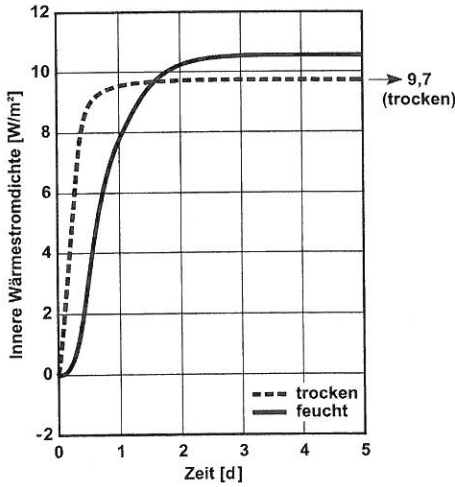


Bild 10. Zeitlicher Verlauf der Wärmestromdichte auf der warmen Innenseite einer feuchten und einer trockenen Porenbetonprobe; Standardfall gemäß Tabelle 2
 Fig. 10. Time history of the heat flow density on the warm sample surface; measurement of a humid and a dry sample; data from default case according to Table 2

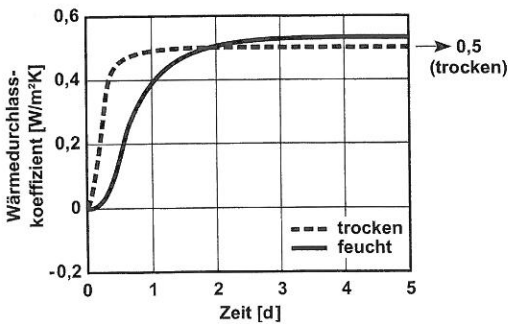


Bild 11. Zeitlicher Verlauf der Wärmedurchlasskoeffizienten während der Messung einer feuchten und einer trockenen Porenbetonprobe; Standardfall gemäß Tabelle 2
 Fig. 11. Time history of the thermal transition coefficient; measurement of a humid and a dry sample; data from default case according to Table 2

der Kurven ist die im Feuchtezustand gemessene Wärmeleitfähigkeit größer als diejenige des trockenen Materials. Die Asymptote der Trocken-Kurve liegt nach Voraussetzung bei $\lambda_{tr} = 0,1 \text{ W/(mK)}$. Die Asymptote der Feuchte-Kurve wird in Abschnitt 5.3 erörtert.

In Bild 13 ist der zeitliche Verlauf des Feuchte-Einflussfaktors wiedergegeben. Da die Wärmeleitfähigkeit der feuchten Probe – wegen der Bremswirkung der Feuchte aufgrund der Latentwärme – zunächst langsamer ansteigt als diejenige der trockenen Probe, dann aber die Kurve der trockenen Probe schneidet, existiert ein Zeitpunkt, an dem für die trockene und die feuchte Probe exakt gleiche Wärmeleitfähigkeiten gemessen werden. Der Feuchte-Einflussfaktor wird dann zu Null. Wie in Bild 13 vermerkt, tritt bei dem hier zugrundeliegenden Porenbeton-Beispiel nach $1,77 \text{ d} = 42,5 \text{ h}$ kein Feuchte-Einfluss auf, obwohl die Probe einen Feuchtegehalt von fast 20 Vol.-% aufweist. Leider kann die Messperson diesen Zeitpunkt nicht „voraussehen“. Bei über diesen Null-Punkt verlängerten Messdauern nimmt der Feuchte-Einflussfaktor wieder zu. Bräche

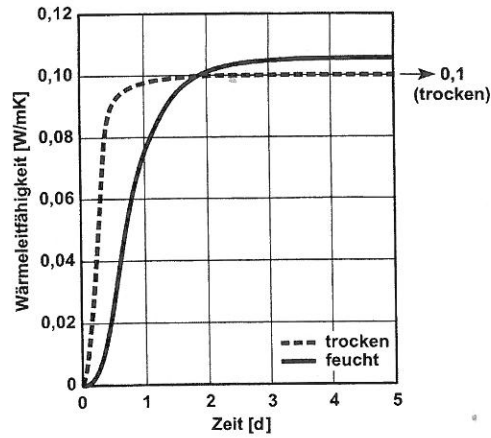


Bild 12. Zeitlicher Verlauf der Wärmeleitfähigkeit während der Messung einer feuchten und einer trockenen Porenbetonprobe; Standardfall gemäß Tabelle 2
 Fig. 12. Time history of the thermal conductivity; measurement of a humid and a dry sample; data from default case according to Table 2

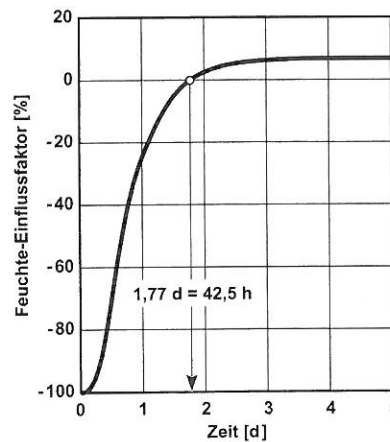


Bild 13. Zeitlicher Verlauf des Feuchte-Einflussfaktors $F = (\lambda_f - \lambda_{tr}) / \lambda_{tr}$; Standardfall gemäß Tabelle 2
 Fig. 13. Time history of the moisture effect factor $F = (\lambda_f - \lambda_{tr}) / \lambda_{tr}$; data from default case according to Table 2

man die Messung aber in diesem Punkt oder in dessen Nähe ab, so erhielte man keinen bzw. relativ kleine Abweichungen. Dies ist wohl der Grund dafür, warum bei Feuchtemessungen manchmal scheinbar unerklärliche Messwertstreuungen auftraten. Je nachdem, wie nahe man diesem Punkt zufällig kam, desto geringer war der („gemessene“) Feuchteeinfluss. Der Null-Durchgang der Kurve des Feuchte-Einflussfaktors stellt ein wichtiges Ergebnis der vorliegenden Arbeit dar. Es besagt nämlich, dass bei Wärmeleitfähigkeitsmessungen feuchter Stoffe – quasi zufällig – sowohl negative als auch positive Abweichungen auftreten können, je nachdem, ob die Messdauer in der Nähe links oder rechts oder weiter entfernt vom Null-Durchgangspunkt liegt.

5.3 Abbruch-Kriterien

Wenn eine Wärmeleitfähigkeitsmessung zum Zeitpunkt $t = 0$ beginnt, laufen, wie die vorhergehenden Bilder gezeigt haben, die instationär-gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportvorgänge im Probekörper an. Der Probekörper wird vor

der Messung vorbehandelt und besitzt – bei Lagerung im Labor – im allgemeinen eine Ausgangstemperatur von 20 °C und eine definierte Feuchte. Der Aufbau des Temperaturfeldes in der Messapparatur erfolgt meist sehr viel rascher als derjenige des Feuchtefeldes, weil die Feuchte-transportvorgänge langsamer ablaufen als die thermischen Prozesse. Beide Transporte – der thermische und der hygrische – streben einem stationären Endzustand entgegen, der theoretisch nach unendlich langer Zeit erreicht wird. Eine Wärmeleitfähigkeitsmessung kann in der Praxis aber nicht „ewig“ dauern, sondern muss innerhalb eines handhabbaren Zeitraums beendet sein bzw. abgebrochen werden.

In den Normen werden hierfür Abbruchkriterien bei Erreichen von 99 % bzw. 99,9 % des (theoretisch nach unendlich langer Zeit) auftretenden Endwertes λ_{∞} genannt, was einer Abweichung von 1 % bzw. 1 ‰ entspricht. Da der thermische Einschwingvorgang immer schneller abläuft als der hygrische, ist in der vorliegenden Arbeit für das Ende der Nachrechnung des Messvorganges das hygrische Abbruchkriterium bestimmend. Der thermische Endwert des trockenen Stoffes $\lambda_{\infty, \text{tr}}$ ist zudem bekannt, weil hierfür nach Voraussetzung λ_{tr} angenommen worden ist. Am Beispiel Porenbeton bedeutet dies:

trockener Stoff:

$$\lambda_{\text{tr}, \infty} = \lambda_{\text{tr}} = 0,1 \text{ W/(mK)}$$

feuchter Stoff:

$\lambda_{\text{f}, \infty}$ zunächst unbekannt; wird mit WUFI ermittelt.

Man könnte unterstellen, dass die feuchte Probe nach langer Zeit austrocknen würde und $\lambda_{\text{f}, \infty}$ den Trockenwert $\lambda_{\text{tr}, \infty}$ annähme. Dies tritt nur dann ein, wenn die Randbedingungen bei der Messung eine Austrocknung gestatten. Möglich ist dies gemäß Bild 2 aber nur im Fall B (beidseitige Austrocknung) und – mit langsamerer Trocknungsgeschwindigkeit – in den Fällen A1 und A2 (zur jeweils offenen Seite hin). Fall C schließt eine Trocknung aus. Aber auch wenn eine Trocknung möglich ist, wird – selbst nach unendlich langer Zeit – nicht der Trockenzustand λ_{tr} erreicht, sondern nur jener Feuchte-Endwert, der dem hygroscopischen Gleichgewicht bei den vorgegebenen Randbedingungen entspricht. Das ist im

- Fall A1: 0 °C; 50 % r. F. (außen)
- Fall A2: 20 °C; 50 % r. F. (innen)
- Fall B: 0 °C (außen); 20 °C (innen), jeweils 50 % r. F.

Wenn $\lambda_{\text{f}, \infty}$ dem hygroscopischen Gleichgewichtszustand unter den gegebenen Randbedingungen entspricht, muss dieser Wert auch jene Wärmeleitfähigkeit verkörpern, bei der alle Feuchteverlagerungsvorgänge zur Ruhe gekommen sind. Der dann noch vorhandene Feuchteeinfluss beruht also ausschließlich auf der Anwesenheit von in Ruhe befindlichen Wassermolekülen im Porengefüge gemäß Buchstabe c) und d) in Abschnitt 3. $\lambda_{\text{f}, \infty}$ stellt somit die wirkliche Wärmeleitfähigkeit eines feuchten Stoffes (ohne Verlagerung der Feuchte) dar. Wenn $\lambda_{\text{f}, \infty}$ die wirkliche („wahre“) Wärmeleitfähigkeit eines feuchten Materials verkörpert, läge es nahe, den Feuchte-Einflussfaktor $F = (\lambda_{\text{f}} - \lambda_{\text{tr}}) / \lambda_{\text{tr}}$ – statt auf den Trockenwert λ_{tr} – auf den Feuchte-Wert $\lambda_{\text{f}, \infty}$ zu beziehen. Die Wahl der Bezugsgröße muss deshalb später noch genauer untersucht werden.

Wie in Bild 14 schematisch dargestellt, kann man davon ausgehen, dass der Feucht-Wert der Wärmeleitfähigkeit nach Erreichen eines Maximums wieder abnimmt und sich dem asymptotischen Wert $\lambda_{\text{f}, \infty}$ annähert, der geringfügig oberhalb des Trocken-Wertes $\lambda_{\text{tr}, \infty} = 0,1 \text{ W/(mK)}$ verbleibt. Den Trocken-Wert, welcher normgemäß bei 105 °C-Trocknung ermittelt worden ist, kann die Feucht-Kurve wegen der anderen End-Randbedingungen aber nicht ganz erreichen. Bild 14 beinhaltet eine schematische, nicht eine mit WUFI berechnete Darstellung. Die bisherige WUFI-Berechnung kann nämlich die Wiederabnahme des λ_{f} -Wertes nicht zutreffend beschreiben, weil hierin die Sorptionsenthalpie vernachlässigt wird (vgl. Tabelle 2, unterste Zeile). Der Einfluss der Bindungsenthalpie würde sich aber gerade bei den kurz vor dem Trockenzustand liegenden Niedrig-Feuchten stark auswirken, weil dort die Bindungsenergien kräftig ansteigen (vgl. Bild 5).

Man muss sich ferner vergegenwärtigen, dass auch der Trockenwert der Wärmeleitfähigkeit λ_{tr} , der einer normgemäß bei 105 °C getrockneten Probe zugeordnet wird, nur dann dem wirklichen Trockenzustand entspricht, wenn im Trocknungsschrank eine relative Luftfeuchte von 0 % vorgehalten wird. Dies geht aus Bild 15 hervor, in dem die bei verschiedenen Temperaturen gemessenen Sorptionsisothermen eingezeichnet sind. Man erkennt, dass der Feuchtegehalt umso kleiner wird, je höher die Temperaturen sind. Dies bedeutet, dass das Material umso stärker austrocknet, je höher die Trocknungstemperatur gewählt wird. Aber selbst bei 105 °C sind – je nach der Feuchte der Umgebungsluft – noch relativ hohe Materialfeuchten vorhanden. Die Materialtrocknung in Trocknungsöfen führt nur dann zu wirklicher Trockenheit, wenn dort getrocknete Luft mit 0 % Feuchte vorhanden ist; sonst kennzeichnet auch der per definitionem festgelegte λ_{tr} -Wert kein wirklich trockenes Material. Unter praktischen Trocknungsbedingungen dürfte dies näherungsweise zutreffen, sofern die Belüftung des Trockenschrankes bei Laborbedingungen erfolgt.

Bild 15 gilt leider nicht für Porenbeton, sondern für Kartoffelstücke. Für Porenbeton oder für andere interessie-

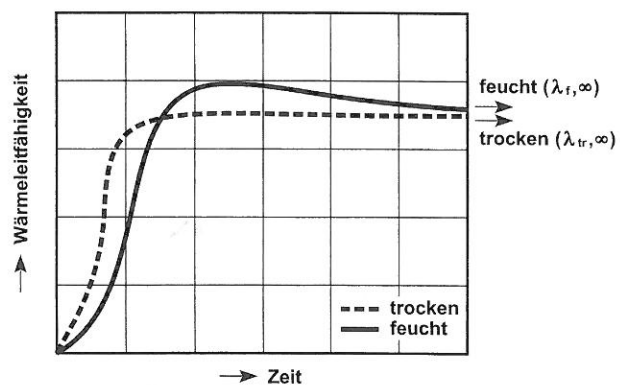


Bild 14. Schematische Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Wärmeleitfähigkeit während der Messung einer feuchten und einer trockenen Probe. Die hier als „trocken“ bezeichnete Probe bleibt trocken; d. h. sie ist in eine Folie eingepackt; andernfalls würde sie aus dem Kühlraum (0 °C/50 % r. F.) geringfügig Feuchte aufnehmen.

Fig. 14. Time history scheme of the thermal conductivity; measurement of a humid and a dry sample with the “dry“ sample sealed in foil, otherwise it would marginally absorb moisture from the cold storage (0 °C/50 % RH)

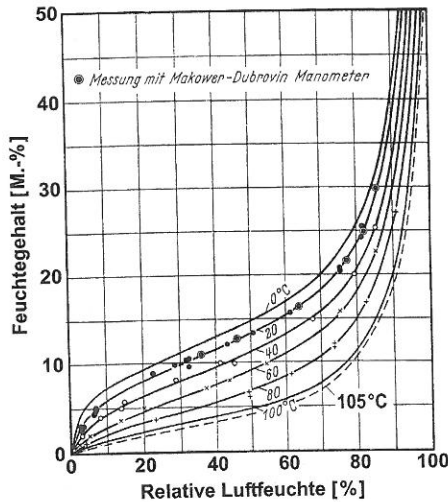


Bild 15. Gemessene Sorptionsisothermen bei verschiedenen Temperaturen für Kartoffel nach [25], [35], die gestrichelte Kurve für 105 °C beruht auf Schätzungen
 Fig. 15. Measured sorption isotherms of potato at various temperature values [25], [35]; the dashed curve for 105 °C is based on estimates

rende Bau- und Dämmstoffe sind bedauerlicherweise kaum Sorptionsisothermen-Scharen für verschiedene Temperaturen in der Fachliteratur zu finden; in keinem Fall sind 105 °C-Sorptionsmessungen bekannt. Dies überrascht. Man hat bei der seinerzeitigen Normgebung offensichtlich weniger auf die im Material verbleibende Restfeuchte, sondern mehr auf die Einschränkung bzw. Vermeidung von Gefügebrauchungen gemäß Buchstabe i) in Abschnitt 3 geachtet.

Bei der WUFI-Nachrechnung hat sich herausgestellt, dass das Erreichen des 99 %- oder 99,9 %-Wertes der Wärmeleitfähigkeit lange Rechenzeiten erfordern würde. Dies führte auch in der Messpraxis auf extrem lange Messdauern, die unrealistisch wären. Jeder erfahrene Messtechniker bricht die Messung nämlich dann ab, wenn sich der Messwert der Wärmeleitfähigkeit nicht mehr nennenswert ändert. Es kommt also auf die zeitliche Änderung der Wärmeleitfähigkeit $d\lambda/dt$ an, nicht auf die Wärmeleitfähigkeit selbst. Aus diesem Grund wird als Abbruch-Zeitpunkt jene Zeitdauer $t_{1\%}$ bzw. $t_{1\%_{00}}$ gewählt, ab der die zeitliche Änderung, also der Zeitgradient, einen Wert von 1 % bzw. 1 %₀₀ unterschreitet. Die hierbei vorhandenen Wärmeleitmesswerte werden $\lambda_{f,1\%}$ bzw. $\lambda_{f,1\%_{00}}$ genannt; sie weisen die Feuchte-Einflussfaktoren $F_{1\%}$ bzw. $F_{1\%_{00}}$ auf. Die WUFI-Berechnung könnte natürlich beliebig lange fortgeführt werden.

Bild 16 zeigt die zeitlichen Verläufe des Zeitgradienten der Wärmeleitfähigkeit bei der Messung einer feuchten und einer trockenen Porenbetonprobe. Man ersieht, dass sich der Zeitgradient bei der trockenen Probe bereits nach 1 Tag kaum mehr ändert. Im Nachlauf hierzu sind nach 2 bis 3 Tagen in diesem Fall auch bei der Feucht-Probekurve kaum mehr Gradienten-Änderungen zu verzeichnen.

6 Allgemeine Ergebnisse und Interpretation

Weil die instationär-gekoppelten Wärme- und Feuchteübertragungsvorgänge bei der Messung der Wärmeleitfähigkeit feuchter Materialien nicht leicht zu durchschauen

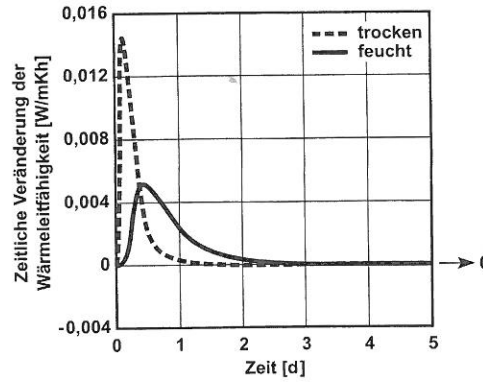


Bild 16. Zeitlicher Verlauf des Zeitgradienten der Wärmeleitfähigkeit bei der Messung einer feuchten und einer trockenen Porenbetonprobe; Standardfall gemäß Tabelle 2
 Fig. 16. Time history of the time gradient of thermal conductivity; measurement of a humid and a dry sample, data from default case according to Table 2

sind, wurden die Abläufe in Abschnitt 5 vorab an Hand des Standardfalles „Porenbeton“ detailliert erläutert. In Tabelle 4 sind nunmehr die Ergebnisse aller untersuchten Varianten zusammengestellt. Neben dem Standardfall Nr. 0 enthält diese Tabelle auch die weiteren Fälle 1 bis 15.

Man findet hierin Angaben zu den Abbruch-Zeiten $t_{1\%}$ bzw. $t_{1\%_{00}}$, zu den dazugehörigen Wärmeleitfähigkeiten und zu den Feuchte-Einflussfaktoren $F_{1\%}$ und $F_{1\%_{00}}$. Ferner ist der 7-Tages-Messwert der Wärmeleitfähigkeit für den jeweiligen Fall mit angegeben, d. h. jener Wert, den man erhalten würde, wenn man die Messung eine Woche lang fortsetzte.

Man ersieht aus Spalte 4 der Tabelle 4, dass die 1%-Abbruchzeiten höchstens ca. 32 h betragen; lediglich im Falle 13 und 14 steigen sie auf 64 h an, weil die Feuchtwanderungen in diesen Fällen länger dauern und deren Rückwirkungen auf den Wärmetransport intensiver ausfallen. Ähnliche Tendenzen erkennt man bei den 1 %₀₀-Abbruchzeiten in Spalte 9. Um eine 1 %₀₀-Annäherung zu erreichen, bräuchte man, wie zunächst zu vermuten, längere Zeiten. In den Fällen 13 und 14 sind es fast 250 h, d. h. ca. 10 d.

Man würde ferner vermuten, dass bei 1 %₀₀-Annäherung geringere Feuchte-Einflussfaktoren aufträten als bei einer 1 %-Annäherung. Überraschenderweise trifft dies nicht generell zu; im Gegenteil: Die feuchtebedingten Abweichungen in Spalte 6 und 9 (sowie die Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{1\%}$ und $\lambda_{1\%_{00}}$ in Spalte 5 und 8, auf denen die Abweichungen basieren) weisen keine systematische Tendenz auf. Sie scheinen vielmehr zufällig zu streuen. Manchmal werden die Abweichungen negativ. Die Erklärung für diese scheinbaren Zufälligkeiten liegt in dem bereits bei Bild 13 erläuterten Null-Durchgang der Einflussfaktor-Kurve. Je nachdem, wo der Null-Durchgang stattfindet und wie weit man beim Abbruch vom Null-Durchgang entfernt ist, umso kleiner oder größer fällt der Feuchte-Einflussfaktor aus. Ein weiterer Grund für gewisse Unsicherheiten liegt – besonders bei Niedrigfeuchten – in der Vernachlässigung der sorptiven Bindungsenthalpie (vgl. Tabelle 2, unterste Zeile). Auch die 7-Tages-Werte bei Abbruch nach 1 Woche weisen aus diesen Gründen scheinbar zufällige Streuungen auf.

Aus den von solchen Streuungen überdeckten Werten der Tabelle 4 lässt sich aber doch erkennen, dass kleinere

Tabelle 4. Zusammenstellung der Abbruch-Werte aller untersuchten 16 Fälle mit Angabe der 7-Tages-Messwerte. Die in den Spalten 5 und 8 angegebenen Wärmeleitfähigkeiten auf 4 wertanzeigende Stellen nach dem Komma dienen zur Vermeidung von Rundungs- Ungenauigkeiten bei der Berechnung der Feuchte-Einflussfaktoren
 Table 4. Compilation of the termination values of all 16 cases, and with 7 days values. Conductivity values to four decimals (columns 5 and 8) serve to protect the calculation of the moisture influence factors from rounding differences

Fall-Nr.	Variierte Parameter	Kennzeichnende Werte	Abbruchwerte						7-Tages-Wert
			$t_{1\%}$ [h]	$\lambda_{f1\%}$ [W/m·K]	$F_{1\%}$ [%]	$t_{100\%}$ [h]	$\lambda_{f100\%}$ [W/m·K]	$F_{100\%}$ [%]	$\lambda_{f,7}$ [W/m·K]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	Standardfall	20 Vol.-%	32,7	0,0933	-6,7	57,0	0,1044	4,4	0,106
1	Anfangsfeuchte	10 Vol.-%	24,6	0,0978	-2,2	40,5	0,1051	5,1	0,106
2		5 Vol.-%	19,8	0,0985	-1,5	31,6	0,1054	5,4	0,106
3		95 %r.F. (3,7 Vol.-%)	18,4	0,1005	0,5	28,9	0,1053	5,3	0,106
4		80 %r.F. (0,9 Vol.-%)	18,2	0,1006	0,6	23,2	0,1042	4,2	0,104
5	Probendicke	10 cm	12,8	0,1032	3,2	18,7	0,1059	5,9	0,107
6		5 cm	5,0	0,1060	6,0	6,6	0,1067	6,7	0,108
7		2 cm	2,9	0,1078	7,8	7,8	0,1093	9,3	0,108
8		1 cm	2,3	0,1113	11,3	9,0	0,1137	13,7	0,107
9	Temperaturgefälle	10 K	32,6	0,1089	8,9	53,5	0,1186	18,6	0,120
10		5 K	31,9	0,1225	22,5	49,8	0,1309	30,9	0,132
11		2 K	31,3	0,1442	44,2	45,5	0,1508	50,8	0,151
12		1 K	31,3	0,1637	63,7	44,0	0,1697	69,7	0,172
13	Feuchteabschluss	A2 kalte Seite dicht	64,3	0,2501	150,1	248,6	0,1729	72,9	0,190
14		B beidseitig offen	64,4	0,2506	150,6	240,9	1,1735	73,5	0,189
15		C beidseitig dicht	32,9	0,0924	-7,6	57,7	0,1038	3,8	0,106

Temperaturdifferenzen zu relativ hohen Einfluß-Faktoren führen (Fall 11 und 12). Auch der Feuchteabschluss der Probenoberflächen übt einen starken Einfluss auf den Feuchte-Einflussfaktor F aus (Fall 13 und 14). Ungünstig sind ein feuchtedichter Abschluss auf der kalten Seite sowie beidseitig offene Proben; ein beidseitig dichter Abschluss (z. B. mittels Folien-Umhüllung der Probe) ist hingegen günstiger. In allen Fällen könnte man natürlich jeglichen feuchtebedingten Einfluss vermeiden, wenn man den Null-Durchgangspunkt wählte und dieser vorab bekannt wäre. Man müsste hierzu aber eine WUFI-Rechnung mit den für die Messprobe zutreffenden Stoffwerten vornehmen; den zu messenden λ -Wert und die übrigen thermohygrischen Stoffwerte müsste man also im voraus schon kennen, was unmöglich ist. Auch eine näherungsweise Vorab-Einschätzung der Lage des Null-Durchgangspunktes erscheint nicht ratsam, weil der Kurven-Gradient in Durchgangspunktnähe relativ steil verläuft und sich deshalb geringe „Verschätzungen“ stark auswirken könnten. Bestimmend für die Lage des Null-Durchgangspunktes sind die Feuchte-transportvorgänge und deren Randbedingungen.

Abrundend und einschränkend ist auszuführen, dass der große Einfluss der Randbedingungen durch relativ aufwendige Experimentaluntersuchungen von *Achtziger* [36] bestätigt wird, der die Feuchteverlagerung in Kerndämmstoffen schichtenweise mit Gamma-Durchstrahlung gemessen hat. Er kommt zu dem Schluss, dass die „Temperaturrandbedingungen und die konstruktiven Ausführungen bezüglich der Feuchtelieferung aus der Grenzschicht zum Dämmstoff in die Betrachtung der Zuschlagswerte einge-

hen“. Auf die Zuschlagswerte feuchter Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen und den Einfluss der dabei auftretenden Latentwärmern wird auch in der Arbeit [37] eingegangen, in der eine WUFI-Nachrechnung von Platten-geräts-Messungen vorgenommen worden war. Allerdings wurde hierin – wie in der vorliegenden Arbeit – die sorptive Bindungswärme, die bei niedrigen Feuchten eine größere Rolle spielt, nicht berücksichtigt. Unter der Annahme einer konstanten und linear-variablen Feuchteverteilung über den Plattenquerschnitt wurde in der Arbeit [38] vor ca. 50 Jahren bereits eine Abschätzung des feuchtebedingten Messfehlers vorgenommen, die bei Porenbeton auf Fehlerwerte bis zu 14 % führte. All diese Arbeiten kamen aber den tatsächlichen thermohygrischen Abläufen, insbesondere dem Null-Durchgang der Einflussfaktor-Kurve, nicht wirklich auf die Spur.

7 Zusammenfassung und Folgerungen

In feuchten Stoffen setzt, sobald ein Temperaturgefälle anliegt, ein instationär-gekoppelter Transport von Wärme und Wasser ein. Dies gilt auch für feuchte Proben, die bei den verschiedenen Messverfahren der Wärmeleitfähigkeit verwendet werden. Der Feuchte-transport verursacht einen sog. „feuchtebedingten“ Faktor, der die Wärmeleitfähigkeit beeinflusst. Dieser Feuchte-Einflussfaktor F wurde durch Nachrechnung mittels des WUFI-Berechnungsverfahrens ermittelt, indem die in den Wärmeleitfähigkeits-Messapparaturen während der Messung auftretenden Feuchtewanderungsprozesse theoretisch nachgebildet werden.

Der Feuchtetransport hängt nicht nur von den hygri-schen Eigenschaften des jeweiligen Stoffes ab, sondern vor allem von den feuchtetechnischen Randbedingungen, denen die Probe während der Wärmeleitfähigkeitsmessung unterworfen ist. Der Einbau in ein Plattengerät oder das Aufbringen eines Wärmeflussmessers auf der Oberfläche einer Probe kommt einem feuchtedichten Abschluss gleich. Bei der Heizkasten-Methode sind hingegen beide Probenoberflächen offen und damit verdunstungsfähig. Dann werden nicht nur die Temperatur-Randbedingungen und das an der Probe anliegende Temperaturgefälle für den Feuchtetransport maßgeblich, sondern auch die in der Heiz- bzw. Kühlkammer vorhandene Luftfeuchte. Diese Randbedingungen sind ebenfalls von Einfluss auf den feuchtebedingten Einfluss. Selbst wenn – etwa durch Folien-Umhüllung der Probe – ein Feuchte-austausch durch die Probenoberflächen unterbunden wird, tritt ein feuchtebedingter Einfluss auf, weil sich während der Messung die Feuchte innerhalb der Probe verlagert. Auch die Ausgangsfeuchte, die sich aufgrund der Probenvorbereitung in der Probe eingestellt hat, spielt eine Rolle.

Bei Beginn der Wärmeleitfähigkeitsmessung laufen die instationär-gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportvorgänge im Probekörper an. Der Aufbau des Temperaturfeldes erfolgt rascher als derjenige des Feuchtefeldes. Beide Transporte – der thermische und der hygri-sche – streben asymptotisch einem Endzustand entgegen, der (theoretisch) nach unendlich langer Zeit erreicht würde. Eine Wärmeleitfähigkeitsmessung kann aber nicht „ewig“ dauern, sondern muss innerhalb eines handhabbaren Zeitraums beendet sein. Jeder erfahrene Messtechniker bricht die Messung dann ab, wenn sich der Messwert der Wärmeleitfähigkeit nicht mehr nennenswert ändert. Es kommt auf die zeitliche Änderung, nicht auf die Wärmeleitfähigkeit selbst an. Aus diesem Grund wird als Abbruchzeitpunkt jene Messdauer $t_{10\%}$ bzw. $t_{100\%}$ gewählt, ab welcher der Zeitgradient der Wärmeleitfähigkeit einen Wert von 1 % bzw. 1 ‰ unterschreitet.

Um die nicht ganz leicht verständlichen thermohygrischen Kopplungsvorgänge von Wärme und Feuchte anschaulich erläutern zu können, wird als Standardmaterial eine Porenbetonplatte von 20 cm Dicke mit einem Temperaturgefälle von 20 K gewählt. Die Ausgangsfeuchte beträgt 20 Vol.-%, konstant verteilt über den Probenquerschnitt mit feuchtedichtem Abschluss auf der warmen Seite. Der Feuchtegehalt, die Plattendicke, das Temperaturgefälle und der Feuchteabschluss werden später variiert.

Der Aufbau des Temperatur- und Feuchtefeldes in der Probe läuft ab Messbeginn unterschiedlich rasch ab. Die Wärmewelle in einer feuchten Probe hinkt derjenigen in einer trockenen Probe um mehr als 1 Tag hinterher. Aufgrund der Phasenänderungsenthalpien wird die feuchte Probe abgekühlt; an gewissen Stellen kann sogar eine Unterkühlung gegenüber der Umgebungstemperatur eintreten. Später kann die feuchte Probe aber wieder mehr Wärme aus dem Heizkasten abziehen. Die Zeitverläufe kreuzen sich. Der feuchtebedingte Einfluss wird bei Messbeginn zunächst negativ ($\lambda_f < \lambda_{tr}$), um – nach einem Null-Durchgangspunkt – positive Werte anzunehmen ($\lambda_f > \lambda_{tr}$). Der Null-Durchgang der Einflussfaktor-Kurve stellt ein wichtiges Ergebnis der vorliegenden Arbeit dar. Er besagt nämlich, dass bei Wärmeleitfähigkeitsmessungen feuchter

Stoffe – quasi zufällig – sowohl negative als auch positive Abweichungen auftreten können, je nachdem, ob die Messdauer in der Nähe links oder rechts oder weiter entfernt vom Durchgangspunkt liegt; die Messwerte können feuchtebedingt stark streuen. Im Durchgangspunkt selbst werden die Abweichungen zu Null.

Nach (unendlich) langer Messzeit würde eine feuchte Probe dann auf Null austrocknen, wenn ihr Einbau in die Messapparatur eine volle Trocknung gestattete und die Randbedingungen dem Trockenzustand (z. B. 105 °C) entsprächen. Dies ist aber nicht der Fall. Deshalb wird sich nur jener Feuchte-Endwert in der Probe einstellen, der dem hygroskopischen Gleichgewicht bei den vorgegebenen Randbedingungen entspricht. Verlagerungen von Feuchte treten, sobald der Gleichgewichtszustand erreicht ist, nicht mehr auf. Der dann noch vorhandene Feuchte-einfluss beruht ausschließlich auf der Anwesenheit von in Ruhe befindlichen Wassermolekülen im Porengefüge; er entspricht der „wahren“ Wärmeleitfähigkeit eines feuchten Stoffes.

Die relativ komplizierten Zusammenhänge bei den instationär-gekoppelten Transportvorgängen in feuchten Stoffen sind vom Normungsgeber zwar erkannt worden, aber für ihn nicht wirklich „behandelbar“ gewesen. Stattdessen wurden Regeln entwickelt, nach denen die im Trockenzustand gemessenen Wärmeleitfähigkeiten mit experimentell ermittelten Feuchtezuschlägen zu versehen sind. Die Zuschläge könnten jetzt mit WUFI-Nachrechnungen auf theoretische Grundlagen gestellt werden. Hierzu müsste allerdings die Genauigkeit einer solchen Nachrechnung, wie dies bereits in der Dissertation [39] geschah, überprüft werden, welche auf die Nachprüfung der Stoffwerte und der Randbedingungen abzielen hätte, die der WUFI-Rechnung zugrunde gelegt wurden. Eine wichtige Rolle spielt dabei die Latententhalpie, die von zwei Anteilen herrührt: Die bei der Phasenänderung von Wasser vorhandene Verdampfungswärme ist gut bekannt. Werte für die sorptive Bindungswärme (wichtig bei Niedrig-Feuchte nahe der Austrocknung) hingegen fehlen für fast alle Baustoffe; die Bindungsenthalpie wird bislang auch beim WUFI-Rechenverfahren vernachlässigt. Hierzu sind weitere Untersuchungen nötig. In diesen müssten auch andere Bau- und Dämmstoffe als das hier zugrunde gelegte Porenbeton-Material überprüft werden. Ferner erscheint die genauere Überprüfung eines beidseitig dichten Feuchteabschlusses geboten, wie er bei Plattengeräts-Messungen gegeben ist.

Literatur

- [1] *Cammerer, W. F.*: Wärme- und Kälteschutz im Bauwesen und in der Industrie. 5. Aufl. Berlin: Springer-Verlag 1995)
- [2] *Cammerer, J. S.*: Über den Zusammenhang zwischen Struktur und Wärmeleitfähigkeit bei Bau- und Isolierstoffen und dessen Beeinflussung durch einen Feuchtegehalt. Mitt. Forsch.-H. Wärmeschutz, München, H. 4 (1924).
- [3] Fraunhofer-Institut für Bauphysik: Berechnung des hygrometrischen Verhaltens von Baukonstruktion unter realen Bedingungen (WUFI). Version 5.1.0.599 (2012).
- [4] DIN-EN 12526: Messung des Wärmedurchlasswiderstandes. Heizkastenverfahren mit dem Wärmestrommesser – Mauerwerk. April 1998.

- [5] ISO 8301: Thermal insulation. Determination of steady state thermal resistance and related properties. Heat flowmeter apparatus. Aug. 1991. Amendment 1. Aug. 2010.
- [6] ISO 8302.: Thermal insulation. Determination of steady state thermal resistance and related properties. Guarded hot plate apparatus. Aug. 1991.
- [7] ISO 8990: Thermal insulation. Determination of steady state thermal transmission properties. Calibrated and guarded hot box. Sept. 1994.
- [8] DIN-EN-ISO 8990: Bestimmung der Wärmedurchgangseigenschaften im stationären Zustand. Verfahren mit dem kalibrierten und dem geregelten Heizkasten. Sept. 1996.
- [9] ISO-TR 9165: Practical thermal properties of building materials and products. Dez. 1988.
- [10] ISO 10051: Thermal insulation. Moisture effects on heat transfer. Determination of thermal transmissivity of a moist material, 1996.
- [11] DIN-EN 12664: Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplattengerät. Trockene und feuchte Produkte mit mittlerem und niedrigem Wärmedurchlasswiderstand. Mai 2001.
- [12] DIN-EN 12667: Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplattengerät. Produkte mit hohem und mittlerem Wärmedurchlasswiderstand. Mai 2001.
- [13] DIN-EN 12939: Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplattengerät. Dicke Produkte mit hohem und mittlerem Wärmedurchlasswiderstand. Febr. 2001.
- [14] DIN 52611: Wärmeschutztechnische Prüfungen. Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes von Bauteilen. Teil 1: Prüfung im Laboratorium. Jan. 1991; Teil 2: Weiterbehandlung der Messwerte für die Anwendung im Bauwesen. April 1990.
- [15] DIN 52612: Wärmeschutztechnische Prüfungen. Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät. Teil 1: Durchführung und Auswertung. Sept. 1979; Teil 2: Weiterbehandlung der Messwerte für die Anwendung im Bauwesen. Juni 1984; Teil 3: Wärmedurchlasswiderstand geschichteter Materialien für die Anwendung im Bauwesen. Sept. 1979.
- [16] DIN 52616: Wärmeschutztechnische Prüfungen. Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Wärmestrommessplattengerät. Nov. 1977.
- [17] *Künzel, H.*: Bestimmt der volumen- oder der massebezogene Feuchtegehalt die Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen? *Bauphysik* 8 (1986), H. 2, S. 33–39.
- [18] *Cammerer, W. F.*: Der Feuchteinfluss auf die Wärmeleitfähigkeit von Bau- und Dämmstoffen. *Bauphysik* 9 (1987), H. 6, S. 259–266.
- [19] *Künzel, H.*: Wie ist der Feuchteinfluss auf die Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen unter heutigen Bedingungen zu bewerten? *Bauphysik* 11 (1989), H. 5, S. 185–189.
- [20] *Achtziger, J., Cammerer, J.*: Untersuchung des anwendungsbedingten Einflusses der Feuchtigkeit auf den Wärmetransport durch gedämmte Außenbauteile. *Bauphysik* 12 (1990), H. 2, S. 42–46.
- [21] *Krischer, O., Esdorn, H.*: Einfaches Kurzzeitverfahren zur gleichzeitigen Bestimmung der Wärmeleitzahl, der Wärmekapazität und der Wärmeeindringzahl fester Stoffe. *VDI-Forsch.* Heft 450 (1955).
- [22] *Wagner, A.*: Nichtstationäre Methode zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit, Temperaturleitfähigkeit und der spezifischen Wärmekapazität nichtmetallischer Baustoffe. Diss. TU Berlin 1977.
- [23] *Kupke, C.*: Bestimmung der Wärmedämmung von Wänden unter instationären Bedingungen. *IBP-Mitt.* 6 (1978), Nr. 36 (dort: Aittomäki-Verfahren).
- [24] *Glück, B.*: Zustands- und Stoffwerte. Wasser, Dampf, Luft. Verbrennungsrechnung. 2. Aufl. Berlin: Verlag-GmbH für Bauwesen 1991.
- [25] *Krischer, O., Kast, W.*: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. 3. Aufl. Berlin: Springer-Verlag 1978.
- [26] *Gertis, K., Kießl, K.*: Theoretische Überlegungen zum Feuchteinfluss auf die Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen. Unveröffentlichte Diagramme. Univ. Essen. Vortrag, EWM-Treffen, Essen 1984.
- [27] *Kießl, K.*: Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen. Diss. Univ. Essen 1983.
- [28] *Krus, M.*: Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Messtechniken. Diss. Univ. Stuttgart 1995.
- [29] Fraunhofer-Institut für Bauphysik: WUFI-Datenbank. Version 24.71 (2012).
- [30] *Künzel, H. M.*: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Diss. Univ. Stuttgart 1994.
- [31] *Kast, W., Jokisch, F.*: Überlegungen zum Verlauf von Sorptionsisothermen und zur Sorptionskinetik an porösen Feststoffen. *Chem.-Ing. Techn.* 44 (1972), H. 8, S. 556–563.
- [32] *Kast, W.*: Adsorption aus der Gasphase. Ingenieurwissenschaftliche Grundlagen und technische Verfahren. Weinheim: VCH-Verlag 1988.
- [33] *Schwarz, B.*: Die Wärme- und Stoffübertragung an Außenwandoberflächen. Diss. Univ. Stuttgart 1971.
- [34] *Albrecht, W.*: Entwicklung und Erprobung eines Plattengerätes zur Messung der Wärmeleitfähigkeit mit geringer Messunsicherheit. *WKS-B-Sonderausgabe*, Mai 1985.
- [35] *Görling, P.*: Untersuchung zur Aufklärung des Trocknungsverhaltens pflanzlicher Stoffe, insbesondere von Kartoffelstücken. Diss. Univ. Darmstadt 1955.
- [36] *Achtziger, J.*: Kerndämmung von zweischaligem Mauerwerk. Einfluss des Wassergehalts und der Feuchtigkeitsverteilung auf die Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht. *Bauphysik* 7 (1985), H. 4, S. 121–124.
- [37] *Kehrer, M., Künzel, H. M., Sedlbauer, K.*: Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen. Ist der Feuchtezuschlag für Wärmeleitfähigkeit gerechtfertigt? *IBP-Mitt.* 28 (2001), H. 390.
- [38] *Gertis, K.*: Einfluss der Feuchtigkeitsverteilung in Außenwänden auf die Wärmeleitung. *Berichte a. d. Bauforschung*, H. 51, S. 7–16. Berlin: Ernst & Sohn 1968.
- [39] *Holm, A.*: Ermittlung der Genauigkeit von instationären hygrothermischen Bauteilberechnungen mittels eines stochastischen Konzeptes. Diss. Univ. Stuttgart 2002.

Autoren dieses Beitrages:

o. Prof. (em.) Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. mult. Dr. E.h. mult. Karl Gertis
Lehrstuhl für Bauphysik, Universität Stuttgart
Bis 2003 Direktor des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik.
2007 Emeritierung

Prof. Dr.-Ing. Andreas Holm
Leiter des Forschungsinstituts für Wärmeschutz FIW München
Lochhauer Schlag 4
82166 Gräfelfing
Professor für Bauphysik,
Hochschule München

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

Telefon +49 (0)89 8 58 00-0
Telefax +49 (0)89 8 58 00-40
info@fiw-muenchen.de
www.fiw-muenchen.de

Bauaufsichtlich anerkannte Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle

