

Entwicklung einer Schnellmeßmethode zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen für die Produktionskontrolle. Wärmeleitfähigkeitsschnellmeßmethode

T 2283

T 2283

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

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

© 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.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

Abschlußbericht BPL 130/90

**Entwicklung einer Schnellmeßmethode zur Be-
stimmung der Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen
für die Produktionskontrolle**

- Wärmeleitfähigkeitsschnellmeßmethode -

Prof. Dr.-Ing. R. Jenisch

Prof. Dr. rer. nat. M. Stohrer

Dipl.-Ing.(FH) S. Palm

Fachbereich Bauphysik

Auftraggeber:

Institut für Bautechnik

Reichpietschufer 74-76

1000 Berlin 30

Auftrag Az.: IV 1-5-558/89

vom 21.12.88

Der Abschlußbericht umfaßt 37 Seiten und 17 Anlagen

Stuttgart, den 15. Oktober 1990

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----------------|
| Kurzfassung, deutsch, englisch, französisch | 2 |
| 1. Projektziel | 5 |
| 2. Einleitung | 6 |
| 3. Theorie der Heißdrahtmethode | 7 |
| 3.1 Theorie zur Vollraummessung der Wärmeleitfähigkeit nach der Heißdrahtmethode | 7 |
| 3.2 Theorie zur Halbraummessung der Wärmeleitfähigkeit nach der Heißdrahtmethode | 12 |
| 4. Heißdraht-Meßapparatur | 15 |
| 5. Steuerung und Ablauf der Messung | 17 |
| 6. Auswertung der Meßwerte | 20 |
| 7. Meßzeitoptimierung | 21 |
| 8. Kalibrierwerte des Heißdraht-Auflagesensors | 23 |
| 9. Auswahl der Testproben | 24 |
| 10. Überprüfung der Meßapparatur | 25 |
| 11. Testmessungen zur Bestimmung der Scherben-Wärmeleitfähigkeit von Lochsteinen und der Wärmeleitfähigkeits-Inhomogenitäten | 26 |
| 12. Zusammenstellung der Testergebnisse | 29 |
| 13. Weiterführende Arbeiten | 31 |
| 14. Zusammenfassung | 32 |
| | |
| Literaturzusammenstellung | Anlage 1 |
| Geräteliste | Anlage 3 |
| Bilder, Tabellen | Anlagen 4 - 17 |

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

Kurzfassung des Berichts BPL 130/90 vom 15.10.1990

Entwicklung einer Schnellmeßmethode zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen für die Produktionskontrolle.
- Wärmeleitfähigkeitsschnellmeßmethode -

In diesem Forschungsprojekt wurde eine computergesteuerte Meßapparatur entwickelt, mit der nach dem Prinzip des Heißdrahtverfahrens die Wärmeleitfähigkeit einer ebenen, kleinformatigen, nichtmetallischen Baustoffprobe in Minutenschnelle meßbar ist. Entsprechend der Theorie dieses instationären Wärmeeindringverfahrens wird durch Regression aus dem zeitlichen Temperaturverlauf eines sehr dünnen, durch einen Konstantstrom beheizten Platin-Heißdrahts zwischen den Probenhälften die Wärmeleitfähigkeit der Probe bestimmt. Die Messung und Auswertung wird am Computer menugeführt gestartet, sie läuft computergesteuert ab, das Meßergebnis und die Analyse der Meßgenauigkeit werden am Bildschirm und über einen Drucker ausgegeben. Ist die Probe im thermischen Gleichgewicht, dann dauert bei der entwickelten Heißdraht-Meßapparatur die Messung der Wärmeleitfähigkeit eines Baustoffs etwa sechs Minuten.

Der Heißdraht-Vollraumsensor wurde zu einem mechanisch stabilen, leicht handbaren Halbraum-Auflagesensor weiterentwickelt, bei dem der 0.05 mm dicke Platin-Heißdraht auf einem ebenen Polyurethan-Hartschaumblock befestigt ist. Der PU-Auflagesensor hat eine Auflagefläche von 120 mm x 60 mm und wird mit einer definierten Auflast auf die Probe aufgelegt. Die Ebenheit der Probenoberfläche sollte im Meßbereich < 0.5 mm sein.

Die Meßgenauigkeit der entwickelten Meßapparatur und die Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse des Heißdrahtverfahrens wurde in einem Wertebereich der Wärmeleitfähigkeit zwischen 0.03 und 1.0 W/(mK) überprüft, indem die an derselben Probe mit der Heißdraht-Apparatur und mit dem Plattengerät nach DIN 52612 gemessenen Wärmeleitfähigkeiten verglichen wurden. Für Baustoffe im Wärmeleitfähigkeitsbereich 0.1 bis 1.0 W/(mK) ergaben sich bei Abweichungen $< 5\%$ gute Übereinstimmungen der Vergleichsmessungen. Bei den Wärmedämmstoffen liegen die Meßwerte der Heißdrahtmethode bis zu 20% unter den Vergleichswerten des Plattengeräts; diese systematischen Abweichungen scheinen sich durch eine Anpassung von Sensorkalibrierfaktoren kompensieren zu lassen.

Erste orientierende Messungen mit dem Halbraum-Auflagesensor an Lochsteinen zeigten, daß mit der entwickelten Heißdraht-Apparatur räumliche Inhomogenitäten der Wärmeleitfähigkeit des Scherbens und der Stegmaterialien analysiert werden können.

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

Short edition of the report BPL 130/90 from October 15, 1990

Development of a short time measuring method for determining the thermal conductivity of building materials for production control

This research project was aimed to develop a computer controlled apparatus for measuring the thermal conductivity of a flat, small sized, non-metallic specimen of solid building material within few minutes by a transient hot-wire method. Corresponding to the theory of nonsteady-state heat transfer the thermal conductivity of a specimen is determined by regression analysis of the time dependence of temperature of a very thin platinum hot-wire heated by constant electric current between two sheets of material. Measurement and evaluation are started and controlled by computer, results and accuracy analysis are issued on the screen as well as on the printer. In equilibrium conditions of temperature the measurement of heat conductivity of a specimen takes about six minutes by use of the new developed apparatus.

The hot-wire sensor was modified to a mechanical sturdy, easy to handle half-sphere layer sensor consisting of a plain polyurethane rigid foam-block on which a platinum hot-wire of 0.05 mm diameter is fixed. The layer plane of the polyurethane-sensor has a size of 120 mm x 60 mm. The sensor is pressed on the specimen by a defined weight. The flatness of specimen should be less than 0.5 mm in the area of measuring.

The accuracy of the developed apparatus and the reproducibility of the results by the transient hot-wire method have been tested in the range from 0.03 to 1.0 W/(mK) of thermal conductivity by comparing the results of identical control specimens measured by the transient hot-wire apparatus as well as by the standard hotplate method of DIN 52612/ISO 8302. For building materials with thermal conductivities between 0.1 and 1.0 W/(mK) the comparative results agree very well, the deviation of the measurement results are less than 5%. In case of heat insulation materials the results of the transient hot-wire apparatus are up to 20% lower than the comparative values of the guarded hot-plate method; adapted sensor factors could compensate the systematic deviations.

First measurements of cored blocks with the half-sphere layer sensor yield the suitability of the developed transient hot-wire apparatus for investigations of local differences in thermal conductivity of the body material.

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

Résumé du compte rendu BPL 130/90 du 15.10.1990

Développement d'une méthode de détermination de la conductibilité thermique d'un matériau de construction pour le contrôle de la production.

- Méthode rapide de mesure de la conductibilité thermique -

Dans ce projet de recherche, on a mis au point un appareil de mesure, contrôlé par ordinateur, avec lequel la conductibilité thermique d'un échantillon de matériau de construction uniforme, de petit format et non métallique est mesurable par le procédé du fil chauffé.

Conformément à la théorie de ce procédé de pénétration transitoire de la chaleur - la température dépendant du temps - , on fait passer un courant constant dans un fil de platine très fin, placé entre les deux moitiés de l'échantillon. L'ordinateur en amorce la mesure et l'interprétation et en contrôle le déroulement. Les résultats et l'analyse de l'exactitude de la mesure sont émis sur un écran et sur un imprimateur. Si l'échantillon est en équilibre thermique, alors, grâce à ce nouvel appareil, la mesure de la conductibilité d'un matériau prend six minutes.

Le "sensor" entièrement sphérique a été transformé en un appareil stable, facile à manier, à surface d'appui hémisphérique sur laquelle le fil de platine d'une épaisseur de 0.05 mm est fixé sur un bloc de mousse rigide de polyuréthane. Ce "sensor" a une surface d'appui de 120 mm x 60 mm et est posé avec une charge précise sur l'échantillon dont l'uniformité de la surface supérieure doit être inférieure de 0.5 mm au champ de mesure.

L'exactitude de la mesure de la conductibilité opérée par ce nouvel appareil et la reproduction des résultats par le procédé du fil chauffé ont été contrôlées dans un champ de valeur compris entre 0.03 et 0.1 W/(mK) et comparées aux résultats obtenus sur le même échantillon aussi bien avec l'appareil à fil chauffé qu'avec celui de la plaque chaude gardée (DIN 52612). En ce qui concerne les matériaux de construction dont la conductibilité est comprise entre 0.1 et 1.0 W/(mK), les écarts sont inférieurs à 5% et concordent bien aux valeurs de référence. Pour les isolants, les valeurs obtenues par la méthode du fil chauffé se situent jusqu'à 20% au-dessous des valeurs de comparaison obtenues par la méthode de la plaque chaude gardée. Ces déviations systématiques semblent pouvoir se compenser par un ajustement du "sensor".

Les premières mesures appliquées à des briques perforées multitubulaires ont montré que la conductibilité de matériaux hétérogènes tels les tessons de briques pouvait être analysée par le "sensor".

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

Forschungsvorhaben: Entwicklung einer Schnellmeßmethode zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen für die Produktionskontrolle

- Wärmeleitfähigkeitsschnellmeßmethode -

- Abschlußbericht BPL 130/90 -

1. Projektziel

In diesem Forschungsprojekt soll eine Wärmeleitfähigkeits-Schnellmeßmethode entwickelt werden, bei der die Wärmeleitfähigkeit einer kleinformatischen, ebenen Baustoffprobe in Minutenschnelle gemessen wird. Dazu soll eine instationäre Wärmeeindringmeßmethode, das Heißdrahtverfahren (in der Literatur auch Heizdrahtverfahren bezeichnet, engl. transient hot strip/wire method), angewandt werden. Für die Anwendung dieser Wärmeleitfähigkeits-Schnellmeßmethode auch durch Nichtspezialisten soll die Kontrolle des Meßablaufs, die Auswertung und die Dokumentation der Meßergebnisse über einen Personalcomputer gesteuert und kontrolliert werden. Der Meßfühler des Heißdrahtverfahrens soll als Halbraum-Auf-lagesensor konstruiert werden, damit auch Messungen an Scherben und Flanken von Lochsteinen möglich sind und ein rascher Probenwechsel durchgeführt werden kann.

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

2. Einleitung

Das für die Messung der Wärmeleitfähigkeit an Baustoffen übliche Verfahren ist die Methode mit dem Plattengerät nach DIN 52612. Dieses Verfahren erfordert große Probenabmessungen von 500 mm x 500 mm und kann Meßdauern von mehreren Tagen pro Meßpunkt benötigen.

Die neuentwickelte Wärmeleitfähigkeits-Schnellmeßmethode bietet die Möglichkeit, auch an kleinen Proben in kurzer Zeit Messungen durchzuführen. Ein bereits am Markt befindliches Gerät, das Kemtherm bzw. Shotherm QTM nach Showa Denko, bietet vergleichbare Möglichkeiten. Das vergleichsweise sehr teure Gerät (ca. 50.000,- DM) bietet keine computergesteuerte Messung und Meßwertausgabe, der Temperaturanstieg wird nur punktuell über ein Thermoelement gemessen und die Meßwertauswertung erfolgt ohne Kurvenanpassung durch eine einfache Zweipunktberechnung. Bei Vergleichsmessungen mit diesem Gerät an Proben mit bekannter Wärmeleitfähigkeit waren große Abweichungen zu Normmessungen (nach DIN 52612) festzustellen.

Am 10.04.1990 wurde die Meßapparatur der Wärmeleitfähigkeits-Schnellmeßmethode dem Sachverständigenausschuß für Wärmeschutz im Institut für Bautechnik in Berlin vorgestellt. Die dabei gewonnenen Anregungen wurden in die Untersuchungen eingearbeitet.

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

3. Theorie der Heißdrahtmethode

3.1 Theorie zur Vollraummessung der Wärmeleitfähigkeit nach der Heißdrahtmethode

Die Ausgangsgleichung für die Wärmeleitung im nichtstationären Feld ist die Fourier-Differentialgleichung [10]:

$$\frac{d\vartheta}{dt} = a \left(\frac{d^2\vartheta}{dx^2} + \frac{d^2\vartheta}{dy^2} + \frac{d^2\vartheta}{dz^2} \right) \quad (1)$$

Bei einem Heißdraht handelt es sich idealisiert um eine linienförmige, in einem unendlich ausgedehnten Medium liegende Wärmequelle mit instationärem Wärmefluß in radialer Richtung. Daher wird die Darstellung der Fourier-Differentialgleichung in Polarkoordinaten gewählt:

$$\frac{d\vartheta}{dt} = a \left(\frac{d^2\vartheta}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\vartheta}{dr} \right) \quad (2)$$

Die Temperaturverteilung $\vartheta(r,t)$ einer unendlich langen, linienförmigen Wärmequelle in einem unendlich ausgedehnten Medium bei plötzlichem Einsetzen der Beheizung zum Zeitpunkt $t=0$, wird nach Carslaw u. Jaeger, Conduction of Heat in Solids, 2. Auflage, S.261, durch die Gleichung

$$\Delta\vartheta = \vartheta(r,t) - \vartheta(r,0) = - \frac{q_l}{4\pi\lambda} \text{Ei} \left(- \frac{r^2}{4at} \right) \quad (3)$$

beschrieben. Hierbei gilt die Bedingung, daß die längenbezogene Heizleistung q_l des Drahtes konstant ist.

r : Drahtradius
 $\vartheta(r,0)$: Temperatur an der Oberfläche des Heißdrahtes zum Zeitpunkt $t=0$ bei Einschalten der Heizung.

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

- $\vartheta(r, t)$: Temperatur an der Oberfläche des Heißdrahtes zum Zeitpunkt $t=t_x$ nach Einschalten der Heizung
- λ : Wärmeleitfähigkeit des Mediums um den Heißdraht
- q_l : Wärmestrom pro Längeneinheit des Heißdrahtes
- a : Temperaturleitfähigkeit des Mediums;
 $a = \lambda / (c \rho)$
- $- Ei\left(-\frac{r^2}{4at}\right)$: Exponentialintegral, in das die Temperaturleitfähigkeit a des umgebenden Mediums eingeht

Lösung des Exponentialintegrals ist die folgende Reihendarstellung:

$$Ei(-x) = - \int_x^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = \gamma + \ln x - \frac{x}{1 \cdot 1!} + \frac{x^2}{2 \cdot 2!} - \dots + \frac{x^n}{n \cdot n!} \quad (4)$$

$$x = \frac{r^2}{4at}$$

$\gamma = 0.5772\dots$ Euler-Konstante

Für großes t wird $\frac{r^2}{4at} \ll 1$, so daß die Gleichung (3) übergeht in die Näherung

$$\Delta\vartheta = \frac{q_l}{4\pi\lambda} \left(-\gamma - \ln \frac{r^2}{4at} \right) \quad (5)$$

Mit $C = e^\gamma = 1.781$ ergibt sich aus Gleichung (5)

$$\Delta\vartheta = \frac{q_l}{4\pi\lambda} \ln \frac{4at}{r^2 C} = \frac{q_l}{4\pi\lambda} \left(\ln \frac{4a}{r^2 C} + \ln t \right) \quad (6)$$

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

Gleichung (6) zeigt, daß die Temperaturerhöhung an einem Ort r mit der logarithmischen Zeit $\ln(t)$ eine lineare Funktion bildet. Die Steigung dieser linearen Funktion ist:

$$\frac{d(\Delta\vartheta)}{d(\ln t)} = \frac{q_l}{4\pi\lambda} \quad (7)$$

Die Temperaturerhöhung $\Delta\vartheta$ des Mediums an der Drahtoberfläche hängt mit der Temperaturerhöhung $\Delta\vartheta_{i,Draht}$ im Heißdraht zusammen. Für einen sehr dünnen Platin-Draht mit einer hohen Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zum Meßmaterial gilt $\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_{i,Draht}$. Die Temperaturerhöhung $\Delta\vartheta_{i,Draht}$ wird über die Spannungsänderung, die aus der Änderung des temperaturabhängigen Platin-Drahtwiderstandes resultiert, mit der Gleichung

$$\Delta\vartheta_{i,Draht} = \frac{\Delta U_H(t_i)}{I \alpha_T R_w(0^\circ\text{C})} \quad (8)$$

bestimmt, wobei $\alpha_T = \alpha + 2\beta\vartheta_A$ ist.

Parameter, die durch Kalibrierung der Apparatur zu bestimmen sind:

- l : Länge des Heißdrahtes
- α, β : Temperaturkoeffizienten des Platindraht-Widerstands
- $R_w(0^\circ\text{C})$: Widerstand des Platindrahts bei 0°C

Parameter, die bei der Messung ermittelt werden:

- ϑ_A : Anfangstemperatur des Heißdrahtes beim Einschalten des Heizstromes
- I : Heizstrom
- $U_H(t_i)$: Spannungsabfall am Heißdraht

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

Die längenbezogene Heizleistung q_l ist:

$$q_l = \frac{I^2 R_w(\vartheta_A)}{l} \quad (9)$$

wobei $R_w(\vartheta_A) = R_w(0^\circ\text{C}) (1 + \alpha\vartheta_A + \beta\vartheta_A^2)$ der Drahtwiderstand bei der Temperatur ϑ_A ist.

Die Bedingung, daß die längenbezogene Heizleistung q_l des Platin-Heißdrahtes konstant ist, ist nur dann erfüllt, wenn sich der Widerstand R des Platindrahtes bei konstantem Strom I nicht ändert. Aufgrund der Temperaturabhängigkeit des Platindraht-Widerstandes kommt es jedoch bei Stromdurchfluß zur Erwärmung des Platindrahtes und daraus resultierend zu einer Widerstandsänderung. Da ein konstanter Strom erforderlich ist, um über die Messung der Widerstandsänderung am Platindraht Temperaturen ermitteln zu können, kann die Heizleistung q nicht konstant gehalten werden. Bei einem Temperaturkoeffizienten von Platin, $\alpha_{pt} = 3.9 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$ ist die Widerstandsänderung in einem Bereich $\Delta\vartheta < 10 \text{ K}$ mit $\Delta R/R < 4\%$ sehr gering. Die Widerstandsänderung durch Stromfluß wird daher durch die folgende einfache Korrektur $R_{w,korr}$ berücksichtigt, welche sich aus der Widerstandsänderung ΔR des Drahtes ergibt:

$$R_{w,korr.} = R_w(\vartheta_A) + \Delta R = R_w(\vartheta_A) (1 + \alpha_{wk} * \Delta\vartheta) \quad (10)$$

mit der Temperaturdifferenz zwischen Anfangstemperatur und der Temperatur des Platin-Heißdrahtes zum Meßzeitpunkt $\Delta\vartheta$:

$$\Delta\vartheta = 0.5 \frac{(U_H(t_i) + U_H(t_{i+n}))}{\alpha_T R_w(0^\circ\text{C}) I}$$

und mit dem Korrektorkoeffizienten α_{wk} für die Heizleistungskorrektur:

$$\alpha_{wk} = \frac{\alpha_T}{1 + \alpha\vartheta_A + \beta\vartheta_A^2}$$

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

Somit gilt für die korrigierte Heizleistung:

$$q_i = I^2 R_w(\vartheta_A) (1 + \alpha_{wk} * \Delta\vartheta) \quad (11)$$

Die Wärmeleitfähigkeit des Mediums läßt sich nach Auflösung von Gleichung (7) nach λ und Einsetzen der Gleichungen (8) und (9) mit folgender Formel bestimmen:

$$\lambda = \frac{I^3 R_w(\vartheta_A) R_w(0^\circ\text{C}) \alpha_T}{4\pi l} * \frac{d(\ln t_i)}{d(\Delta U_H(t_i))} \quad (12)$$

Die Auswerteformel für die Wärmeleitfähigkeitsmessung mit einem **Vollraumsensor** ist unter Berücksichtigung der Korrektur der nicht-konstanten Heizleistung nach Gleichung (12):

$$\lambda_{\text{Probe}} = \frac{I^3 R_w(\vartheta_A) (1 + \alpha_{wk} * \Delta\vartheta) R_w(0^\circ\text{C}) \alpha_T}{4\pi l} * \frac{d(\ln t_i)}{d(\Delta U_H(t_i))} \quad (13)$$

Folgende Werte sind zu kalibrieren: die Länge des Heizdrahtes l , die Temperaturkoeffizienten des Platindrahtwiderstands α und β , sowie der Widerstand des Platindrahts bei 0°C . Zu Messen ist die Anfangstemperatur ϑ_A des Heißdrahtes bei Einschalten des Heizstromes und der Spannungsabfall $U_H(t_i)$ am Heißdraht; der Heizstrom I wird an einer programmierbaren Präzisions-Konstant-Stromquelle vorgegeben.

Gleichung (3) bezieht sich auf die Messung als **Vollraumsensor**, d.h. auf eine linienförmige Wärmequelle in einem homogenen Medium. Handelt es sich dagegen um eine zusammengesetzte Probe, wobei der Heißdraht zwischen zwei Materialien mit unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit liegt, erhält man die Meßanordnung eines **Halbraum-Auflagesensors**; dann muß Gleichung (13) erweitert werden.

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

3.2 Theorie zur Halbraummessung der Wärmeleitfähigkeit nach der Heißdrahtmethode

Ausgangsgleichung für die Temperaturverteilung einer Anordnung, bei der ein in einer ebenen Trennschicht zwischen zwei ausgedehnten Materialien unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit liegender, linearer, dünner Heißdraht sprunghaft beheizt wird, ist die Gleichung einer punktförmigen Wärmequelle in einem unendlichen zusammengesetzten Medium nach Carslaw und Jaeger, *Conduction of Heat in Solids*, 2. Auflage, S.376, Gleichung (5). Takegoshi u.a. [14] haben aus der Gleichung nach Carslaw u. Jaeger die Beziehung für eine linienförmige, zwischen zwei Materialien mit unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten liegenden Wärmequelle hergeleitet. Danach ergibt sich folgende Lösung für die Zeitabhängigkeit der Heißdrahttemperatur ϑ :

$$\frac{d\vartheta}{d(\ln t)} = \frac{q_l}{2\pi(\lambda_1 + \lambda_2)} \left(1 - \frac{(\lambda_1 a_1 / a_2) + \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} * \frac{r^2}{4a_2 t} \right) \quad (14)$$

Unter den Bedingungen $\frac{\lambda_1 a_2 / a_1 + \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \approx 1$ und $\frac{r^2}{4a_2 t} < 0.01$ (15)

ergibt sich mit einer Abweichung von kleiner 1% folgende Näherung für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit durch einen Halbraumsensor:

$$\lambda_2 = \frac{q_l}{2\pi} * \frac{d(\ln t)}{d(\vartheta)} - \lambda_1 \quad (16)$$

λ_1, λ_2 : Wärmeleitfähigkeit der Materialien in den beiden Halbräumen

a_1, a_2 : Temperaturleitfähigkeit der Materialien in den beiden Halbräumen

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

Der Temperaturverlauf an der Probenoberfläche ab Einschaltzeitpunkt des Heizstromes wird über den Zeitverlauf des elektrischen Spannungsabfalls am Platindraht bestimmt. Der pro Längeneinheit abgegebene Wärmestrom ergibt sich aus dem Heizstrom und dem Widerstand des Heizdrahtes, wobei die Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstandes zu berücksichtigen ist. Für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des Probenmaterials bei der Probentemperatur ϑ_A zu Anfang der Heißdrahtmessung ergibt sich durch Ersetzen von $\Delta\vartheta$ und q_l analog zu Gleichung (13) in Gleichung (16) folgende Auswerteformel für die Heißdrahtmessung mit einem Halbraumsensor.

$$\lambda_{\text{Probe}}(\vartheta_A) = k_1 \frac{I^3 R_w(\vartheta_A) (1 + \alpha_{wk} \Delta\vartheta) R_w(0^\circ\text{C}) \alpha_T}{2\pi l \frac{d(\Delta U_H(t_i))}{d(\ln t_i)}} - k_2 \lambda_{\text{Sensor}}(\vartheta_A) \quad (17)$$

Zusätzlich zu den Parametern bei der Vollraummessung sind bei der Halbraumsensor-Messung folgende Apparaturparameter zu kalibrieren:

- $\lambda_{\text{Sensor}}(\vartheta_A)$: Wärmeleitfähigkeit des Sensormaterials bei ϑ_A
(Polyurethan-Hartschaum)
 k_1, k_2 : Sensorkalibrierfaktoren

Die Wärmeleitfähigkeit des Sensormaterials wird bei der Kalibrierung des Halbraum-Auflagesensors in Abhängigkeit von der Temperatur gemessen. Die Sensorkalibrierfaktoren k_1 und k_2 sind theoretisch gleich Eins zu setzen, sofern die Einflüsse von Löt-, Längen- und Inhomogenitätseffekten am Platindraht bzw. der Trägerfolien und Polyurethanschaum-Inhomogenitäten vernachlässigbar sind. Experimentell zeigte es sich, daß bei der ausgeführten Sensorkonstruktion durch

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

die Einflüsse der Folienabdeckung des Heißdrahtes sowie die löttechnisch bedingten Längenunsicherheiten zwischen den Meßwerten nach dem Plattenverfahren von DIN 52612 und den Meßwerten der Heißdrahtmethode systematische Abweichungen auftreten. Durch Anpassung der Sensorkalibrierfaktoren k_1 und k_2 lassen sich diese Abweichungen kompensieren. Diese Korrekturen sind jedoch bei einer nicht allzuhohen Genauigkeitsanforderung vernachlässigbar. Wie die Untersuchungen an verschiedenen Baustoffen ergeben haben, bleibt für Baustoffe mit Wärmeleitfähigkeiten von $0.1 < \lambda < 1.1 \text{ W/mK}$ mit $k_1 = k_2 = 1$ die systematische Abweichung des Sensoraufbaus unter 5%.

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

4. Heißdraht-Meßapparatur

Für die Messung des Temperaturanstiegs am elektrisch beheizten 0.05 mm dicken Platinheißdraht wurde eine computergesteuerte Heißdrahtmeßapparatur entwickelt. Dieser Meßaufbau besteht aus einem Personalcomputer (640 kByte, Betriebssystem MS-DOS, PC<>488-Karte, Hercules-Graphikkarte) als Steuer- und Datenverarbeitungseinheit, einem Digitalmultimeter mit Meßwertspeicher, einem Relais-Scanner, einem DC-Kalibrator als Konstantstromquelle für den Bereich von 1 mA bis 200 mA und einer Heißdrahtmeßbrücke mit einem Halbraum-Auflagesensor. Die Geräte sind über eine IEC-Busleitung miteinander verbunden. Zur Ausgabe und Dokumentation des Meßergebnisses wurde ein Drucker benutzt. Das Blockschaltbild der Meßmethode zeigt Bild 1.

Das Meßprinzip beruht auf der Verwendung der Widerstandsänderung des elektrisch beheizten Heißdrahtes zur Messung dessen Temperaturanstiegs. Die Widerstandsmessung erfolgt über die Meßbrücke, wobei der Spannungsabfall des Heizstromes am Heißdraht kompensiert ist. Das Konstruktionsprinzip der Meßbrücke zeigt Bild 2.

In Bild 3 ist die Konstruktion des Halbraum-Auflagesensors aus Polyurethan-Hartschaum skizziert; der Heißdraht liegt auf der Oberseite der ebenen Probe und der Unterseite der Polyurethan-Hartschaum-Wärmedämmung des Auflagesensors. Zum mechanischen Schutz ist der 0.05 mm dicke Heißdraht zwischen 0.06 mm dicke Kunststoffklebefolien gelegt, durch welche er auf den Polyurethan-Hartschaum gepreßt wird. Das Gehäuse des Halbraumsensors besteht aus 10 mm dicken Kunststoffplatten. Auf den Kunststoffdeckel des Halbraumfühlers wird eine Auflast aufgebracht, welche den Sensor auf die Probenoberfläche preßt. Der gesamte Anpreßdruck beträgt etwa 6 MN/m^2 . Die Probentemperatur zu Beginn der Messung wird mit Hilfe von

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

Thermoelementen, welche an der Probenoberfläche befestigt werden, gemessen. Die Proben für die Heißdraht-Meßapparatur benötigen eine Mindestabmessung von 120 mm x 60 mm. Die Ebenheit der Probenoberfläche im Meßbereich sollte ≤ 0.5 mm sein.

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

5. Steuerung und Ablauf der Messung

Der gesamte Meßablauf wird durch ein GW-Basic-Programm über den Personalcomputer gesteuert. Die Meßdaten werden automatisch über das Datenbussystem vom Digitalmultimeter in den Computer übernommen, auf Festplatte bzw. Diskette unter einem frei wählbaren Dateinamen abgespeichert, analysiert und ausgewertet sowie die Wärmeleitfähigkeit des Untersuchungsmaterials berechnet. Der Benutzer wird am Bildschirm über ein Software-Menü durch die gesamte Messung geführt. Bild 4 zeigt das Struktogramm des Meßablaufs.

Nach Programmstart ist vom Bediener der Software einmalig, nach Aufforderung durch das Programm, der Relais-Scanner zu initialisieren. Es besteht die Möglichkeit einen Hilfe-Programmteil aufzurufen. Der Bediener kann über ein Menü auswählen, ob er eine Messung durchführen, oder eine bereits als Datei abgespeicherte Messung auswerten lassen will. In jedem Auswahlmenü besteht die Möglichkeit, in das vorhergehende Menü zurückzugehen oder das Programm zu beenden. Bei der Wahl einer Meßdurchführung wird vorausgesetzt, daß die zu messende Probe zuvor sachgemäß präpariert wurde, d.h. die Probe muß konstant temperiert, der Halbraum-Auflagesensor auf die Probe aufgelegt und die Thermoelemente zur Temperaturmessung auf der Probenoberfläche angebracht sein. Das Programm startet selbständig die Messung der Probenoberflächentemperatur. Anschließend wird überprüft, ob die Heißdrahtmeßbrücke abgeglichen ist, d.h., ob der Spannungsabfall des Heizstromes am Heißdraht kompensiert ist. Ist das Ergebnis dieser Überprüfung negativ, so wird der Benutzer des Programms aufgefordert, die Meßbrücke manuell über die Drehknöpfe am Gerät abzugleichen. Bei positivem Ergebnis der Überprüfung geht das Programm weiter zum Eingabeteil. Hier können auftragsbezogene und probenspezifische Daten eingege-

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

ben werden. Es folgt die Aufforderung zur Eingabe der drei Meßparameter Stromstärke, Meßintervalldauer und Meßintervallanzahl, sowie zur Eingabe des gewünschten Dateinamens für die Abspeicherung der Meßdaten.

Stromstärke

Die variable Eingabe der Stromstärke ist notwendig, da sie von der Wärmeleitfähigkeit des Probenmaterials abhängig ist. Bei Materialien mit einer hohen Wärmeleitfähigkeit ist ein höherer Heizstrom erforderlich um einen Temperaturanstieg am Platin-Heißdraht um etwa 2 - 6 K zu erzielen als bei Materialien mit niedriger Wärmeleitfähigkeit. Bei einer zu niedrigen Heizleistung wird kein linearer Anstieg des Spannungsabfalls über dem Logarithmus der Zeit während der Messdauer erzielt. Der Temperaturanstieg am Heißdraht soll aber möglichst gering sein, um den Fehler durch Nicht-Konstanz der Heizleistung gering zu halten. Für die untersuchten Materialien mit Wärmeleitfähigkeiten zwischen 0.02 und 1.0 W/mK wurden Heizströme von 40 - 130 mA verwendet.

Meßintervalldauer und Meßintervallanzahl

Als optimale Meßintervalldauer ergaben sich 1000 ms bei einer Meßintervallanzahl von 60 - 80. Diese beiden Meßparameter lassen sich auch als Konstanten in das Programm integrieren; darauf wurde bisher während der Testphase verzichtet.

Nach der Eingabe kann die eigentliche Messung gestartet werden. Die eingegebene Heizstromstärke wird automatisch am DC-Kalibrator eingestellt und aktiviert. Das Digitalmultimeter mißt den Spannungsabfall am Heißdraht und übernimmt alle 1000 ms einen Meßwert in seinen Speicher. Bei Erreichen der Meßintervallanzahl wird die Messung beendet und der Heizstrom abgeschaltet. Die Meßdaten werden vom Multimeter

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

in den Personalcomputer übernommen und als Datei abgespeichert. Das Programm geht weiter in den Auswertungsprogrammteil zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit des Probenmaterials aus den Meßdaten.

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

6. Auswertung der Meßwerte

Der Verlauf des Spannungsabfalls am Heißdraht bei Einsetzen des Heizstromes beschreibt über dem Logarithmus der Zeit $\ln(t)$ nach einer Übergangsphase eine lineare Funktion. Die Übergangsphase hängt von der Zeitdauer, die zum Aufheizen des Platinheißdrahtes benötigt wird, sowie von Übergangswiderständen vom Heißdraht zum Probenmaterial bzw. der Schutzfolie, ab. Zur Auswertung wird nur der lineare Bereich der Meßkurve verwendet. Dieser Bereich wird durch eine Intervallschachtelung ermittelt, wobei durch die Meßwerte über bestimmte Zeitintervalle Ausgleichsgeraden gelegt werden und deren Korrelationsfaktoren verglichen werden. Die Steigung $d(U_H(t_i))/d(\ln t_i)$ im Bereich mit der höchsten Korrelation wird zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit verwendet.

Das Meßergebnis wird sowohl auf dem Bildschirm als auch als Druckgrafik dargestellt. Die Kopfzeilen des Ausdrucks beinhalten eine Probenbeschreibung und die charakteristischen Meßparameter. In halblogarithmischer Darstellung wird der Verlauf des Temperaturanstiegs im Heißdraht aufgezeigt, wobei Kreuze den Bereich markieren, der zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit herangezogen wurde. Zur Meßfehlerbeurteilung wird zusätzlich zur Wärmeleitfähigkeit des Materials die Standardabweichung und der Korrelationskoeffizient angegeben. Bild 5 zeigt einen Ausdruck einer Messung von Gasbeton.

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

7. Meßzeitoptimierung

Die Dauer einer Wärmeleitfähigkeitsmessung mit der Schnellmeßmethode gliedert sich in sieben Abschnitte:

1. Probenvorbereitung (Auflegen des Halbraumsensors und Anbringen der Thermoelemente an der Probenoberfläche)
2. Automatische Messung von Probentemperatur und Abgleich der Meßbrücke
3. Eingabe von Materialdaten und Meßparametern
4. Messung des Spannungsabfalls bei elektrisch beheiztem Heißdraht
5. Speicherung der Meßdaten auf einem Speichermedium (auf Festplatte des Personalcomputers oder auf Diskette)
6. Auswertung der Meßdaten mit Berechnung der Wärmeleitfähigkeit der Probe
7. Ausgabe des Meßergebnisses auf dem Bildschirm und dem Drucker

Die Messung der Probentemperatur und der Abgleich der Meßbrücke ist nach ca. 90 Sekunden abgeschlossen; ein manueller Brückenabgleich benötigt zusätzlich etwa 30 Sekunden. Die darauffolgende Eingabe von Materialdaten und Meßparametern beansprucht bis zu 80 Sekunden.

Die Meßdauer des Spannungsabfalls wurde so optimiert, daß eine Mindestmeßzeit besteht, die gewährleistet, daß über die Aufheizphase des Platindrahtes hinaus gemessen wird. Eine obere Zeitgrenze verhindert eine unnötige Verlängerung der Meßzeit und eine Einflußnahme der Probengeometrie [8]. Die optimale Meßdauer beträgt aufgrund der Erfahrungen mit unterschiedlichen Materialien 60 - 80 Sekunden.

Die Dauer der Meßwertspeicherung, der Auswertung und der Ausgabe des Meßergebnisses ist abhängig von der Verarbeitungsgeschwindigkeit des Personalcomputers. Bei dem verwendeten Meßaufbau beträgt diese Phase etwa 170 Sekunden.

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

Die Gesamtmeßdauer einer einzelnen Messung mit der Wärmeleitfähigkeits-Schnellmeßmethode beansprucht demzufolge 6 bis 7 Minuten.

Bei der Durchführung einer Wiederholungsmessung unter gleichen Bedingungen und an derselben Probenstelle wie bei der vorherigen Messung liegt zwischen den beiden Messungen eine Wartezeit von 3 bis 10 Minuten. Diese Wartezeit ist notwendig, damit die Heißdrahttemperatur wieder auf die Proben temperatur zurückgeht. Nach 3 Minuten Wartezeit wird vom Programm überprüft, ob die Heißdrahttemperatur gleich der Ausgangstemperatur ist. Sofern dies der Fall ist, wird die Wiederholungsmessung gestartet, andernfalls werden weitere 3 Minuten gewartet. Ist die Heißdrahttemperatur nach 10 Minuten Wartezeit noch nicht auf Proben temperatur, wird der Meßablauf unterbrochen und am Bildschirm erscheint ein entsprechender Hinweis. Eine Fortsetzung muß durch den Bediener eingegeben werden.

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

8. Kalibrierwerte des Heißdraht-Auflagesensors

Zur Kalibrierung des Halbraum-Auflagesensors ist es notwendig, die Temperaturkoeffizienten α und β des elektrischen Platin-Drahtwiderstandes und dem Widerstandswert des Platindrahtes bei 0°C zu bestimmen. Dazu muß die Kalibrierkurve des Platindrahtes ermittelt werden.

Die Länge des Platin-Heißdrahtes zwischen den Lötstellen für den Spannungsabgriff ist mindestens auf 0.1 mm genau zu bestimmen.

Für die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit des Probenmaterials wird die Wärmeleitfähigkeit des Materials auf der Sensorseite des Platindrahtes benötigt. Die temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit des verwendeten Polyurethan-Hartschaums wurde durch eine Vollraummessung, d.h. beiderseits des Heißdrahtes befindet sich dasselbe Material, gemessen.

Die Kalibrierwerte α , β , $R_w(0^\circ\text{C})$, $\lambda_{\text{Sensor}}(\vartheta)$ und l_{Draht} gehen in die Auswerteformel ein. Die Sensorkalibrierfaktoren k_1 und k_2 wurden bei den folgenden Messungen $k_1 = k_2 = 1$ gesetzt. Soll die Meßgenauigkeit auf etwa 1 - 2% gesteigert werden, so sind k_1 und k_2 durch die Messung von Materialien mit unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit und eine Anpassung an Meßwerte, die nach dem Plattenverfahren nach DIN 52612 gemessen wurden, zu bestimmen.

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

9. Auswahl der Testproben

Die Auswahl der Materialien, die zur Erprobung der Wärmeleitfähigkeits-Schnellmeßmethode verwendet wurden, orientierte sich an der Zielsetzung, eine Schnellmeßmethode speziell für Baustoffe zu entwickeln. Es soll dabei zum einen der Vergleich mit Messungen nach dem Plattenverfahren nach DIN 52612 gewährleistet sein und zum anderen die Anwendbarkeit der Heißdrahtmethode für Proben untersucht werden, bei denen aufgrund der äußeren Form eine Messung nach DIN 52612 nicht möglich ist.

Es wurden homogene Stoffe gewählt, die sich in ihren Rohdichten und Wärmeleitfähigkeiten deutlich unterscheiden, um die Anwendungsgrenzen der Wärmeleitfähigkeits-Schnellmeßmethode zu ermitteln.

Tabelle 1 führt die Materialien auf, an denen Messungen mit der Heißdrahtmethode durchgeführt wurden.

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

10. Überprüfung der Meßapparatur

Zur Überprüfung der Meßgenauigkeit und der Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse der Wärmeleitfähigkeits-Schnellmeßmethode, sowie zum Test der computergesteuerten Meßwertfassung und -auswertung wurden Messungen an Proben mit bekannten Wärmeleitfähigkeitswerten durchgeführt. Die Vergleichswerte der Wärmeleitfähigkeit dieser Proben wurden vom Forschungsinstitut für Wärmeschutz (FIW), Gräfelfing, nach DIN 52612 mit dem Plattengerät gemessen und für die Überprüfung der Meßapparatur zur Verfügung gestellt.

Bild 6 zeigt eine Gegenüberstellung der gemessenen Wärmeleitfähigkeiten bei 10°C an trockenen Proben (Trocknung nach DIN 52612) mit dem Plattengerät und der neuentwickelten Heißdraht-Meßapparatur. Der Meßwert nach der Heißdrahtmethode wurde durch lineare Regression aus Messergebnissen bei unterschiedlichen Probentemperaturen bestimmt (s. auch Bild 7). Im Diagramm von Bild 6 wurden die Wärmeleitfähigkeitswerte nach der Wärmeleitfähigkeits-Schnellmeßmethode über den nach DIN 52612 gemessenen Wärmeleitfähigkeiten aufgetragen. Die eingetragene 45°-Gerade zeigt den Idealfall, wenn die Wärmeleitfähigkeiten nach beiden Meßmethoden übereinstimmen. Bild 7 zeigt einen Vergleich der gemessenen Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von Gasbeton, gemessen einerseits mit dem Plattengerät nach DIN 52612 (Messung durchgeführt von FIW) und andererseits mit der Heißdraht-Meßapparatur (Messung durchgeführt von FHT). Die Meßwerte der Heißdrahtmessungen sind nicht über die Sensorkalibrierfaktoren angepaßt; es wurden nur direkt gemessene Kalibrierfaktoren in die Bestimmungsgleichung (17) eingesetzt und die Faktoren k_1 und k_2 sind $k_1 = k_2 = 1$.

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

11. Testmessungen zur Bestimmung der Scherben-Wärmeleitfähigkeit von Lochsteinen und der Wärmeleitfähigkeits-Inhomogenitäten.

Um die Anwendbarkeit der Schnellmeßmethode für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des Scherbens von Lochsteinen zu prüfen, wurden Messungen nach der Heißdrahtmethode an einem Hochlochziegel nach DIN 105 (HLzW-0.8-12 DF, Steinrohichte im Mittel 715 kg/m^3 ; Abmessungen $240 \text{ mm} \times 365 \text{ mm} \times 238 \text{ mm}$; $\lambda_{\text{Lochstein}} = 0.309 \pm 0.005 \text{ W/mK}$ [6]) durchgeführt. Hierbei wurde der Halbraum-Auflagesensor an 16 verschiedenen Stellen auf jeweils einen Steg der Flanken des Lochsteines aufgelegt (siehe Bild 8b). Die Messungen wurden an der konstant temperierten Probe an jeder Meßstelle drei mal wiederholt. Als Ergebnis der Wärmeleitfähigkeit ergaben sich an den verschiedenen Meßstellen Werte zwischen $0.370 \pm 0.006 \text{ W/mK}$ und $0.540 \pm 0.003 \text{ W/mK}$, die einzelnen Meßergebnisse sind in Tabelle [2] aufgeführt. Ein Vergleichswert für die Wärmeleitfähigkeit des Scherbens konnte nicht herangezogen werden. Die Ursache für die Abweichungen beruht nicht auf dem Meßverfahren, sondern ist auf Inhomogenitäten des Probenmaterials zurückzuführen; bei den Wiederholungsmessungen an jeweils einer Meßstelle ergaben sich Abweichungen der Wärmeleitfähigkeit von weniger als 2%.

Zur Untersuchung des Einflusses der Oberflächenbeschaffenheit der Proben wurden an einem Teil der Meßstellen die Oberfläche abgeschliffen und die Messungen wiederholt. Die Abweichungen der Meßergebnisse bei abgeschliffener Oberfläche gegenüber den Werten bei unbehandelter Probenoberfläche lagen unter 3%. Tabelle [5] zeigt die Gegenüberstellung der Meßergebnisse. Der Einfluß der Oberflächenbeschaffenheit ist vernachlässigbar, solange die Ebenheit $\leq 0.5 \text{ mm}$

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

ist.

Aufgrund des erheblichen Größenunterschieds der Meßflächen bei der Schnellmeßmethode (Meßfläche 120 mm x 60 mm) und einer Messung mit dem Plattengerät nach DIN 52612 (Meßfläche 500 mm x 500 mm) sollte untersucht werden, welchen Einfluß die Wahl der Meßstelle durch materialbedingte Inhomogenitäten auf das Meßergebnis hat. Hierzu wurde die zu messende Probe gemäß Bild (8) in Felder unterteilt und für jedes Feld mit der Schnellmeßmethode die Wärmeleitfähigkeit durch Mittelung von drei Wiederholungsmessungen bestimmt. Die Untersuchungen wurden an einer Gasbetonprobe, einer Leichtmauermörtelprobe und einem Hochlochziegel durchgeführt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in den Tabellen [2]-[4] dargestellt.

Die Erfahrungen durch die Messungen an den verschiedenen Materialien zeigen, daß zwischen den Meßwerten von zufällig gewählten Meßstellen auf der Probenfläche materialabhängig zum Teil erhebliche Abweichungen auftreten. Es ist deshalb bei großflächigen Proben sinnvoll, an verschiedenen Stellen der Probe Messungen nach der Schnellmeßmethode durchzuführen und aus den Meßergebnissen bei vollkommen homogenen Materialien, wie z.B. Gasbeton, einen arithmetischen Mittelwert, bei Materialien mit Inhomogenitäten, wie z.B. porosierten Ziegeln und Leichtmauermörtel, über die Flächen einen Mittelwert zu bilden.

Um zu überprüfen, ob das Meßverfahren in Richtung niedriger Wärmeleitfähigkeiten uneingeschränkt angewendet werden kann, wurden im Verlauf der Untersuchungen Messungen an Materialien mit sehr niedrigen Wärmeleitfähigkeiten unter 0.04 W/mK durchgeführt. Als Probenmaterial dienten Proben aus expandiertem Polystyrol und Polyurethan-Hartschaum. Die Ergebnis-

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

se der Messungen nach der Schnellmeßmethode ergaben im Vergleich mit Meßergebnissen nach DIN 52612 systematisch um bis zu 20% niedrigere Werte.

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

12. Zusammenstellung der Testergebnisse

Die Überprüfung der Meßgenauigkeit und der Reproduzierbarkeit von Meßergebnissen mit der Wärmeleitfähigkeits-Schnellmeßmethode führte zu einem positiven Ergebnis. Im Vergleich mit dem Plattenverfahren nach DIN 52612 ergab sich an denselben Proben für die Schnellmeßmethode nach dem Heißdrahtverfahren eine systematische Abweichung $< 5\%$. Diese Abweichung läßt sich noch durch eine Anpassung der Sensorkalibrierfaktoren k_1 und k_2 kompensieren. Bisher wurde diese Korrektur aufgrund der geringen Abweichungen vernachlässigt und $k_1 = k_2 = 1$ gesetzt.

Im Verlauf der Untersuchungen der Anwendungsgrenzen der Schnellmeßmethode wurden Messungen an homogenen Baustoffen mit Wärmeleitfähigkeiten zwischen 0.034 W/mK und 1.06 W/mK durchgeführt. Es ergab sich bei allen Materialien, mit Ausnahme der Wärmedämmstoffe, mit Abweichungen $< 5\%$ für Baustoffe mit Wärmeleitfähigkeiten von $0.1 < \lambda < 1.06 \text{ W/mK}$ eine gute Übereinstimmung zu Vergleichswerten, die mit dem Plattenverfahren nach DIN 52612 gemessen wurden. Bei den Wärmedämmstoffen liegen die Meßwerte nach der Wärmeleitfähigkeits-Schnellmeßmethode bis zu 20% unter den Vergleichswerten nach dem Plattenverfahren.

Die Messungen der Wärmeleitfähigkeit an einem Hochlochziegel nach dem Heißdrahtverfahren zeigten, daß mit der entwickelten Meßapparatur die Messung der Wärmeleitfähigkeit des Scherbens gut durchführbar ist. Damit eröffnet diese Methode die Möglichkeit, an Lochsteinen und Stegmaterialien die Wärmeleitfähigkeit des Scherbens messen zu können.

Die für die Schnellmeßmethode erforderliche Mindestabmessung der Proben von $120 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ bringt den Vorteil, daß im Vergleich zum Verfahren mit dem Plattengerät nach DIN 52612, bei den Proben mit den Abmessungen $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ benötigt

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

werden, auch an kleinformatischen Proben die Messung der Wärmeleitfähigkeit durchgeführt werden kann.

Der Meßablauf wurde optimiert, so daß die Gesamtdauer einer Messung mit der Schnellmeßmethode etwa 6 - 7 Minuten in Anspruch nimmt. Durch den handlichen Auflagesensor ist ein rascher Probenwechsel gewährleistet. Zwischen einzelnen Messungen ist eine Wartezeit von mindestens 3 Minuten notwendig, damit der Heißdraht bis zu seiner Ausgangstemperatur abkühlt. Der gesamte Ablauf der Messung mit Auswertung läuft computergesteuert ab, es sind nur wenige Eingaben durch den Benutzer erforderlich. Die gesamte Meßapparatur erfordert keine speziellen Kenntnisse in Bezug auf die Meßgeräte, da alle Geräte vom Personalcomputer aus über die Software gesteuert und eingestellt werden.

Die Testerfahrungen zeigen, daß die entwickelte Wärmeleitfähigkeits-Schnellmeßmethode für homogene, ebene Baustoffe mit Wärmeleitfähigkeiten zwischen 0.1 und 1.0 W/mK gut geeignet ist. Bezüglich der Messung von Wärmedämmstoffen muß noch überprüft werden, ob durch eine spezielle Anpassung der Sensorkalibrierfaktoren eine Korrektur der Meßergebnisse möglich ist.

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

13. Weiterführende Arbeiten

Der Aufbau der Meßapparatur wurde in Bezug auf seine Funktionsfähigkeit abgeschlossen. Zu Gunsten einer größeren Kompaktheit, einer höheren Verarbeitungsgeschwindigkeit der Meßwerte durch den Personalcomputer und zum Schutz gegen elektromagnetische Störfelder muß der Meßaufbau noch optimiert werden. Zu untersuchen ist die Eignung von extrudiertem Polystyrol als Dämmmaterial für den Halbraum-Auflagesensor, das bezüglich Bearbeitbarkeit und Formstabilität vergleichbare Eigenschaften wie Polyurethan aufweist, jedoch keine alterungsabhängige Wärmeleitfähigkeit hat. Als weiteres soll die Anpreßlast in den Auflagesensor integriert werden und eine alternative Lösung zur Messung der Proben-temperatur zu Beginn der Messung gefunden werden (z.B. Verzicht auf Thermolemente und Temperaturmessung durch Absolutmessung des Heißdrahtwiderstandes).

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

14. Zusammenfassung

In diesem Forschungsprojekt wurde eine computergesteuerte Meßapparatur entwickelt, mit der nach dem Prinzip des Heißdrahtverfahrens die Wärmeleitfähigkeit einer ebenen, kleinformatigen, nichtmetallischen Baustoffprobe in Minuten-schnelle meßbar ist. Entsprechend der Theorie dieses instationären Wärmeeindringverfahrens wird durch Regression aus dem zeitlichen Temperaturverlauf eines sehr dünnen, durch einen Konstantstrom beheizten Platin-Heißdrahtes zwischen den Probenhälften die Wärmeleitfähigkeit der Probe bestimmt. Die Messung und Auswertung wird am Computer menügeführt gestartet, sie läuft computergesteuert ab, das Meßergebnis und die Analyse der Meßgenauigkeit werden am Bildschirm und über einen Drucker ausgegeben. Ist die Probe im thermischen Gleichgewicht, dann dauert bei der entwickelten Heißdraht-Meßapparatur die Messung der Wärmeleitfähigkeit eines Baustoffs etwa sechs Minuten.

Der Heißdraht-Vollraumsensor wurde zu einem mechanisch stabilen, leicht handbaren Halbraum-Auflagesensor weiterentwickelt, bei dem der 0.05 mm dicke Platin-Heißdraht auf einem ebenen Polyurethan-Hartschaumblock befestigt ist. Der PU-Auflagesensor hat eine Auflagefläche von 120 mm x 60 mm und wird mit einer definierten Auflast auf die Probe aufgelegt. Die Ebenheit der Probenoberfläche sollte im Meßbereich < 0.5 mm sein.

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

Theorie der Heißdraht-Meßmethode

Bei der Heißdraht-Meßanordnung handelt es sich idealisiert um eine linienförmige, in einem unendlich ausgedehnten Medium liegende konstante Wärmequelle mit instationärem Wärmefluß in radialer Richtung.

Unter den Randbedingungen,

- daß die Beheizung des Heißdrahtes zum Zeitpunkt $t=0$ sprunghaft einsetzt,
- daß die längenbezogene Heizleistung q_l des Heißdrahts konstant ist,
- daß für den Meßzeitbereich t , den Heißdrahtradius r und die Temperaturleitfähigkeit a des umgebenden Mediums die Beziehung $r^2/(4at) \ll 1$ gilt und
- daß die Temperaturerhöhung $\Delta\vartheta(t)$ der Heißdrahtoberfläche über die Änderung des thermischen Widerstands des Platin-Heißdrahts gemessen wird,

ergeben sich die folgenden Auswertgleichungen für den Vollraumsensor und den Halbraum-Auflagesensor:

Vollraumsensor

$$\lambda_{\text{Probe}}(\vartheta_A) = k_1 \frac{I^3 R_w(\vartheta_A) (1 + \alpha_{wk} \Delta\vartheta) R_w(0^\circ\text{C}) \alpha_T}{4\pi l \frac{d(\Delta U_H(t_i))}{d(\ln t_i)}}$$

Halbraum-Auflagesensor:

$$\lambda_{\text{Probe}}(\vartheta_A) = k_1 \frac{I^3 R_w(\vartheta_A) (1 + \alpha_{wk} \Delta\vartheta) R_w(0^\circ\text{C}) \alpha_T}{2\pi l \frac{d(\Delta U_H(t_i))}{d(\ln t_i)}} - k_2 \lambda_{\text{Sensor}}(\vartheta_A)$$

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

Dabei ist $\alpha_T = \alpha + 2\beta\vartheta_A$ und $\alpha_{wk} = \frac{\alpha_T}{1 + \alpha\vartheta_A + \beta\vartheta_A^2}$.

Parameter, die durch Kalibrierung der Apparatur zu bestimmen sind:

- l: Länge des Heißdrahtes
- α, β : Temperaturkoeffizienten des Platindraht-Widerstands
- $R_w(0^\circ\text{C})$: Widerstand des Platindrahts bei 0°C
- $\lambda_{\text{Sensor}}(\vartheta_A)$: Wärmeleitfähigkeit des Sensormaterials bei ϑ_A (Polyurethan-Hartschaum)
- k_1, k_2 : Sensorkalibrierfaktoren; i.a. $k_1 = k_2 = 1$.
Für $\lambda_{\text{Medium}} < 0.1 \text{ W/(mK)}$ sensorspezifisch zu kalibrieren.

Parameter, die bei der Messung ermittelt werden:

- ϑ_A : Anfangstemperatur des Heißdrahtes beim Einschalten des Heizstromes
- I: Heizstrom
- $U_H(t_i)$: Spannungsabfall am Heißdraht zu den Zeitpunkten t_i während des Aufheizvorgangs
- $\frac{d(\Delta U_H(t_i))}{d(\ln t_i)}$: Steigung des Spannungsabfalls am Heizdraht bei logarithmischer Zeitabhängigkeit

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

Heißdraht-Meßapparatur

Für die Messung des Temperaturanstiegs am elektrisch beheizten 0.05 mm dicken Platinheißdraht wurde eine computergesteuerte Heißdrahtmeßapparatur entwickelt. Dieser Meßaufbau besteht aus einer Widerstands-Brückenschaltung, mit der der Heißdraht-Kaltwiderstand kompensiert und die thermische Widerstandsänderung des Heißdrahts über eine Verstärkerschaltung zur Messung mit einem System-Multimeter aufbereitet wird. Die Steuerung, Datenverarbeitung und Auswertung der Heißdrahtmessung erfolgt durch einen Personalcomputer, der über eine IEC-Busleitung mit dem Relaisscanner, System-Digitalmultimeter, der Konstantstromquelle und der Printer-Ausgabe verbunden ist.

Der eigentliche Meßsensor, der Halbraum-Auflagesensor, wurde so konzipiert, daß er für eine Wärmeleitfähigkeitsmessung auf eine ebene Probe aufgelegt wird. Der 0.05 mm dünne Platin-Heißdraht, der sich auf der Unterseite des Sensors befindet, liegt dann zwischen dem Probenmaterial und dem Sensormaterial geschützt durch dünne Kunststoffolien. Die Meßlänge des Pt-Drahts beträgt 100 mm. Die Auflagefläche ist 120 mm x 60 mm. Die Auflagekraft des Sensors hat einen Anpreßdruck von 6 MN/m^2 . Die Ebenheit der Probenoberfläche im Meßbereich sollte $< 0.5 \text{ mm}$ betragen. Die Wärmeleitfähigkeitsmessung mit Auswertung und Ausgabe des Meßergebnisses auf einem Drucker läuft in ca. 6 Minuten programmgesteuert ab, wenn die Probe zuvor in thermischem Temperaturgleichgewicht ist.

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

Erprobung des Meßverfahrens

Zur Erprobung der Wärmeleitfähigkeits-Schnellmeßmethode wurden homogene Stoffe gewählt, die sich in ihren Rohdichten und Wärmeleitfähigkeiten deutlich unterscheiden. Die Wärmeleitfähigkeiten der untersuchten Baustoffe lagen zwischen 0.03 und 1.0 W/mK.

Zur Überprüfung der Meßgenauigkeit der Wärmeleitfähigkeits-Schnellmeßmethode wurden Messungen an Proben mit bekannten Wärmeleitfähigkeitswerten durchgeführt. Die Vergleichswerte der Wärmeleitfähigkeit dieser Proben wurden vom Forschungsinstitut für Wärmeschutz (FIW), Gräfelfing, nach DIN 52612 mit dem Plattengerät gemessen und für die Überprüfung der Meßapparatur zur Verfügung gestellt.

Im Vergleich mit dem Plattenverfahren nach DIN 52612 ergab sich an denselben Proben für die Schnellmeßmethode nach dem Heißdrahtverfahren eine Abweichung < 5%. Diese gute Übereinstimmung zu Vergleichswerten, die mit dem Plattenverfahren nach DIN 52612 gemessen wurden, ergab sich für die Baustoffe Gasbeton, Leichtmauermörtel, Ziegel und Glas, mit Wärmeleitfähigkeiten von $0.1 < \lambda < 1.0$ W/mK.

Bei den Wärmedämmstoffen liegen die Meßwerte nach der Wärmeleitfähigkeits-Schnellmeßmethode systematisch bis zu 20% unter den Vergleichswerten nach dem Plattenverfahren. Die Abweichungen scheinen sich durch eine entsprechende Anpassung der Kalibrierfaktoren k_1 und k_2 des Halbraum-Auflage-sensors kompensieren zu lassen. Weitere Untersuchungen müssen dies klären.

Zur Untersuchung des Einflusses der Oberflächenbeschaffenheit der Proben wurden Messungen bei abgeschliffener Oberfläche durchgeführt und mit Messungen an derselben Meßstelle bei nicht abgeschliffener Oberfläche verglichen.

Der Einfluß der Oberflächenbeschaffenheit der Proben ist

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

vernachlässigbar, solange die Ebenheit ≤ 0.5 mm und die Auflagekraft des Halbraum-Auflagesensors 6 MN/m^2 ist.

Die Wärmeleitfähigkeits-Schnellmeßmethode kann durch ihren computergesteuerten Meßablauf und die in das Meßprogramm integrierte Meßauswertung auch von Nichtspezialisten angewandt werden. An Proben aus der Produktion, die entweder produktionsbedingt im thermischen Gleichgewicht sind oder bis zur Temperaturkonstanz gelagert werden, kann mit der entwickelten Heißdraht-Apparatur mit Halbraum-Auflagesensor in Minutenschnelle die Wärmeleitfähigkeit ermittelt und zur Produktionskontrolle herangezogen werden.

Untersuchungen von Lochsteinen

Erste Untersuchungen ergaben, daß die Heißdraht-Wärmeleitfähigkeits-Schnellmeßmethode geeignet ist, an kleinformati- gen Proben mit einer Mindestabmessung von $120 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ die Wärmeleitfähigkeit zu bestimmen. Damit eignet sich dieses Meßverfahren besonders für die räumliche Analyse der Wärmeleitfähigkeit des Scherbens und der Stegmaterialien von Lochsteinen.

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

Literaturzusammenstellung:

- [1] Blackwell, J.H.: A transient flow method for determination of thermal constants of insulating materials in bulk. J. Appl.Phys. 25 (1954), S.137.
- [2] Carslaw, H.S. und Jaeger J.C.: Conduction of Heat in Solids, Second edition, Oxford, Clarendon Press (1959), S.261f, S.344f.
- [3] Daris, P.S. et al.: Non-steady-state hot wire thermal conductivity apparatus. J.Chem. Phys. E 9 (1976), S.1037.
- [4] DIN 51046: Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit bei Temperaturen bis 1600°C nach dem Heißdrahtverfahren (1976).
- [5] Dohm, K.D., Schwiete, H.E.: Wärmeleitfähigkeitsmessung mit dem Heißdrahtverfahren an feuerfesten Baustoffen unter Berücksichtigung des Einflusses von Gasatmosphäre und Unterdruck auf die Wärmeleitfähigkeit. Dissertation TH Aachen (1969).
- [6] FEB-Projekt Wärmeenergietransport durch Außenwände unter natürlichen Klimabedingungen; Abschlußbericht vom 16.03.1987.
- [7] Haarman, J.W.: A contribution to the theory of the transient hot-wire method. Physica 51 - 52 (1971), S. 605.
- [8] Healy, J.J., De Groot, J.J. and Kestin, J.: The theory of the transient hot-wire method for measuring thermal conductivity. Physica, Vol. 82 C (1976), S.392 - 408.
- [9] Hilbig, G., Bennert, W. und Heuchel, B.: Ermittlung von Wärme- und Temperaturleitfähigkeit aus Meßergebnissen der Heizdrahtmethode. Wärme- und Stoffübertragung 14 (1980), S.225 - 230.
- [10] Kestin, J., Wakeham, W.A.: A contribution to the theory

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

- of transient hot-wire technique for the thermal conductivity measurements. Physica 92 A (1978) S. 120.
- [11] Krischer, O. und Esdorn, H.: Einfaches Kurzzeitverfahren zur gleichzeitigen Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit, der Wärmekapazität und der Wärmeeindringzahl fester Stoffe. VDI Forschungsheft 450 (1954), S.28 - 39.
- [12] Mittenbühler, A.: Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von feuerfesten Stoffen nach der Heißdrahtmethode. Ber. Dtsch. Keram. Ges. 39 (1962), S.387.
- [13] Song, Y.W.: Measurement of the effective thermal conductivity of dispersed materials. High-temperatures, High-pressures Vol.19 (1987), S.57 - 64.
- [14] Takegoshi, E., Imura, S., Hirasawa, Y., Takenaka, T.: Trans. Japan. Soc. Mechanical Engineering, Vol. 47 (1981), S. 1307 - 1316.
- [15] Touloukian, Y.S., Liley, P.E., Saxena, S.C.: Thermal Conductivity / Nonmetallic Liquids and Gases. Thermophysical properties of material. The TPRC Data Series Vol. 3 (1979), S.209.
- [16] Wagner, A.: Nichtstationäre Methode zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit, Temperaturleitfähigkeit und der spezifischen Wärmekapazität nichtmetallischer Baustoffe. Dissertation TU Berlin (1977).
- [17] Wagner, A.: Der Einfluß des Feuchtigkeitsgehaltes auf die Wärmeleitfähigkeit von Gasbeton. Materialprüfung 13 (1971) S. 14 - 16.

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

In dem Meßaufbau der Wärmeleitfähigkeits-Schnellmeßmethode
verwendete Geräte:

Personalcomputer : Commodore PC 10 - II Model 9100 -00
Erweiterungen:
IEEE-488-Schnittstelle PC<>488 von
Keithley
Hercules Graphikkarte
Digitalmultimeter : Keithley 193 A System DMM
Konstant-Stromquelle : Knick DC-Calibrator J 152
Relais-Scanner : P-S-Q 5000 Mack Elektronik
Heißdrahtmeßbrücke : Spezialanfertigung
Halbraum-Auflagesensor: Spezialanfertigung
Drucker : NEC Pinwriter P6

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

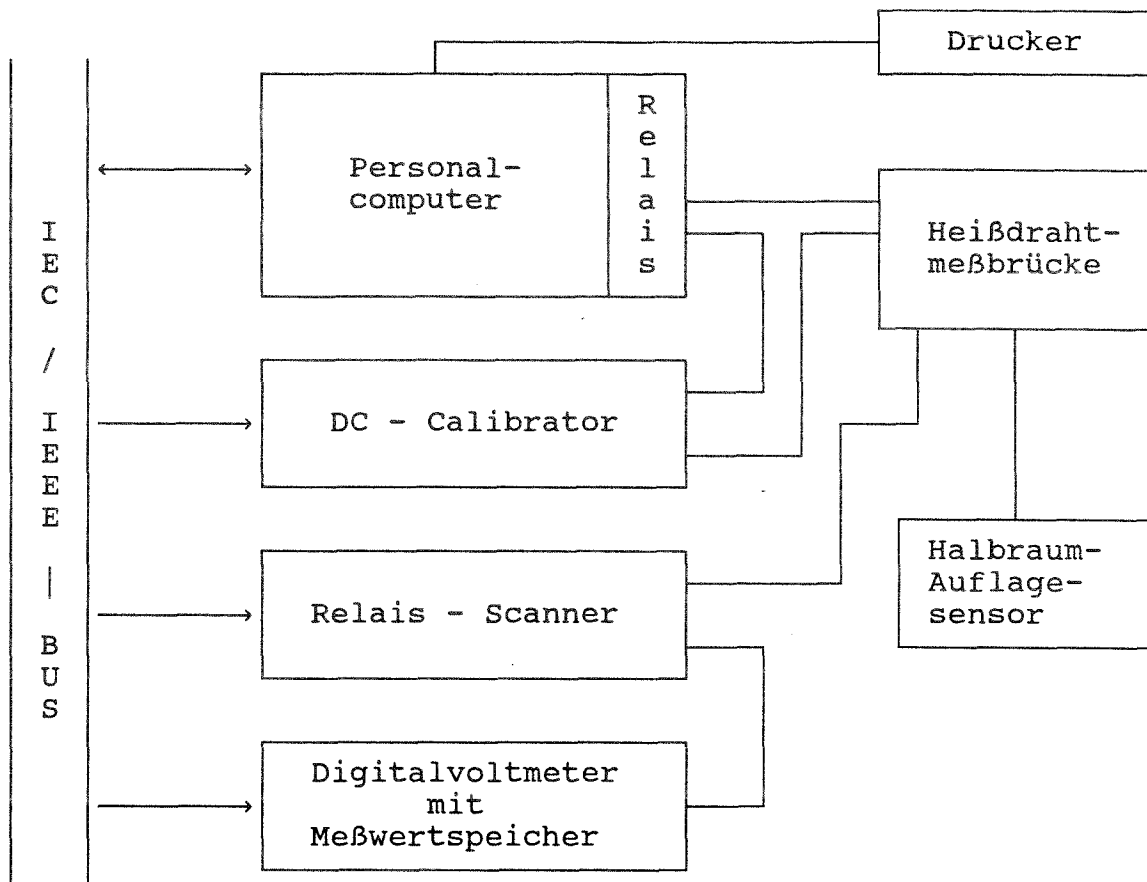


Bild 1: Blockschaltbild der Heißdraht-Meßapparatur

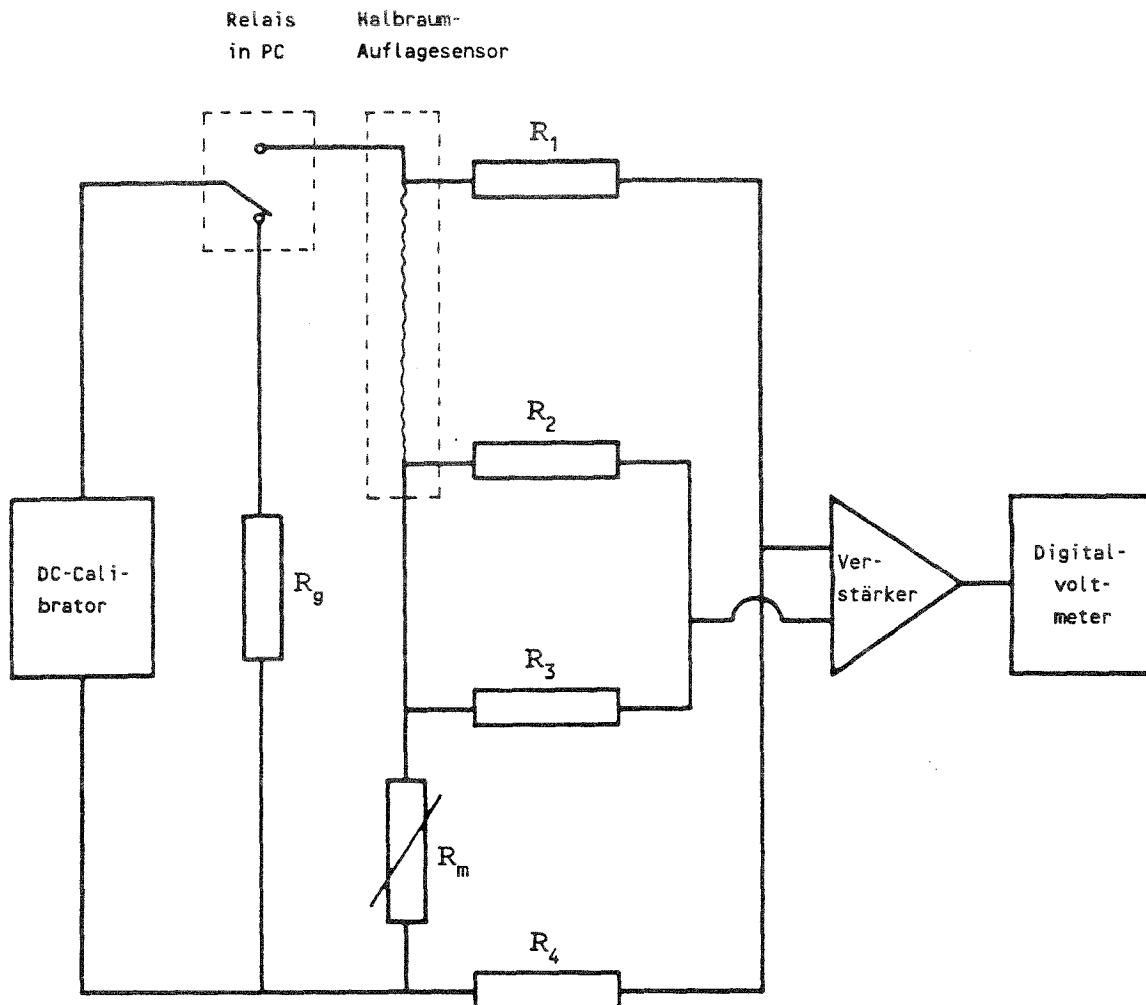


Bild 2: Konstruktion der Meßbrücke zur Messung des Heißdrahttemperaturverlaufs über die Platindraht-Widerstandsthermometrie.

$R_1 - R_4$: feste Brückenwiderstände

R_m : Brückenabgleich

R_g : ohmsche Vorlast des DC-Calibrators

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

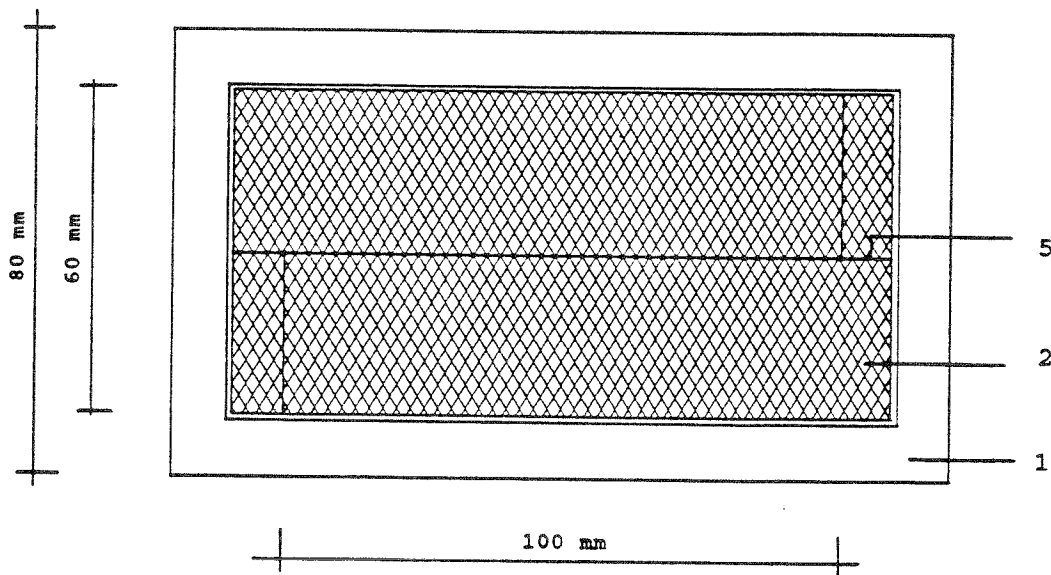
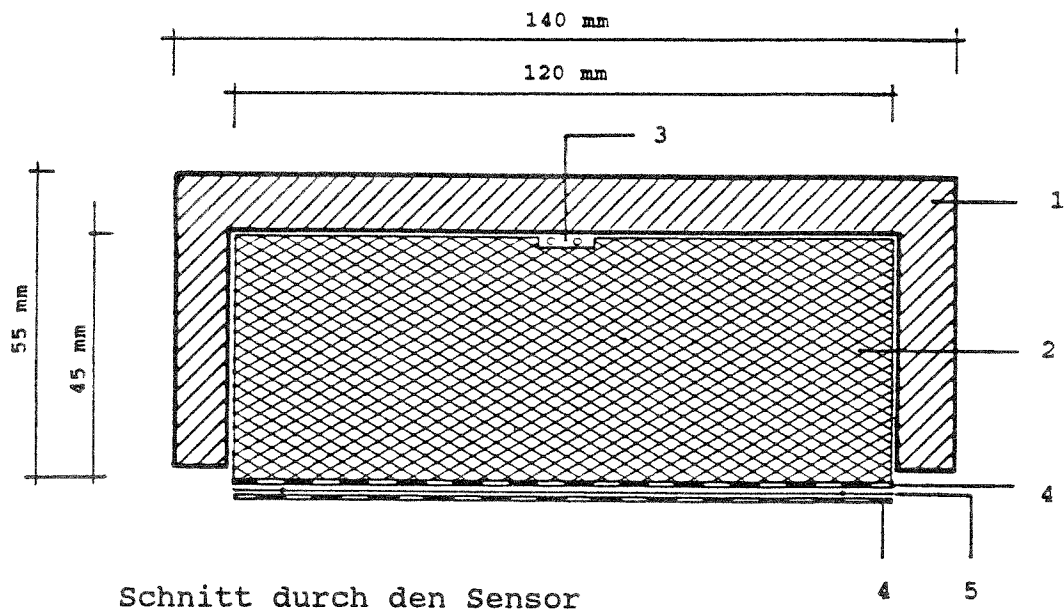


Bild 3: Konstruktionsskizze des Halbraum-Auflagesensors

- 1 - Kunststoffgehäuse
- 2 - Polyurethan-Hartschaum als Sensormaterial
- 3 - Kupfermeßleitung
- 4 - Trägerfolie, $d = 0.06 \text{ mm}$
- 5 - Platin-Heißdraht, $d = 0.05 \text{ mm}$

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

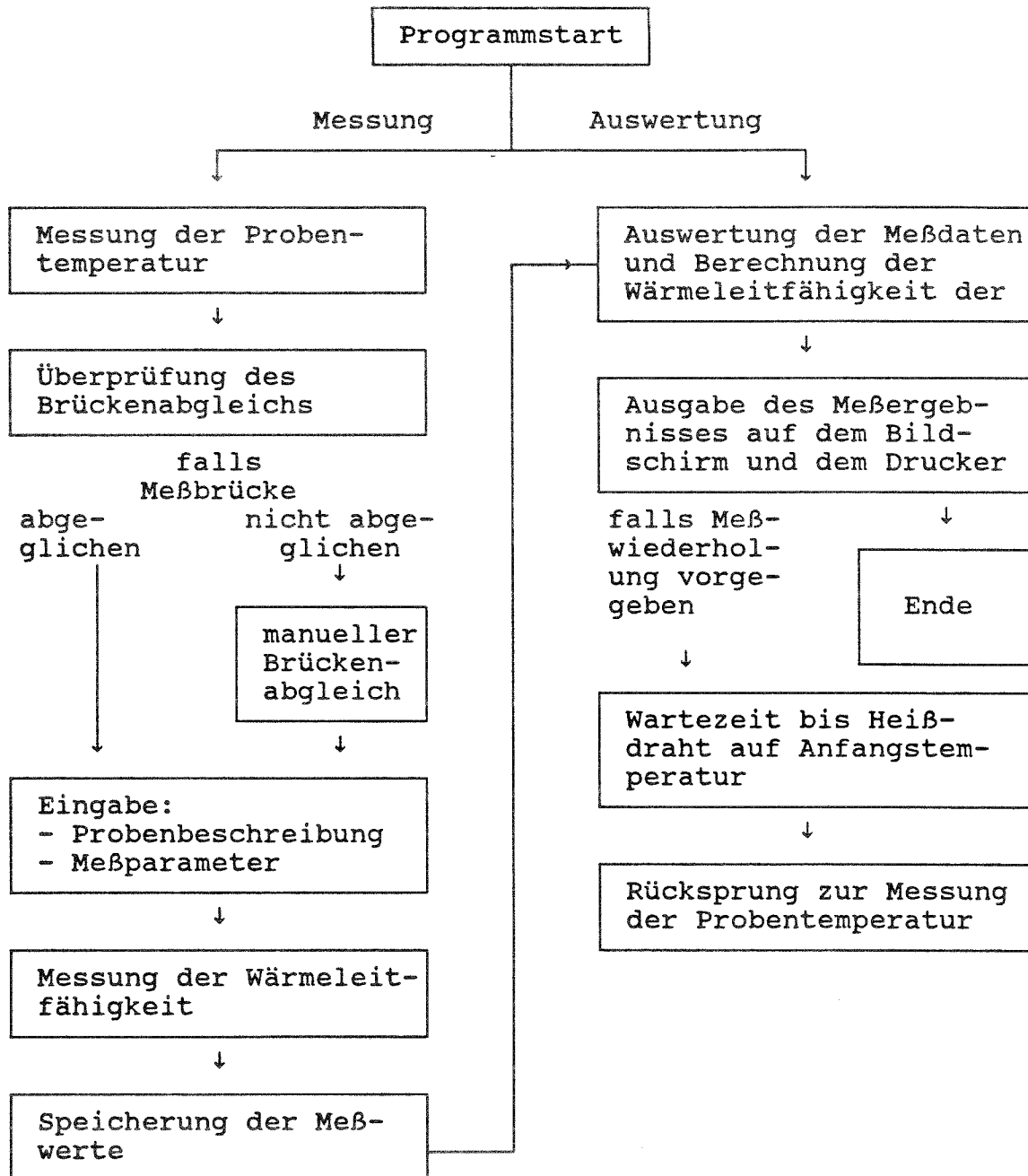


Bild 4: Struktogramm des programmgesteuerten Ablaufs einer Messung mit dem Wärmeleitfähigkeits-Schnellmeßverfahren nach der Heißdrahtmethode.

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

Auftrags-Nr.:demol

Bearbeiter:pm

Datum: 6. April 1990

Messung der Wärmeleitfähigkeit nach der Heißdrahtmethode

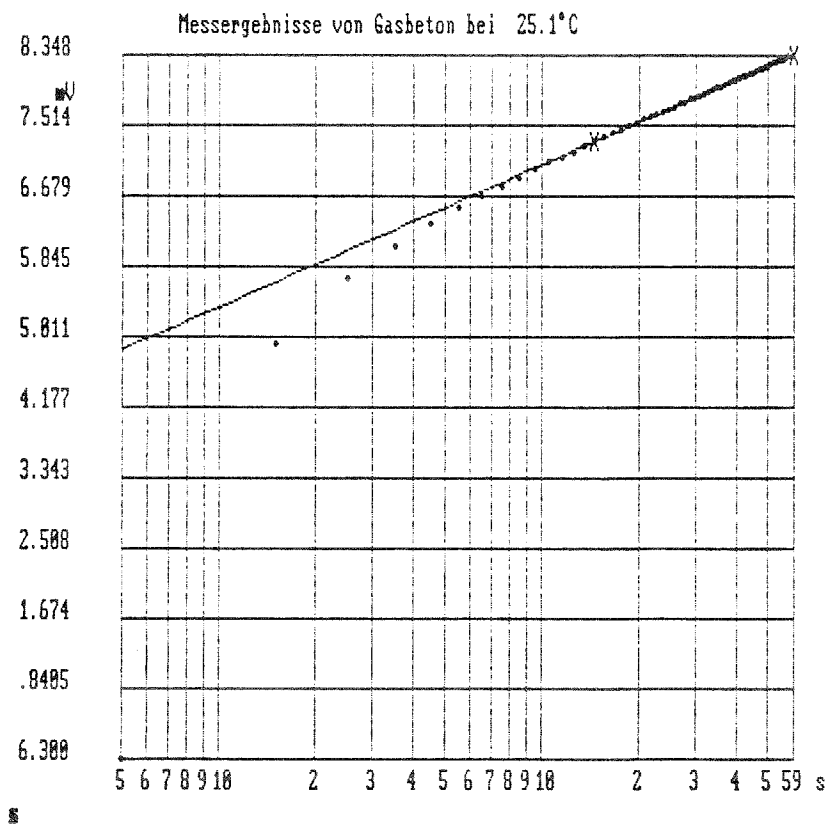
Antragsteller : FHT
 Probenentnahme : FIW
 Geprüfter Stoff : Gasbeton

Probenparameter :

Länge/Durchmesser : 20.0 cm
 Breite : 20.0 cm
 Dicke : 4.0 cm
 Rohdichte trocken : 573.0 kg/m³
 m. Feuchtegehalt : %
 Trocknungstemp. : °C
 Trocknungsart :

Meßparameter:

Sensor : Auflagesensor 2
 Strom : 90.0 mA
 Messzyklus-Dauer : 1000.0 ms
 Messzyklus-Anzahl : 60.0
 Temperatur : 25.1 °C
 Messdateiname : demogb



| Auswertebereich | Wärmeleitfähigkeit : W/(mK) | rel. Standardabweichung in % | mittlerer Fehler der Anpassung | Korrelationskoeffizient |
|-----------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------------|
| 15 - 60 | 0.148 | 0.1186 | 0.000128 | 0.99997 |

Bild 5: Ausgabe des Ergebnisses einer Messung mit der Wärmeleitfähigkeits-Schnellmeßmethode an einer Gasbetonprobe.

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

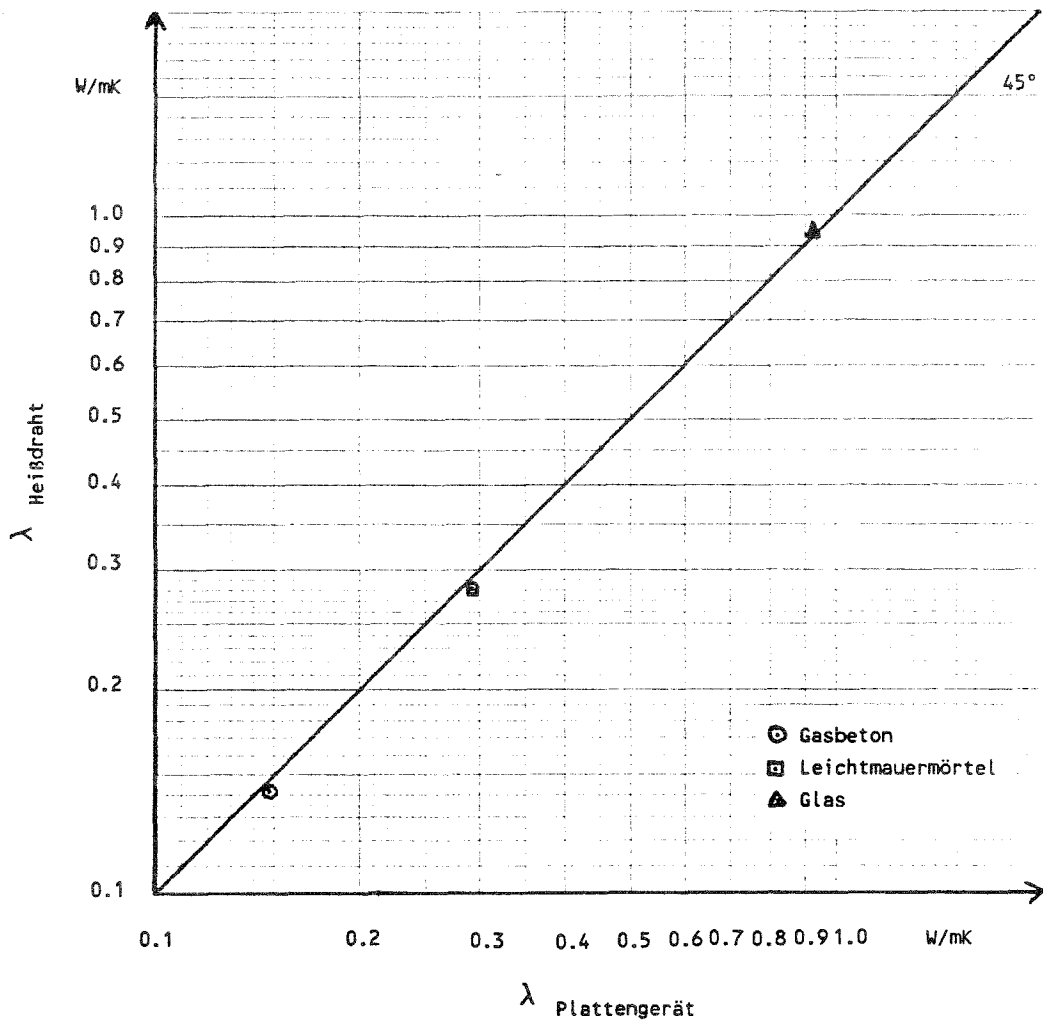


Bild 6: Gegenüberstellung der λ -Meßergebnisse mit dem Plattengerät und der neuentwickelten Heißdrahtmeßapparatur. Die 45°-Gerade zeigt zur Orientierung den Idealfall.

| Material | Meßwerte der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, tr}$ in W/mK | |
|-------------------|--|------------------------------------|
| | gemessen mit dem Plattengerät nach DIN 52612 | gemessen mit der Schnellmeßmethode |
| Gasbeton | 0.148 | 0.143 |
| Leichtmauermörtel | 0.291 | 0.284 |
| Glas | 0.930 | 0.939 |

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

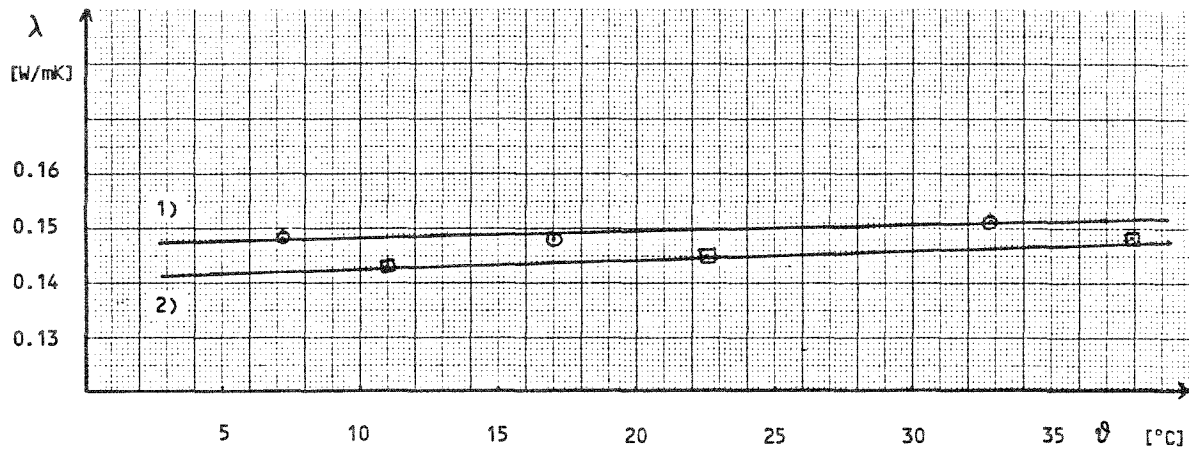


Bild 7: Vergleich der gemessenen Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von Gasbeton

- 1) Messungen der Wärmeleitfähigkeit mit dem Platten-
gerät nach DIN 52612 (FIW)
- 2) Messungen der Wärmeleitfähigkeit mit der Heiß-
draht-Meßapparatur der Wärmeleitfähigkeits-
Schnellmeßmethode (FHT)
(Sensorkalibrierfaktoren $k_1 = k_2 = 1$)

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

Tabelle 1: Materialien, an denen Messungen mit der Wärmeleitfähigkeits-Schnellmeßmethode durchgeführt wurden.

| Material | gemessene Rohdichte *) Steinrohddichte | gemessene Wärmeleitfähigkeit nach DIN 52612 | gemessene Wärmeleitfähigkeit nach dem Heißdrahtverfahren |
|---|---|---|--|
| | kg/m ³ | W/mK | W/mK |
| Gasbeton | 559 | 0.148 1) | 0.143 |
| Leichtmauermörtel | 1129 | 0.291 1) | 0.284 |
| poros. Ziegelplatten | 1600 | - 1) | 0.37 |
| Hochlochziegel n.DIN 105, HLzW-0.8-12DF | 715 *) | - 2) | 0.468 |
| Beton | 2080 | 1.063 3) | 1.073 |
| Glas | 2200 | 0.93 | 0.939 |
| expan. Polystyrol PS 15 | 22 | 0.0359 1) | 0.0244 |
| Polyurethan-Hartschaum | 28 | - 4) | 0.0191 |
| | 46 | 0.0304 5) | 0.0267 |

1) Diese Proben wurden vom Forschungsinstitut für Wärmeschutz (FIW), München-Gräfelfing, nach DIN 52612 mit dem Plattengerät gemessen und der FHT Stuttgart zur Überprüfung der Schnellmeßmethode zur Verfügung gestellt. Bei dem porierten Ziegelmaterial (plattenförmig) war kein Vergleichswert nach DIN 52612 vorhanden. Die Meßwerte von Polystyrol beziehen sich auf eine Temperatur von 21°C.

2) Angaben über die Wärmeleitfähigkeit des Scherbens fehlen;

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

die Wärmeleitfähigkeit des Lochsteins beträgt nach [6]
0.309 W/mK.

3) Die Wärmeleitfähigkeitswerte nach beiden Meßmethoden wurden bei einer Temperatur von 28°C gemessen; die Messung nach DIN 52612 wurde an der FHT durchgeführt.

4) Kein Vergleichswert nach DIN 52612 vorhanden.

5) Meßwert nach dem Meßplattenverfahren nach DIN 52616 bei einer Mitteltemperatur von 10°C, durchgeführt von der Firma Bauder. Der Meßwert nach der Schnellmeßmethode nach dem Heißdrahtverfahren wurde bei einer Probertemperatur von 21°C bestimmt.

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

Tabelle 2: Meßergebnisse der Wärmeleitfähigkeit einschließlich Standardabweichung eines Hochlochziegels, gemessen an 16 verschiedenen Stellen mit der Wärmeleitfähigkeits-Schnellmeßmethode.

| Meßstelle Nr. | gemessene Wärme- leitfähigkeit in W/mK |
|------------------|--|
| 1 | 0.4208 ± 0.0017 |
| 2 | 0.3933 ± 0.0075 |
| 3 | 0.3701 ± 0.0062 |
| 4 | 0.4635 ± 0.0029 |
| 5 | 0.4590 ± 0.0060 |
| 6 | 0.5324 ± 0.0014 |
| 7 | 0.4962 ± 0.0033 |
| 8 | 0.5391 ± 0.0051 |
| 9 | 0.5401 ± 0.0029 |
| 10 | 0.5363 ± 0.0018 |
| 11 | 0.4914 ± 0.0008 |
| 12 | 0.4654 ± 0.0022 |
| 13 | 0.4467 ± 0.0048 |
| 14 | 0.4403 ± 0.0029 |
| 15 | 0.4511 ± 0.0016 |
| 16 | 0.4491 ± 0.0059 |
| Mittelwert | 0.4684 ± 0.0515 |

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

Tabelle 3: Meßergebnisse der Wärmeleitfähigkeit einschließlich Standardabweichung einer Probe aus Leichtmauermörtel, gemessen an 12 verschiedenen Stellen mit der Wärmeleitfähigkeits-Schnellmeßmethode.

| Meßstelle Nr. | gemessene Wärmeleitfähigkeit in W/mK |
|---------------|--------------------------------------|
| 1 | 0.288 ± 0.001 |
| 2 | 0.281 ± 0.003 |
| 3 | 0.284 ± 0.004 |
| 4 | 0.281 ± 0.003 |
| 5 | 0.282 ± 0.003 |
| 6 | 0.289 ± 0.005 |
| 7 | 0.280 ± 0.003 |
| 8 | 0.296 ± 0.002 |
| 9 | 0.302 ± 0.001 |
| 10 | 0.289 ± 0.002 |
| 11 | 0.287 ± 0.003 |
| 12 | 0.293 ± 0.002 |
| Mittelwert | 0.288 ± 0.007 |

Tabelle 4: Meßergebnisse der Wärmeleitfähigkeit einschließlich Standardabweichung einer Probe aus Gasbeton, gemessen an 5 verschiedenen Stellen mit der Wärmeleitfähigkeits-Schnellmeßmethode.

| Meßstelle Nr. | gemessene Wärmeleitfähigkeit in W/mK |
|---------------|--------------------------------------|
| 1 | 0.1419 ± 0.0008 |
| 2 | 0.1423 ± 0.0018 |
| 3 | 0.1430 ± 0.0008 |
| 4 | 0.1407 ± 0.0004 |
| 5 | 0.1436 ± 0.0009 |
| Mittelwert | 0.1423 ± 0.0012 |

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

Tabelle 5: Gegenüberstellung der Meßergebnisse der Wärmeleitfähigkeit des Scherbens eines Hochlochziegels, gemessen mit der Wärmeleitfähigkeits-Schnellmeßmethode an fünf verschiedenen Meßstellen, bei unbehandelter und bei abgeschliffener Probenoberfläche.

| Meßstelle Nr. | gemessene Wärmeleitfähigkeit in W/mK bei unbehandelter Oberfläche | gemessene Wärmeleitfähigkeit in W/mK bei abgeschliffener Oberfläche |
|------------------|---|---|
| 1 | 0.4208 | 0.4081 |
| 2 | 0.3933 | 0.3895 |
| 8 | 0.5391 | 0.5428 |
| 9 | 0.5401 | 0.5373 |
| 10 | 0.5363 | 0.5252 |

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

| | | |
|----|----|----|
| 1 | 2 | 3 |
| 4 | 5 | 6 |
| 7 | 8 | 9 |
| 10 | 11 | 12 |

Bild 8a: Feldeinteilung für 12 verschiedene Meßstellen an einer Probe aus Leichtmauermörtel.

Maße der Gesamtfläche: 500 mm x 500 mm

Bericht BPL 130/90 vom 15.10.1990

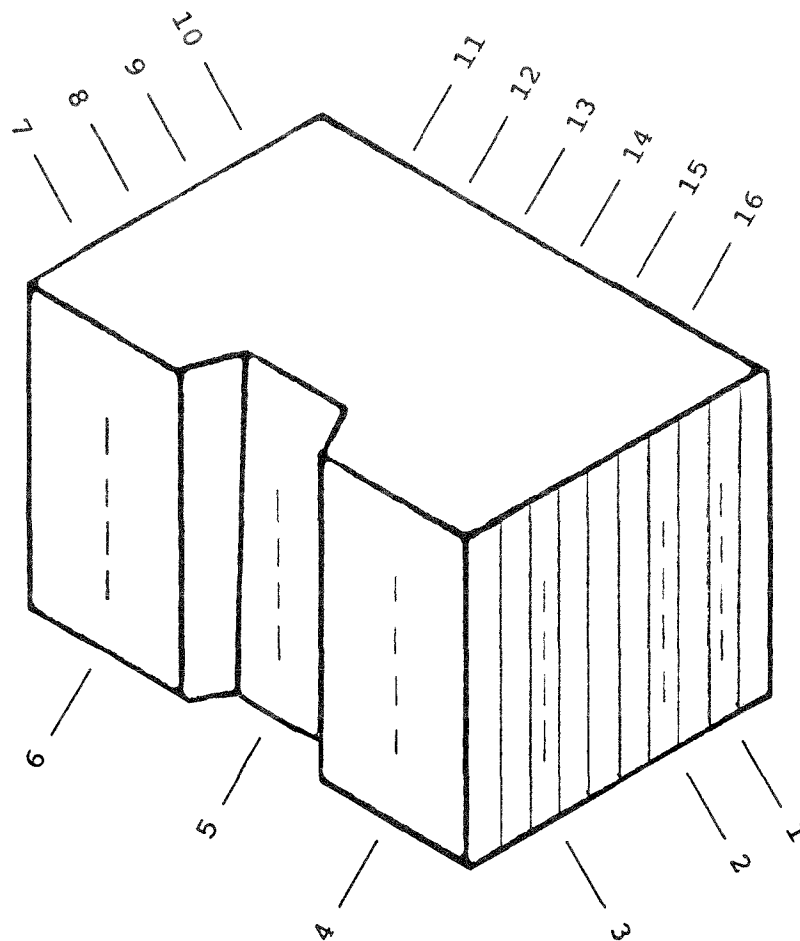


Bild 8b: Einteilung von 16 Meßstellen an einem Hochlochziegel.

---- Schematische Markierung des Heißdrahtverlaufs
des Auflagesensors während der Messung

Development of a short time measuring method for determining the thermal conductivity of building materials for production control

This research project was aimed to develop a computer controlled apparatus for measuring the thermal conductivity of a flat, small sized, non-metallic specimen of solid building material within few minutes by a transient hot-wire method. Corresponding to the theory of nonsteady-state heat transfer the thermal conductivity of a specimen is determined by regression analysis of the time dependence of temperature of a very thin platinum hot-wire heated by constant electric current between two sheets of material. Measurement and evaluation are started and controlled by computer, results and accuracy analysis are issued on the screen as well as on the printer. In equilibrium conditions of temperature the measurement of heat conductivity of a specimen takes about six minutes by use of the new developed apparatus.

The hot-wire sensor was modified to a mechanical sturdy, easy to handle half-sphere layer sensor consisting of a plain polyurethane rigid foam-block on which a platinum hot-wire of 0.05 mm diameter is fixed. The layer plane of the polyurethane-sensor has a size of 120 mm x 60 mm. The sensor is pressed on the specimen by a defined weight. The flatness of specimen should be less than 0.5 mm in the area of measuring.

The accuracy of the developed apparatus and the reproducibility of the results by the transient hot-wire method have been tested in the range from 0.03 to 1.0 W/(mK) of thermal conductivity by comparing the results of identical control specimens measured by the transient hot-wire apparatus as well as by the standard hotplate method of DIN 52612/ISO 8302. For building materials with thermal conductivities between 0.1 and 1.0 W/(mK) the comparative results agree very well, the deviation of the measurement results are less than 5%. In case of heat insulation materials the results of the transient hot-wire apparatus are up to 20% lower than the comparative values of the guarded hot-plate method; adapted sensor factors could compensate the systematic deviations.

First measurements of cored blocks with the half-sphere layer sensor yield the suitability of the developed transient hot-wire apparatus for investigations of local differences in thermal conductivity of the body material.