

F O R S C H U N G S I N S T I T U T
MITTEILUNGEN
F Ü R W Ä R M E S C H U T Z
E . V . M Ü N C H E N

Reihe I Allgemeine Fragen des Wärme- und Kälteschutzes Nummer 8

**Messung
der Wärmeleitfähigkeit
von Schaumkunststoffen
mit beliebigem
Feuchtigkeitsgehalt*)**

Von Dipl.-Ing. J. Achtziger, Forschungsinstitut für
Wärmeschutz e. V., München

Sonderdruck aus  „Kunststoffe im Bau“, Themenheft 23

Verlag für Publizität • 3001 Isernhagen HB / Hannover

Die Messung der Wärmeleitfähigkeit feuchter Dämmstoffe ist mit Schwierigkeiten verbunden. An drei Schaumkunststoffarten wie Polystyrol-Hartschaum, Polyurethan-Hartschaum und Phenolharz-Hartschaum werden Methoden zur Befeuchtung und Wärmeleitfähigkeitsbestimmung im stationären Zustand der Wärmeströmung mit dem Plattengerät behandelt. Die Meßergebnisse sind in Abhängigkeit vom Wassergehalt der untersuchten Proben dargestellt.

Der Einfluß des Feuchtigkeitsgehaltes auf die Wärmeleitfähigkeit von Schaumkunststoffen ist für deren Verwendung als Dämmstoffe im Hochbau, in industriellen Anlagen oder Kühlhäusern von Bedeutung. Durch Luftfeuchtigkeit und Wasserdampfdiffusion weisen poröse, wasserdampfdurchlässige Stoffe in der Praxis einen Feuchtigkeitsgehalt auf, welcher erfahrungsgemäß die Wärmeleitfähigkeit erhöht. Der Anstieg der Wärmeleitfähigkeit in feuchten Stoffen gegenüber dem trockenen Zustand wird nicht allein durch den Austausch der Porenluft durch das ca. 25 mal besser als Luft leitende Wasser bewirkt, sondern auch durch einen Wasserdampfdiffusionsvorgang in den mit Dampf-Luftgemisch gefüllten Poren.

Auswahl der untersuchten Schaumstoffe und der Feuchtigkeitsbereiche

Durch ihren überwiegenden Marktanteil bedingt, beschränkten sich die Untersuchungen auf die 3 Stoffe Polystyrolschaum, Polyurethanschaum und Phenolharzschaum. Das Probematerial wurde jeweils von einem namhaften Rohstoffhersteller und einer Firma, welche das Rohmaterial durch Aufschäumen weiterverarbeitet, zur Verfügung gestellt. Beim Polystyrol-Hartschaum handelte es sich um einen Partikelschaumstoff aus verschweißtem geblähten Polystyrolgranulat. Die Rohdichte der Platten betrug in beiden Fällen 19 kg/m^3 . Der Polyurethan-Hartschaum wurde als Block hergestellt und anschließend in Platten aufgeschnitten. Diese wiesen Rohdichten von 35 und 41 kg/m^3 auf. Beim Phenolharz-Hartschaum lagen die Rohdichten der untersuchten Proben bei 43 und 49 kg/m^3 .

Zur Erfassung des praktisch interessierenden Feuchtigkeitsbereichs waren Messungen im vollkommen trockenen und lufttrockenen Zustand des Materials, bei 5 Vol.-% und 10 Vol.-% Wassergehalt sowie bei vollkommener Wassersättigung geplant. Obwohl in der Praxis eine vollkommene Wassersättigung nicht auftritt, erscheint die Bestimmung dieses Versuchspunktes bei der Untersuchung des Feuchtigkeitseinflusses auf die Wärmeleitfähigkeit sehr wichtig. Während bei teilweiser Benetzung der Porenwände mit meßtechnischen Schwierigkeiten zu rechnen ist, können die Endpunkte der Kurve mit der Messung der Wärmeleitfähigkeit im trockenen Zustand und bei Wassersättigung ziemlich sicher festgelegt werden.

Vorbereitung und Befeuchtung der Proben

Bei Polyurethan-Hartschäumen, welche mit Fluortrichlormethan getrieben werden, sind die Zellen mit einem Gas gefüllt, dessen Wärmeleitfähigkeit bei Normdruck und Raumtemperatur kleiner ist als die ruhender Luft. Im Laufe der Zeit findet zwischen dem Zellgas und der Umgebungsluft ein Gasaustausch statt, welcher mit einem Anstieg der Wärmeleitfähigkeit des Schaumes ver-

bunden ist. Versuche im Forschungsinstitut für Wärmeschutz [1] haben gezeigt, daß bei einem Blockschaum mit der Rohdichte 43 kg/m^3 nach 2 Jahren die Wärmeleitfähigkeit nur mehr geringfügig ansteigt. Die für die vorliegenden Untersuchungen verwendeten Proben wurden daher einer ähnlichen Lagerzeit bei Normklima unterworfen. Um ein zusätzliches Ausdiffundieren des Treibgases zu vermeiden, erfolgte keine Trocknung vor Versuchsbeginn. Die Polystyrol-Hartschaumplatten weisen eine Anwendungsgrenztemperatur von ca. $+80^\circ\text{C}$ auf und wurden daher in Anlehnung an DIN 52 612 [2] bei $+40^\circ\text{C}$ getrocknet, während bei den Phenolharz-Hartschaumplatten die Trocknungstemperatur bei $+105^\circ\text{C}$ lag. Auf die Untersuchung im lufttrockenen Zustand konnte verzichtet werden, da die Feuchtigkeitsaufnahme im Klimaraum praktisch nicht meßbar oder so gering war, daß eine Messung der Wärmeleitfähigkeit die gleichen Werte wie für den trockenen Zustand ergeben hätte.

Die gleichmäßige Befeuchtung der Schaumstoffproben machte wegen der teilweise geschlossenzelligen Struktur der Stoffe große Schwierigkeiten. Die Abb. 1 bis 3 zeigen die geringe Wasseraufnahme bei Unterwasserlagerung. Etwas größer wurde die Feuchtigkeitsaufnahme bei vorausgehender Erwärmung der Probe auf $+90^\circ\text{C}$ und Abschreckung im Wasser von $+10^\circ\text{C}$ (Abb. 1). Wesentlich günstigere Verhältnisse ergab die Konden-

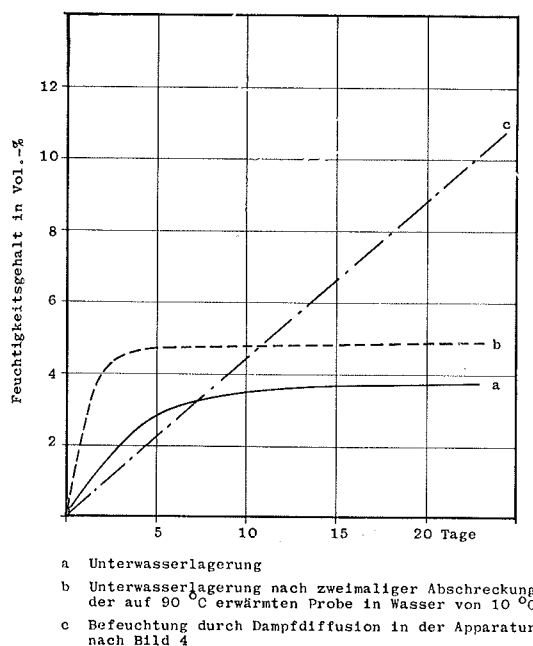


Abb. 1. Wasseraufnahme von Polystyrol-Hartschaum in Abhängigkeit von der Zeit (Rohdichte der Probe 19 kg/m^3).

*) Die Forschungsarbeit wurde mit Mitteln des Bundesministers für Städtebau und Wohnungswesen durchgeführt. Für diese Förderung sei an dieser Stelle der Dank des Forschungsinstituts ausgesprochen.

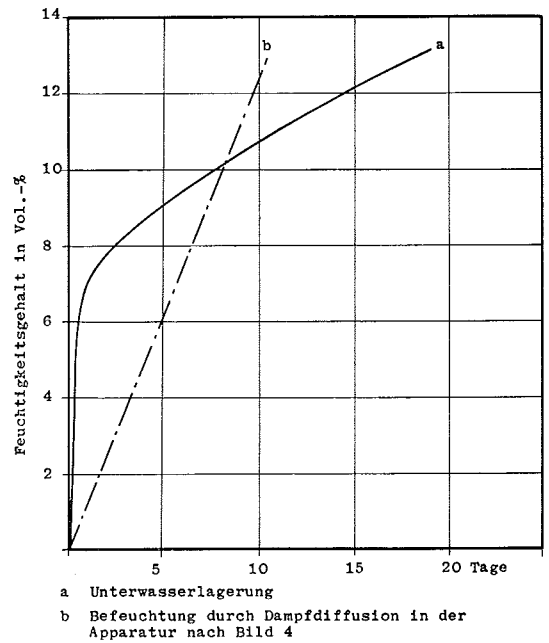
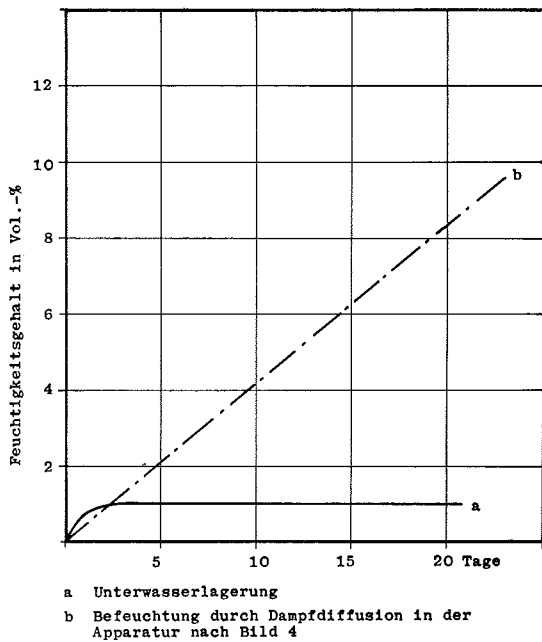


Abb. 2. Wasseraufnahme von Polyurethan-Hartschaum in Abhängigkeit von der Zeit (Rohdichte der Probe 35 kg/m³). Abb. 3 (oben). Wasseraufnahme von Phenolharz-Hartschaum in Abhängigkeit von der Zeit (Rohdichte der Probe 49 kg/m³).

sation von Wasser in der Probe durch Wasserdampfdiffusion. Die dabei erzielte Feuchtigkeitsaufnahme ist in den Abb. 1 bis 3 ebenfalls dargestellt. Abb. 4 zeigt den Querschnitt der Apparatur. Die Probe liegt über einem Wasserbad von + 50°C und wird auf der Oberseite durch eine thermostatisch geregelte Umlaufkühlung einer Temperatur von etwa + 1°C ausgesetzt. Ein Gitter sorgt für einen kleinen Abstand zwischen Probe und Kühlplatte, um einen niedrigen Dampfdruck zu gewährleisten. Zur Erzielung einer gleichmäßigen Durchfeuchtung wurde die Probe täglich gewendet und nach Erreichen des gewünschten Feuchtigkeitsgehaltes zur Ermöglichung eines Feuchtigkeitsausgleichs längere Zeit in dampfdichter Folienumhüllung bzw. unter Wasser gelagert. Mit diesem Verfahren wurde bei Polystyrol-Hartschaum ein Feuchtigkeitsgehalt von etwa 60 Vol.-%, bei Polyurethan-Hartschaum von etwa 75 Vol.-% und bei Phenolharz-Hartschaum von über 50 Vol.-% erreicht. Hierfür waren Zeiten von 3 bis 11 Monaten erforderlich. Da die Wasseraufnahme mit zunehmendem Feuchtigkeitsgehalt immer geringer

wurde und das zu erwartende Meßergebnis den großen Zeitaufwand bis zur vollkommenen Wassersättigung nicht rechtfertigte, wurde die Befeuchtung jeweils bei den erzielten Wassergehalten abgebrochen.

Meßverfahren

Die Meßeinrichtung ist im Prinzip ein sogenannter Einplattenapparat nach Poensgen, wie er in DIN 52612 genormt ist. Das in der Norm beschriebene Verfahren mit Temperaturdifferenzen von 10 bis 20°C an den Versuchsplatten ist nicht anwendbar, da sich mit der Richtung des Wärmestromes Feuchtigkeitsverschiebungen in der Probe aufgrund eines zu großen Dampfdruckunterschiedes ergeben. Die Folge sind Falschmessungen. Im Forschungsinstitut für Wärmeschutz wurde daher eine Meßmethode nach dem Einplattenverfahren unter Verwendung eines sehr geringen Temperaturgradienten von 0,2 bis 0,4°C/cm Probendicke entwickelt. Die gleiche Apparatur erlaubt auch die Messungen bei völliger Wassersättigung, wobei hier wieder auf größere Temperaturdifferenzen übergegangen werden kann, da sich in der Probe kein Diffusionsvorgang mehr abspielt.

Abb. 5 zeigt den Aufbau der Meßeinrichtung. Die Wärmestromrichtung verläuft von unten nach oben. Auf diese Weise wirkt die Schwerkraft einer eventuellen Feuchtigkeitsverlagerung durch Dampfdiffusion entgegen. Eine Heizplatte, deren elektrische Leistung genau bestimmt werden kann, dient zur Erzeugung des Wärmeflusses, welcher durch eine Kühlplatte auf der kalten Seite abgeführt wird. Ein um die Heizplatte konzentrisch angeordneter Schutzring und eine Gegenheizung auf der Unterseite sorgen dafür, daß die gesamte mit Gleichstromheizung erzeugte Wärmemenge durch den Probekörper fließt. Schutzring und Gegenheizung werden durch die elektromotorische Kraft einer Differential-Thermoelementenkette bzw. eines Wärmeflußmessers automatisch über Regeleinrichtungen so gesteuert, daß die Temperaturen der Schutzringinnenkante und der Gegenheizungsobenseite mit derjenigen der Heizplatte übereinstimmen. Die Kühlplatten werden durch einen Thermostaten temperiert, welcher die eingestellte Temperatur auf ± 0,03°C genau hält. Die Messung der Temperaturdifferenz an der Probe erfolgt durch Hintereinanderschaltung von je 5 Thermoelementen, wobei die fünffache Thermospannung von einem Kompensationsschreiber mit elektronischer Verstärkung und einem Meßbereich von 1 mV registriert wird. Die Proben selber werden bei der Prüfung im trockenen Zustand und bis 10 Vol.-% in dampfdichte Kunststoff-Folien eingehüllt. Bei der Messung mit höheren Wassergehalten liegt die Probe vollkommen unter Wasser. Dadurch wird vermieden, daß das im Probekörper an-

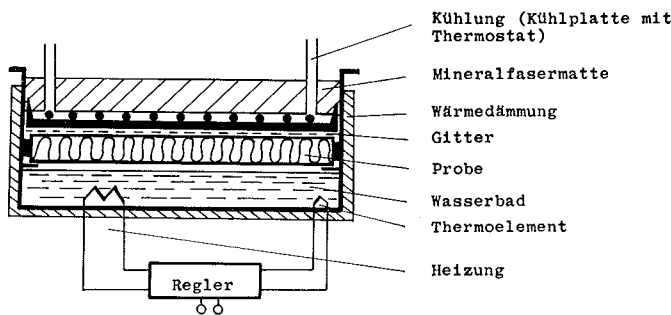
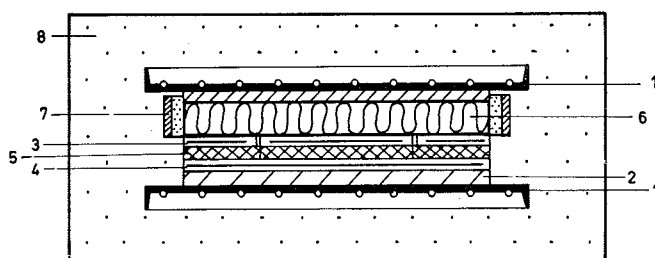


Abb. 4. Apparatur zur Befeuchtung von Schaumkunststoffen durch Dampfdiffusion. Abb. 5 (unten). Meßeinrichtung zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit, Einplattengerät mit elektrischer Heizung (1 Kühlplatten, 2 Isolierplatten, 3 Heizplatte mit Schutzring, 4 Gegenheizung, 5 Wärmeflußmeßplatte, 6 Versuchsprobe, 7 Rahmen des Wassergefäßes, 8 Korkschröt).



gereicherte Wasser entweicht. Andererseits wird zusätzlich kein Wasser aufgenommen, wie die bereits besprochene Unterwasserlagerung gezeigt hat. Die Wärmeleitfähigkeit der Schaumstoffproben ergibt sich im stationären Zustand der Wärmeströmung, der sich in 2 bis 3 Tagen einstellt.

Zur Abkürzung dieser Versuchszeit kam noch ein weiteres Verfahren zur Anwendung, das in Abb. 6 dargestellt ist. Der Wärmestrom wird durch unterschiedliche Temperierung zweier Kupferplatten, welche über Thermostate mit Methylalkohol beheizt bzw. gekühlt werden, erzeugt. Die Wärmestromdichte durch die Probe wird mit Hilfe von 2 Wärmeflußmeßplatten [3] bestimmt. Die Temperaturmessung erfolgt in der bereits beschriebenen Weise. Bei dieser Apparatur stellt sich der Beharrungszustand nach einem Tag ein.

Meßergebnisse

Für jeden Schaumstoff und Feuchtigkeitsgehalt wurde die Wärmeleitfähigkeit bei mindestens 2 Mitteltemperaturen bestimmt und der Wert für 10°C interpoliert, da diese Temperatur auch den Rechenwerten der Wärmeleitfähigkeit nach DIN 52 612 zugrunde gelegt wird. Auf den Abb. 7 bis 9 sind die ermittelten Wärmeleitfähigkeiten in Abhängigkeit vom volumenbezogenen Feuchtigkeitsgehalt aufgetragen und durch ausgleichende Kurven verbunden. Da bei allen drei Schaumstoffen in der 1. Meßreihe die durchfeuchteten Proben durch die lange Lagerung unter Wasser und den wiederholten Aus- und Einbau beschädigt waren, mußten neue Proben verwendet werden. Die Meßwerte der verschiedenen Platten sind in den Diagrammen durch ausgefüllte und nicht ausgefüllte Kreise zu unterscheiden. Bei Polystyrol-Hartschaum und Polyurethan-Hartschaum konnten Proben etwa gleicher Rohdichte und Wärmeleitfähigkeit benutzt werden, während die zweite Phenolharz-Hartschaumplatte eine von der ersten stark abweichende Wärmeleitfähigkeit aufwies.

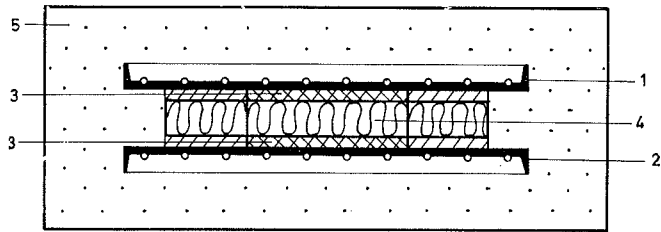


Abb. 6. Meßeinrichtung zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit, Einplattengerät mit Wärmeleitmeßplatten (1 Kühlplatte, 2 Heizplatte, 3 Wärmeleitmeßplatte, 4 Versuchsprobe, 5 Korkschrot).

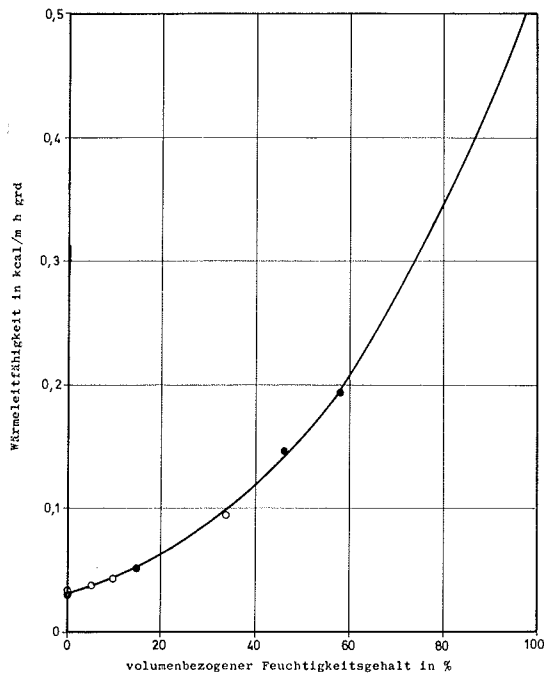


Abb. 7. Wärmeleitfähigkeit von Polystyrol-Hartschaum, Mitteltemperatur: 10°C (○ Trockenrohddichte 19 kg/m³, ● Trockenrohddichte 19 kg/m³).

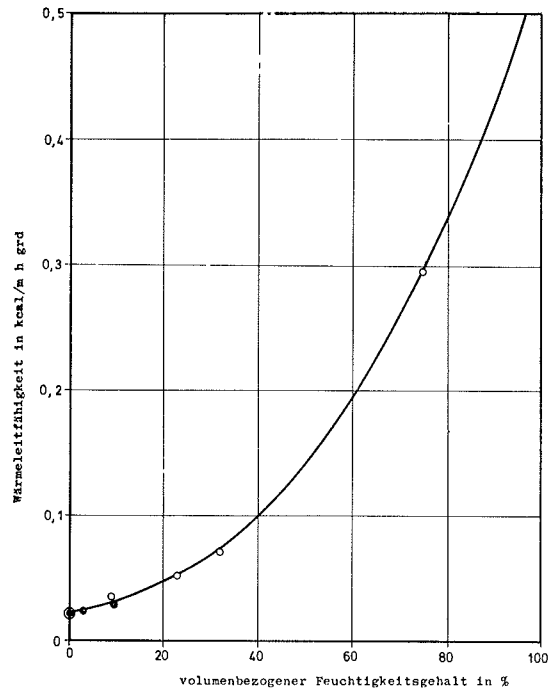


Abb. 8. Wärmeleitfähigkeit von Polyurethan-Hartschaum, Mitteltemperatur: 10°C (○ Trockenrohddichte 35 kg/m³, ● Trockenrohddichte 41 kg/m³).

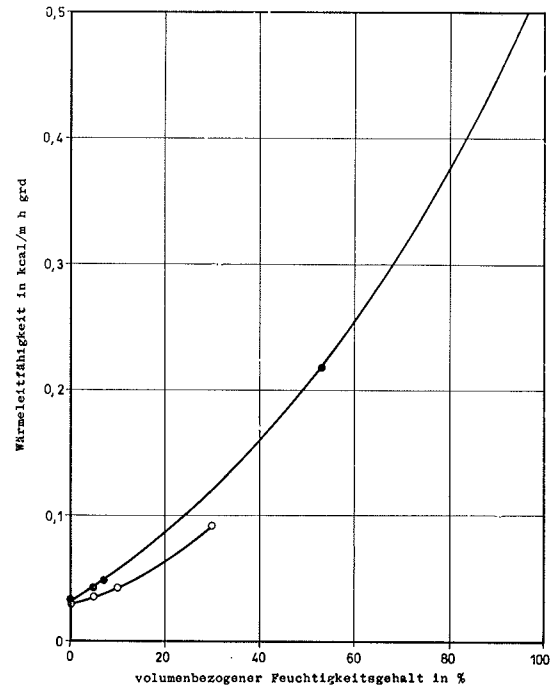


Abb. 9. Wärmeleitfähigkeit von Phenolharz-Hartschaum, Mitteltemperatur: 10°C (○ Trockenrohddichte 49 kg/m³, ● Trockenrohddichte 43 kg/m³).

Es ergibt sich eine stetige Zunahme der Wärmeleitfähigkeit mit steigendem Feuchtigkeitsgehalt, und der Kurvenverlauf läßt sich eindeutig bis zur Wassersättigung extrapolieren, wo die Wärmeleitfähigkeit der Schaumstoffe aufgrund der großen Porosität von etwa 97 bis 98% bei ca. 0,5 kcal/m h °C, nämlich der Wärmeleitfähigkeit des Wassers, liegen muß. In einer Tabelle (Abb. 10) sind neben der Probengröße und der Trockenrohddichte die Meßwerte für die Wärmeleitfähigkeit bei den unterschiedlichen Feuchtigkeitsgehalten zusammengestellt.

Kontrolle des Meßverfahrens

Um zu prüfen, welches Feuchtigkeitsgefälle sich bei dem gewählten Meßverfahren mit kleinem Temperaturgefälle infolge einer Feuchtigkeitsverlagerung einstellt, wurde für den Polystyrol-Hartschaum und Phenolharz-Hartschaum eine Schichtung von 5 etwa 1 cm dicken Platten bei 5 Vol.-% Feuchtigkeits-

gehalt untersucht. Der Temperaturgradient in der Probe betrug 0,6 bzw. 0,5°C/cm, die Mitteltemperatur etwa +10°C. Beim Polystyrolschaum stellte sich nach 24 Stunden Versuchszeit der Beharrungszustand ein. Die dabei ermittelte Wärmeleitfähigkeit ergab sich zu 0,037 kcal/m h °C und liegt damit ziemlich genau auf der Kurve nach Abb. 7. Bei konstanten Versuchsbedingungen nach 76, 152 und 240 Stunden vorgenommene Zwischenbewertungen ergaben die gleichen Wärmeleitfähigkeiten. In Abb. 11 ist dabei die Feuchtigkeitsverschiebung in den 5 Schichten unter der Annahme angegeben, daß die Feuchtigkeitsverlagerung linear mit der Versuchszeit erfolgt. Nach Erreichen des 1. Meßpunktes liegt die Austrocknung auf der Warmseite und die Feuchtigkeitsanreicherung auf der Kaltseite unter 0,1 Vol.%. Ähnlich liegen die Verhältnisse, wie aus Abb. 12 ersichtlich ist, beim Phenolharzschaum. Auch hier ändert sich zwischen Meßpunkt 1 und 3 die Wärmeleitfähigkeit nicht und deren Wert stimmt gut mit der oberen Kurve in Abb. 9 überein. Die Feuchtigkeitsverlagerung ist etwas größer als beim Polystyrolschaum, was sich durch den geringeren Diffusionswiderstand erklären läßt. Auf die Messung von geschichteten Polyurethanschaumplatten konnte verzichtet werden, da dieser Schaumstoff bei den hier untersuchten Rohdichten den größten Diffusionswiderstand aufweist und somit die geringste Feuchtigkeitsverlagerung zu erwarten ist. Man kann also annehmen, daß die Austrocknung auf der Warmseite und die Feuchtigkeitsanreicherung an der Kaltseite keinen merklichen Einfluß auf die ermittelte Wärmeleitfähigkeit hat.

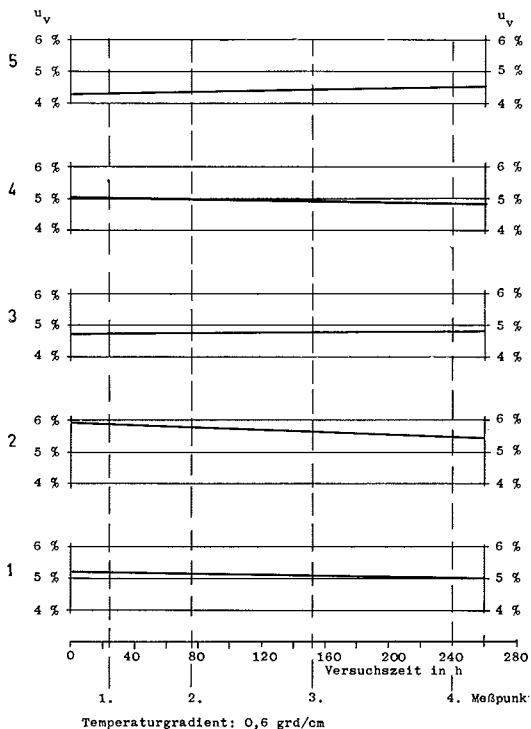


Abb. 11. Feuchtigkeitsverlagerung bei der Wärmeleitfähigkeitsbestimmung von feuchten Stoffen (Polystyrol-Hartschaum). u_v : volumenbezogener Feuchtigkeitsgehalt.

Zusammenfassung

Mit steigendem Feuchtigkeitsgehalt eines Schaumkunststoffs ist eine stetige Zunahme seiner Wärmeleitfähigkeit bis zur Wassersättigung zu verzeichnen. Während bei Polystyrol-Hartschaum die Erzeugnisse zweier verschiedener Hersteller für gleiche Rohdichten denselben Anstieg aufweisen, ergibt sich bei Polyurethan-Hartschaum und Phenolharz-Hartschaum bei höheren Rohdichten scheinbar eine geringere Zunahme.

Die Wärmeleitfähigkeit im trockenen Zustand des Materials liegt beim Polyurethan-Hartschaum nach Lagerung durchaus im Rahmen des Üblichen, beim Polystyrol-Hartschaum in einem Fall mit 0,033 kcal/m h °C und beim Phenolharz-Hartschaum in beiden Fällen über dem Durchschnittswert, welcher für Stoffe der untersuchten Rohdichten bisher ermittelt wurde.

Stoff	Probenabmessungen in cm	Trockenrohddichte in kg/m ³	Feuchtigkeitsgehalt volumenbezogen in %	Wärmeleitfähigkeit in kcal/m h °C
Polystyrol-Hartschaum	50 x 50 x 6	19	0 5,5 10 34	0,033 0,037 0,042 0,094
	30 x 30 x 3	19	0 15 46 58	0,029 0,051 0,148 0,194
Polyurethan-Hartschaum	50 x 50 x 6	35	0 9 23 32 75	0,022 0,035 0,052 0,070 0,294
	30 x 30 x 2,5	41	0 2,5 10	0,023 0,024 0,028
Phenolharz-Hartschaum	50 x 50 x 6	49	0 5 10 30	0,030 0,035 0,043 0,092
	30 x 30 x 3	43	0 5 7 54	0,032 0,043 0,048 0,218

Abb. 10. Zusammenstellung der Meßergebnisse

Literatur

- [1] H. Zehender. Wärmeleitfähigkeitsmessungen an Schaumkunststoffen bei tiefen Temperaturen; Kältetechnik - Klimatisierung Bd 19 (1967) Nr. 1, S. 2/8.
- [2] DIN 52 612: Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät, Beuth-Vertrieb Berlin und Köln (Januar 1966).
- [3] E. Schmidt: Ein neuer Wärmeflußmesser und seine praktische Bedeutung in der Wärmetechnik. Mitteilungen Forschungsheim für Wärmeschutz, München H. 3 (1923).

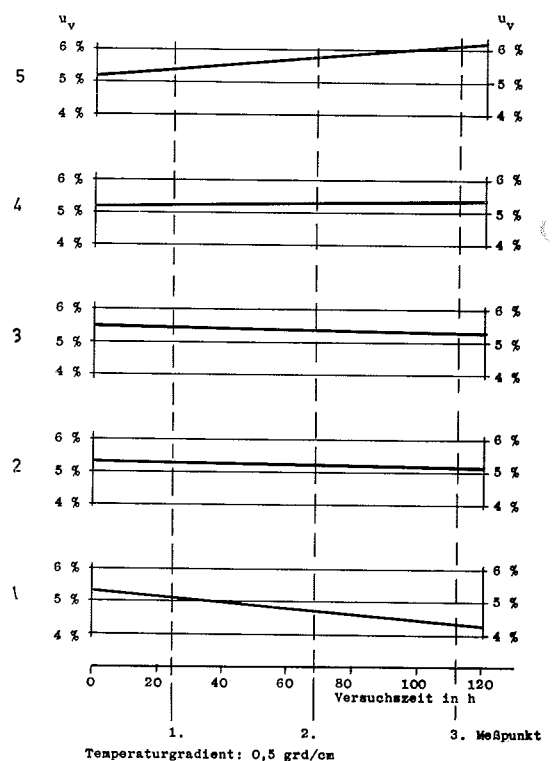


Abb. 12. Feuchtigkeitsverlagerung bei der Wärmeleitfähigkeitsbestimmung von feuchten Stoffen (Phenolharz-Hartschaum). u_v : volumenbezogener Feuchtigkeitsgehalt.