

Entwicklung einer Prüfapparatur zur
Bestimmung des
Wärmedurchlasswiderstandes von
Bauteilen nach der Heizkastenmethode
im Laboratorium

T 1205

T 1205

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

T 1205: Entwicklung einer Prüfapparatur zur Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes von Bauteilen nach der Heizkastenmethode im Laboratorium

5/3



BERICHT AUS DEM

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR BAUPHYSIK

**ENTWICKLUNG EINER PRÜFAPPARATUR
ZUR BESTIMMUNG DES WÄRMEDURCHLASSWIDERSTANDES VON BAUTEILEN
NACH DER HEIZKASTENMETHODE IM LABORATORIUM.**

Forschungsvorhaben: IV/1-5-243/82

Durchgeführt unter Förderung des
**INSTITUTS FÜR BAUTECHNIK
BERLIN**

BW 165/83

ENTWICKLUNG EINER PROFAPPARATUR
ZUR BESTIMMUNG DES WÄRMEDURCHLASSWIDERSTANDES VON BAUTEILEN
NACH DER HEIZKASTENMETHODE IM LABORATORIUM.

Forschungsvorhaben: IV/1-5-243/82

Durchgeführt unter Förderung des

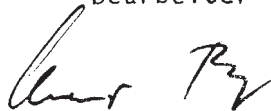
INSTITUTS FÜR BAUTECHNIK
BERLIN

vom

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR BAUPHYSIK
STUTTGART

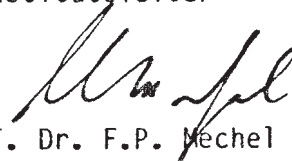
Stuttgart, den 1.12.1983

Bearbeiter



Dipl.-Ing. E. Boy

Institutsleiter



Prof. Dr. F.P. Mechel

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. EINLEITUNG.	7
2. DER WÄRMEDURCHLASSWIDERSTAND VON BAUTEILEN.	8
2.1 DEFINITION DES WÄRMEDURCHLASSWIDERSTANDES NACH DIN 52 611.	8
2.2 GRUNDLAGEN ZUR BESTIMMUNG DES WÄRMEDURCHLASSWIDERSTANDES VON BAUTEILEN.	8
2.2.1 Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen.	9
2.2.2 Grundgleichung der Wärmeleitung.	9
2.2.3 Die Differentialgleichung der Wärmeleitung.	10
2.2.4 Stationäre Temperaturfelder ohne Wärmequellen.	12
2.2.4.1 Der Wärmedurchlaßwiderstand homogener isotroper Bauteile bei eindimensionalen stationären Temperaturfeldern.	13
2.2.4.2 Der Wärmedurchlaßwiderstand homogener isotroper Bauteile bei dreidimensionalen stationären Temperaturfeldern.	15
2.2.4.3 Der Wärmedurchlaßwiderstand inhomogener Bauteile bei eindimensionalen stationären Temperaturfeldern.	18
2.2.4.4 Der Wärmedurchlaßwiderstand inhomogener Bauteile bei dreidimensionalen stationären Temperaturfeldern.	24
2.2.5 Praktisch realisierbare Randbedingungen.	32
2.2.6 Nichtadiabate Randstirnflächen.	40

	Seite
3. ZUSAMMENFASSUNG DER VORAUSSETZUNGEN FOR EINE EINDEUTIGE DEFINITION DES WÄRMEDURCHLASSWIDERSTANDES VON BAUTEILEN.	46
4. DIE EXPERIMENTELLE ERMITTLUNG DES WÄRMEDURCHLASSWIDERSTANDES VON BAUTEILEN.	47
4.1 VERFAHREN ZUR MESSUNG DES WÄRMEDURCHLASSWIDERSTANDES VON BAUTEILEN.	48
4.2 PRAKTISCH AUSGEFÜHRTE VERSUCHSEINRICHTUNGEN ZUR MESSUNG DES WÄRMEDURCHLASSWIDERSTANDES VON BAUTEILEN.	48
5. ERMITTLUNG DER GENAUIGKEIT VON WÄRMEDURCHLASSWIDERSTANDSMESSUNGEN UND WÄRMEDURCHGANGSKOEFFIZIENTEN-MESSUNGEN.	57
5.1 FEHLERABSCHÄTZUNG BEI IDEALEN VERSUCHSBEDINGUNGEN.	59
5.2 FEHLERABSCHÄTZUNG BEI REALEN VERSUCHSBEDINGUNGEN.	66
5.3 SIMULATION DER MESSUNG HOMOGENER ISOTROPER BAUTEILE.	67
5.3.1 Einfluß der Randstirnflächen bei Laborproben.	67
5.3.2 Methode mit kalibriertem Heizkasten.	68
5.3.3 Methode mit geregelter Heizkasten.	73
5.3.4 Messung mit Wärmestrommeßplatten.	76
5.4 SIMULATION INHOMOGENER WÄNDE. (Mauerwerk, Bauteile mit Wärmebrücken)	79
5.5 DIE OBERFLÄCHENTEMPERATURMESSUNG BEI PROBEN MIT NICHT ISOTHERMEN OBERFLÄCHEN.	82
5.6 STÖREINFLOSSE AUS DER UMGEBUNG.	84
5.7 MESSUNG FEUCHTER PROBEKÖRPER.	86

	Seite
6. ZUSAMMENFASSUNG DER UNSICHERHEITEN BEI DER MESSUNG DES WÄRMEDURCHLASSWIDERSTANDES UND DES WÄRMEDURCHGANGSKOEFFIZIENTEN MIT DEN DERZEIT ANGEWANDTEN VERSUCHSEINRICHTUNGEN.	86
7. FEHLERMINIMIERUNG DURCH KONZIPIERUNG EINER NEUEN MESSAPPARATUR.	87
7.1 MESSPRINZIP.	89
7.2 HERSTELLUNG KONSTANTER DEFINIERTER RANDBEDINGUNGEN IM MESSAUSSCHNITT.	90
8. KONSTRUKTION EINER HEIZPLATTENAPPARATUR.	93
8.1 KONSTRUKTIVE AUSFÜHRUNG DER WARMSEITE.	93
8.2 KONSTRUKTIVE AUSFÜHRUNG DER KALTSEITE.	97
8.3 RANDSTIRNFLÄCHEN.	98
8.4 MESSWERTERFASSUNG.	98
8.5 REGELEINRICHTUNGEN.	103
9. WÄRMEDURCHLASSWIDERSTANDSMESSUNGEN MIT DER NEUENTWICKELTEN HEIZPLATTENAPPARATUR.	103
9.1 MESSUNG HOMOGENER PROBEKÖRPER.	104
9.2 MESSUNG INHOMOGENER PROBEKÖRPER.	104
9.3 MESSUNG INHOMOGENER BAUTEILE MIT STRUKTURIERTEN OBERFLÄCHEN.	107
10. GENAUIGKEITSGRAD DER HEIZPLATTENAPPARATUR.	109
11. ANWENDUNGSVORTEILE UND ANWENDUNGSNOTWENDIGKEITEN DER HEIZPLATTENAPPARATUR.	109
12. ZUSAMMENFASSUNG.	111
13. LITERATURVERZEICHNIS.	113

GRÖSSEN UND EINHEITEN

BEDEUTUNG	FORMELZEICHEN	SI-EINHEITEN
Fläche	A	m ²
Breite	B	m
Höhe	H	m
Oberfläche	O	m ²
Volumen	V	m ³
Temperatur	T	K, °C
Elektrische Leistung	P	W
Wärmequelle	W	W
Dicke	s	m
Zeit	t	s
Kartesische Koordinaten	x, y, z	-
Einheitsvektor	e	-
Normalenvektor	n	-
Temperaturleitfähigkeit	a	m ² /s
Wärmedurchgangskoeffizient	k	W/m ² K
Wärmestromdichte	q	W/m ²
Wärmeübergangskoeffizient	α	W/m ² K
Temperaturabhängigkeitskoeffizient der Wärmeleitfähigkeit	β	W/m K ²
Emissionskoeffizient	ε	-
Einstrahlzahl	φ	-
Wärmeleitfähigkeit	λ	W/m K
Dichte	ρ	kg/m ³
Temperatur	θ	°C
Wärmestrom	Φ	W
Wärmedurchlaßkoeffizient	Λ	W/m ² K
Wärmedurchlaßwiderstand	1/Λ	m ² K/W
Kalibrierfaktor	C	(verschieden)
Relativer Fehler	δ	-
Absolutfehler	Δ	(verschieden)
Differenz in Verbindung mit Formelzeichen	Δ	-

Indizes

W	= Warmseite
K	= Kaltseite
L	= Luft
O	= Oberfläche
M	= Maske
P	= Probekörper
D	= Dämmstoff
WS	= Wärmestrommesser
KH	= kalibrierter Heizkasten
GH	= geregelter Heizkasten
S	= Schutzring
H	= Heizfläche
G	= Gegenheizfläche
St	= Stein
Mö	= Mörtel
k	= konvektiv
l	= leitungsbedingt
s	= strahlungsbedingt
m	= mittel
ges	= gesamt
g	= gemessen
r	= berechnet
x, y, z	= entsprechende Koordinatenrichtung; entsprechende partielle Ableitung
0	= Bezugsgröße
1	= wärmere Oberfläche
2	= kältere Oberfläche
1 bis 6	= verschiedene Bedeutung
•	= Umgebung

1. EINLEITUNG.

Die Erhöhung der Anforderungen an den Wärmeschutz von Gebäuden erfordert eine zunehmende Genauigkeit bei der Ermittlung der Wärmeschutzeigenschaften von Baustoffen und Bauteilen.

Kennzeichnende Größe bei der Beurteilung der Wärmedämmung von Bauteilen ist der Wärmedurchlaßwiderstand.

Bei den gegenwärtigen Baustoff- und Bauteilentwicklungen kommen neben den homogenen vermehrt auch inhomogene Materialien und Konstruktionen zur Anwendung. Durch Trennung der statischen und wärmedämmenden Funktionen können innerhalb eines Bauteiles Bereiche unterschiedlicher Wärmeleiteigenschaften vorliegen.

Aus statischen, ästhetischen oder funktionellen Gesichtspunkten werden auch Bauteile mit strukturierten Oberflächen hergestellt.

Die Wärmeschutzeigenschaften solcher Bauteile sind nicht nur von der Wärmeleitfähigkeit, sondern auch von den geometrischen Verhältnissen, wie der Anordnung einzelner Bereiche unterschiedlicher Wärmeleiteigenschaften und der Form der Begrenzungsflächen des Bauteiles, abhängig.

Die rechnerische Ermittlung des Wärmedurchlaßwiderstandes solcher Bauteile ist nur bei genauer Kenntnis des geometrischen Aufbaus und der Stoffwerte der einzelnen Bereiche möglich; auf die meßtechnische Ermittlung des Wärmedurchlaßwiderstandes kann somit nicht völlig verzichtet werden.

Bei der Messung des Wärmedurchlaßwiderstandes können Unsicherheiten sowohl durch fehlerhafte Erfassung des physikalischen Zustandes bei der Messung entstehen, als auch durch Abweichungen des physikalischen Zustandes vom definitionsgemäß vorausgesetzten Zustand.

Ziel der nachfolgenden Untersuchung ist es, die Unsicherheit der derzeit angewandten Prüfmethode abzuschätzen, eventuelle Fehlerquellen aufzuzeigen und durch Minimierung der Unsicherheiten eine Meßeinrichtung zu entwickeln, die sichere, reproduzierbare Ergebnisse bekannten und ausreichenden Genauigkeitsgrades liefert.

Dazu ist eine ausführliche Diskussion der Definition des Wärmedurchlaßwiderstandes beliebiger Bauteile erforderlich.

2. DER WÄRMEDURCHLASSWIDERSTAND VON BAUTEILEN.

2.1 DEFINITION DES WÄRMEDURCHLASSWIDERSTANDES NACH DIN 52 611.

In DIN 52 611, Teil 1 "Bestimmung des Wärmedurchlaßwiderstandes von Wänden und Decken"[1] wird für die Berechnung des Wärmedurchlaßwiderstandes aus den Meßwerten folgende Beziehung angegeben:

$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{\Delta\theta}{q} \quad (1)$$

dabei bedeutet:

$\Delta\theta$ = Temperaturdifferenz oder mittlere Temperaturdifferenz zwischen den beiden Oberflächen des Probekörpers in °C oder in K;

q = Wärmestromdichte oder mittlere Wärmestromdichte im Probekörper in W/m^2 .

Zur Messung muß im Probekörper ein definiertes stationäres Temperaturfeld derart erzeugt werden, daß ein konstanter Wärmestrom durch den Probekörper fließt.

2.2 GRUNDLAGEN ZUR BESTIMMUNG DES WÄRMEDURCHLASSWIDERSTANDES VON BAUTEILEN.

Zur Diskussion des Wärmedurchlaßwiderstandes ist eine Analyse der Wärmeleitvorgänge, insbesondere des Zusammenhanges zwischen Temperaturfeldern in Bauteilen und den daraus resultierenden Wärmeströmen durch die Bauteile erforderlich. Dabei muß die Geometrie der Bauteile und gegebenenfalls die geometrische Zuordnung einzelner Bereiche unterschiedlicher Wärmeleiteigenschaften in den Bauteilen besonders berücksichtigt werden.

2.2.1 Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen.

Mikroskopisch sind Baustoffe häufig Gemische aus unter Umständen verschiedenen Feststoffen unterschiedlicher Stoffeigenschaften mit luftgefüllten (oder gasgefüllten) Hohlräumen, die in der Praxis auch noch Wasser in gasförmigem, flüssigem oder festem Zustand enthalten können.

Beim Wärmetransport durch solche Stoffe können Leitung, Konvektion und Strahlung beteiligt sein. Betrachtet man solche Stoffe als makroskopisch homogen und führt für den Wärmetransport durch solche Stoffe eine äquivalente Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{äqu}}$ ein, so wird diese sowohl von der Dichte des Stoffes (entsprechend den Lufthohlräumen) als auch vom Wassergehalt abhängen. Derzeit wird angenommen, daß für die meisten Baustoffe $\lambda_{\text{äqu}}$ im Baustoff selbst jedoch als richtungsunabhängig angenommen werden kann. (Diese Annahme bedarf für einige Baustoffe noch der experimentellen Bestätigung).

Mehrschichtige Bauteile, Mauerwerk sowie Bauteile mit Wärmebrücken sind in dieser Betrachtungsweise als jeweils "homogene" isotrope nebeneinander oder hintereinander liegende Bereiche unterschiedlicher Stoffeigenschaften anzusehen.

Parallel zum Temperaturgefälle stellt sich bei Wasser enthaltenden Bauteilen ein Wasserdampfpartialdruckgefälle ein. Außerdem wirken bei entsprechenden Mikrostrukturen Kapillarkräfte, so daß neben dem Wärmetransport ein Stofftransport stattfinden kann. Durch die Enthalpieänderung des Wassers längs des Transportweges findet ein zusätzlicher Wärmetransport statt. Im Falle von Phasenänderungen stellt die Schmelz- oder die Verdampfungsenthalpie Wärmequellen dar (vergleiche [2]).

Im Hinblick auf die meßtechnische Ermittlung des Wärmedurchlaßwiderstandes wird nachfolgend dessen Abhängigkeit von verschiedenen Parametern bei verschiedenen Randbedingungen diskutiert.

2.2.2 Grundgleichung der Wärmeleitung.

Der durch Temperaturdifferenzen im Innern fester Körper erzeugte Wärmefluß kann durch das Vektorfeld:

$$q(x,y,z,t) = -\lambda(x,y,z) \cdot \text{grad } T(x,y,z,t) \quad (2)$$

beschrieben werden, wobei $T = T(x,y,z,t)$ das skalare Temperaturfeld im Körper ist.

Die Richtung der Wärmestromdichte \mathbf{q} ist durch den Gradienten des Temperaturfeldes gegeben; der Betrag hängt von den Wärmeleiteigenschaften des entsprechenden Stoffes ab. Der Proportionalitätsfaktor zwischen Wärmestromdichte und Temperaturfeld wird als Wärmeleitfähigkeit λ bezeichnet. Da λ stoffabhängig ist, kann es nur experimentell ermittelt werden. Bei homogenen isotropen Körpern ist λ eine skalare Größe, bei inhomogenen "isotropen" Körpern eine skalare Funktion des Ortes.

Nur bei anisotropen Körpern ist die Wärmeleitfähigkeit keine skalare Größe; sie kann dann durch einen symmetrischen Tensor beschrieben werden.

Gleichung (2) wird als "Grundgleichung der Wärmeleitung" bezeichnet.

2.2.3 Die Differentialgleichung der Wärmeleitung.

Mit der Grundgleichung der Wärmeleitung kann die Differentialgleichung der Wärmeleitung aus einer Wärmebilanz in einem endlichen Volumen V_0 , in dem das Temperaturfeld $T(x,y,z,t)$ vorliegt, abgeleitet werden.

Der durch ein Oberflächenelement dA aus V_0 austretende Wärmestrom $d\Phi$ ist:

$$d\Phi(x,y,z,t) = \mathbf{q}(x,y,z,t) \cdot \mathbf{n}(x,y,z) dA. \quad (3)$$

Hierbei ist $\mathbf{n}(x,y,z)$ das nach außen positiv gezählte Vektorfeld auf der Oberfläche O_0 des abgeschlossenen Volumens V_0 und stimmt in jedem Punkt der Oberfläche mit deren Normalenvektor überein.

Der Wärmestrom durch die gesamte Oberfläche ist dann:

$$\Phi_0 = \int_{O_0} \mathbf{q}(x,y,z,t) \cdot \mathbf{n}(x,y,z) dA. \quad (4)$$

Mit Hilfe des Gauß'schen Integralsatzes kann dieses Flächenintegral in ein Volumenintegral umgerechnet werden:

$$\int_{O_0} \mathbf{q} \cdot \mathbf{n} dA = \int_{V_0} \operatorname{div} \mathbf{q} dV. \quad (5)$$

Da die zeitliche Abnahme der in V_0 gespeicherten Wärmemenge

$$-\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_0} \rho(x,y,z,T) \cdot c(x,y,z,T) \cdot T(x,y,z,t) dV \quad (6)$$

mit dem durch die Oberfläche austretenden Wärmestrom identisch sein muß, kann folgende Bilanzgleichung aufgestellt werden:

$$\operatorname{div} \mathbf{q} dV = -\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} dV. \quad (7)$$

Mit der Gleichung (2) folgt aus (7):

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div} (\lambda \operatorname{grad} T). \quad (8)$$

Für homogene isotrope Stoffe ($\lambda = \text{konstant}$) gilt:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \cdot \operatorname{div} (\operatorname{grad} T). \quad (9)$$

Mit der Abkürzung a , die als Temperaturleitfähigkeit bezeichnet wird:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad (10)$$

folgt die als Fourier'sche Differentialgleichung der Wärmeleitung bezeichnete Darstellung:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \operatorname{div} (\operatorname{grad} T) = a \nabla^2 T = a \Delta T. \quad (11)$$

Für inhomogene Körper führt die Gleichung (8) zu:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div} (\lambda \operatorname{grad} T) = \nabla \lambda \cdot \operatorname{grad} T + \lambda \Delta T. \quad (12)$$

Befinden sich innerhalb des betrachteten Volumens Wärmequellen, durch die pro Zeit und Volumeneinheit eine gewisse Wärmemenge $W(x,y,z,t,T)$ frei wird, so ist diese in der Bilanzgleichung (7) zu berücksichtigen. Anstatt Gleichung (8) erhält man dann die inhomogene Differentialgleichung:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div} (\lambda \cdot \operatorname{grad} T) + W. \quad (13)$$

Die Lösbarkeit dieser Differentialgleichungen 2. Ordnung hängt von der Geometrie der betrachteten Körper sowie von den Anfangswerten und den Anfangsrandwerten oder bei stationären Temperaturfeldern von den Randwerten ab. Bei inhomogenen Körpern muß zusätzlich die Ortsabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit bekannt sein und bei anisotropen Körpern deren Richtungsabhängigkeit.

2.2.4 Stationäre Temperaturfelder ohne Wärmequellen.

Der theoretische Sollzustand für die Ermittlung des Wärmedurchlaßwiderstandes ist ein quellfreies stationäres Temperaturfeld im Bauteil während der Messung.

Nach den vorangegangenen Ableitungen lautet die Differentialgleichung der Wärmeleitung für homogene isotrope Körper ohne Wärmequellen:

$$\nabla^2 T = \Delta T = 0. \quad (14)$$

Mit dieser homogenen linearen Differentialgleichung lassen sich die Temperaturfelder in geometrisch einfachen Gebilden wie ebenen Wänden, zylindrischen oder kugelförmigen Körpern, einfach ermitteln.

Für inhomogene Körper kann Gleichung (14) nur in einzelnen homogenen Bereichen angewandt werden. Bei ortsabhängiger, jedoch in den einzelnen homogenen Bereichen isotroper Wärmeleitfähigkeit, erhält man folgende nichtlineare Differentialgleichung:

$$\operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad} T) = \nabla \lambda \cdot \operatorname{grad} T + \lambda \Delta T = 0. \quad (15)$$

In kartesischen Koordinaten erhält man aus Gleichung (14) die als Laplace-Gleichung bezeichnete Form:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0. \quad (16)$$

Gleichung (15) ergibt in kartesischen Koordinaten:

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial T \cdot \partial \lambda}{\partial x^2} + \frac{\partial T \cdot \partial \lambda}{\partial y^2} + \frac{\partial T \cdot \partial \lambda}{\partial z^2} = 0. \quad (17)$$

2.2.4.1 Der Wärmedurchlaßwiderstand homogener isotroper Bauteile bei eindimensionalen stationären Temperaturfeldern.

Für die bei Bauteilen (Wänden und Decken) häufig vorliegende Geometrie: planparallele ebene Platte, wird nachfolgend eine Lösung abgeleitet.

Im Falle einer unendlich ausgedehnten homogenen Wand mit isothermen Oberflächen lautet der Lösungssatz:

$$T(x,y,z) = C_1 x + C_2. \quad (18)$$

Mit den Randbedingungen entsprechend der Lage des Koordinatensystems in Bild 1:

$$\begin{aligned} T(0,y,z) &= T_1 \\ T(s,y,z) &= T_2 \end{aligned} \quad (19)$$

lautet die Lösung für das Temperaturfeld:

$$T(x,y,z) = -\frac{T_1 - T_2}{s} \cdot x + T_1. \quad (20)$$

Alle Parallelebenen zur Wandoberfläche (y-z-Ebene) sind isotherm.

Der Gradient dieses Temperaturfeldes ist:

$$\text{grad } T = \left(\mathbf{e}_x \cdot \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{e}_y \cdot \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{e}_z \cdot \frac{\partial}{\partial z} \right) T = -\frac{T_1 - T_2}{s} \mathbf{e}_x. \quad (21)$$

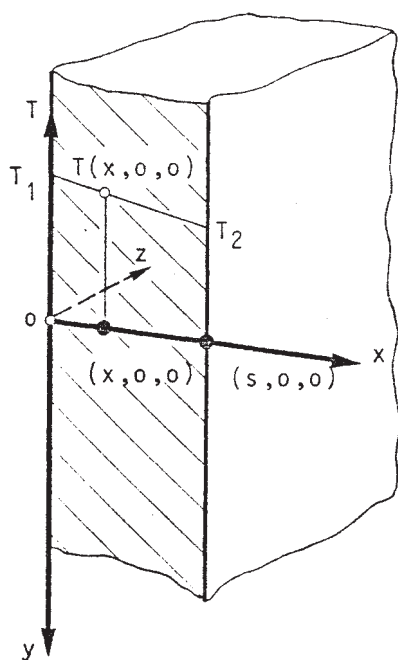


BILD 1: Temperaturfeld in einer unendlich ausgedehnten homogenen isotropen Wand mit isothermen Oberflächen.

Damit ergibt sich nach der Grundgleichung der Wärmeleitung eine ausschließlich senkrecht zur Wandoberfläche gerichtete Wärmestromdichte:

$$\mathbf{q} = -\lambda \text{ grad } T = -\frac{\lambda}{s} (T_1 - T_2) \mathbf{e}_x. \quad (22)$$

Das für die unendlich ausgedehnte Wand ermittelte Temperaturfeld gilt ebenso für einen Wandausschnitt mit adiabaten Randstirnflächen.

Die Wärmeleitfähigkeit einer homogenen isotropen ebenen Wand der Dicke s kann somit bei isothermen Oberflächen und adiabaten Randstirnflächen durch Messung des Wärmestroms Φ im Wandausschnitt A und durch Messung der Wandoberflächentemperaturen oder deren Differenz ermittelt werden:

$$\lambda = \frac{\Phi \cdot s}{A(T_1 - T_2)} = \frac{q \cdot s}{\Delta T}. \quad (23)$$

Der Wärmedurchlaßwiderstand (Wärmedämmwert) dieser homogenen isotropen Wand der Dicke s und der Wärmeleitfähigkeit λ nach Gleichung (23) beträgt beim Vorliegen eines stationären eindimensionalen Temperaturfeldes:

$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{\Delta T}{q} = \frac{\Delta \theta}{q} = \frac{\Delta \theta \cdot A}{\Phi} = \frac{s}{\lambda}. \quad (24)$$

In der Meßpraxis von Bauteilen sind eindimensionale Temperaturfelder und adiabate Randstirnflächen des Meßausschnittes nur näherungsweise herstellbar. In der Regel werden bei der Messung dreidimensionale Temperaturfelder in den Bauteilen vorliegen.

2.2.4.2 Der Wärmedurchlaßwiderstand homogener isotroper Bauteile bei dreidimensionalen stationären Temperaturfeldern.

Für beliebige stationäre dreidimensionale Temperaturfelder $T = T(x,y,z)$ im Ausschnitt V einer homogenen ebenen Wand mit den Ausschnittsoberflächen A_1 und A_2 und den Randstirnflächen A_3 bis A_6 wird der Wärmedurchlaßwiderstand nach Gleichung (1) aus den mittleren Oberflächentemperaturen (Bezeichnungen entsprechend Bild 2):

$$\bar{T}_i = \frac{1}{A_i} \int_{z_1}^{z_2} \int_{y_1}^{y_2} T(x_i, y, z) dy dz \quad (\text{für } i = 1 \text{ und } 2) \quad (25)$$

und der mittleren Wärmestromdichte q im Probekörper ermittelt.

Meßtechnisch wird die mittlere Wärmestromdichte aus dem Wärmestrom Φ_1 durch die wärmere Oberfläche A_1 des Bauteils ermittelt. Bei adiabaten Randstirnflächen ist:

$$\bar{q}_1 = q = \frac{\Phi_1}{A_1}. \quad (26)$$

Φ_1 ist das Flächenintegral des Vektorfeldes $\mathbf{q} = -\lambda \text{ grad } T(x_1, y, z)$ über A_1 (entsprechend Gleichung 4).

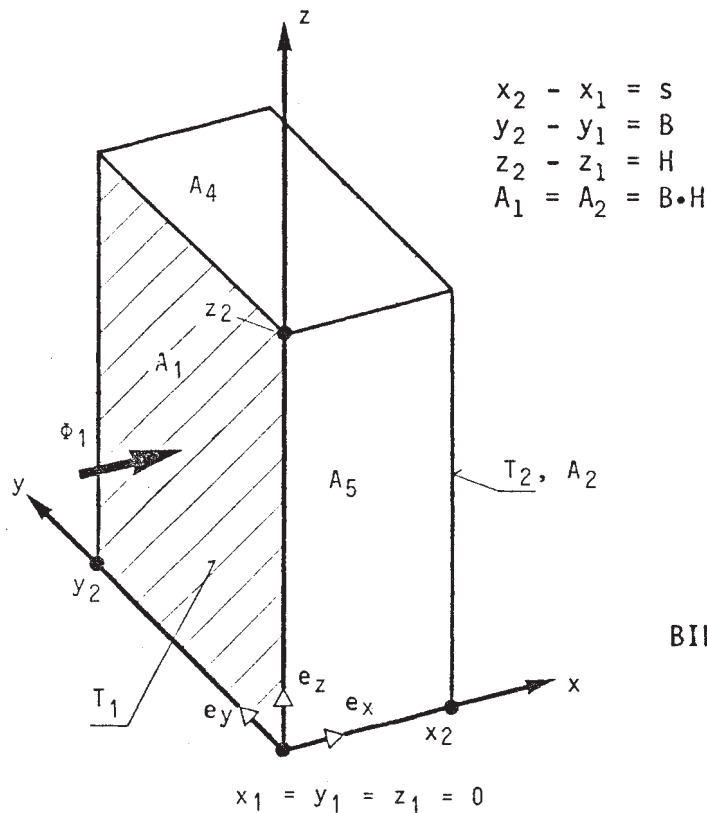


BILD 2: Bezeichnungen und Lage des Koordinatensystems im Probekörper.

Im stationären Temperaturfeld ohne Wärmequellen ist das Flächenintegral von \mathbf{q} über der gesamten Oberfläche des Probekörpers:

$$\sum_i \Phi_i = 0 \quad (\text{für } i = 1 \text{ bis } 6); \quad (27)$$

dies gilt ebenso für jeden Volumenausschnitt der Wand.

Das bedeutet, daß bei dreidimensionalen Temperaturfeldern die mittlere Wärmestromdichte in der wärmeren Oberfläche (\bar{q}_1) nur dann mit der mittleren Wärmestromdichte im Probekörper (q) übereinstimmt, wenn die Summe der Wärmeströme durch die Randstirnflächen Null ist:

$$\Phi_1 = -\Phi_2 \quad (28)$$

$$\sum_{i=3}^6 \Phi_i = 0.$$

Werden mit $i = 1$ die wärmere, mit $i = 2$ die kältere Oberfläche und mit $i = 3$ bis $i = 6$ die Randstirnflächen des Probekörpers bezeichnet (vergleiche Bild 2), so gilt für die wärmere Oberfläche:

$$\Phi_1 = \bar{q}_1 \cdot A_1 = \iint_{A_1} q(x_1, y, z) \cdot e_x \, dy \, dz. \quad (29)$$

Entsprechend der Voraussetzung der Homogenität und Isotropie erhält man:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= -\lambda \iint_{A_1} \text{grad } T(x_1, y, z) \cdot e_x \, dy \, dz \\ &= \lambda \int_{z_1}^{z_2} \int_{y_1}^{y_2} \frac{\partial T(x_1, y, z)}{\partial x} \, dy \, dz. \end{aligned} \quad (30)$$

Der Wärmedurchlaßwiderstand nach Gleichung (1) ist:

$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{\bar{T}_1 - \bar{T}_2}{\bar{q}_1} = \frac{\Delta\theta \cdot A_1}{\Phi_1}. \quad (31)$$

Nach Einsetzen der Gleichungen (25) und (30) ergibt dies:

$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\int_{z_1}^{z_2} \int_{y_1}^{y_2} T(x_1, y, z) \, dy \, dz - \int_{z_1}^{z_2} \int_{y_1}^{y_2} T(x_2, y, z) \, dy \, dz}{\int_{z_1}^{z_2} \int_{y_1}^{y_2} \frac{\partial T(x_i, y, z)}{\partial x} \, dy \, dz} \quad (32)$$

(für $i = 1$ und 2)

Aus den Voraussetzungen nach Gleichung (28) können mit Gleichung (32) die Bedingungen für die Temperaturfelder abgeleitet werden, für die der Wärmedurchlaßwiderstand vom Temperaturfeld unabhängig ist. Die Diskussion von Gleichung (32) zeigt, daß dies nicht nur bei eindimensionalen Temperaturfeldern der Fall ist.

In Abschnitt 5 werden hierzu einige Beispiele angegeben.

2.2.4.3 Der Wärmedurchlaßwiderstand inhomogener Bauteile bei eindimensionalen stationären Temperaturfeldern.

In inhomogenen Bauteilen beschreibt $\lambda = \lambda(x,y,z)$ die ortsabhängige Wärmeleitfähigkeit.

Sind die Bauteile in einzelne homogene und isotrope Bereiche aufteilbar, so können die Temperaturfelder in den einzelnen Bereichen jeweils mit der Laplace-Gleichung (entsprechend Gleichung (14) oder (16)) beschrieben werden. Die Randbedingungen innerhalb des Bauteils ergeben sich aus der Koppelung der einzelnen aneinandergrenzenden Bereiche.

Zur Beschreibung des Temperaturfeldes im gesamten Bauteil muß von Gleichung (15) oder (17) ausgegangen werden.

Bei inhomogenen Bauteilen sind eindimensionale Temperaturfelder nur in ausschließlich hintereinander liegenden planparallelen Schichten oder ausschließlich nebeneinander liegenden Bereichen unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit herstellbar.

Für eindimensionale Temperaturfelder $T = T(x)$ in solchen Bauteilen folgt aus Gleichung (17) mit den Abkürzungen:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = T_x, \quad \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = T_{xx} \quad (33)$$

$$\frac{\partial \lambda}{\partial x} = \lambda_x \quad \text{usw.}$$

$$T_x(x) \cdot \lambda_x(x,y,z) + \lambda(x,y,z) \cdot T_{xx}(x) = 0 \quad (34)$$

$$[T_x(x) \cdot \lambda(x,y,z)]_x = 0.$$

Die Integration liefert:

$$T_x(x) \cdot \lambda(x,y,z) = f(y,z)$$

und

$$T(x_0) = f(y,z) \int_0^{x_0} \frac{1}{\lambda(x,y,z)} dx + g(y,z) \quad (35)$$

f und g sind so zu bestimmen, daß die Randbedingungen gelten:

$$\begin{aligned} T(x_1) &= T_1 \\ T(x_2) &= T_2. \end{aligned} \quad (36)$$

Die mittlere Wärmestromdichte im Bauteil ist:

$$q = -\lambda(x,y,z) \text{ grad } T(x) = -f(y,z) = -\frac{T(x_2) - T(x_1)}{\int_x \frac{1}{\lambda(x,y,z)} dx} \quad (37)$$

und der Wärmestrom durch die wärmere Oberfläche:

$$\Phi_1 = \bar{q}_1 \cdot A_1 = -(T_2 - T_1) \iint_{zy} \frac{1}{\int_x \frac{1}{\lambda(x,y,z)} dx} dy dz. \quad (38)$$

Der Wärmedurchlaßwiderstand nach Gleichung (1) ist somit

$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{T_1 - T_2}{q_1} = \frac{A_1}{\iint_{zy} \frac{1}{\int_x \frac{1}{\lambda(x,y,z)} dx} dy dz}. \quad (39)$$

Hierbei war ein eindimensionales Temperaturfeld $T = T(x)$ im Bauteil vorausgesetzt.

Für mehrschichtige Bauteile (vergleiche Bild 3) mit

$$\lambda = \lambda(x) = \begin{cases} \lambda_1 & \text{für } x_1 < x < x_2 \\ \lambda_2 & \text{für } x_2 < x < x_3 \\ \dots & \dots \end{cases}$$

usw.

ist

$$\int_{x_1}^x \frac{1}{\lambda(x)} dx = \int_{x_1}^{x_2} \frac{1}{\lambda_1} dx + \int_{x_2}^{x_3} \frac{1}{\lambda_2} dx + \text{usw.}$$

$$= \frac{x_2 - x_1}{\lambda_1} + \frac{x_3 - x_2}{\lambda_2} + \text{usw.} \quad (40)$$

mit $x_2 - x_1 = s_1$ und $x_3 - x_2 = s_2$ usw. ergibt sich für Gleichung (39):

$$\frac{1}{\Delta} = \frac{A_1}{A_1} = \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{s_n}{\lambda_n} \quad (41)$$

$$\frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{s_n}{\lambda_n}$$

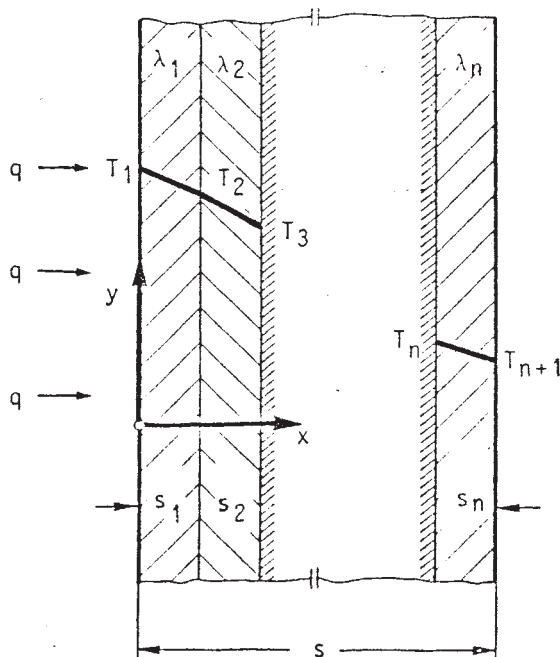


BILD 3: Mehrschichtiges Bauteil.

Für temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeiten $\lambda = \lambda(T)$ kann, wenn ein eindimensionales Temperaturfeld $T = T(x)$ vorliegt, $\lambda(T)$ durch $\lambda = \lambda(x)$ ersetzt werden.

Hängt die Wärmeleitfähigkeit linear von der Temperatur ab:

$$\lambda(T) = \lambda_0 + \beta T, \quad (42)$$

so kann mit dem Näherungsansatz

$$\lambda(x) = a + bx \quad (43)$$

für den Wärmedurchlaßwiderstand nach Gleichung (1) folgende Beziehung angegeben werden:

$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{s \ln \frac{\lambda_0 + \beta T_1}{\lambda_0 + \beta T_2}}{\beta (T_1 - T_2)} \quad \text{oder} \quad \frac{1}{\Lambda} = \frac{\ln(\beta s + 1)}{\beta \lambda_0} \quad (44)$$

Für nebeneinander liegende Bereiche unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit $\lambda = \lambda(y,z)$ (vergleiche Bild 4), wie das zum Beispiel bei Mauerwerk der Fall sein kann, gilt:

$$\lambda = \lambda_1 \quad \text{für} \quad \begin{cases} y_1 < y < y_2 \\ z_1 < z < z_2 \end{cases}$$

$$\lambda = \lambda_2 \quad \text{für} \quad \begin{cases} y_1 < y < y_2 \\ z_2 < z < z_3 \end{cases}$$

$$\int_0^s \frac{1}{\lambda(y,z)} dx = \frac{s}{\lambda(y,z)} \quad (45)$$

Der Wärmedurchlaßwiderstand dieser Wand ist nach Gleichung (39) bei eindimensionalem Temperaturfeld $T = T(x)$:

$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{A_1}{\iint_{zy} \frac{\lambda(y,z)}{s} dy dz} \quad (46)$$

mit

$$\begin{array}{l|l} y_2 - y_1 = \Delta y_1 & \Delta y_1 \cdot \Delta z_1 = A_{11} \\ z_2 - z_1 = \Delta z_1 & \Delta y_1 \cdot \Delta z_2 = A_{12} \\ z_3 - z_2 = \Delta z_2 & A_1 = A_{11} + A_{12} \end{array}$$

folgt

$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{A_1}{\frac{\lambda_1}{s} \cdot A_{11} + \frac{\lambda_2}{s} \cdot A_{12}} = \frac{1}{\frac{\lambda_1}{s} \cdot \frac{A_{11}}{A_1} + \frac{\lambda_2}{s} \cdot \frac{A_{12}}{A_1}} \quad (47)$$

Für i nebeneinander liegende Bereiche unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit kann Gleichung (47) entsprechend verallgemeinert werden:

mit

$$\frac{\lambda_i}{s} = \Delta_i \quad \text{und} \quad \frac{A_{1i}}{A_1} = p_i$$

folgt

$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{\sum_i \Delta_i p_i} \quad (48)$$

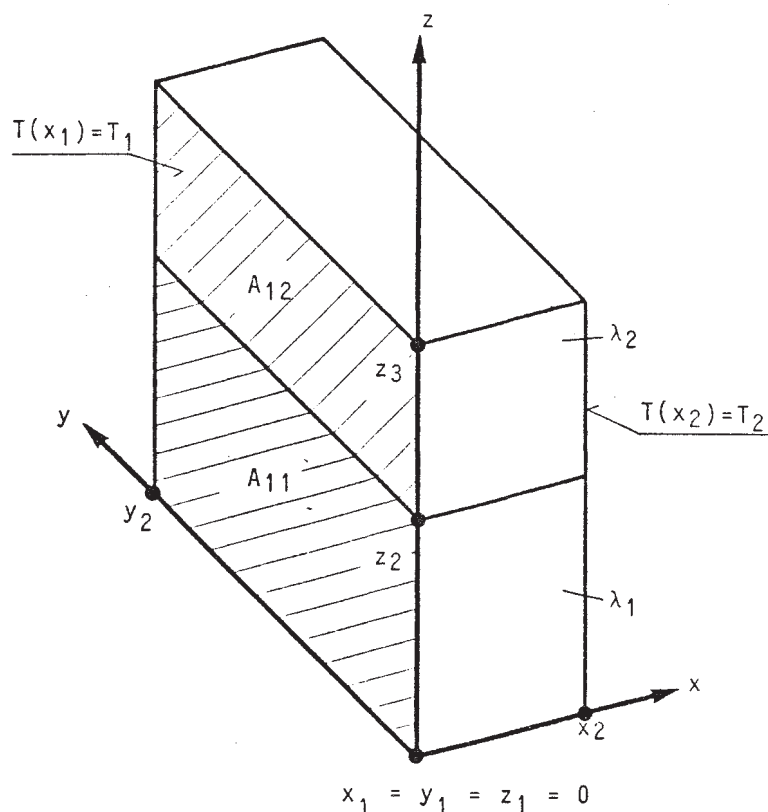


BILD 4: Wand aus nebeneinander liegenden Bereichen unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit.

Die unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit in den nebeneinander liegenden Bereichen führt bei eindimensionalen Temperaturfeldern zu unterschiedlichen Wärmestromdichten in den jeweiligen Bereichen:

$$q_{1i} = \lambda_i (T_1 - T_2). \quad (49)$$

Der praktischen Herstellbarkeit eindimensionaler Temperaturfelder in diesen inhomogenen Bauteilen dürften dadurch Grenzen gesetzt sein.

Versuchseinrichtungen zur Messung des nach Gleichung (1) definierten Wärmedurchlaßwiderstandes solcher Bauteile müßten isotherme Oberflächen bei unterschiedlichen Wärmestromdichten ermöglichen.

2.2.4.4 Der Wärmedurchlaßwiderstand inhomogener Bauteile bei dreidimensionalen stationären Temperaturfeldern.

Das Temperaturfeld in inhomogenen Bauteilen kann mit den in Gleichung (33) angegebenen Abkürzungen folgendermaßen beschrieben werden:

$$T_{xx} + T_x \cdot \frac{\lambda_x}{\lambda} + T_{yy} + T_y \cdot \frac{\lambda_y}{\lambda} + T_{zz} + T_z \cdot \frac{\lambda_z}{\lambda} = 0. \quad (50)$$

Aufgrund der Vielzahl der geometrischen Möglichkeiten der Bereichsaufteilung kann eine allgemeine analytische Lösung dieser nichtlinearen Differentialgleichung nicht angegeben werden. Auf die analytische Ermittlung der Temperaturfelder bei ausgewählten Beispielen wird an dieser Stelle ebenfalls verzichtet.

Der Wärmedurchlaßwiderstand nach Gleichung (1) läßt sich bei inhomogenen Bauteilen in einfacher Weise mit Hilfe der Simulation dieser Bauteile mit einer Finite-Elemente-Methode (FEM) berechnen.

Bei der FEM wird das gesamte Bauteil in kleine homogene isotrope Elemente zerlegt. Als Elementgeometrie werden beim angewandten Simulationsprogramm Quader mit den Abmessungen $\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$ verwendet (bei zweidimensionaler Betrachtung entsprechende Rechtecke).

Für stationäre Berechnungen kann jedem Element eine spezielle Wärmeleitfähigkeit zugeordnet werden, womit sowohl homogene isotrope, als auch inhomogene, jedoch bereichsweise homogene isotrope Bauteile beliebiger Konfiguration simuliert werden können.

Der Einfluß des Feuchtegehaltes in Bauteilen kann auf diese Weise ebenfalls ermittelt werden, wenn die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Feuchtegehalt bekannt ist und die Feuchteverteilung im Bauteil bekannt ist oder angenommen werden kann, oder wenn der Feuchtegehalt über die Temperaturabhängigkeit abgeleitet werden kann (feuchte Bauteile mit temperaturabhängiger Feuchteverlagerung).

Bei vorgegebenen Randbedingungen wahlweise:

- Berandungstemperatur,
- Wärmestromdichte und Temperaturniveau,
- Wärmeübertragung: Fluid- Festkörper (Konvektion) und Fluidtemperaturniveau,

wird aus der Gesamtzahl der Wärmebilanzgleichungen aller Elemente ein lineares Gleichungssystem gebildet, das mit einer Iterationsmethode gelöst wird.

Wärmequellen oder -senken können in der jeweiligen Elementenmitte oder als Wärmestromquellendichte an beliebigen Oberflächen ebenfalls berücksichtigt werden. Damit lassen sich nicht nur Bauteile, sondern auch komplexe Apparatekonstruktionen simulieren.

In Bild 5 sind die nachfolgend untersuchten charakteristischen Bauteilbeispiele schematisch dargestellt.

Ungeachtet der praktischen Realisierbarkeit werden folgende Randbedingungen:

- isotherme Oberflächen,
- konstante Wärmeübergangskoeffizienten bei jeweils konstanten Umgebungstemperaturen auf beiden Wandseiten,
- konstante Wärmestromdichte an der wärmeren Oberfläche bei vorgegebener Umgebungstemperatur und konstantem Wärmeübergangskoeffizienten auf der Kaltseite,

bei adiabaten Randstirnflächen *) diskutiert.

Bei der dreidimensionalen Betrachtung sind die Niveauflächen des skalaren Temperaturfeldes ($T(x,y,z) = \text{konstant}$) die Isothermenebenen. Diese sind in Bild 6 für die in Bild 5 a) und 5 d) angegebenen Bauteile in zweidimensionalen Schnitten angegeben.

In Bauteilen mit ausschließlich nebeneinander liegenden Bereichen unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit stellt sich bei konvektivem Wärmeübergang auf einer oder auf beiden Wandseiten mit jeweils konstanter Umgebungstemperatur ein dreidimensionales Temperaturfeld ein (vergleiche Bild 6, Spalte II).

Während bei diesen Bauteilen eindimensionale Temperaturfelder aufgeprägt werden können, sind bei Bauteilen, die nicht ausschließlich aus nebeneinander liegenden Bereichen unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit zusammengesetzt sind, wie die Beispiele Bild 5 c) und Bild 5 d), eindimensionale Temperaturfelder nicht herstellbar.

Isotherme Oberflächen (vergleiche Bild 6, Spalte I) führen bei inhomogenen Bauteilen mit nicht ausschließlich nebeneinanderliegenden Bereichen unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit zu dreidimensionalen Temperaturfeldern im Bauteil.

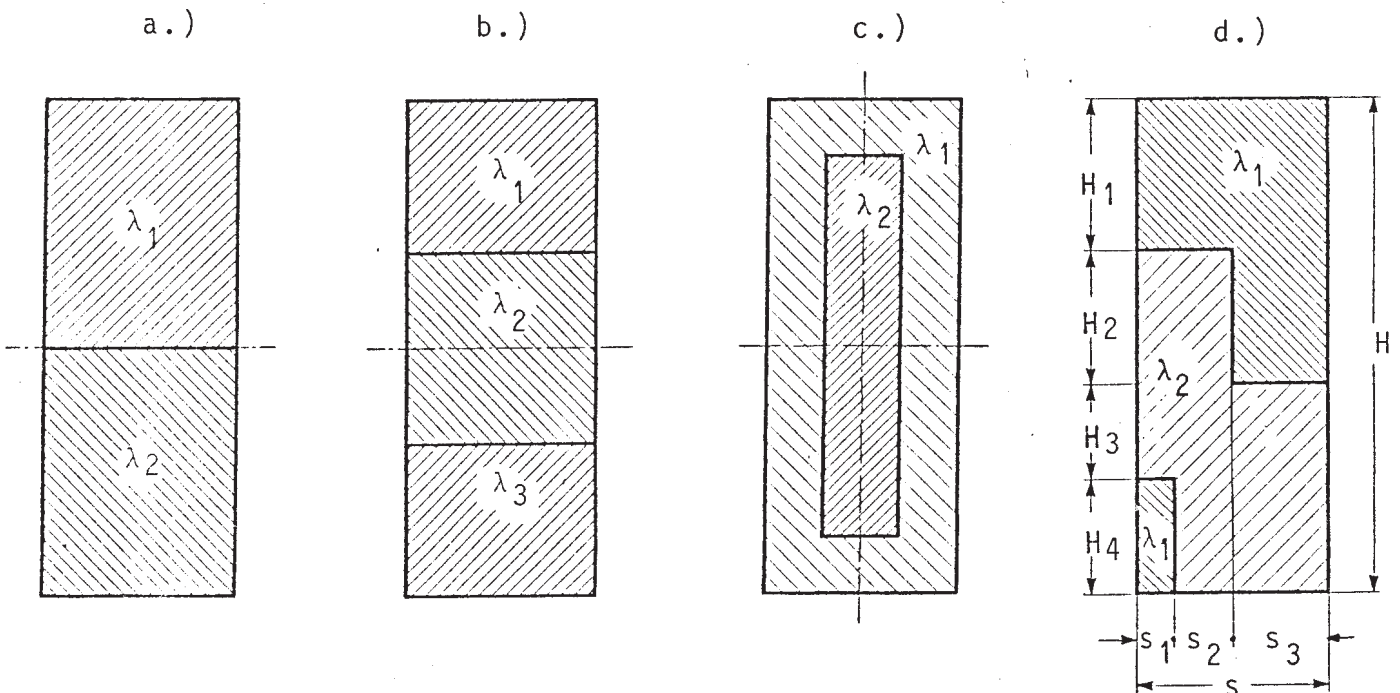
*)

Bei unsymmetrischen Inhomogenitäten werden in der Praxis adiabate Randstirnflächen nicht herstellbar sein.

Die Randbedingung: "konstante Wärmestromdichte an der wärmeren Oberfläche" führt bei unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten aneinander grenzender Bereiche ebenfalls zu dreidimensionalen Temperaturfeldern in den Bauteilen (vergleiche Bild 6, Spalte III). Diese Bedingung ist praktisch für wärmetechnische Bauteilprüfungen kaum realisierbar.

Bei diesen inhomogenen Bauteilen hängt der nach Gleichung (1) ermittelte Wärmedurchlaßwiderstand vom jeweiligen Temperaturfeld im Bauteil und damit von den Randbedingungen ab.

Für die in Bild 5 skizzierten Beispiele sind in Tabelle 1 die nach Gleichung (1) berechneten Wärmedurchlaßwiderstände angegeben. Abmessungen, Stoffwerte und Randbedingungen sind identisch mit den Werten für die die Berechnung der in Bild 6 angegebenen Temperaturfelder erfolgt ist.



- a.) Nebeneinander liegende Bereiche unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit.
- b.) Nebeneinander liegende Bereiche unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit.
- c.) Symmetrische Inhomogenität.
- d.) Unsymmetrische Inhomogenität.

BILD 5: Beispiele inhomogener Bauteile mit planparallelen Oberflächen.

		TEMPERATURFELDER INHOMOGENER BAUTEILE BEI VERSCHIEDENEN RANDBEDINGUNGEN		
BAUTEIL (Bezeichnung entsprechend Bild 5)	Isotherme Oberflächen	Konstante Wärmeübergangskoeffizienten	Konstante Wärmestromdichte an der wärmeren Oberfläche	
	$T_1 = T_W = \text{konstant}$ $T_2 = T_K = \text{konstant}$	$\alpha_W = \text{konstant}, \alpha_K = \text{konstant}$ $T_W = \text{konstant}, T_K = \text{konstant}$	$q_1 = \text{konstant}$ $\alpha_K = \text{konstant}$ $T_K = \text{konstant}$	I II III
5 a.) Isothermen- darstellung				
In der Wand	$T = T(x)$ $q = q(y, z)$	$T = T(x, y, z)$ $q = q(x, y, z)$	$T = T(x, y, z)$	
5 d.) Isothermen- darstellung			Bemerkungen: $\lambda_2 > \lambda_1$ Geometrie, Stoff- werte und Randbe- dingungen siehe Tabelle 1.	
In der Wand	$T = T(x, y, z)$ $q = q(x, y, z)$	$T = T(x, y, z)$ $q = q(x, y, z)$		

BILD 6: Schematische Darstellung der Temperaturfelder in verschiedenen inhomogenen Bauteilen bei verschiedenen Randbedingungen.

BAUTEIL NR. 1)	ABMESSUNGEN 1)										STOFFWERTE		RANDBE- DINGUNGEN 2)	WÄRMEDURCHLASS- WIDERSTAND 1/Λ	
	B	H	s	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	s ₁	s ₂	s ₃	λ ₁	λ ₂		m ² K/W	%
-	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	W/m K	W/m K	-		
5 a.)	1,0	0,4	0,175	0,2	0,2	-	-	-	-	-	0,14	0,87	I	0,35	84
													II	0,41	100
													III	0,58	141
5 b.)	1,5	1,5	0,175	0,5	0,5	0,5	-	-	-	-	0,14	0,87	I	0,79	88
													II	0,90	100
													III	1,22	136
5 c.)	1,5	1,5	0,175	0,25	1,0	0,25	-	0,05	0,075	0,05	0,14	0,87	I	1,00	101
													II	0,99	100
5 d.)	1,0	1,5	0,3	0,4	0,4	0,3	0,4	0,05	0,1	0,15	0,5	2,1	I	0,26	91
													II	0,28	100

1) Entsprechend Bezeichnung in Bild 5; (Teilmaße analog Bild 5 d.).

2) Entsprechend Bezeichnung in Bild 6.

TABELLE 1: Wärmedurchlaßwiderstand einiger inhomogener Bauteile mit planparallelen Oberflächen in Abhängigkeit vom Temperaturfeld.

In Bild 7 ist ein homogenes isotropes Bauteil mit einer strukturierten Oberfläche skizziert.

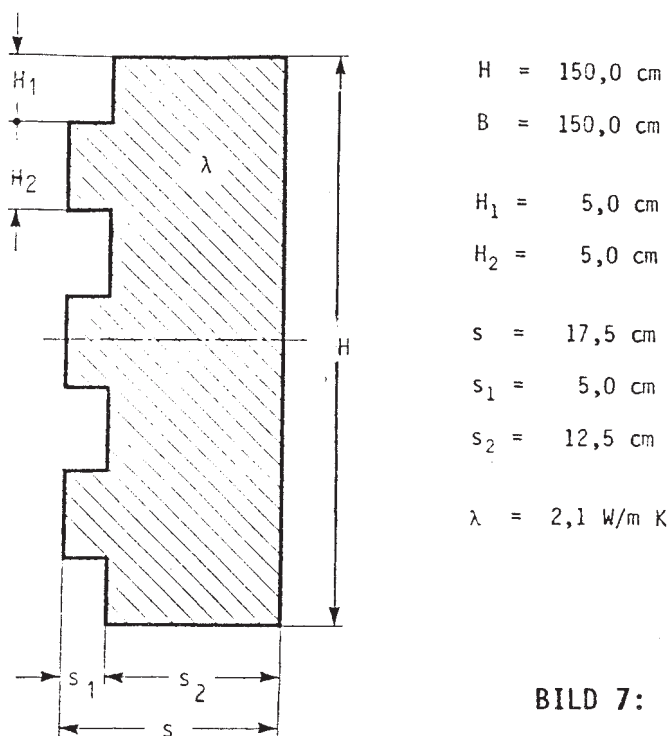


BILD 7: Homogenes isotropes Bauteil mit einer strukturierten Oberfläche.

Die numerische Simulation des in Bild 7 angegebenen Bauteils ergibt bei den verschiedenen Randbedingungen die in Bild 8 angegebenen Temperaturfelder. Aus den in der Tabelle (Bild 8) ebenfalls angegebenen Wärmedurchlaßwiderständen dieses Bauteils bei den verschiedenen Temperaturfeldern wird ersichtlich, daß für die Messung des Wärmedurchlaßwiderstandes derartiger Bauteile erhebliche Unsicherheiten bestehen.

Aufgrund des an der wärmeren Oberfläche vorliegenden Temperaturfeldes ist die Messung eines repräsentativen Mittelwertes sehr schwierig. Bezieht man den an der wärmeren Oberfläche eintretenden Wärmestrom auf die in die Bauteilebene projizierte Fläche, so entstehen große Abweichungen von der mittleren Wärmestromdichte im Bauteil. Das bedeutet, daß auch bei homogenen isotropen Bauteilen mit nichtebenen Oberflächen das Ergebnis der Wärmedurchlaßwiderstandsermittlung von der Auswertemethode und vom jeweiligen Temperaturfeld im Bauteil abhängt.

RANDBEDINGUNGEN	$\theta_W = 20 \text{ °C}; \quad \theta_K = 0 \text{ °C}$					
	$\alpha_W = 8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ $\alpha_K = 23 \text{ W/m}^2 \text{ K}$		isotherme Oberflächen $\theta_1 = \theta_W; \quad \theta_2 = \theta_K$		$\alpha_{W1} = 8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ $\alpha_{W2} = 4 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ (12) $\alpha_K = 23 \text{ W/m}^2 \text{ K}$	
TEMPERATURFELDAUSSCHNITTE						
	WÄRMEDURCHLASSWIDERSTAND $1/\Delta$		$\text{m}^2 \text{ K/W}$	%	$\text{m}^2 \text{ K/W}$	%
		0,146 1)	100 1)	0,123 1)	84 1)	0,151 1) (0,143)
		0,070 2)	48 2)	0,062 2)	42 2)	0,073 2) (0,069)
						104 1) (98)
						50 2) (47)

- 1) Ermittlung der Mittelwerte für Temperatur und Wärmestrom als Integralmittelwerte über der gesamten wärmeren Oberfläche.
- 2) Ermittlung des Temperaturmittelwertes nur an den parallel zur Bauteilebene liegenden Flächen (anteilige Berücksichtigung). Die mittlere Wärmestromdichte ist auf die Projektionsfläche bezogen.

BILD 8: Schematische Darstellung der Temperaturfelder in einem Ausschnitt eines homogenen Bauteils mit strukturierter Oberfläche bei verschiedenen Randbedingungen und Angabe der Wärmedurchlasswiderstände.

In Bild 9 ist ein inhomogenes Bauteil mit strukturierter Oberfläche angegeben.

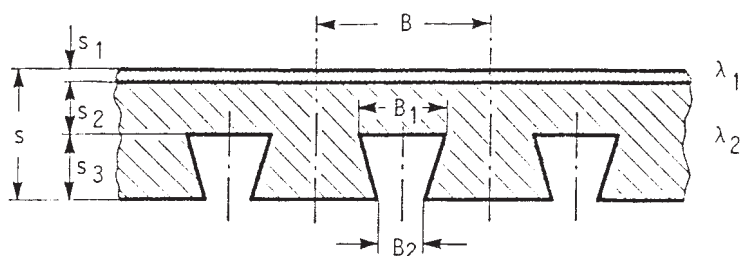


BILD 9: Inhomogenes Bauteil (symmetrischer Ausschnitt) mit strukturierter Oberfläche.

$$\begin{aligned} s &= 16,0 \text{ cm}; & B &= 20,0 \text{ cm}; & \lambda_1 &= 0,17 \text{ W/m K}; \\ s_1 &= 1,0 \text{ cm}; & B_1 &= 8,0 \text{ cm}; & \lambda_2 &= 0,04 \text{ W/m K}. \\ s_2 &= 4,5 \text{ cm}; & B_2 &= 2,5 \text{ cm}; \\ s_3 &= 10,5 \text{ cm}; \end{aligned}$$

Da sich bei Bauteilen mit nicht planparallelen Oberflächen praktisch die Randbedingungen I (isotherme Berandung) und III (konstante Wärmestromdichte an der wärmeren Oberfläche) nicht realisieren lassen, wird für das im Bild 9 angegebene Beispiel nur das Temperaturfeld bei konvektivem Wärmeübergang mit jeweils konstanten Wärmeübergangskoeffizienten an beiden Oberflächen angegeben (vergleiche Bild 10).

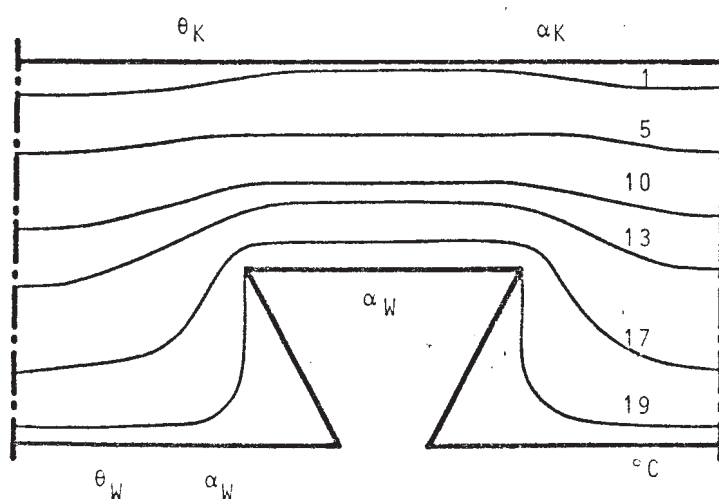


BILD 10: Schematische Darstellung des Temperaturfeldes in einem inhomogenen Bauteil mit strukturierter Oberfläche.

Berechnung für:

$$\theta_W = 20 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\theta_K = 0 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\alpha_W = 8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$\alpha_K = 23 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Abmessungen gemäß Bild 9.

Bei inhomogenen Bauteilen und bei Bauteilen mit nicht ebenen planparallelen Oberflächen werden konstante Wärmeübergangskoeffizienten ebenfalls praktisch nicht realisierbar sein.

Der sich daraus ergebende Einfluß auf die meßtechnische Ermittlung des Wärmedurchlaßwiderstandes wird im nachfolgenden Abschnitt diskutiert.

2.2.5 Praktisch realisierbare Randbedingungen.

Wie an einigen Beispielen im vorangegangenen Abschnitt gezeigt wurde, ist der Wärmedurchlaßwiderstand für inhomogene Bauteile und für Bauteile mit nicht ebenen Oberflächen keine bauteilspezifische Größe und nur bei identischen Randbedingungen und geometrisch ähnlichen Berandungsgeometrien vergleichbar. Zur meßtechnischen Ermittlung des Wärmedurchlaßwiderstandes solcher Bauteile müssen zum Ergebnis der Messung die Randbedingungen mit angegeben werden. Für die Meßpraxis besteht die Schwierigkeit darin, definierte Randbedingungen herzustellen.

Zur Beurteilung der Genauigkeit des Meßergebnisses muß untersucht werden, wie sich Unsicherheiten bei den Randbedingungen auf das Meßergebnis auswirken.

Für die Annahme konstanter Wärmeübergangskoeffizienten auf beiden Wandseiten bei jeweils konstanten Umgebungstemperaturen ist in der Literatur der Begriff "Hilfsschichtmethode" angegeben.

Auf beiden Seiten der Wand werden ebene Hilfsschichten so gewählt, daß deren äußere Grenzfläche auf der wärmeren Seite im Abstand s_1 isotherm und gleich der Umgebungstemperatur T_W und auf der kälteren Seite im Abstand s_2 isotherm und gleich der Umgebungstemperatur T_K ist (vergleiche Bild 11). Für diese Hilfswand der Dicke $s_1 + s + s_2$ stellen die isothermen Oberflächen physikalisch definierte Randbedingungen dar, wenn jeweils konstante Wärmeübergangskoeffizienten vorliegen.

In diesem Fall kann ein Wärmedurchgangskoeffizient k innerhalb eines Bauteilausschnittes folgendermaßen definiert werden:

$$k = \frac{\Phi}{A (T_W - T_K)} = \frac{\Phi}{A (\theta_W - \theta_K)} = \frac{q}{\Delta\theta} \quad (51)$$

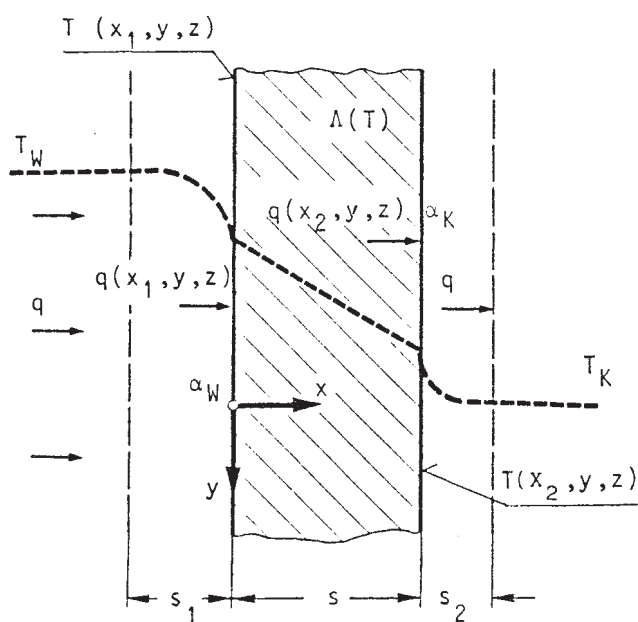


Bild 11: Hilfsschichtmethode.

Unter der Annahme, daß konstante Wärmeübergangskoeffizienten auf beiden Seiten eines ebenen planparallelen Bauteils vorliegen, stellt sich bei homogenen isotropen Bauteilen ein eindimensionales Temperaturfeld ein; ebenso bei ausschließlich hintereinander liegenden ebenen homogenen isotropen Schichten.

Da in diesem Fall der nach Gleichung (1) definierte Wärmedurchlaßwiderstand vom Temperaturfeld unabhängig ist, hängt der nach Gleichung (51) definierte Wärmedurchgangskoeffizient bei konstanten Umgebungstemperaturen α_W und α_K noch von den jeweils vorliegenden Wärmeübergangskoeffizienten ab:

$$k(\alpha_W, \alpha_K) = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_W} + \frac{1}{\Lambda} + \frac{1}{\alpha_K}} \quad (52)$$

Aus der Messung des Wärmedurchgangskoeffizienten $k(\alpha_1, \alpha_2)$ bei beliebigen Wärmeübergangskoeffizienten α_1 und α_2 kann in diesem Fall der für definierte Werte α_W und α_K gültige Wärmedurchgangskoeffizient berechnet werden:

$$k(\alpha_W, \alpha_K) = \frac{1}{\left(\frac{1}{k}\right)(\alpha_1, \alpha_2) - \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}\right) + \frac{1}{\alpha_W} + \frac{1}{\alpha_K}} \quad (53)$$

Bei inhomogenen Bauteilen und bei Bauteilen mit strukturierten Oberflächen stellt sich bei konstanten Wärmeübergangskoeffizienten im Bauteil ein dreidimensionales Temperaturfeld ein.

Der Wärmedurchlaßwiderstand ist in diesem Fall kein konstanter Wert; Gleichung (53) kann bei der Messung solcher Bauteile nicht angewendet werden.

In Bild 12 ist für das in Bild 5 angegebene Beispiel a.) die Abhängigkeit des Wärmedurchlaßwiderstandes von den Wärmeübergangskoeffizienten bei konstanten Umgebungstemperaturen T_W und T_K angegeben.

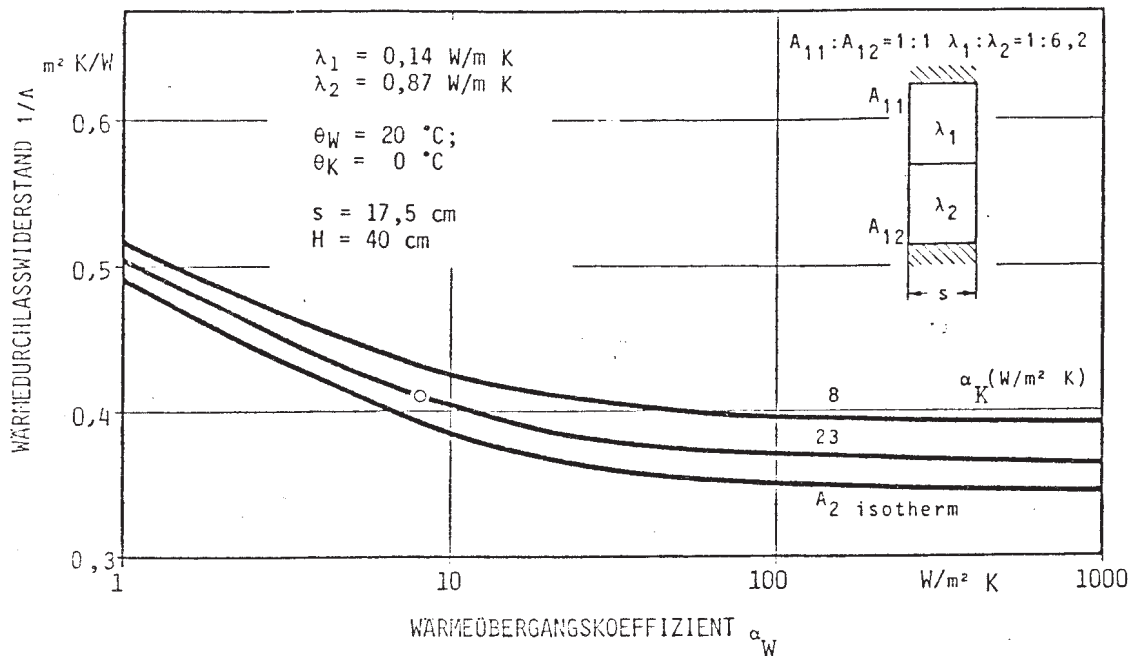


BILD 12: Abhängigkeit des Wärmedurchlaßwiderstandes einer inhomogenen Wand von den Wärmeübergangskoeffizienten auf beiden Wandseiten.

Für die in Bild 12 angegebenen Werte wurden adiabate Randstirnflächen vorausgesetzt.

Bei isothermen Oberflächen beträgt der Wärmedurchlaßwiderstand dieser Wand

$$\frac{1}{\Lambda(\text{isoth.})} = 0,346 \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

und liegt gegenüber dem Fall $\alpha_W = 8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ und $\alpha_K = 23 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ für den

$$\frac{1}{\Lambda(8;23)} = 0,41 \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

ermittelt wurde, um 15,6 % tiefer.

Wenn α_W zwischen $4 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ und $12 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ und α_K zwischen $8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ und $23 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ schwankt streut der Wärmedurchlaßwiderstand zwischen $0,398 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ und $0,458 \text{ m}^2 \text{ K/W}$; gegenüber dem Wert $1/\Lambda(8;23)$ sind das Abweichungen zwischen -2,9 % und +11,7 %; gegenüber $1/\Lambda(\text{isoth.})$ liegen diese Werte um 14,9 % bis 32,2 % höher.

In Bild 13 ist die Abhängigkeit des Wärmedurchlaßwiderstandes vom Wärmeübergangskoeffizienten auf der Kaltseite, bei konstanter Wärmestromdichte an der wärmeren Oberfläche, angegeben. Dabei wurden die Wärmestromdichten so gewählt, daß durch das Bauteil der gleiche Wärmestrom hindurchtritt wie bei konvektivem Wärmeübergang (entsprechend Bild 12) mit $\alpha_W = 8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ und $\alpha_K = 23 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ oder wie im Falle isothermer Oberflächen mit $\theta_W = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $\theta_K = 0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Die Erhöhung der Wärmestromdichte führt nur zu einer Anhebung des Temperaturniveaus in der Wand, wie die in Bild 13 angegebenen Beispiele zeigen:

$$q_1 = 35 \text{ W/m}^2 \text{ (konstant)}$$

(entsprechend q bei $\alpha_W = 8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ und $\alpha_K = 23 \text{ W/m}^2 \text{ K}$).

$$q_1 = 58 \text{ W/m}^2 \text{ (konstant)}$$

(entsprechend q bei isothermen Oberflächen, $\theta_W = \theta_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ und $\theta_K = \theta_2 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$).

Bei konstanter Wärmestromdichte an der wärmeren Oberfläche ist der Wärmedurchlaßwiderstand vom Betrag der Wärmestromdichte nahezu unabhängig.

Im Bereich zwischen $\alpha_2 = 8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ und $23 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ unterscheiden sich die ermittelten Werte nur um 0,2 %. Sie liegen jedoch insgesamt um ca. 38 % über den Werten bei beidseitig konvektivem Wärmeübergang $1/\Lambda(8;23)$ und bis zu 66,5 % über dem Wert $1/\Lambda(\text{isoth.})$.

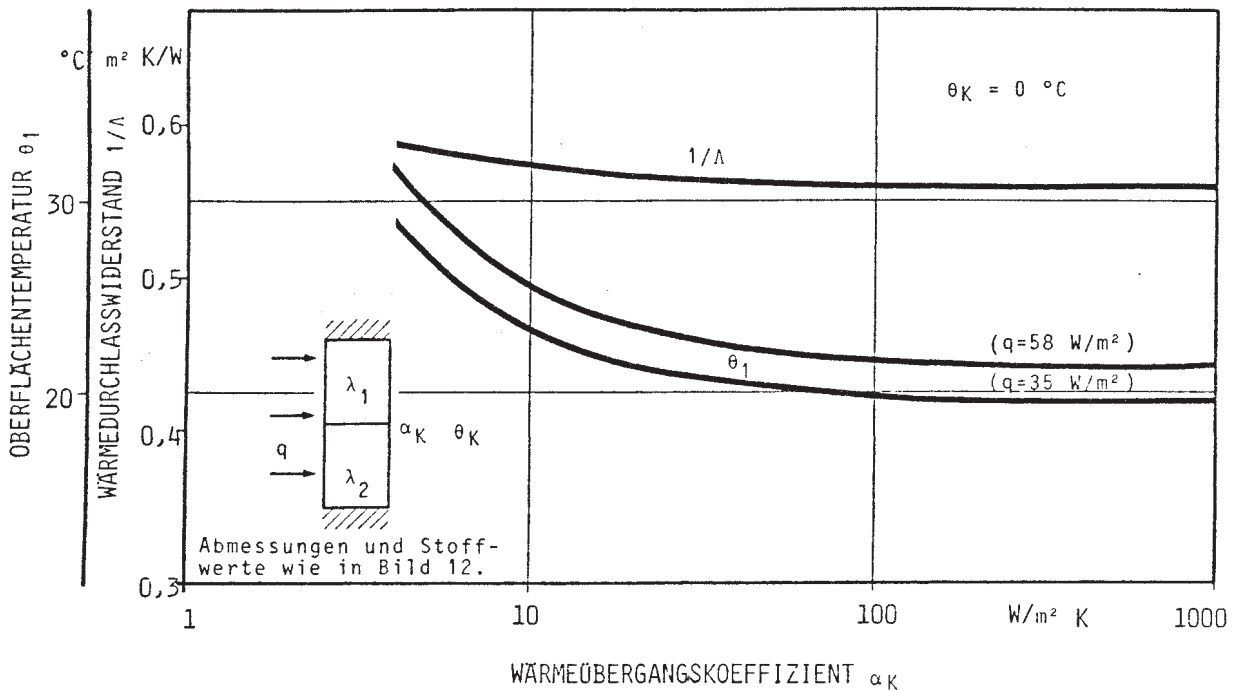


BILD 13: Abhängigkeit des Wärmedurchlasswiderstandes einer inhomogenen Wand vom Wärmeübergangskoeffizienten auf der Kaltseite bei konstanter Wärmestromdichte auf der Warmseite.

In Bild 14 ist ein entsprechendes Diagramm für ein Mauerwerk mit Vollsteinen des Formats $b \cdot h \cdot s = 365 \text{ mm} \cdot 238 \text{ mm} \cdot 175 \text{ mm}$ mit 12 mm breiten Lagerfugen und 10 mm breiten Stoßfugen angegeben. Für die Wärmeleitfähigkeit der Steine wurde der Wert $\lambda = 0,14 \text{ W/m K}$ und für die Fugen $\lambda = 0,87 \text{ W/m K}$ angenommen.

Der Wärmedurchlasswiderstand dieses Mauerwerks beträgt bei isothermen Oberflächen mit $\theta_W = \theta_1 = 20^\circ C$ und $\theta_K = \theta_2 = 0^\circ C$

$$\frac{1}{\Lambda(\text{isoth.})} = 0,904 \text{ m}^2 \text{ K/W.}$$

Bei $\theta_W = 20^\circ C$, $\alpha_W = 8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ und $\theta_K = 0^\circ C$, $\alpha_K = 23 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ist der Wärmedurchlasswiderstand dieses Mauerwerks 5,5 % höher

$$\frac{1}{\Lambda(8;23)} = 0,954 \text{ m}^2 \text{ K/W.}$$

Für den entsprechenden Streubereich der Wärmeübergangskoeffizienten wie im Beispiel auf Seite 35, ergibt sich für den Wärmedurchlaßwiderstand dieses Mauerwerks eine Streuung zwischen $0,951 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ und $0,970 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ also gegenüber dem Wert $1/\Delta(8;23)$ Abweichungen zwischen $-0,3 \%$ und $+1,7 \%$; gegenüber $1/\Delta(\text{isoth.})$ um $5,2 \%$ bis $7,3 \%$ höhere Werte, obwohl der Fugenanteil im Querschnitt der Wand nur $7,34 \%$ beträgt.

Bei diesen angegebenen Werten wird die exakte Ermittlung der mittleren Oberflächentemperaturen und der mittleren Wärmestromdichte vorausgesetzt.

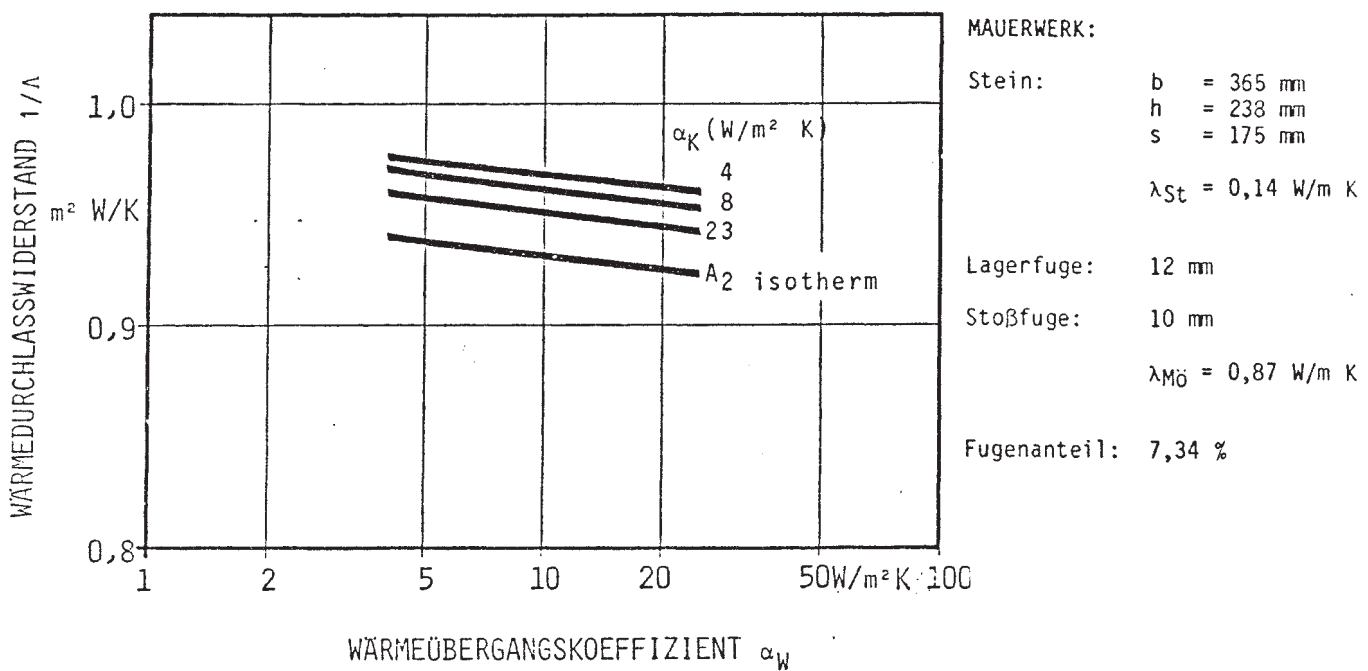


BILD 14: Wärmedurchlaßwiderstand eines Mauerwerkes in Abhängigkeit von den Wärmeübergangskoeffizienten.

Für das in Bild 5 d.) angegebene Beispiel ergeben sich mit den in Tabelle 1 angegebenen Stoffwerten und Abmessungen für den Wärmedurchlaßwiderstand in Abhängigkeit von den Randbedingungen folgende Werte:

$$1/\Lambda(8;23) = 0,282 \text{ m}^2 \text{ K/W } (\cong 100 \%)$$

und

$$1/\Lambda(\text{isoth.}) = 0,256 \text{ m}^2 \text{ K/W } (\cong 91 \%).$$

Da der Wärmedurchlaßwiderstand inhomogener Bauteile bei konvektiver Wärmeübertragung von den jeweiligen Wärmeübergangskoeffizienten abhängt ergeben sich selbst wenn bei der Messung über der gesamten Meßfläche konstante Wärmeübergangskoeffizienten gewährleistet werden können, für die Definition eines Wärmedurchgangskoeffizienten k solcher Bauteile Unsicherheiten dann, wenn für dessen Ermittlung Messungen bei verschiedenen Wärmeübergangskoeffizienten zugelassen werden.

Korrekturen entsprechend Gleichung (53) führen in diesem Fall zu von den jeweiligen Wärmeübergangskoeffizienten abhängigen Werten.

Eine weitere Schwierigkeit für die meßtechnische Ermittlung des Wärmedurchlaßwiderstandes oder des Wärmedurchgangskoeffizienten ergibt sich durch die Tatsache, daß bei Prüfeinrichtungen in denen durch entsprechende Luftventilation definierte Wärmeübergangskoeffizienten eingestellt werden sollen, über der gesamten Meßfläche konstante Wärmeübergangskoeffizienten nicht gewährleistet werden können; meßtechnisch ist dies auch nicht kontrollierbar. Bei Bauteilen mit strukturierten Oberflächen ist dies sogar unmöglich.

Für das in Bild 9 skizzierte Bauteil werden bei Luftventilation in den Vertiefungen andere Wärmeübergangskoeffizienten vorliegen, als am vorstehenden Oberflächenbereich. Bei der Messung dieses Bauteils können definierte Randbedingungen unter Umständen nicht angegeben werden.

Bei Anordnung dieses Bauteils zwischen einem Warmraum konstanter Temperatur und einem Kaltraum konstanter Temperatur hängt der durch das Bauteil fließende Wärmestrom von den Wärmeübergangskoeffizienten ab. Dabei ist eine Vielzahl verschiedener Temperaturfelder bei gleicher Differenz der mittleren Oberflächentemperaturen möglich. Für derartige Bauteile ist damit der Wärmedurchlaßwiderstand nicht eindeutig und nur mit Angabe der Randbedingungen reproduzierbar.

In der Praxis werden sich bei derartigen Bauteilen die Wärmeübergangskoeffizienten an den vorstehenden, von denen in vertieften Oberflächenbereichen unterscheiden.

Im vertieften Bereich können sich bei Luftventilation Strömungstodzonen bilden und für den Strahlungswärmeaustausch steht ein geringerer Winkelbereich zur Verfügung. In Bild 15 ist die relative Änderung des Wärmedurchlaßwiderstandes bei Variation des Wärmeübergangskoeffizienten im vertieften Bereich bei sonst konstanten Bedingungen angegeben.

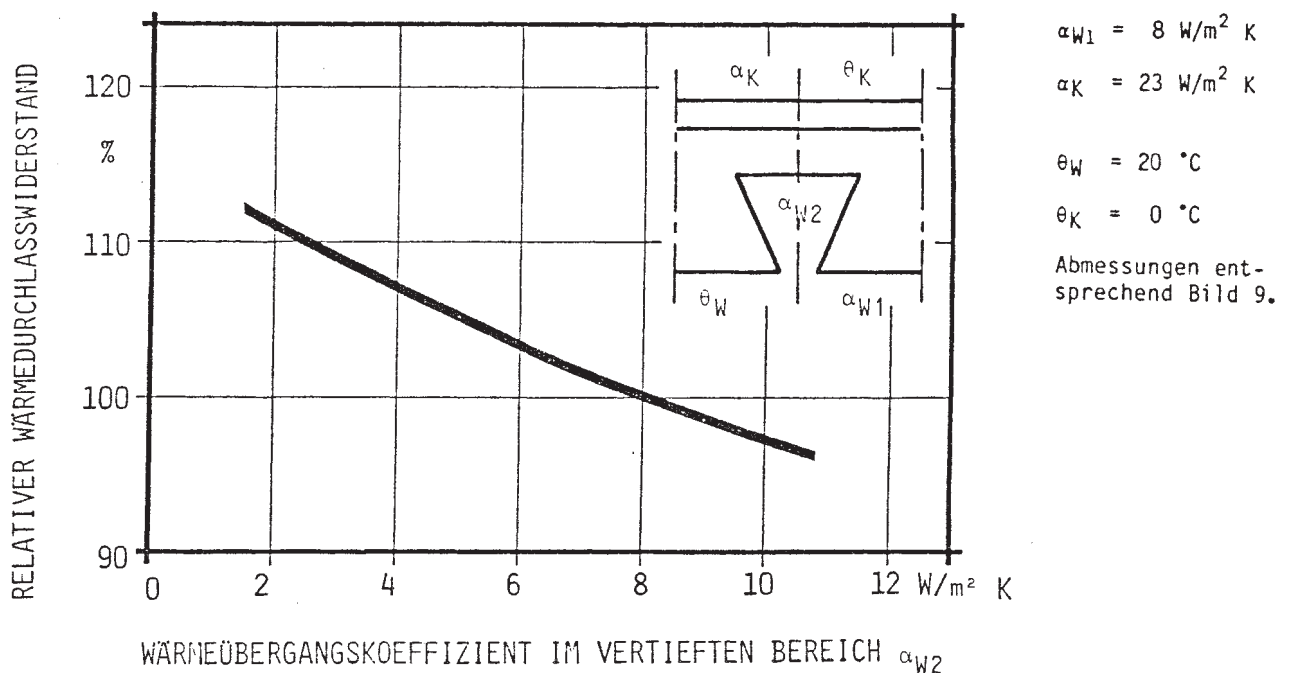


Bild 15: Abhängigkeit des Wärmedurchlaßwiderstandes vom Wärmeübergangskoeffizienten im vertieften Oberflächenbereich eines inhomogenen Bauteils mit strukturierter Oberfläche.

Wie obige Beispiele verdeutlichen, müssen bei inhomogenen und bei nicht planparallelen Bauteilen zu den Meßergebnissen die Meßbedingungen mit angegeben werden. Für allgemein gültige Prüfvorschriften müssen zur Vergleichbarkeit der Meßwerte entweder einheitliche, genau definierte Meßbedingungen festgelegt werden, oder es müssen Faktoren eingeführt oder ermittelt werden, die den jeweiligen geometrischen Aufbau berücksichtigen.

2.2.6. Nichtadiabate Randstirnflächen.

Praktisch ist die mittlere Wärmestromdichte im Probekörper nur über die Messung des an der wärmeren Oberfläche eintretenden oder an der kälteren Oberfläche austretenden Wärmestromes möglich.

Bei nichtadiabaten Randstirnflächen ist damit die ermittelte Wärmestromdichte nicht mit der für das im Bauteil vorliegende Temperaturfeld charakteristischen mittleren Wärmestromdichte identisch. Dies ist an den in Bild 16 dargestellten Beispielen verdeutlicht.

Bei jeweils drei adiabaten Randstirnflächen wurden bei verschiedenen Bedingungen an der vierten Stirnfläche und an den Probenoberflächen die Temperaturfelder in der Probe berechnet. Mit der mittleren Wärmestromdichte an der wärmeren Wandoberfläche und der Differenz der mittleren Oberflächentemperaturen (entsprechend Gleichung (1)) wurden die in der Tabelle in Bild 16 angegebenen Wärmedurchlaßwiderstände ermittelt. Aus den dort angegebenen Ergebnissen ist ersichtlich, daß bei nichtadiabaten Stirnflächen ganz erhebliche Fehler entstehen können, die das Meßergebnis unbrauchbar machen.

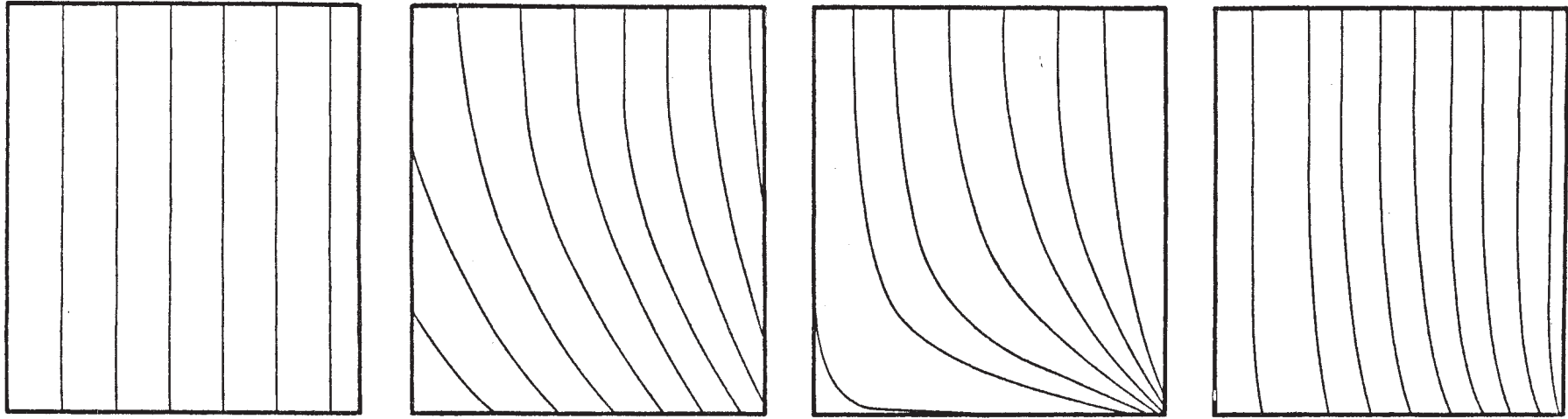
Durch die endliche Ausdehnung der Bauteile mit unterschiedlichen Temperaturen auf beiden Seiten und durch im Randstirnflächenbereich angrenzende Konstruktionen wird das Temperaturfeld beeinflusst. Dies ist auch bei der Messung von Bauteilen mit Maske von Bedeutung.

Das sich im Randstirnflächenbereich einstellende Temperaturfeld hängt von den Randbedingungen, von den Stoffwerten und von den geometrischen Verhältnissen ab.

Die einfachste Methode Rand- und Umgebungstöreinflüsse zu minimieren ist das "Schutzringprinzip", da sich Störungen über die Randstirnflächen zur Probenmitte hin verringern.

Im Zusammenhang mit Untersuchungen an Plattenapparaturen hat WOODSIDE [3] für isotherme Randstirnflächen, was praktisch schwer realisierbar ist, eine Lösung für das Temperaturfeld in einer Schnittebene senkrecht zu den Wandoberflächen ermittelt. Mit Hilfe der Abweichung des errechneten Temperaturfeldes vom idealen Temperaturfeld gibt er eine Fehlerabschätzung für die Ermittlung von λ an.

Bei variablen Bedingungen an den Randstirnflächen hat BODE [4] für kreisförmige und quadratische Wandausschnitte an analytischen Lösungen der Temperaturfelder für isotherme Oberflächen eine Randfehlerabschätzung für die Ermittlung von λ abgeleitet, und Schutzringdimensionierungs-Anweisungen zur Fehlerminimierung angegeben.



BEISPIEL 1

BEISPIEL 3

BEISPIEL 4

BEISPIEL 5

BEI- SPIEL	WAND			RANDBEDINGUNGEN								SIMULATIONSWERTE						
	λ	s	$\frac{1}{\Lambda}$	Warme Seite		Kalte Seite		Stirnflächen		θ_{∞}	α_{∞}	θ_1	θ_2	Φ_W	Φ_K	Φ_{∞}	$\frac{1}{\Delta r}$	δ
				θ_W	α_W	θ_K	α_K	oben	vorne hinten									
-	W/m K	m	m ² K/W	°C	W/m ² K	°C	W/m ² K	-	-	°C	W/m ² K	°C	°C	W	W	W	m ² K/W	%
1	2,1	0,175	0,083	20	8	0	23	adiabat		adiabat		10,1	3,5	15,9	15,9	0	0,083	0
2	2,1	0,175	0,083	Oberfläche isotherm		Oberfläche isotherm		adiabat		adiabat		20,0	0	48,0	48,0	0	0,083	0
3	2,1	0,175	0,083	20	8	0	23	adiabat		20	8	12,5	5,3	12,0	24,3	12,3	0,121	44,9
4	2,1	0,175	0,083	Oberfläche isotherm		Oberfläche isotherm		adiabat		20 isotherm		20,0	0,0	29,6	124,3	94,7	0,135	62,2
5	2,1	0,175	0,083	Oberfläche isotherm		Oberfläche isotherm		adiabat		20	8	20,0	0,0	44,2	56,0	11,8	0,091	8,6

BILD 16: Schematische Darstellung der Temperaturfelder im Randstirnflächenbereich eines Probekörpers (B = 1 m; H = 0,2 m) bei verschiedenen Randbedingungen.

Nachfolgend soll durch numerische Simulation von Bauteilen untersucht werden, welche Auswirkungen verschiedene Randstirnflächenbedingungen auf die Ermittlung des Wärmedurchlaßwiderstandes haben.

Bei konvektiver Wärmeübertragung mit konstanten Wärmeübergangskoeffizienten auf beiden Seiten des Probekörpers stellt sich sowohl bei der Messung mit Maske als auch bei Abdeckung der Randstirnflächen mit Dämmstoff im Randstirnflächenbereich ein Temperaturfeld wie in Bild 6, Beispiel 5 a.), II, ein. Dies führt zu einem Wärmestrom durch die Randstirnflächen. Bei gleichen Wärmeübergangskoeffizienten an beiden Oberflächen ist in homogenen isotropen Probekörpern, vorausgesetzt die Wärmeleitfähigkeit ist im vorliegenden Temperaturbereich von der Temperatur unabhängig, das Isothermenfeld zur Probekörpermittelebene symmetrisch. In diesem Fall ist der Gradient des Temperaturfeldes im Randstirnflächenbereich der wärmeren Probekörperhälfte in Richtung Probekörper und in der kälteren Probekörperhälfte in Richtung Dämmstoff gerichtet. In der Summe ist der Wärmestrom durch die Randstirnflächen Null. Die Randstirnflächen sind "quasi-adiabat". Der Wärmedurchlaßwiderstand kann in diesem Fall exakt gemessen werden. Dabei spielen weder die Wärmeleitfähigkeiten von Maske oder Dämmstoff und Probekörper, noch die Ringbreite, noch deren Dicke eine Rolle.

Jedoch schon die Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha_W = 8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ und $\alpha_K = 23 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ führen zu Fehlern infolge nichtadiabater Randstirnflächen (in diesem Fall ist das Isothermenfeld im Probekörper nicht symmetrisch zur Mittelebene).

Zur Erläuterung der nachfolgenden Berechnungen ist in Bild 17 die Konstruktion bei Messung mit Maske oder mit Randstirnflächendämmung skizziert.

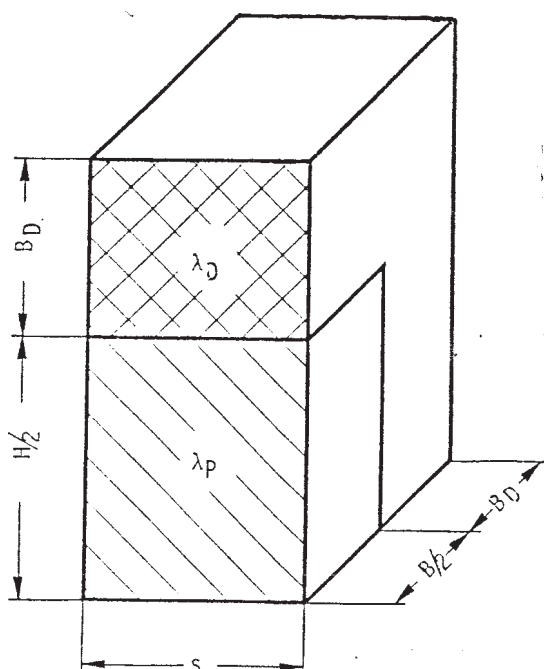


BILD 17: Schematische Darstellung: Randstirnflächendämmung oder Messung mit Maske.

Um allein den Einfluß des sich aufgrund der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten einstellenden Temperaturfeldes im Übergangsbereich zwischen Probekörper und Dämmstoffring mit der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_D = 0,03 \text{ W/m K}$ zu ermitteln, wurde für den Dämmstoffring eine Breite von $B_D = 1,4 \text{ m}$, idealer Wärmekontakt zum Probekörper und adiabate Außenstirnflächen angenommen.

In Tabelle 2 ist das Ergebnis der Simulation homogener isotroper Probekörper der Größe $1,5 \text{ m} \cdot 1,5 \text{ m} \cdot s$ angegeben. Der berechnete Wärmedurchlaßwiderstand wurde aus der Differenz der mittleren Oberflächentemperaturen und der mittleren Wärmestromdichte an der wärmeren Oberfläche des Probekörpers berechnet.

Die numerischen Simulationen wurden mit folgenden Randbedingungen durchgeführt: $\theta_W = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $\theta_K = 0 \text{ }^\circ\text{C}$; $\alpha_W = 8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, $\alpha_K = 23 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Zum Vergleich sind die Werte bei adiabaten Randstirnflächen als "Istwerte" angegeben.

In den Spalten: Simulationsergebnis in Tabelle 2 sind neben den bei nichtadiabaten Randstirnflächen ermittelten Wärmedurchlaßwiderständen des gesamten Probekörpers die relativen Abweichungen vom Istwert für verschiedene zentrische Ausschnitte angegeben.

Bei praktisch kaum noch verbesserbarer Randstirnflächendämmung ist zum Beispiel beim Probekörper Nr.12 infolge nichtadiabater Randstirnflächen ein Fehler von 1,6 % unvermeidlich.

Bei Beibehaltung der Probekörperaußenabmessung und Verkleinerung des Meßausschnittes (Schutzringprinzip), verkleinert sich dieser Fehler. Für zentrisch gelegene Ausschnittsflächen von $1 \text{ m} \cdot 1 \text{ m}$ und $0,5 \text{ m} \cdot 0,5 \text{ m}$ verringern sich relativen Abweichungen nur noch unbedeutend (vergleiche Tabelle 2).

Der Fehler infolge nichtadiabater Randstirnflächen nimmt zu mit zunehmender Wärmeleitfähigkeit und zunehmender Dicke des Probekörpers.

Die angegebenen Fehler sind zwar gering und scheinen deshalb keine praktische Bedeutung zu haben, sie könnten jedoch, mit gleichen Wärmeübergangskoeffizienten auf beiden Wandseiten, einfach vermieden werden. Bei der Messung kleinerer oder inhomogener Probekörper können nichtadiabate Randstirnflächen jedoch zu unzulässig großen Fehlern führen.

In Tabelle 3 sind dazu einige Beispiele angegeben.

Nr.	s	λ	ISTWERT		SIMULATIONSERGEBNIS		
			$1/\Lambda$	$1/\Lambda_{\text{ges}}$	$\frac{\Lambda - \Lambda_{\text{ges}}}{\Lambda_{\text{ges}}} \cdot 100$	$\frac{\Lambda - \Lambda_{100}}{\Lambda_{\text{ges}}} \cdot 100$	$\frac{\Lambda - \Lambda_{50}}{\Lambda_{50}} \cdot 100$
-	m	W/m K	$\text{m}^2 \text{ K/W}$	$\text{m}^2 \text{ K/W}$	%	%	%
1	0,175	0,14	1,250	1,260	0,8	0,01	0,01
2	0,175	1,3	0,135	0,136	1,2	0,1	0,1
3	0,175	2,1	0,083	0,084	1,2	0,2	0,1
4	0,24	0,14	1,714	1,730	0,9	0,05	0,01
5	0,24	1,3	0,185	0,187	1,4	0,2	0,1
6	0,24	2,1	0,114	0,116	1,4	0,3	0,1
7	0,3	0,14	2,143	2,160	1,0	0,1	0,05
8	0,3	1,3	0,231	0,234	1,5	0,3	0,1
9	0,3	2,1	0,143	0,145	1,5	0,4	0,15
10	0,365	0,14	2,607	2,630	1,0	0,1	0,05
11	0,365	1,3	0,281	0,285	1,6	0,5	0,15
12	0,365	2,1	0,174	0,177	1,6	0,7	0,2

TABELLE 2: Einfluß nichtadiabater Randstirnflächen trotz maximaler Randstirnflächendämmung auf das Ergebnis der Wärmedurchlaßwiderstandsermittlung homogener isotroper Probekörper.

Bezeichnungen gemäß Bild 17:

Probekörper: $B \cdot H = 1,5 \text{ m} \cdot 1,5 \text{ m}$

Wärmedämmstoffring: $B_D = 1,4 \text{ m}$; $\lambda_D = 0,03 \text{ W/m K}$

Randbedingungen: $\theta_W = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; $\theta_K = 0 \text{ }^\circ\text{C}$;

$\alpha_W = 8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, $\alpha_K = 23 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

PROBENABMESSUNG		STOFFWERTE		SIMULATIONSERGEBNIS			
B,H	s	λ	$\frac{1}{\Lambda}$	θ_1	θ_2	q	$\frac{1}{\Lambda_r}$
m	m	W/m K	m ² K/W	°C	°C	W/m ²	%
0,3	0,175	0,87	0,20	13,8	2,4	49,9	113
0,5	0,175	0,87	0,20	13,6	2,4	51,5	108
0,7	0,175	0,87	0,20	13,5	2,4	52,2	106
1,0	0,175	0,87	0,20	13,4	2,4	52,8	104
0,3	0,375	0,87	0,43	16,4	1,5	29,1	119
0,5	0,375	0,87	0,43	16,2	1,5	30,7	111
0,7	0,375	0,87	0,43	16,1	1,5	31,4	108
1,0	0,375	0,87	0,43	16,0	1,5	32,0	106
0,3	0,375	1,3	0,29	15,3	1,9	38,0	122
0,5	0,375	1,3	0,29	15,0	1,9	40,1	113
0,7	0,375	1,3	0,29	14,9	1,9	41,1	109
1,0	0,375	1,3	0,29	14,8	1,9	41,9	106
0,3	0,375	2,1	0,18	13,7	2,6	50,2	124
0,5	0,375	2,1	0,18	13,4	2,6	53,0	114
0,7	0,375	2,1	0,18	13,2	2,6	54,3	110
1,0	0,375	2,1	0,18	13,1	2,5	55,3	107

TABELLE 3: Einfluß nichtadiabater Randstirnflächen auf das Ergebnis der Wärmedurchlaßwiderstandsermittlung homogener isotroper Probekörper beim Einbau mit Maske.

Maske: Außenabmessung 1,5 m x 1,5 m;
 $\lambda_D = 0,03$ W/m K.

Randbedingungen: $\theta_W = 20$ °C; $\theta_K = 0$ °C;
 $\alpha_W = 8$ W/m² K; $\alpha_K = 23$ W/m² K

Quadratischer Probekörper: B x H x s.

3. ZUSAMMENFASSUNG DER VORAUSSETZUNGEN FÜR EINE EINDEUTIGE DEFINITION DES WÄRMEDURCHLAßWIDERSTANDES VON BAUTEILEN.

In homogenen isotropen Bauteilen mit ebenen planparallelen Oberflächen und temperaturunabhängiger Wärmeleitfähigkeit ist der nach Gleichung (1) definierte Wärmedurchlaßwiderstand bei Ermittlung innerhalb eines Bauteilausschnittes oder am Gesamtbauteil nur dann vom Temperaturfeld unabhängig, wenn die Randstirnflächen des Meßausschnittes adiabatisch sind oder wenn die Summe der Wärmeströme durch die Randstirnflächen Null ist.

Bei inhomogenen, bereichsweise homogenen und isotropen Bauteilen, die entweder ausschließlich hintereinander liegende ebene planparallele Schichten oder ausschließlich nebeneinander liegende Bereiche unterschiedlicher jedoch temperaturunabhängiger Wärmeleitfähigkeiten haben, ist bei eindimensionalen Temperaturfeldern der Wärmedurchlaßwiderstand vom Temperaturniveau und vom Temperaturgradienten im Bauteil unabhängig.

Bei mehrdimensionalen Temperaturfeldern muß bei hintereinander liegenden Schichten in jeder Schicht die Summe der Wärmeströme durch die Randstirnflächen Null sein. Dagegen ist bei nebeneinander liegenden Bereichen unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit selbst bei adiabatischen Randstirnflächen, der Wärmedurchlaßwiderstand nicht eindeutig definiert. Verschiedene Temperaturfelder in diesen Bauteilen können zu jeweils gleicher Differenz der mittleren Oberflächentemperaturen führen. Um für verschiedene Bauteile vergleichbare Wärmedurchlaßwiderstände zu erhalten, müssen diese bei jeweils gleichen exakt definierten Randbedingungen ermittelt werden.

Bei inhomogenen Bauteilen undefinierbarer Bereichszusammensetzung oder definierter jedoch sowohl hinter- als auch nebeneinander liegender Bereiche unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit, sind eindimensionale Temperaturfelder nicht herstellbar. Um vergleichbare Wärmedurchlaßwiderstände zu erhalten müssen auch hier zum Ergebnis die exakt definierten Randbedingungen, für die dieses Ergebnis gilt, mit angegeben werden.

Dies gilt ebenso für Bauteile mit nicht planparallelen Oberflächen.

Homogene Bauteile mit temperaturabhängiger Wärmeleitfähigkeit können, unter Berücksichtigung des Temperaturgradienten im Bauteil, als hintereinander geschichtete Bauteile betrachtet werden.

Feuchte Bauteile mit definierter stationärer Feuchteverteilung (ohne Wasserdampfdiffusion) können entsprechend in einem Schichtenmodell behandelt werden.

Bei ungleichmäßiger Feuchteverteilung sind homogene Bauteile wie inhomogene Bauteile zu betrachten. In diesem Falle ist auch anisotropes Wärmeleitverhalten nicht auszuschließen.

4. DIE EXPERIMENTELLE ERMITTLUNG DES WÄRMEDURCHLASSWIDERSTANDES VON BAUTEILEN.

Bei der experimentellen Ermittlung des Wärmedurchlaßwiderstandes von Bauteilen ergeben sich neben den Problemen der Erzeugung und Aufrechterhaltung konstanter Randbedingungen auch bei Ausschluß der Problematik des Stofftransports die durch Trocknung der Proben und Messung in klimatisierten Räumen verringert werden kann, eine Reihe weiterer Faktoren, die das Meßergebnis beeinflussen können.

Neben Fertigungstoleranzen und Fertigungsunterschieden von Steinen und Fugen in Mauerwerk, die die Anwendung statistischer Methoden bei der Auswertung von Einzelergebnissen erforderlich macht, ist zum Beispiel auch die Meßwerterfassung fehlerbehaftet.

Die Annäherung an den Beharrungszustand erfolgt unter Umständen mit fehlerbehafteten Meßwerten durch Regelungen oder Steuerungen, die einen vorgegebenen Sollwert nur innerhalb gewisser Bandbreiten annähern können.

4.1 VERFAHREN ZUR MESSUNG DES WÄRMEDURCHLASSWIDERSTANDES VON BAUTEILEN.

Die Messung des Wärmedurchlaßwiderstandes von Bauteilen bei stationären Temperaturfeldern lassen sich grundsätzlich in zwei Verfahren unterteilen:

1. Relative oder indirekte Verfahren;
2. Absolutverfahren oder direkte Verfahren.

Relative oder indirekte Verfahren:

Diese Verfahren beruhen auf dem Vergleich der zu untersuchenden Probekörper mit einer bekannten Substanz. Sie sind in der Literatur unter der Bezeichnung "Hilfswandmethode" anzutreffen. Die Entwicklung der Wärmestrommeßplatten geht auf diese Methode zurück.

Absolutverfahren oder direkte Verfahren:

Bei diesen Verfahren werden die Oberflächentemperaturen und der Wärmestrom **direkt** gemessen. Mit diesem Verfahren können prinzipiell genauere Ergebnisse erzielt werden, weil zu jedem Relativ-Verfahren eine Eichung oder eine Kalibrierung durch ein Absolutverfahren erforderlich ist.

Bezüglich der Probekörper kann unterschieden werden in:

- Messung an "homogenen" Platten im Laboratorium;
- Messung an Probewänden im Laboratorium;
- Messung an ausgeführten Bauten.

4.2 PRAKTISCH AUSGEFÜHRTE VERSUCHSEINRICHTUNGEN ZUR MESSUNG DES WÄRMEDURCHLASSWIDERSTANDES VON BAUTEILEN.

Aus einer Literaturdurchsicht werden nachfolgend einige ausgeführte Versuchseinrichtungen aufgezeigt und diskutiert. In [5] wird die Entwicklung der ersten Meßmethoden zur Prüfung von Mauerwerk auf "Wärmedurchlässigkeit" beschrieben. Einen kritischen Überblick der um 1919 angewandten Methoden enthält [6].

Bei Mauerwerk wurde entweder die "Wärmedurchgangszahl k " oder die "Wärmedurchlaßzahl Δ " ermittelt. Einzelheiten zu entsprechenden Meßmethoden und Prüfständen sind in [7] und [8] angegeben.

Um "den Einfluß aufsteigender Bodenfeuchte" in Wänden ausgeführter Bauten prüfen zu können, entwickelte HENCKY eine "Hilfswandmethode" [9]. Durch Belegen der Prüfwand mit einer Hilfswand bekannter Dicke und bekannter Wärmeleitfähigkeit (vergleiche Bild 18), wurde aus der Messung der Oberflächentemperaturen mit der Dicke und der Wärmeleitfähigkeit der Hilfswand der Wärmedurchlaßwiderstand der Prüfwand ermittelt.

$$\begin{array}{l}
 \text{Hilfswand B: } \Phi = \frac{\lambda}{s} \cdot A (\theta_1 - \theta_m) \\
 \text{Prüfswand A: } \Phi = \Delta \cdot A (\theta_m - \theta_2)
 \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} \text{Hilfswand B: } \\ \text{Prüfswand A: } \end{array}} \right\} \rightarrow$$

$$\rightarrow \Delta = \frac{\lambda}{s} \frac{(\theta_1 - \theta_m)}{(\theta_m - \theta_2)} = \sum_i \frac{\lambda_i}{s_i} \quad (54)$$

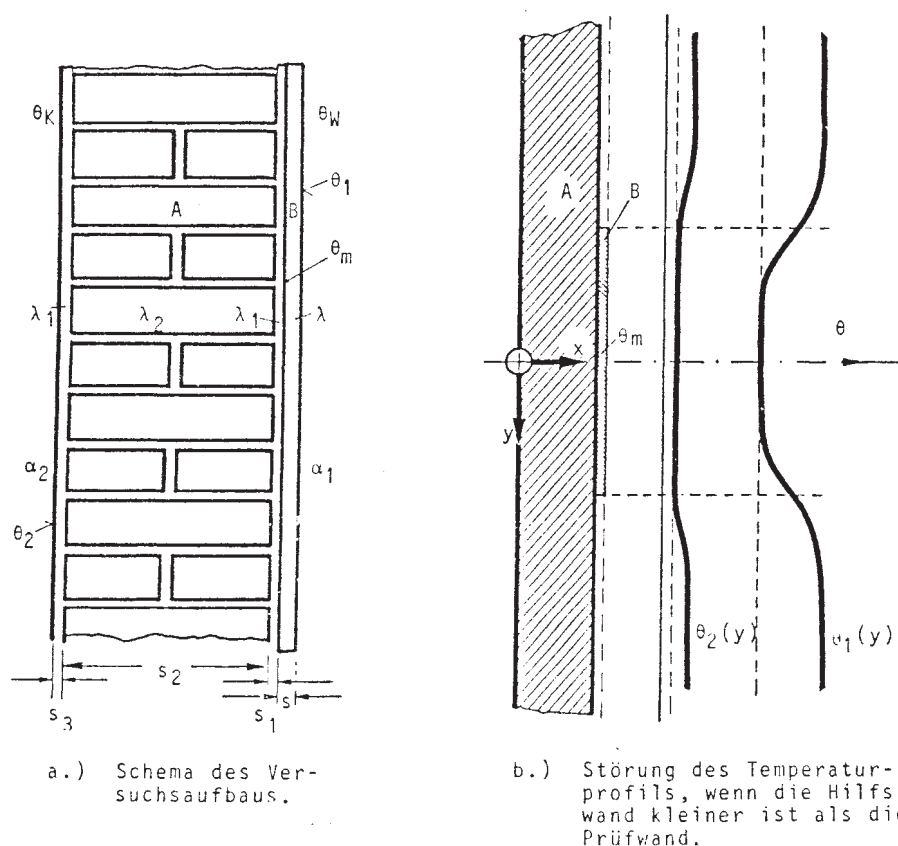


BILD 18: Hilfswandmethode nach HENCKY.

Für die Anwendung an ausgeführten Bauten wurden keine hohen Genauigkeitsansprüche gestellt, da weder stationäre Temperaturfelder über einen längeren Meßzeitraum, noch isotherme Oberflächen oder konstante Wärmestromdichten oder konstante Wärmeübergangskoeffizienten und konstante Umgebungstemperaturen eingestellt werden konnten.

"Als Vorteil der Anwendung dieses Meßverfahrens galt, daß die Ermittlung des Wärmestroms durch Temperaturmessungen ersetzt wurde".

HENCKY zeigt in einer Fehlerdiskussion durch welche Maßnahmen das Meßergebnis verbessert werden kann (zum Beispiel Wahl der Wärmeleitfähigkeit, Abmessungen und Anordnung der Hilfswand).

Eine Weiterentwicklung der Hilfswandmethode stellten die von SCHMIDT [10] eingeführten Wärmeflußmesser mit in der Hilfswand eingearbeiteten Temperaturmeßstellen dar.

Um bei der Messung feuchter Mauern "über den Feuchtigkeitsgehalt der Mauer dauernd unterrichtet zu sein", wurde eine Methode ausgearbeitet [11] die in Bild 19 schematisch dargestellt ist.

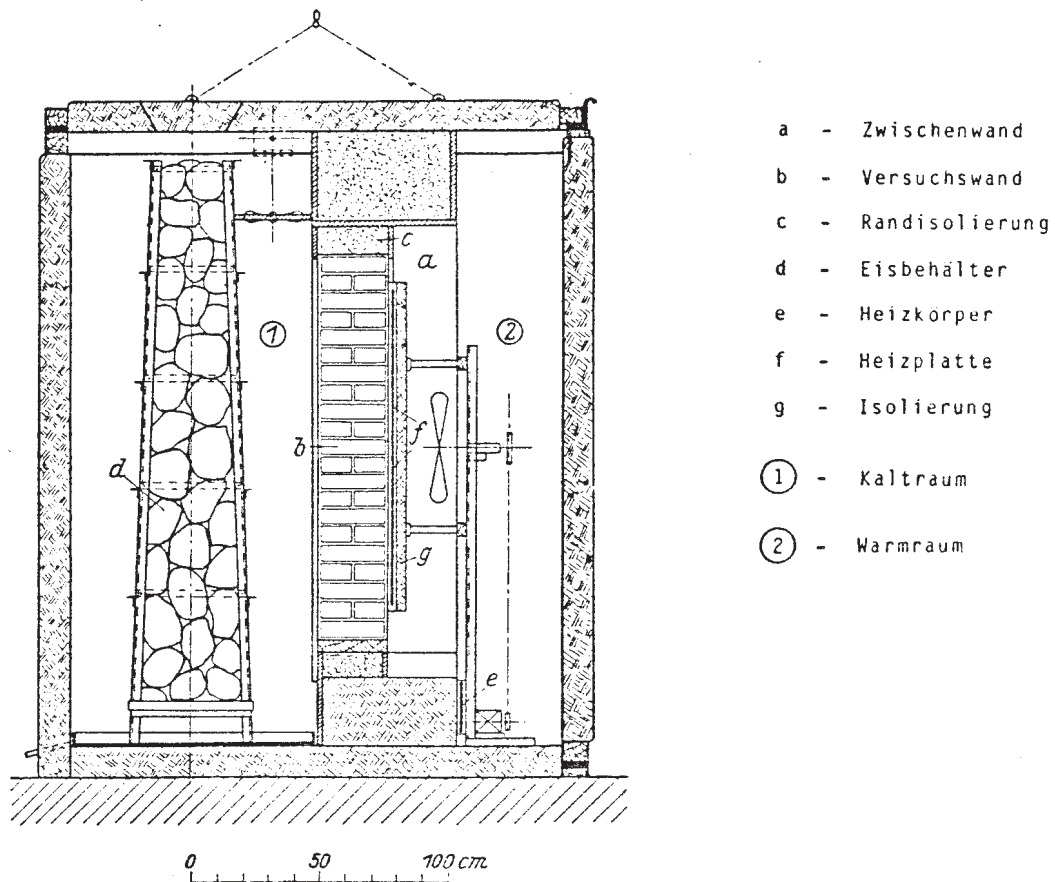


BILD 19: Methode nach HENCKY, SCHMIDT, GROSSMANN (1924).

In dieser Konstruktion wird die Temperatur im Warmraum durch einen elektrischen Heizkörper auf etwa 20 °C gebracht und durch einen Temperaturregler konstant gehalten. Im Kaltraum befindet sich für die Kühlung der Luft ein Eisbehälter.

Ein gegen den Warmluftraum isolierter Flächenheizkörper der einen Randstreifen der Probemauer nicht bedeckt (vergleiche Bild 19) wird so geregelt, daß die Oberflächentemperatur der Versuchswand unter dem Heizkörper gleich der neben dem Heizkörper in der Randzone ist.

Die Gewichtsänderung der Wand kann mittels einer Kranwaage festgestellt werden.

KRÜGER und ERIKSSON [12] sowie BUGGE und KOLFLAATH [13] wendeten dann in speziellen Versuchshäusern "Kastenmethoden" an, die sich prinzipiell von den heute angewandten Kastenmethoden nicht unterscheiden: "Auf die zu prüfende Wand wird ein Kasten aufgesetzt, der auf fünf Seiten geschlossen und nur an der, der Wand zugekehrten Seite offen ist. Die Temperatur im Innern des Kastens wird durch eine Heizung auf derselben Höhe gehalten wie die Umgebungstemperatur des Kastens, so daß der im Kasten zugeführte Wärmestrom nur durch die Versuchswand abströmen kann".

Das Versuchshaus von KRÜGER und ERIKSSON ist in Bild 20 schematisch dargestellt.

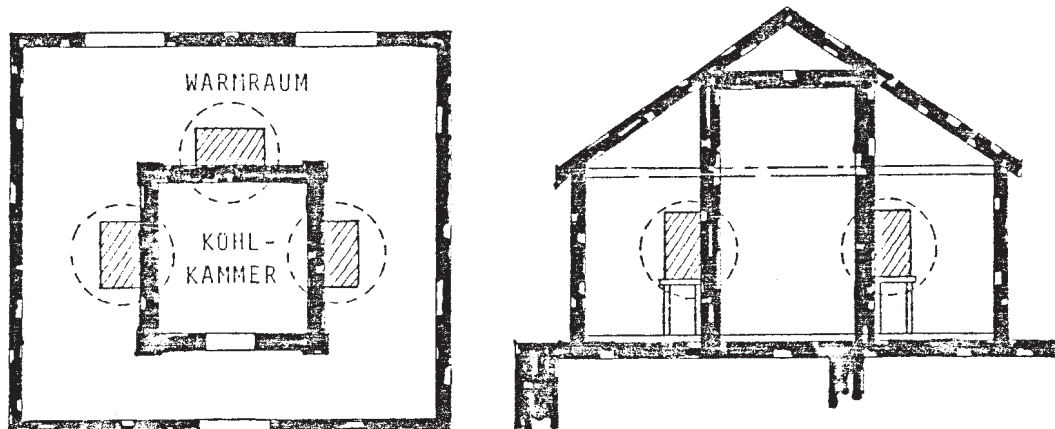


BILD 20: Kastenmethode in einem Versuchshaus der TH Stockholm (1923).

Von CAMMERER [14] und von HOFBAUER [15] wurden dann die "Wärmeflußmesser" (derzeitige Bezeichnung: Wärmestrommesser) zu der auch heute üblichen Anwendung weiterentwickelt. Um Randstörungen zu verringern wurden, gegenüber den ersten Anwendungen, die "Wärmeflußmesser" von einem Schutzring umgeben.

Das Meßprinzip ist in Bild 21 dargestellt.

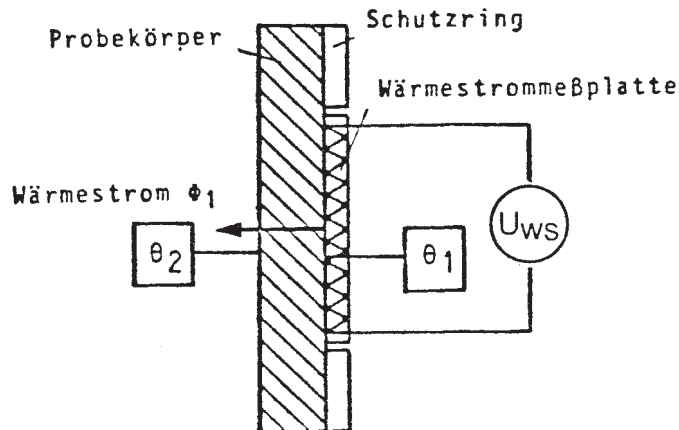


BILD 21: Wärmestrommeßplattenprinzip.

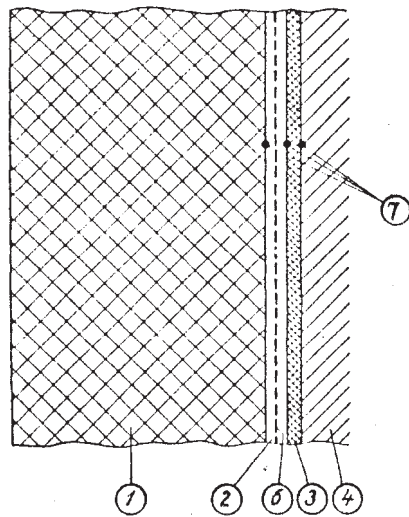
Der durch die Meßfläche fließende Wärmestrom Φ kann über einen zuvor für die Wärmestrommeßplatte ermittelten Kalibrierfaktor C_{WS} aus der von der eingearbeiteten Thermoelmenteinreihe abgegebenen Thermospannung abgeleitet werden.

MEISSNER und GERLOFF [16] konstruierten dann eine Heizplattenapparatur die in Bild 22 schematisch dargestellt ist.

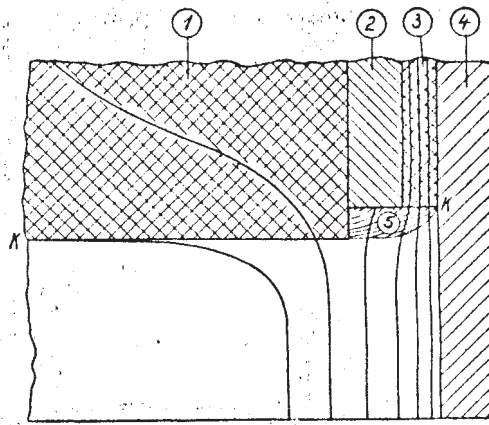
Eine elektrische Heizplatte ist gegen den Umgebungsluftraum "stark isoliert", so daß der von der Heizplatte an die Umgebungsluft abgegebene Wärmestrom "klein" ist. Zwischen Heizplatte und Prüfwand ist ebenfalls eine Wärmedämmschicht, so daß die Wandoberflächentemperatur unter der Heizplatte auf den Wert neben der Heizplatte geregelt werden kann.

Diese Konstruktion war als ein leichter zu handhabender Ersatz der Heizkasten, vor allem für Messungen an ausgeführten Bauten, gedacht.

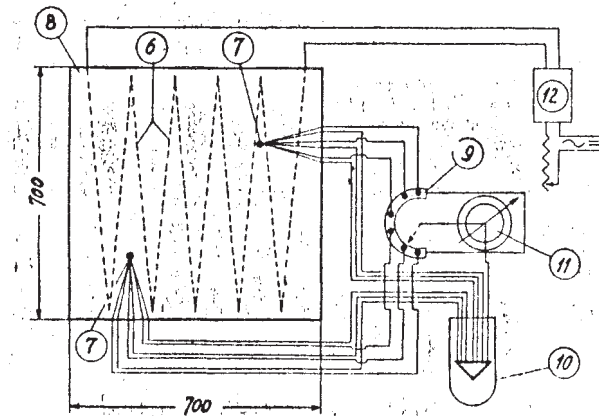
Ähnliche Apparaturen wurden etwa zur selben Zeit unter anderen im Forschungsinstitut für Wärmeschutz in München und an der TH Stockholm entwickelt. In der Werkstoffprüfnorm DIN 52611, Ausgabe August 1944 [1a] waren als Prüfverfahren für die Messung der "Wärmedurchlässigkeit" von Wänden und Decken neben dem "Wärmeflußmeßplatten-Verfahren" das "Heizplattenverfahren" zugelassen.



a.) PLATTENAUFBAU



b.) TEMPERATURVERLAUF AM PLATTENRAND



c.) MESSANORDNUNG

- | | |
|---|--|
| ① Rückseitige Isolierung (7 cm starke Korkplatte) | ⑦ Temperaturmeßstellen mit Thermoelementen |
| ② Heizplatte (5 mm dicke Aluminiumplatte) | ⑧ Meßplatte (entsprechend 2 in a.) und b.) |
| ③ Isolierschicht (4 mm starke Korkplatte) | ⑨ Meßstellenumschalter |
| ④ Versuchswand | ⑩ Vergleichstemperatur (Eislötstelle) |
| ⑤ Plattenrandisolierung (Plastilin) | ⑪ Galvanometer |
| ⑥ Heizdrähte | ⑫ Wattmeter |

BILD 22: Heizplattenapparat nach MEISSNER UND GERLOFF (1936).

Wie schon aus den in [16] angegebenen Genauigkeitsabschätzungen ersichtlich ist, genügt diese Apparatur den heutigen Genauigkeitsanforderungen nicht. Aus den Untersuchungen in Abschnitt 2 geht hervor, daß diese Apparatur für inhomogene Bauteile, das heißt auch schon für die Messung von Mauerwerk, ungeeignet ist.

Die Konstruktion der Heizplattenapparatur von MEISSNER UND GERLOFF weist folgende Nachteile auf:

Die Wärmeleitfähigkeit von Kork liegt bei ca. $0,05 \text{ W/m K}$. Der Wärmedurchlaßwiderstand der 4 mm dicken Dämmschicht zwischen Heizplatte und Versuchswand (vergleiche Bild 22) ist somit $1/\Lambda_D = 0,08 \text{ m}^2 \text{ K/W}$. Unter der Voraussetzung idealen Wärmekontakts, sowohl zwischen Heizplatte und Dämmschicht, als auch zwischen Dämmschicht und Versuchswand, was wegen Unebenheiten an der Versuchswand unrealistisch ist, stellt diese Korkschicht den gleichen Wärmeübergangswiderstand dar, wie ein Wärmeübergangskoeffizient von $12,75 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Unebenheiten der Versuchswandoberfläche führen zu ortsabhängigen Kontaktwiderständen und damit zu nichtisothermen Probekörperoberflächen selbst bei isothermer Heizplatte.

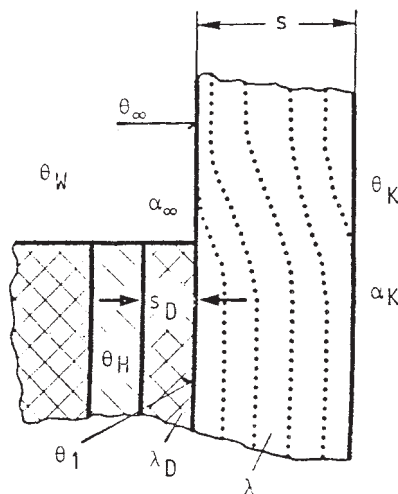
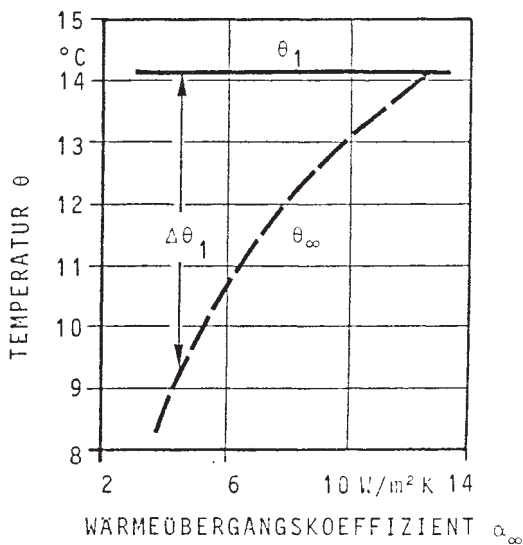
Bei Abweichung des Wärmeübergangskoeffizienten neben der Heizplatte vom Wärmedurchgangskoeffizienten der Korkschicht ergeben sich für den Fall, daß die Heizplattentemperatur auf Raumtemperaturniveau geregelt wird; Abweichungen zwischen den Versuchswand-Oberflächentemperaturen unter und neben der Heizplatte.

Ein Beispiel dazu ist in Bild 23 angegeben, das die Abweichung der Oberflächentemperaturen eines 30 cm dicken Probekörpers mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 2,1 \text{ W/m K}$ in Abhängigkeit vom Wärmeübergangskoeffizienten α_∞ , neben der Heizplatte, zeigt.

Das sich im Randbereich der Heizplatte in der Versuchswand einstellende Temperaturfeld ist in Bild 23 schematisch dargestellt.

Erfolgt die Regelung der Probekörper-Oberflächentemperatur unter der Heizplatte auf das Niveau neben der Heizplatte, so kann die Heizplattentemperatur vom Umgebungstemperaturniveau abweichen. Dann entstehen Fehlerwärmeströme zwischen Heizplatte und Umgebung. Für die in Bild 23 angegebene Wand dürfte bei $\alpha_\infty = 8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ die Heizplattentemperatur nur $17 \text{ }^\circ\text{C}$ betragen. Der Fehlerwärmestrom durch die rückwärtige Dämmschicht (7 cm Kork) würde in diesem Beispiel schon ca. 3% des Meßwärmestromes betragen.

Nachteilig bei der Apparatur von MEISSNER und GERLOFF ist auch die "linienförmige" Einspeisung des Wärmestroms durch Heizdrähte. Bei ortsabhängigen Kontaktwiderständen an der Versuchswand ist damit auch bei homogenen Bauteilen die Erzeugung eines eindimensionalen Temperaturfeldes im Heizflächenbereich nicht möglich. Bei Mauerwerk können mit der vorliegenden Meßflächengröße repräsentative Ausschnitte nicht erfaßt werden.



$$\theta_W = \theta_H = 20 \text{ °C};$$

$$\theta_K = 0 \text{ °C};$$

$$s = 30 \text{ cm};$$

$$s_D = 4 \text{ mm};$$

$$\lambda = 2,1 \text{ W/m K};$$

$$\lambda_D = 0,05 \text{ W/m K};$$

$$\alpha_K = 23 \text{ W/m}^2 \text{ K}.$$

BILD 23: Abweichung der Probekörperoberflächentemperatur neben der Heizplatte von der Probekörperoberflächentemperatur unter der Heizplatte bei Regelung der Heizplattentemperatur auf Umgebungstemperaturniveau in Abhängigkeit vom Wärmeübergangskoeffizienten neben der Heizplatte, bei der Heizplattenkonstruktion von MEISSNER und GERLOFF [16].

Durch diese Heizplattenkonstruktion wird in der Wand ein undefiniertes Temperaturfeld erzeugt. Dies führt schon bei Mauerwerk zu von der Anordnung der Meßplatte abhängigen Ergebnissen. Entsprechend den Untersuchungen in Abschnitt 2 können diese von Meßergebnissen mit Heizkästen oder Wärmestrommeßplatten erheblich abweichen.

In allen weiteren verfügbaren, zeitlich nachfolgend veröffentlichten Arbeiten über Apparaturen zur Messung des Wärmedurchlaßwiderstandes von Decken und Wänden bei stationären Temperaturfeldern, wurden Heizkastenmethoden oder Wärmestrommeßplatten-Methoden in verschiedenen konstruktiven Variationen beschrieben.

In den der Ausgabe August 1944 folgenden Überarbeitungen der DIN 52611 [1] bis [1d] werden Heizplatten-Apparaturen nicht mehr als Prüfapparaturen zugelassen. Neben der Prüfung mit "Wärmeflußmessern", später und derzeit "Wärmestrommessern", wird die Prüfung mit Heizkasten vorgeschrieben.

In Abhängigkeit von der Probekörpergröße und eventuell von der Anwendung: Labormessung - Messung am ausgeführten Bau, wurden zwei sich im Heizkasten unterscheidende Methoden entwickelt:

Die Methode mit **kalibriertem Heizkasten** (vergleiche Bild 24a), die in der englischsprachigen Literatur mit **Calibrated Hot Box** bezeichnet wird; und die Methode mit **geregeltem Heizkasten** (vergleiche Bild 24b), als **Guarded Hot Box** bezeichnet.

In Bild 24 sind diese beiden Meßanordnungen schematisch dargestellt (vergleiche [1], [17] und [20]).

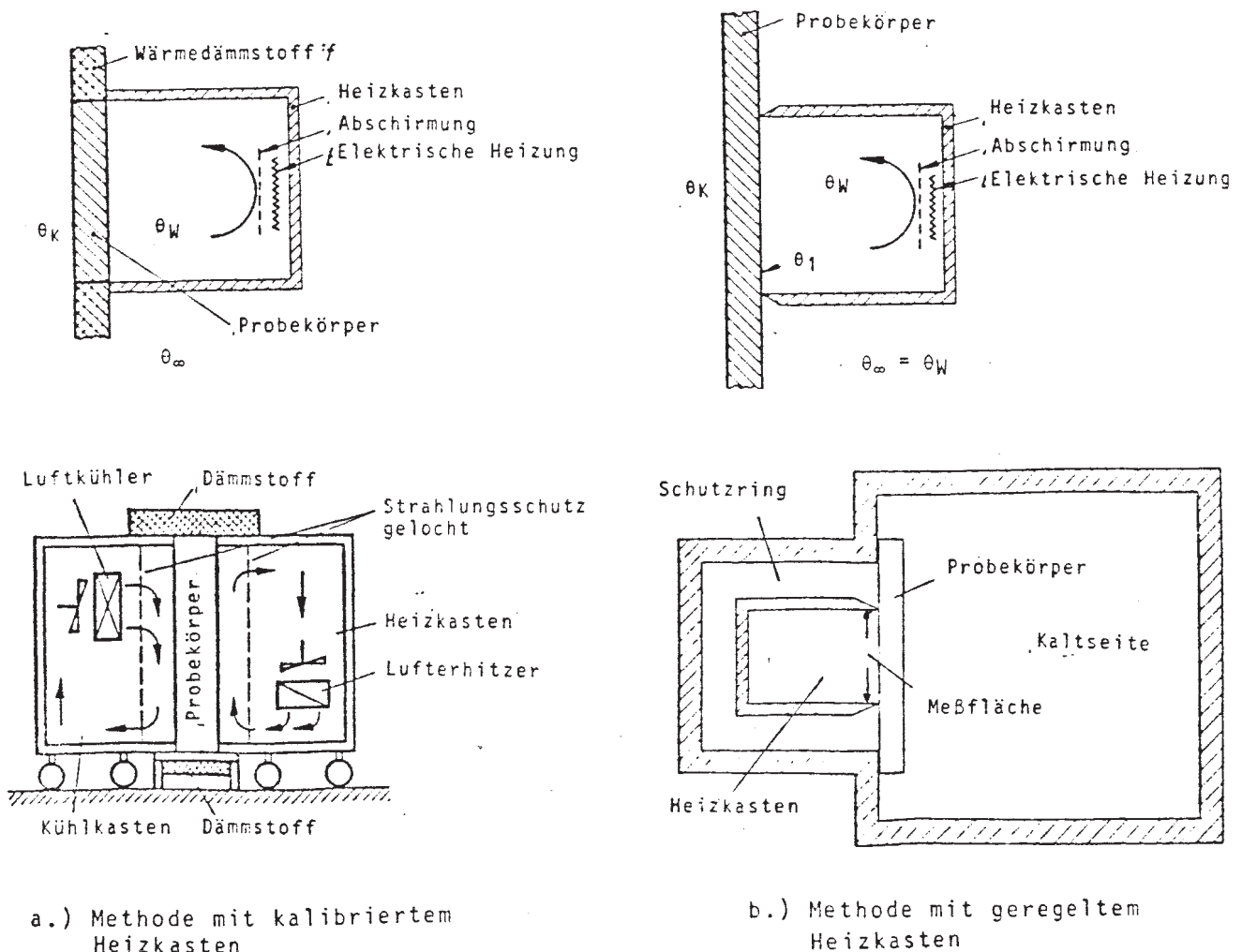


BILD 24: Schematische Darstellung von Meßanordnungen mit Heizkasten.

Auf die Unterschiede und die Besonderheiten der beiden Heizkastenmethoden wird in nachfolgenden Abschnitten noch ausführlich eingegangen.

Aus einer Vielzahl von Veröffentlichungen über ausgeführte Konstruktionen und zur Standardisierung der Prüfverfahren werden nachfolgend nur einige herausgegriffen.

Eine Meßeinrichtung nach der Methode mit geregelter Heizkasten ist in [17] beschrieben. Zur Standardisierung dieser Methode siehe [18] und [19].

Ergebnisse aus Messungen mit einem kalibrierten Heizkasten sind in [20] angegeben.

Eine "besonders für Bauteile mit Wärmebrücken" konstruierte Apparatur ist in [21] beschrieben.

Konstruktive Details einer Meßeinrichtung mit Wärmestrommeßplatten sind in [22] angegeben.

5. ERMITTLUNG DER GENAUIGKEIT VON WÄRMEDURCHLASSWIDERSTANDSMESSUNGEN UND VON WÄRMEDURCHGANGSKOEFFIZIENTEN-MESSUNGEN.

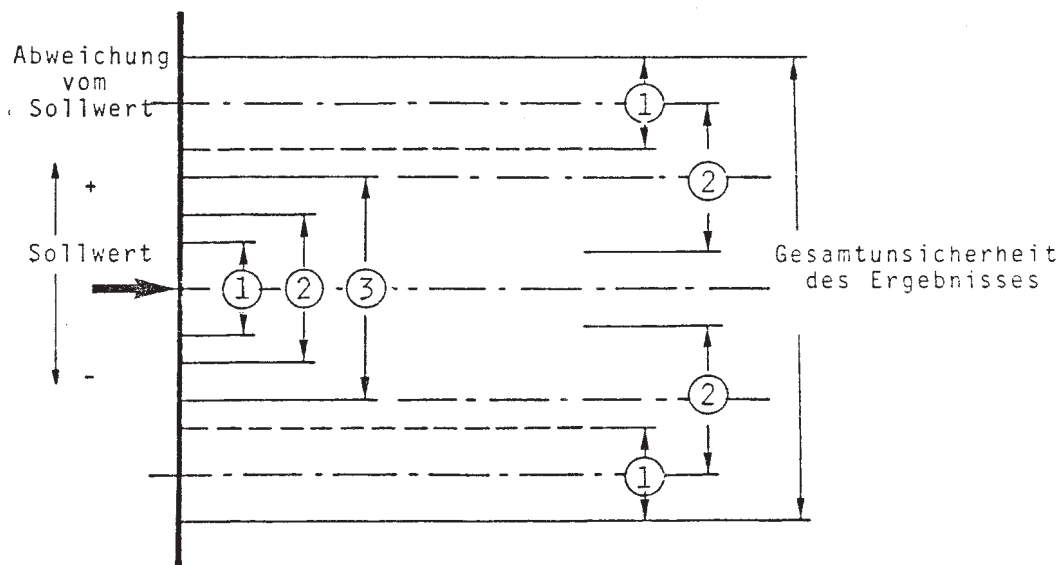
Eine genaue Fehlerangabe ist bei der Messung des Wärmedurchlaßwiderstandes oder des Wärmedurchgangskoeffizienten von Bauteilen nicht möglich. Fehlerabschätzungen können in Abhängigkeit von der Meßmethode, von den Bauteilen, von den Meßfühlern und der Meßwerterfassungseinrichtung durchgeführt werden. Im Hinblick auf die Genauigkeit des nach Gleichung (1) definierten Meßergebnisses sind die wesentlichsten Punkte der Beurteilung von Meßapparaturen:

1. Sind stationäre, genau definierte Randbedingungen herstellbar;
2. Werden die für eine exakte Auswertung erforderlichen Meßwerte erfaßt?
3. Werden die jeweils geeignetesten und genauesten Meßfühler und Meßwerterfassungseinrichtungen verwendet?

Wie die Ableitungen in Abschnitt 2 zeigen, ist bei Wärmedurchlaßwiderstandsmessungen und Wärmedurchgangskoeffizienten-Messungen neben den Problemen der Meßwerttoleranzen und der zufälligen und systematischen Meßfehler mit einer weiteren Unsicherheit zu rechnen, die die Unsicherheit der Meßfehler weit übertreffen kann.

Diese Unsicherheit entsteht mit der Definition des Wärmedurchlaßwiderstandes (und des Wärmedurchgangskoeffizienten) dadurch, daß die theoretisch geforderten Bedingungen für eine eindeutige Definition, im folgenden als "Soll"- oder "Idealzustand" bezeichnet, mit den derzeit praktisch angewandten Meßapparaturen nicht herstellbar ist.

In Bild 25 ist die Zusammensetzung der Gesamtunsicherheit des Meßergebnisses schematisch dargestellt.



- ① Unsicherheit aufgrund der Meßwerttoleranzen
- ② Unsicherheit aufgrund von Meßfehlern
- ③ Unsicherheit aufgrund der Abweichungen vom Idealzustand

BILD 25: "Unsicherheit des Meßergebnisses".

Auch wenn bei der Messung die theoretisch geforderten Randbedingungen exakt eingehalten werden können wird durch unvermeidbare Toleranzen der jeweiligen Meßwerterfassung (unter anderem Auflösungsgrenzen, Verstärkungs- oder Übertragungsfehler vom Meßwertaufnehmer bis zur Meßwertregistrierung für das Meßergebnis) nur ein Toleranzbereich angegeben werden können innerhalb dessen das Ergebnis mit Sicherheit liegt.

Diese Unsicherheit ist in Bild 25 mit ① bezeichnet.

Durch fehlerbehaftete Meßwerte wird die "Unsicherheit des Meßergebnisses" weiter vergrößert (zum Beispiel durch falsche Wahl des Meßfühlers, so daß die zu messende Größe durch den Meßfühler verfälscht wird, oder durch unsachgemäße Anbringung der Meßfühler). Diese Unsicherheit ist in Bild 25 mit 2 bezeichnet. In der Praxis werden die Unsicherheiten 1 und 2 nicht zu trennen sein. Die Abweichung der realen Versuchsbedingungen vom Sollzustand führt zu der in Bild 25 mit 3 gekennzeichneten Unsicherheit.

Insgesamt ist damit eine Zweiteilung der Meßunsicherheit möglich und für Genauigkeitsabschätzungen sinnvoll:

1. Meßgenauigkeit bei idealen Versuchsbedingungen;
2. Meßgenauigkeit bei realen Versuchsbedingungen.

5.1 FEHLERABSCHÄTZUNG BEI IDEALEN VERSUCHSBEDINGUNGEN.

Mit der oben angegebenen Definition idealer Versuchsbedingungen kann für den Wärmedurchlaßwiderstand und den Wärmedurchgangskoeffizienten eine Fehlerabschätzung vorgenommen werden.

Bezeichnet man den tatsächlich vorliegenden Wärmedurchlaßwiderstand oder den Wärmedurchgangskoeffizienten mit:

$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{\Delta\theta_0}{q} \quad \text{beziehungsweise} \quad k = \frac{q}{\Delta\theta_L} \quad (55)$$

und das Meßergebnis mit:

$$\frac{1}{\Lambda_g} = \frac{\Delta\theta_{0g}}{q_g} \quad \text{beziehungsweise} \quad k_g = \frac{q_g}{\Delta\theta_{Lg}} \quad (56)$$

so ist der absolute Fehler des Meßergebnisses:

$$\frac{\Delta 1}{\Lambda} = \frac{1}{\Lambda_g} - \frac{1}{\Lambda} \quad \text{beziehungsweise} \quad \Delta k_g = k_g - k \quad (57)$$

und der relative Fehler:

$$\frac{\delta 1}{\Lambda} = \frac{\frac{1}{\Lambda_g} - \frac{1}{\Lambda}}{1/\Lambda} = \frac{\Lambda}{\Lambda_g} - 1 = \Delta \frac{1}{\Lambda} \cdot \Lambda \quad \text{beziehungsweise} \quad \delta k_g = \frac{k_g - k}{k} = \frac{\Delta k_g}{k} \quad (58)$$

Die tatsächlichen exakten Werte sind unbekannt. Durch Ermittlung oder Abschätzung der Unsicherheiten der Oberflächentemperaturdifferenz-Messung beziehungsweise der Differenz der Umgebungslufttemperaturen und der Wärmestromdichte-Bestimmung:

$$\begin{aligned}\Delta(\Delta\theta_0) &= \Delta\theta_{0g} - \Delta\theta_0 \text{ und } \Delta(\Delta\theta_L) = \Delta\theta_{Lg} - \Delta\theta_L \\ \Delta q &= q_g - q\end{aligned}\quad (59)$$

kann die Unsicherheit des Meßergebnisses nach der Gauß'schen Fehlerrechnung abgeschätzt werden.

Allgemein ergeben sich für die Größe y , die aus der Funktion $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ zu bestimmen ist, wobei die Meßwerte x_1, x_2, \dots, x_n mit den Fehlern $\pm\Delta x_1, \pm\Delta x_2, \dots, \pm\Delta x_n$ behaftet sind, die Einzelfehler mit Hilfe der partiellen Ableitungen zu:

$$\Delta y(x_1) = \frac{\partial f}{\partial x_1} \cdot \Delta x_1, \dots, \Delta y(x_n) = \frac{\partial f}{\partial x_n} \cdot \Delta x_n. \quad (60)$$

Nach der Gauß'schen Fehlerrechnung ermittelt man den Gesamtfehler eines Ergebnisses aus mehreren Einzelmessungen wie folgt:

$$\Delta y = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 \cdot \Delta x_1^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 \cdot \Delta x_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)^2 \cdot \Delta x_n^2}. \quad (61)$$

Für die Bewertung eines Meßergebnisses aus mehreren Einzelmessungen kann dann zum Ergebnis eine Genauigkeitsangabe erfolgen:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \pm \Delta y. \quad (62)$$

Dazu ist die Kenntnis der Genauigkeit der Einzelmeßwerte Δx_i erforderlich.

Die Abschätzung des Gesamtfehlers dient dann nicht nur der Genauigkeitsangabe des Ergebnisses, sie zeigt vor allem welchem Teil der Messung die größte Sorgfalt zuzuwenden ist, wo der geringste Einfluß zu erwarten ist, und durch welche Maßnahmen die Genauigkeit unter Umständen verbessert werden kann.

Für die Unsicherheit des Ergebnisses einer Wärmedurchlaßwiderstandsmessung bei idealen Versuchsbedingungen ergibt sich damit:

$$\Delta \frac{1}{\Lambda} = \pm \sqrt{\left(\frac{1}{q_g}\right)^2 \cdot [\Delta(\Delta\theta_0)]^2 + \left(\frac{\Delta\theta_g}{q_g^2}\right)^2 \cdot (\Delta q^2)} \quad (63)$$

Die Unsicherheit des Wärmedurchgangskoeffizienten homogener isotroper Bauteile bei idealen Versuchsbedingungen ist:

$$\Delta k_g = \pm \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta\theta_{Lg}}\right)^2 \cdot \Delta q^2 + \left(\frac{q_g}{\Delta\theta_{Lg}^2}\right)^2 \cdot [\Delta(\Delta\theta_L)]^2} \quad (64)$$

Die Unsicherheit des Wärmedurchgangskoeffizienten als bauteilcharakteristische Kenngröße erhöht sich für homogene Bauteile noch um die Unsicherheit der Wärmeübergangskoeffizienten. Deren Unsicherheiten können aus den Unsicherheiten der Temperaturmessungen der Umgebungs- und der Oberflächentemperaturen sowie der Wärmestromdichtebestimmung abgeschätzt werden:

$$\Delta\alpha_W \approx \pm \sqrt{\left(\frac{1}{q_g}\right)^2 \cdot [\Delta(\Delta\theta_{LOW})]^2 + \left(\frac{\Delta\theta_{LOW}}{q_g^2}\right)^2 \cdot (\Delta q)^2} \quad (65)$$

und

$$\Delta\alpha_K \approx \pm \sqrt{\left(\frac{1}{q_g}\right)^2 \cdot [\Delta(\Delta\theta_{OLK})]^2 + \left(\frac{\Delta\theta_{OLK}}{q_g^2}\right)^2 \cdot (\Delta q)^2} \quad (66)$$

mit $\Delta\theta_{LW}$ als Unsicherheit bei der Ermittlung von θ_{LW}

$\Delta\theta_{OW}$ für θ_{OW}

$\Delta(\Delta\theta_{LOW})$ für $\theta_{LW} - \theta_{OW}$

usw.

(67)

wobei

$$\Delta(\Delta\theta_{LOW}) = \pm \sqrt{\Delta\theta_{LW}^2 + \Delta\theta_{OW}^2} \quad (68)$$

ist.

Die Unsicherheit des Wärmedurchgangskoeffizienten homogener Bauteile erhöht sich damit auf:

$$\Delta k_{g,\alpha} \approx \pm \sqrt{\Delta k_g^2 + \Delta \alpha_W^2 + \Delta \alpha_K^2} \quad (69)$$

Bei inhomogenen Bauteilen führen die Unsicherheiten der Randbedingungen auch bei idealen Versuchsbedingungen zu einer zusätzlichen Unsicherheit des Wärmedurchlaßwiderstandes und damit zu einer weiteren Vergrößerung der Unsicherheit des meßtechnisch ermittelten Wärmedurchgangskoeffizienten. Dies muß im Einzelfall berücksichtigt werden.

Für eine grobe Abschätzung der Gesamtunsicherheit des Meßergebnisses bei idealen Versuchsbedingungen können sowohl für die Unsicherheiten der Temperatur- und der Temperaturdifferenzmessung, als auch für die Unsicherheit der Wärmestromdichtebestimmung Erfahrungswerte verwendet werden. Die Unsicherheit der Wärmestromdichteermittlung hängt im Einzelfall vom angewandten Meßverfahren ab. Dies wird in den folgenden Abschnitten noch weiter untersucht.

Nachfolgend werden für die in Tabelle 4 angegebenen Beispiele Fehlerabschätzungen bei der Messung unter idealen Versuchsbedingungen vorgenommen.

Wird der Wärmestrom aus der Leistung einer elektrischen Heizung (Absolutverfahren oder direktes Verfahren) ermittelt, dann ist die Wärmestromdichte:

$$\bar{q} = f(I, U, A_1) \quad (70)$$

Bei Verwendung von Wärmestrommessern (Relativverfahren oder indirektes Verfahren) müssen diese zuvor nach einem Absolutverfahren kalibriert worden sein.

Die Meßflächengröße wird in diesem Beispiel aus zwei Längenmessungen (B und H) ermittelt, so daß der Wärmedurchlaßwiderstand von den Meßgrößen B, H, U, I und $\Delta\theta$ abhängt.

Für diese Meßgrößen sind in Tabelle 5 Beispiele für Genauigkeitsangaben enthalten.

Nr.	θ_W	θ_1	θ_2	θ_K	$\Delta\theta$	s	λ	q	k	1/ Λ
-	°C	°C	°C	°C	K	m	W/m K	W/m ²	W/m ² K	m ² K/W
1	20	18,2	0,6	0	17,6	0,175	0,14	14,1	0,71	1,25
2	20	11,8	2,9	0	8,9	0,175	1,3	66,0	3,30	0,135
3	20	10,1	3,5	0	6,6	0,175	2,1	79,4	3,97	0,083
4	20	18,7	0,5	0	18,2	0,24	0,14	10,6	0,53	1,714
5	20	12,9	2,5	0	10,5	0,24	1,3	36,6	2,83	0,185
6	20	11,2	3,1	0	8,1	0,24	2,1	70,7	3,54	0,114
7	20	18,9	0,4	0	18,5	0,3	0,14	8,7	0,43	2,143
8	20	13,7	2,2	0	11,6	0,3	1,3	50,1	2,50	0,231
9	20	12,0	2,8	0	9,2	0,3	2,1	64,2	3,21	0,143
10	20	19,1	0,3	0	18,8	0,365	0,14	7,2	0,36	2,607
11	20	14,4	1,9	0	12,5	0,365	1,3	44,5	2,23	0,281
12	20	12,7	2,5	0	10,2	0,365	2,1	58,4	2,92	0,174
13	20	19,6	0,14	0	19,4	0,175	0,03	3,3	0,17	5,83
14	20	19,7	0,11	0	19,6	0,240	0,03	2,4	0,12	8,00
15	20	19,8	0,09	0	19,7	0,300	0,03	2,0	0,10	10,00
16	20	19,8	0,07	0	19,7	0,365	0,03	1,6	0,08	12,17

TABELLE 4: Stationäre Wärmeleitung durch homogene isotrope Probe-
körper bei eindimensionalem Temperaturfeld.

Berechnung für $\alpha_1 = 8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

$\alpha_2 = 23 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

MESSGRÖSSE	MESSBEREICH	GENAUIGKEITSANGABE
Länge	< 1 m	± 0,001 m
Spannung	bis 40 V	± 0,5 % vom Endwert
		± 0,2 % vom Endwert
Stromstärke	bis 3 A	± 0,5 % vom Endwert
		± 0,2 % vom Endwert
Temperaturdifferenz	0 - 50 K	± 0,25 K
		± 0,15 K

TABELLE 5: Beispiele für Genauigkeitsangaben von Meßgrößen.

Zur Ermittlung der Einflüsse der einzelnen Meßunsicherheiten und der Unsicherheit des Endergebnisses sind für die Ermittlung des Wärmedurchlaßwiderstandes die partiellen Ableitungen der "Ergebnisfunktion" nach den Einzelmeßgrößen zu bilden:

$$\frac{\partial f}{\partial U} = - \frac{A_1 \cdot \Delta\theta}{I \cdot U^2}$$

$$\frac{\partial f}{\partial I} = - \frac{A_1 \cdot \Delta\theta}{U \cdot I^2}$$

$$\frac{\partial f}{\partial A_1} = \frac{\Delta\theta}{U \cdot I}$$

$$\frac{\partial f}{\partial \Delta\theta} = \frac{A_1}{U \cdot I} \quad (71)$$

Der Einfluß der Einzelmeßfehler ist:

$$\frac{\partial f}{\partial U} \cdot \Delta U = \Delta f_U \quad \text{usw.} \quad (72)$$

Für die in Tabelle 4 angegebenen homogenen isotropen Probekörper sind die Einzelmeßunsicherheiten und der Genauigkeitsgrad des Ergebnisses in Tabelle 6 angegeben. Die angegebenen Werte wurden für eine quadratische Meßfläche mit 1 m Kantenlänge berechnet. Die Heizflächen (Ersatzwiderstand 7,316 Ω) werden mit Gleichstrom (Endwert 40V/3A) beheizt.

WAND NR.	s	λ	q	Δf_U	Δf_I	Δf_A	$\Delta f_{\Delta\theta}$	GENAUIGKEITSGRAD	
								absolut	relativ
-	m	W/m K	W/m ²	m ² K/W	m ² K/W	m ² K/W	m ² K/W	m ² K/W	%
1	0,175	0,14	14,1	0,0246	0,0135	0,0018	0,0177	0,0332	2,6576
2	0,175	1,3	66,0	0,0012	0,0007	0,0002	0,0038	0,0040	2,9947
3	0,175	2,1	79,4	0,0007	0,0004	0,0001	0,0031	0,0032	3,9127
4	0,240	0,14	10,6	0,0390	0,0214	0,0024	0,0236	0,0504	2,9407
5	0,240	1,3	56,6	0,0035	0,0019	0,0004	0,0068	0,0079	4,2842
6	0,240	2,1	70,3	0,0010	0,0006	0,0002	0,0035	0,0037	3,2646
7	0,300	0,14	8,7	0,0533	0,0292	0,0030	0,0287	0,0673	3,1414
8	0,300	1,3	50,1	0,0024	0,0013	0,0003	0,0050	0,0057	2,4724
9	0,300	2,1	64,2	0,0013	0,0007	0,0002	0,0039	0,0042	2,9237
10	0,365	0,14	7,2	0,0720	0,0395	0,0037	0,0347	0,0892	3,4213
11	0,365	1,3	44,5	0,0031	0,0017	0,0004	0,0056	0,0067	2,3695
12	0,365	2,1	58,4	0,0017	0,0009	0,0002	0,0043	0,0047	2,7019
13	0,175	0,03	3,3	0,2393	0,1313	0,0083	0,0758	0,2834	4,8608
16	0,365	0,03	1,6	0,7197	0,3949	0,0174	0,1563	0,8359	6,8685

TABELLE 6: Einfluß der einzelnen Meßunsicherheiten und der Gesamtunsicherheit des Endergebnisses bei der Messung des Wärmedurchlaßwiderstandes verschiedener Probekörper (ideale Versuchsbedingungen; Randwerte entsprechend Tabelle 4).

Die Darstellung in Tabelle 6 macht deutlich, aus welcher Einzelmessung der größte Fehlerbeitrag kommt. Diese Betrachtungsweise ermöglicht eine gezielte Fehlerminimierung.

5.2 FEHLERABSCHÄTZUNG BEI REALEN VERSUCHSBEDINGUNGEN.

Nachfolgend sollen die Fehler abgeschätzt werden, die sich bei der Ermittlung des Wärmedurchlaßwiderstandes von Bauteilen unter realen Versuchsbedingungen ergeben. Hier muß die Fehlerabschätzung mit der jeweiligen Versuchseinrichtung einschließlich deren Meßwerterfassung probenabhängig erfolgen.

Unsicherheiten entstehen, falls die konstruktive Ausführung der Versuchseinrichtungen weder exakt definierbare Randbedingungen, noch adiabate Randstirflächen ermöglichen, das heißt, falls das Meßergebnis nicht dem der Meßvorschrift entsprechenden physikalisch exakt definierten Meßzustand zugeordnet werden kann. Auch bei guter Reproduzierbarkeit solcher Meßergebnisse sind Messungen an unterschiedlichen Objekten nicht ohne weiteres vergleichbar. Zudem muß mit einer begrenzten Anzahl von Meßstellen die unvollständige Erfassung des Istzustandes angenommen werden.

An den derzeit in der Praxis angewandten Apparatekonstruktionstypen werden diese Probleme nachfolgend diskutiert.

Um praktische Anhaltswerte für die Größenordnung der Unsicherheiten zu erhalten, werden Probekörper einschließlich Meßapparatekonstruktion nach der oben beschriebenen FEM-Methode simuliert.

Infolge der begrenzten Rechnerkapazität war die Elementenanzahl auf ca. 2500 begrenzt. Da jedoch in der Regel symmetrische Proben untersucht wurden, genügte die Berechnung von Ausschnitten. Falls bei entsprechenden Konstruktionen durch die Elementzahlbegrenzung Ungenauigkeiten zu befürchten waren, wurden zweidimensionale Schnitte berechnet, so daß zumindest ein relativer Vergleich der unterschiedlichen Konstruktionen möglich ist.

Die Untersuchungen wurden auf Wände ohne Hohlräume also ohne innere Konvektion, beschränkt. Stofftransport war ebenfalls ausgeschlossen.

Bei den Simulationen wurden Umgebungslufttemperaturen und Wärmeübergangskoeffizienten, oder für die Simulation von Folienheizflächen Wärmequellen, sowie die Wärmeleitfähigkeiten und Geometrien vorgegeben. Aus den sich bei verschiedenen Randbedingungen einstellenden Temperaturfeldern in der Wand und dem daraus resultierenden Wärmestrom durch die Oberflächen, wurde der Wärmedurchlaßwiderstand nach Gleichung (1) berechnet und mit dem Sollwert bei idealen Randbedingungen verglichen.

5.3 SIMULATION DER MESSUNG HOMOGENER ISOTROPER BAUTEILE.

5.3.1 Einfluß der Randstirnflächen bei Laborproben.

Bei der Messung an ausgeführten Bauten können Wärmeströme durch die Randstirnflächen nur durch die Lage des Meßausschnittes beeinflußt werden.

Bei Labormessungen wird das Schutzringprinzip angewandt und/oder die Probekörper-Randstirnfläche mit einem Wärmedämmstoff abgedeckt.

Bei praktischen Meßeinrichtungen entsteht eine Schwierigkeit dadurch, daß auf mindestens einer der beiden Seiten des Probekörpers ein von der Umgebungstemperatur abweichendes Temperaturniveau eingestellt werden muß. Dies ermöglicht verschiedene konstruktive Ausführungen. In Bild 26 sind einige davon skizziert.

Daraus wird ersichtlich, daß der durch die Apparatekonstruktion bedingte Einfluß der Randstirnflächen mit der jeweiligen Apparatekonstruktion diskutiert werden muß.

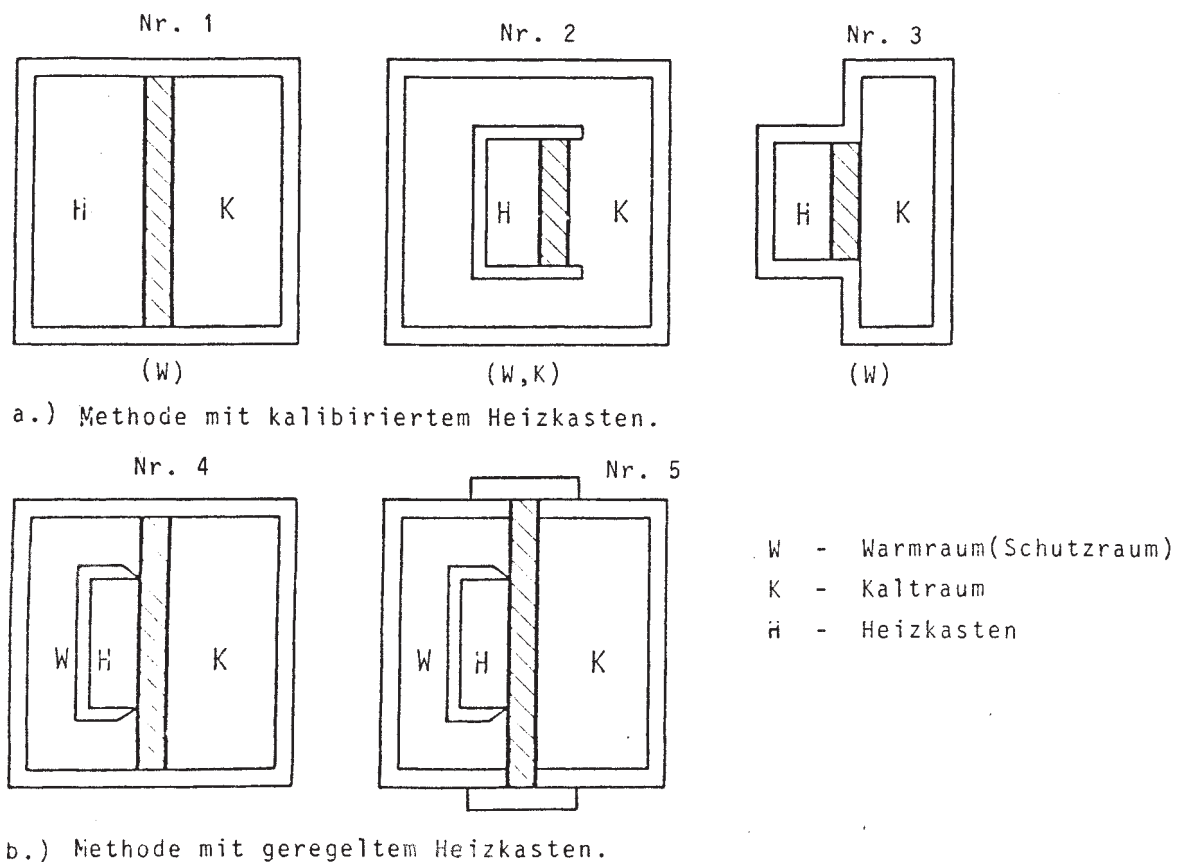


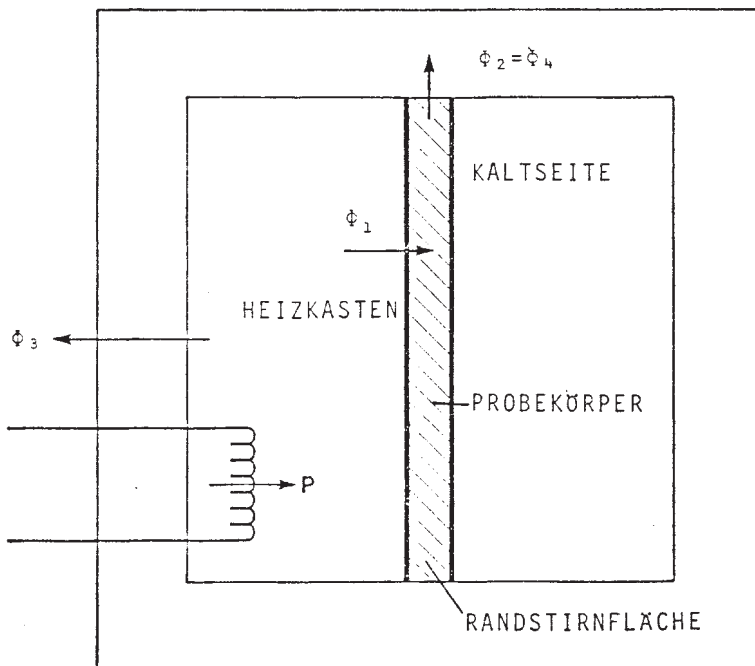
BILD 26: Schemaskizze einiger Versuchsaufbauten.

5.3.2 Methode mit kalibriertem Heizkasten.

Bei der Messung ohne Maske stimmt hier die Probengröße mit der Meßflächengröße überein. Der dem Heizkasten im stationären Temperaturzustand zugeführte Wärmestrom P kann, legt man die innere Oberfläche des Heizkastens einschließlich der wärmeren Probekörperoberfläche als Bilanzgrenze fest, teilweise durch die Probenoberfläche A als Wärmestrom Φ_1 und teilweise durch die Heizkastenwand als Wärmestrom Φ_3 , abfließen (vergleiche Bild 27):

$$P = \Phi_1 + \Phi_3 \quad (73)$$

Die Unsicherheit des Meßwertes P ist ΔP .



- Φ_1 = Wärmestrom durch die wärmere Prüffläche des Probekörpers
- Φ_2 = Wärmestrom durch die Meßauschnittsrandstirnflächen
- Φ_3 = Wärmestrom durch die Heizkastenwand
- Φ_4 = Wärmestrom durch die Probekörperendstirnfläche

BILD 27: Methode mit kalibriertem Heizkasten.

Zur Ermittlung von Φ_1 muß Φ_3 bekannt sein:

$$\Phi_1 \pm \Delta\Phi_1 = (P \pm \Delta P) - (\Phi_3 \pm \Delta\Phi_3) \quad (74)$$

Infolge instationärer Umgebungseinflüsse und Regelschwankungen ist die Ermittlung von Φ_3 mit einer Unsicherheit behaftet. Der Wärmestrom Φ_1 durch die Prüffläche ist daher umso genauer, je kleiner der Wärmestrom durch die Heizkastenwand Φ_3 ist.

Um insbesondere bei gut wärmedämmenden Proben Φ_1 mit ausreichender Genauigkeit ermitteln zu können, darf Φ_3 im ungünstigsten Fall einen vorgegebenen Bruchteil von Φ_1 nicht überschreiten.

$$\Phi_3 < f_1 \cdot \Phi_1 \text{ mit } f_1 \text{ etwa } 0,25 \quad (75)$$

Damit ergibt sich:

$$\Delta\Phi_1 < 1,03 \Delta P. \quad (76)$$

Bei einer vorgegebenen maximalen Temperaturdifferenz zwischen den Heizkastoberflächen innen und außen, läßt sich daraus eine Dimensionierungsbedingung für die Heizkastoerwand ableiten.

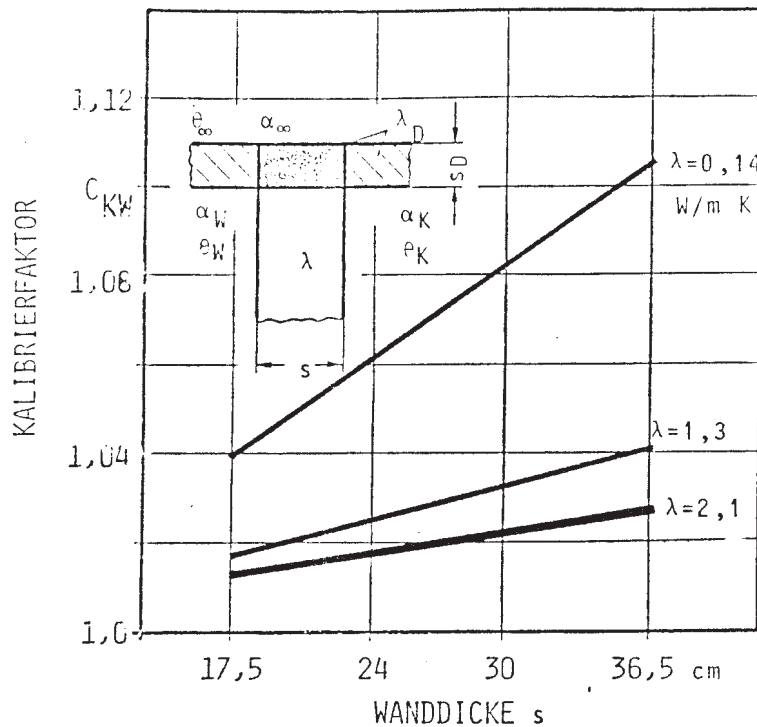
Zur Ermittlung der mittleren Wärmestromdichte q im Probekörper muß der Einfluß des Wärmestroms durch die Randstirnflächen Φ_4 ermittelt werden. Dies kann durch Kalibrierung mit homogenen Probekörpern bekannten Wärmedurchlaßwiderstandes erfolgen, wobei der gesamte Dicken- und Wärmeleitfähigkeitsbereich der Prüfprobekörper zu berücksichtigen ist. Der Kalibrierfaktor ergibt sich aus dem Vergleich des bei $\Phi_3 = 0$ gemessenen Wärmedurchlaßwiderstandes des Kalibrierprobekörpers mit den bekannten Werten:

$$C_{KH} = \frac{\frac{1}{\Lambda_g}}{\frac{s}{\lambda}} = \frac{\frac{\lambda}{s} \cdot \Delta\theta}{\frac{\Phi_1}{A}} = \frac{q_m}{q_1} \quad (77)$$

Für $\Phi_3 \neq 0$ ist der Kalibrierfaktor nur dann exakt, wenn bei allen Folgemessungen Φ_3 gleich groß ist wie bei der Kalibrierung.

Zur Erzielung hoher Genauigkeiten ist dieser Kalibrierfaktor für jede Apparatekonstruktion in Abhängigkeit von der Wärmeleitfähigkeit und der Dicke homogener Probekörper zu ermitteln.

Für eine Konstruktion entsprechend Abb. 27 sind in Abb. 28 Kalibrierfaktoren in Abhängigkeit von der Probekörperdicke für einige Wärmeleitfähigkeiten angegeben.



$$\theta_W = \theta_\infty = 20 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\theta_K = 0 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\alpha_W = 8 \text{ W/m}^2 \text{ K};$$

$$\alpha_K = 23 \text{ W/m}^2 \text{ K};$$

$$\lambda_D = 0,03 \text{ W/m K};$$

$$s_D = 0,1 \text{ m};$$

$$A = 1,5 \text{ m} \times 1,5 \text{ m}.$$

BILD 28: Kalibrierfaktor für einen Heizkasten entsprechend Bild 27 für die oben angegebenen Abmessungen und Stoffwerte.

Aus den Unsicherheiten der einzelnen Faktoren in Gleichung (77) kann die Unsicherheit des Kalibrierfaktors abgeschätzt werden.

Mit folgenden Unsicherheiten:

$$\text{für } \lambda: \pm 2 \%; \Delta(\Delta\theta) = \pm 0,25 \text{ K}; \Delta s = \pm 0,002 \text{ m}; \Delta A = \pm 0,004 \text{ m}^2; \Delta\Phi_1 = 1,03 \Delta P; \\ \Delta P: \pm 2 \% \text{ und } \Phi_3 = 0.$$

ist die Unsicherheit der in Bild 28 angegebenen Werte kleiner als 0,5 %.

Damit kann die Unsicherheit der mittleren Wärmestromdichte folgendermaßen berechnet werden:

$$\Delta q = \pm \sqrt{\left(\frac{\Phi_1}{A}\right)^2 \cdot \Delta C_{KH}^2 + \left(\frac{C_{KH}}{A}\right)^2 \cdot \Delta\Phi_1^2 + \left(\frac{C_{KH} \cdot \Phi_1}{A^2}\right)^2 \cdot \Delta A^2} \quad (78)$$

Für einen 24 cm dicken homogenen Probekörper mit $\lambda = 0,14 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ beträgt die Unsicherheit der mittleren Wärmestromdichte damit: $\Delta q = \pm 0,3 \text{ W/m}^2$, also ca. $\pm 2,6 \%$ des Sollwertes.

Die Unsicherheit des Wärmedurchlaßwiderstandes wird damit $\Delta\left(\frac{1}{\lambda}\right) = \pm 0,12 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, also $\pm 7,3 \%$ des Sollwertes.

Da bei diesen Untersuchungen von der Kenntnis der exakten Werte sowohl für die Kalibrierung, als auch für die Messung ausgegangen wird, mit der Annahme idealer Verhältnisse im Heizkasten, ist das angegebene Ergebnis unter den angenommenen Voraussetzungen das Bestmögliche.

Die Ermittlung der Unsicherheit der Wärmedurchgangskoeffizienten-Messung wird an der gleichen homogenen Probe aufgezeigt.

Bei der Wärmestromdichte-Ermittlung kann bestenfalls die oben angegebene Genauigkeit erzielt werden. Die Unsicherheit des gemessenen Wärmedurchgangskoeffizienten bei $\alpha_j = \alpha_W = 8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$; $\alpha_a = \alpha_K = 23 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$; $\theta_W = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; $\theta_K = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ wäre in diesem Fall ca. $\pm 0,01 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, also etwa $\pm 2 \%$ des Sollwertes.

Durch die Messung bei von α_j und α_a abweichenden Wärmeübergangskoeffizienten würde sich zwar die Unsicherheit des gemessenen Wärmedurchgangskoeffizienten k_g nur unwesentlich verändern, durch die Korrektur würde jedoch eine weitere Unsicherheit entstehen.

Nimmt man für die Temperaturdifferenz-Messung zwischen Umgebung und Oberfläche der Probe eine Unsicherheit von $0,5 \text{ K}$ an, was bei inhomogenen Probekörpern entweder nicht, oder nur mit erheblichem Aufwand zu erzielen ist, so erhält man für die Wärmeübergangskoeffizienten folgende Unsicherheiten: $\Delta\alpha \approx 0,05 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. Für den korrigierten Wärmedurchgangskoeffizienten k_K also ca. $\pm 20 \%$ des Sollwertes.

Für inhomogene Proben ist mit Unsicherheiten dieser Größenordnung zu rechnen.

Zur Fehlerminimierung durch die Apparatekonstruktion werden nachfolgend einige Untersuchungsergebnisse angegeben.

Die Definition des Wärmedurchlaßwiderstandes setzt bei der Messung $\Phi_4 = 0$ voraus; dies würde $C_{KH} = 1$ und $\Delta C_{KH} = 0$ entsprechen. Mit Apparatekonstruktionen entsprechend Bild 27 kann diese Bedingung nicht erfüllt werden.

In Bild 29 ist das sich bei dieser Konstruktion im Randstirnflächenbereich, einschließlich des angrenzenden Dämmstoffes und der Heizkastenwände, einstellende Temperaturfeld schematisch dargestellt.

Auch durch Verstärkung der Randstirnflächendämmung kann Φ_4 nicht beseitigt werden.

Um die Größenordnung dieses Einflusses aufzuzeigen, ist in Bild 30 in einem Diagramm die Abweichung des Meßergebnisses vom Sollwert aufgrund des Verlustwärmestromes Φ_4 durch die Randstirnflächen einer Probe von $1,5 \text{ m} \times 1,5 \text{ m}$ in Abhängigkeit von der Probendicke und der Wärmeleitfähigkeit der Probe für diese Apparatekonstruktion angegeben.

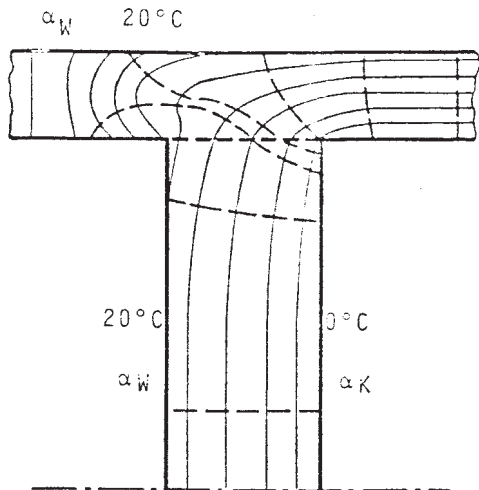
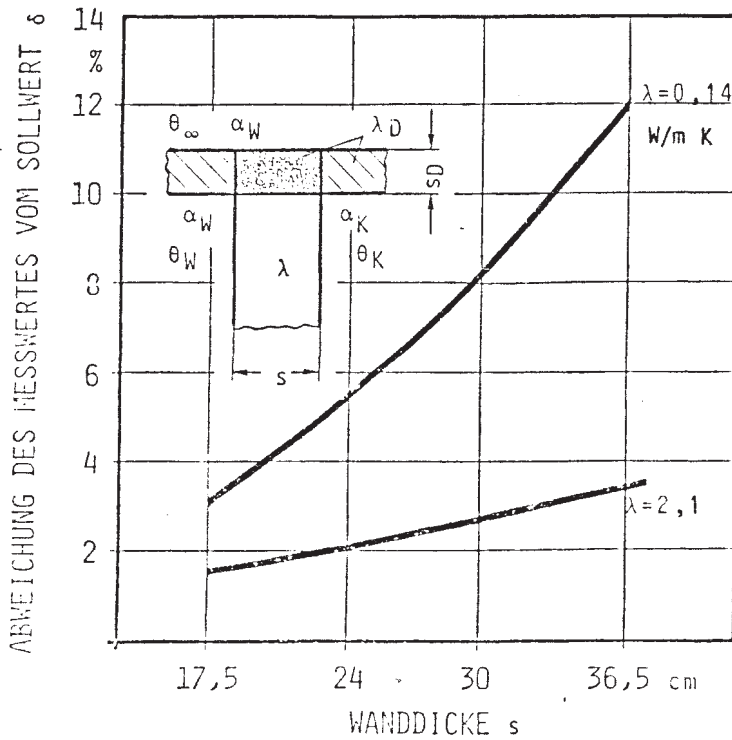


BILD 29: Schematische Darstellung des Temperaturfeldes im Bereich der Randstirnfläche und des angrenzenden Heiz- und Kühlkastens bei der Methode mit kalibriertem Heizkasten.

— Linien gleicher Temperatur
 - - - Richtung der Wärmestromdichte



$\theta_W = \theta_\infty = 20 \text{ }^\circ\text{C};$
 $\theta_K = 0 \text{ }^\circ\text{C};$
 $\alpha_W = 8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
 $\alpha_K = 23 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
 $\lambda_D = 0,03 \text{ W/m K};$
 $s_D = 0,1 \text{ m}.$

BILD 30: Einfluß des Verlustwärmestroms Φ_4 durch die Randstirnflächen auf das Ergebnis des Wärmedurchlaßwiderstandes homogener Proben 1,5 m x 1,5 m in Abhängigkeit von der Wanddicke und der Wärmeleitfähigkeit der Proben (ohne Kalibrierung des Heizkastens).

Mit Apparatekonstruktionen entsprechend Bild 26 a, Nr. 3, kann der Verlustwärmestrom Φ_4 wesentlich verringert werden.

Um sehr genaue Ergebnisse zu erzielen muß durch die Apparatekonstruktion oder durch entsprechende Maßnahmen an den Randstirnflächen, wie zum Beispiel eine Randstirnflächen-Temperierung auf die Probenmitteltemperatur, dafür gesorgt werden, daß $\Phi_4 \approx 0$ wird.

Bei der Messung mit Maske muß bei der Ermittlung von Φ_1 der Wärmestrom durch die Maske Φ_5 zusätzlich berücksichtigt werden. Die Unsicherheit von Φ_1 muß im jeweiligen Anwendungsfall abgeschätzt werden.

Zur Ermittlung der Wärmestromdichte im Probekörper sind zusätzlich die Einflüsse der Wärmeströme Φ_4 und Φ_2 zu berücksichtigen.

Dies erfordert eine Kalibrierung mit Maske (C_{KH}^*).

5.3.3 Methode mit geregelttem Heizkasten.

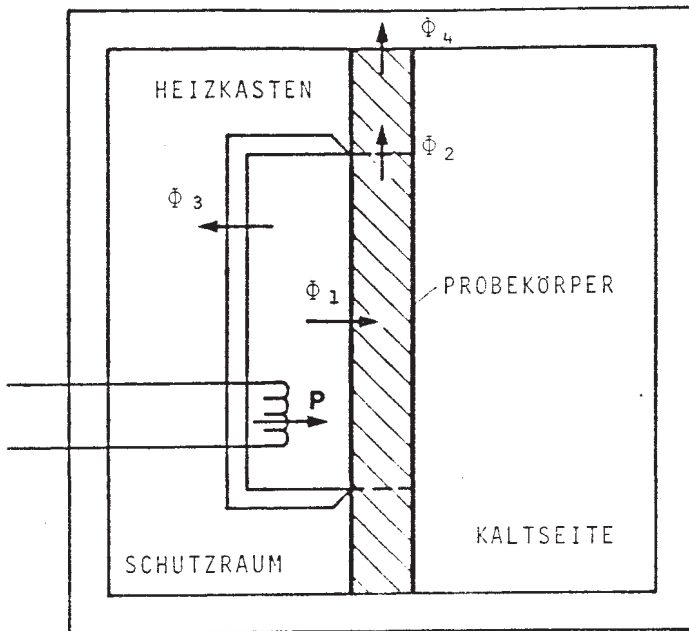
Da bei der Methode mit geregelttem Heizkasten (vergleiche Bild 31) die Meßflächen-Randstirnfläche im allgemeinen nicht mit der Probekörper-Randstirnfläche übereinstimmt, und deshalb der Heizkasten im Probekörperbereich auf der Oberfläche anliegt, sowie in der Umgebung des Heizkastens derselbe thermische Zustand hergestellt wird wie im Heizkasten, ergeben sich gegenüber der Betrachtungsweise bei der Methode mit kalibriertem Heizkasten folgende Unterschiede:

1. Der Fehlerwärmestrom Φ_3 durch die Heizkastenwand soll im stationären Temperaturzustand 0 sein. Bedingt durch Regelschwankungen und die geometrischen Verhältnisse kann dies in der Meßpraxis nur angenähert werden. Die Unsicherheit von Φ_1 ist damit:

$$\Delta\Phi_1 \approx \Delta P. \quad (79)$$

2. Bedingt durch den auf der Oberfläche des Probekörpers anliegenden Heizkasten wird das Temperaturfeld in der Probe im Kontaktbereich mit der Heizkastenwand beeinflusst. Dies führt in der Randstirnfläche des Meßausschnittes zu einem Verlustwärmestrom Φ_2 . Unterschiedliche thermische Bedingungen zwischen Heizkasteninnenraum und Umgebung verstärken diesen Effekt.

2a)



2b)

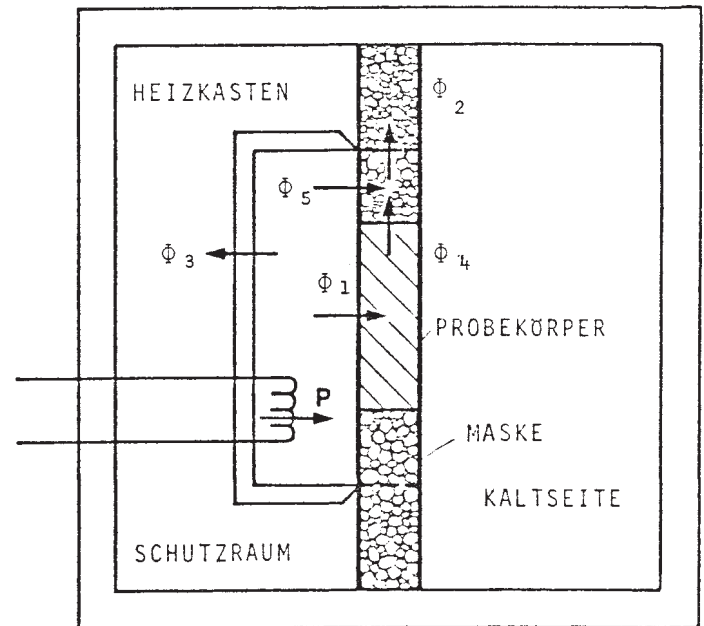
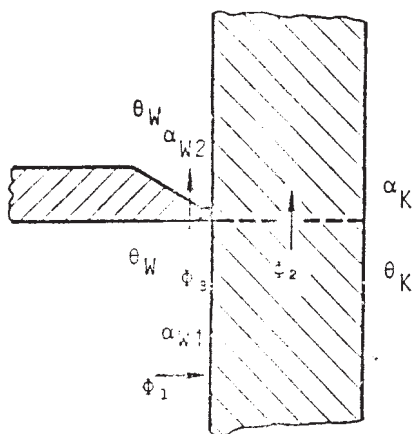


BILD 31: Methode mit geregelttem Heizkasten.

In Bild 32 sind die Wärmeströme und der Isothermenverlauf im Kontaktbereich der Probe mit der Heizkastenwand schematisch dargestellt.



a.) Fehlerwärmeströme

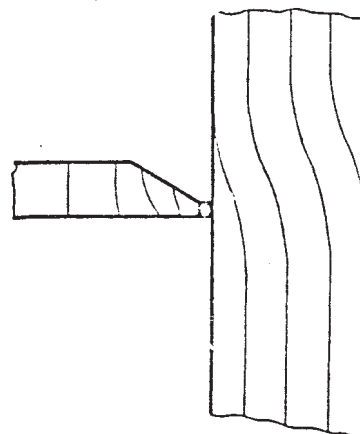
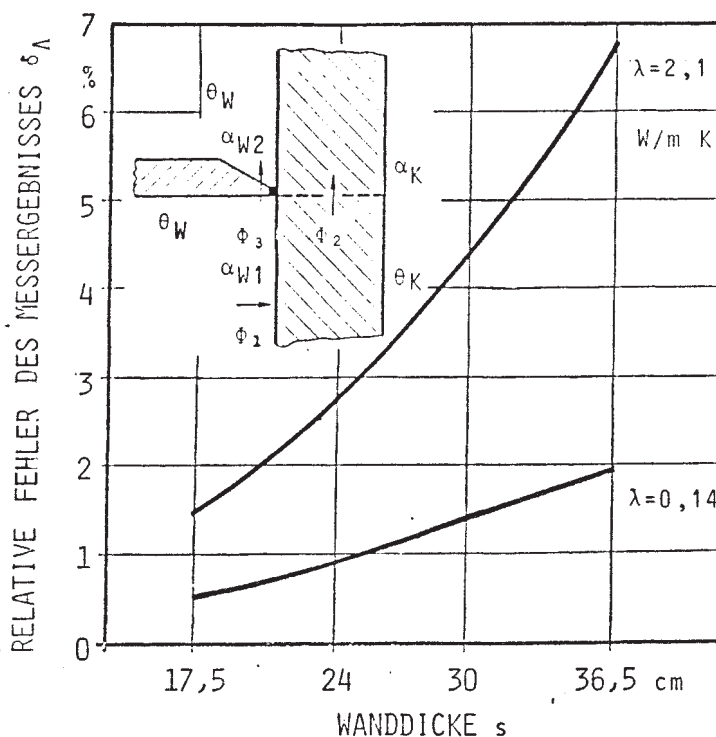
b.) Isothermenverlauf für $\alpha_{W2} > \alpha_{W1}$

BILD 32: Schematische Darstellung der Wärmeströme und des Isothermenverlaufs im Kontaktbereich des Heizkastens mit der Probe bei der Methode mit geregelttem Heizkasten.

Die Nichtberücksichtigung von Φ_2 bei der Ermittlung der mittleren Wärmestromdichte im Probekörper führt zu einer Unsicherheit des Meßergebnisses.

Zur Abschätzung der Größenordnung dieses Einflusses ist in Bild 33 ein Beispiel angegeben:

An einem Probekörper von 1,5 m x 1,5 m ist ein Heizkasten von 1,0 m x 1,0 m zentrisch angeordnet. Die durch Φ_2 bedingte Unsicherheit ist dort in Abhängigkeit von der Probekörperdicke und der Wärmeleitfähigkeit angegeben.



Heizkastendicke: $s_D = 10$ cm
mit $\lambda_D = 0,03$ W/m K

Probengröße: 1,5 m x 1,5 m

Heizkastenöffnung: 1,0 m x 1,0 m

Dichtlippe: 1 cm x 1 cm
 $\lambda = 0,1$ W/m K

$\theta_W = 20$ °C;

$\theta_K = 0$ °C;

$\alpha_{W1} = 8$ W/m² K;

$\alpha_{W2} = 4$ W/m² K;

$\alpha_K = 23$ W/m² K.

BILD 33: Einfluß unterschiedlicher Wärmeübergangskoeffizienten innerhalb und außerhalb des Heizkastens auf das Ergebnis bei der Ermittlung des Wärmedurchlaßwiderstandes bei der Methode mit geregelttem Heizkasten.

Der Einfluß der Proben-Randstirnfläche auf die Meßausschnitts-Randstirnfläche kann durch Vergrößerung der Schutzringbreite zwischen Meßausschnitt und Probenrand verringert werden.

Die durch Φ_4 bedingte Unsicherheit ist bei Konstruktionen gemäß Bild 31 a) für Probenabmessungen von 1,5 m x 1,5 m bei zentrisch angeordneten Meßflächen von 1,0 m x 1,0 m für Wanddicken bis zu 40 cm kleiner als 2 % des Ergebnisses.

Ohne Berücksichtigung der durch Φ_2 und Φ_4 bedingten Unsicherheit erhält man:

$$\Delta q = \pm \sqrt{\left(\frac{1}{A}\right)^2 \cdot \Delta p^2 + \left(\frac{\Phi_1}{A^2}\right)^2 \cdot \Delta A^2} \quad (80)$$

Für das in Abschnitt 5.2.2 angegebene Beispiel: 24 cm dicker homogener Probekörper mit $\lambda = 0,14 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ erhält man für die mittlere Wärmestromdichte im Probekörper $\Delta q = \pm 0,22 \text{ W/m}^2$, also ca. 2,1 % der Sollwärmestromdichte.

Die Unsicherheit des Wärmedurchlaßwiderstandes ist hier $\Delta\left(\frac{1}{\Lambda}\right) = \pm 0,09 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$, also ca. $\pm 5,4 \%$ des Sollwertes.

Mit Berücksichtigung einer Unsicherheit entsprechend Bild 33 würde die Unsicherheit jedoch schon ca. $\pm 6,3 \%$ des Sollwertes betragen.

Bei der Messung mit Maske gilt entsprechendes wie bei der Methode mit kalibriertem Heizkasten.

5.3.4 Messung mit Wärmestrommeßplatten.

Bei der Anwendung von Wärmestrommessern in homogenen und nahezu homogenen Probekörpern zur Ermittlung der mittleren Wärmestromdichte die proportional der Thermospannung des Wärmestrommessers ist, hängt die Genauigkeit des Meßwertes von der Genauigkeit der Kalibrierung des Wärmestrommessers und von der Genauigkeit der Erfassung des Meßsignals ab:

$$\Delta q = \pm \sqrt{(U_{WS})^2 \cdot (\Delta C_{WS})^2 + (C_{WS})^2 \cdot (\Delta U_{WS})^2} \quad (81)$$

Beide Unsicherheiten (ΔC_{WS} und ΔU_{WS}) können hierbei als bekannt angenommen werden.

Für das Beispiel der homogenen Wand, 24 cm dick, mit der Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,14 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, erhält man für einen Wärmestrommesser, dessen Eichfaktor $C_{WS} = 3,3 \text{ W/m}^2\cdot\text{mV}$ ist (Unsicherheit $\pm 3 \%$; $\Delta U_{WS} = \pm 3 \mu\text{V}$) für die mittlere Wärmestromdichte eine Unsicherheit von $\pm 0,32 \text{ W/m}^2$, also ca. $\pm 3 \%$ des Sollwertes.

Für den Wärmedurchlaßwiderstand entsteht damit eine Unsicherheit von $\pm 0,13 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$, also ca. $7,7 \%$ des Sollwertes.

Eine weitere Unsicherheit kann durch den Fehlerwärmestrom Φ_2 (vergleiche Bild 34) bei der Ermittlung von q entstehen.

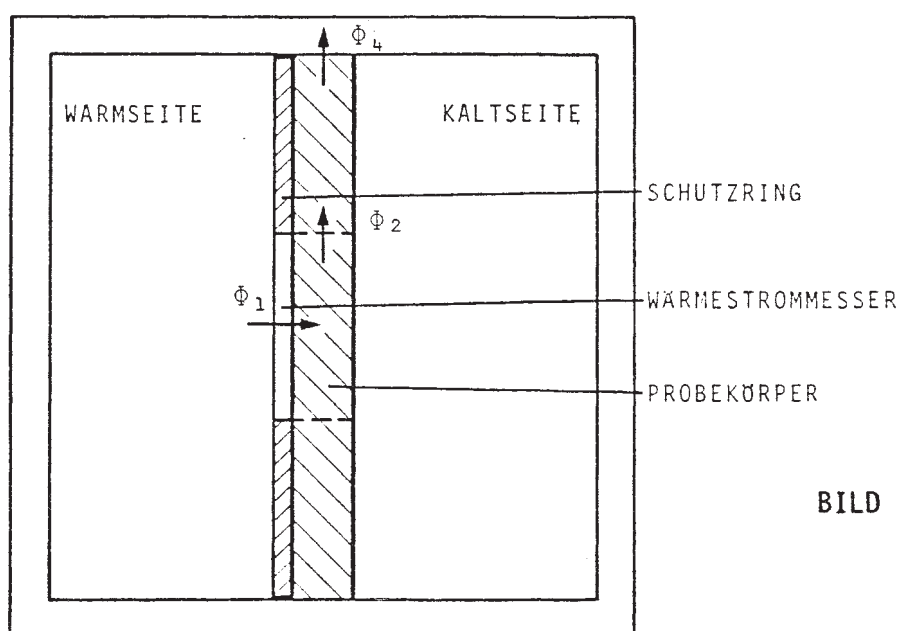


BILD 34: Methode mit Wärmestrommesser.

In Tabelle 7 ist der Einfluß von Φ_2 auf das Meßergebnis für zentrisch in Probekörpern von $1,5 \text{ m} \times 1,5 \text{ m}$ angeordneten Wärmestrommessern von $0,5 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$ auf der wärmeren Probekörperoberfläche mit einem Schutzring desselben Materials angegeben.

In Tabelle 7 bedeutet

$$\delta = \frac{\frac{1}{\Lambda_g} - \frac{1}{\Lambda}}{\frac{1}{\Lambda}} \cdot 100 \quad (\%)$$

und

$$\frac{1}{\Lambda_g} = \frac{(\theta_1 - \theta_2)A}{\Phi_1} \quad (\text{m}^2 \text{ K/W})$$

(82)

Nr.	s	λ	1/ Λ	δ_{WS}
-	m	W/m K	m ² K/W	%
1	0,175	0,14	1,25	0,01
2	0,175	1,3	0,135	0,1
3	0,175	2,1	0,083	0,1
5	0,24	1,3	0,185	0,2
6	0,24	2,1	0,114	0,3
7	0,3	0,14	2,143	0,5
10	0,365	0,14	2,607	0,7
11	0,365	1,3	0,281	0,7
12	0,365	2,1	0,174	0,7

TABELLE 7: Einfluß des Fehlerwärmestroms Φ_2 auf das Ergebnis bei der Ermittlung des Wärmedurchlaßwiderstandes mit Wärmestrommeßplatten.

Zentrische Anordnung eines Wärmestrommessers 0,5 m x 0,5 m auf einem homogenen Probekörper von 1,5 m x 1,5 m mit 10 cm Randstirnflächendämmung;

$$\begin{aligned} \lambda_D &= 0,03 \text{ W/m K;} \\ \theta_W &= 20 \text{ }^\circ\text{C;} \\ \theta_K &= 0 \text{ }^\circ\text{C;} \\ \alpha_W &= 8 \text{ W/m}^2 \text{ K} \\ \alpha_K &= 23 \text{ W/m}^2 \text{ K.} \end{aligned}$$

5.4 SIMULATION INHOMOGENER WÄNDE. (Mauerwerk, Bauteile mit Wärmebrücken)

Neben den nicht erfaßbaren Materialunregelmäßigkeiten in den Probekörpern, die zu gewissen Meßwertstreuungen führen, stellen die genau lokalisierbaren Unregelmäßigkeiten, wie zum Beispiel die Mörtelfugen von Mauerwerk, Inhomogenitäten dar, die das Temperaturfeld in der Wand beeinflussen.

Da die Wärmeleitfähigkeit des Mörtels in der Regel von der der Steine abweicht, ergeben sich bei Nichterfassung repräsentativer Ausschnitte nicht repräsentative Meßergebnisse.

In Tabelle 8 sind einige Steinformate, Fugenabmessungen und Fugenanteile angegeben.

STEIN		FUGENDICKE		FUGENANTEIL
Länge	Höhe	Stoß	Lager	der Gesamtfläche
mm	mm	mm	mm	%
490	238	10	12	6,7
490	115	10	10	9,8
365	115	10	10	9,8
240	113	10	12	13,2
240	238	10	12	8,6
365	238	10	12	7,3
245	238	5	12	6,7
370	238	5	12	6,1
495	238	5	12	5,8

TABELLE 8: Steinformate, Fugenabmessungen und Fugenanteil im Mauerwerk.

Bei Messung an verputzten Wänden kann die Lage der Fugen unter Umständen nicht ohne weiteres festgestellt werden, das heißt, neben der Größe des Meßausschnittes spielt auch dessen Anordnung an der Wand eine Rolle. Nur die "repräsentative Meßflächengröße" ist anordnungsunabhängig.

In den Bildern 35 und 36 sind die Abhängigkeiten des erfaßten Fugenanteils von der Kantenlänge einer quadratischen Meßfläche für die großformatigen Steine: 490 mm x 238 mm x s und 365 mm x 238 mm x s bei jeweils gleicher Anordnung der linken unteren Ecke im Mauerwerk angegeben.

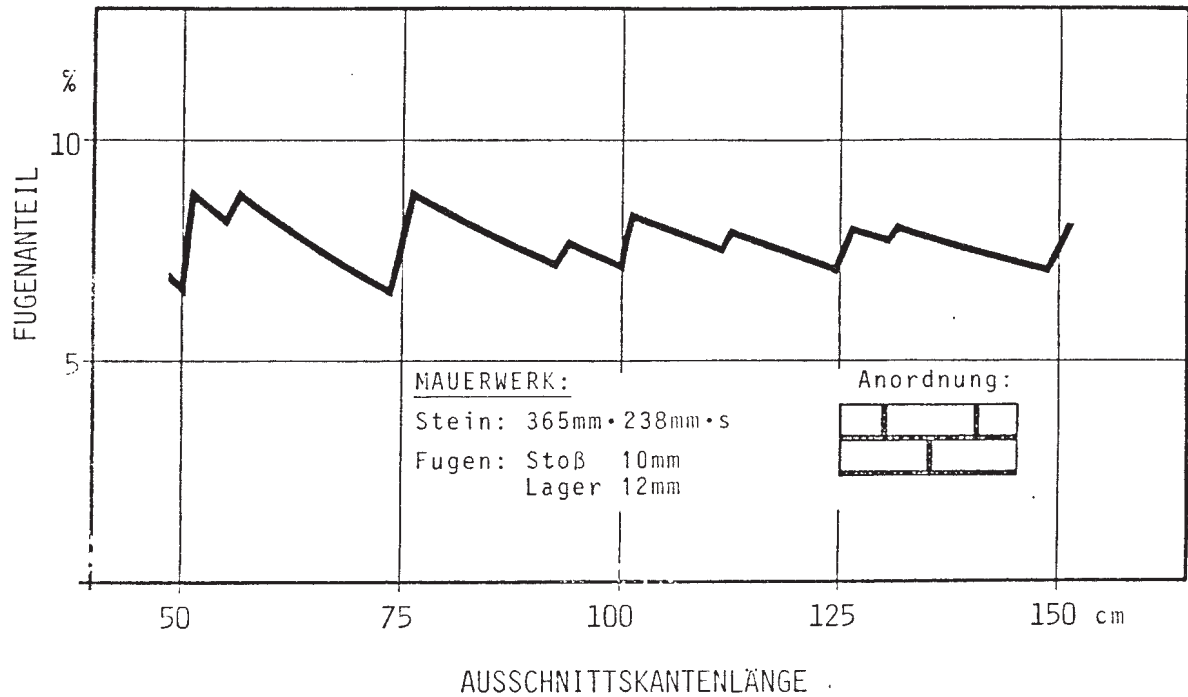


BILD 35: Fugenanteil eines quadratischen Mauerausschnittes in Abhängigkeit von der Ausschnittskantenlänge.

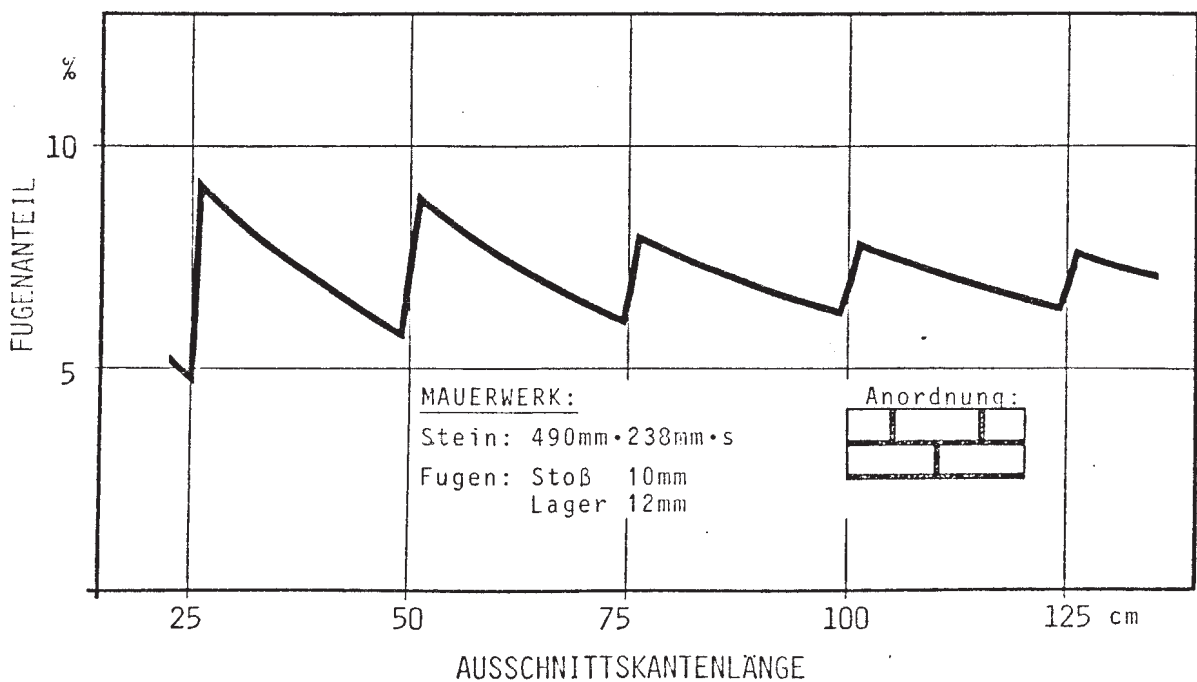


BILD 36: Fugenanteil eines quadratischen Mauerausschnittes in Abhängigkeit von der Ausschnittskantenlänge.

Die für den jeweiligen Mauerausschnitt einer 30 cm dicken Wand berechneten äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten für die nebeneinander liegenden Bereiche unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit

$$\lambda_{\text{äqu}} = s \cdot \Lambda_{\text{ges}} \quad (83)$$

(isotherme Oberflächen vorausgesetzt), verglichen mit dem Sollwert eines repräsentativen Ausschnitts, sind in Bild 37 dargestellt, wobei für den Stein $\lambda_{\text{Stein}} = 0,14 \text{ W/m K}$ und für den Mörtel $\lambda_{\text{Mörtel}} = 0,87 \text{ W/m K}$ angenommen wurde.

Für die in Tabelle 8 angegebenen Steinformate ist der so ermittelte kleinste repräsentative Ausschnitt $50 \text{ cm} \cdot 75 \text{ cm}$.

Wie aus Bild 37 ersichtlich ist, führt zum Beispiel die Meßflächengröße $50 \text{ cm} \cdot 50 \text{ cm}$ beim Steinformat $365 \text{ mm} \cdot 238 \text{ mm} \cdot s$ schon zu einem Fehler von ca. 2 %.

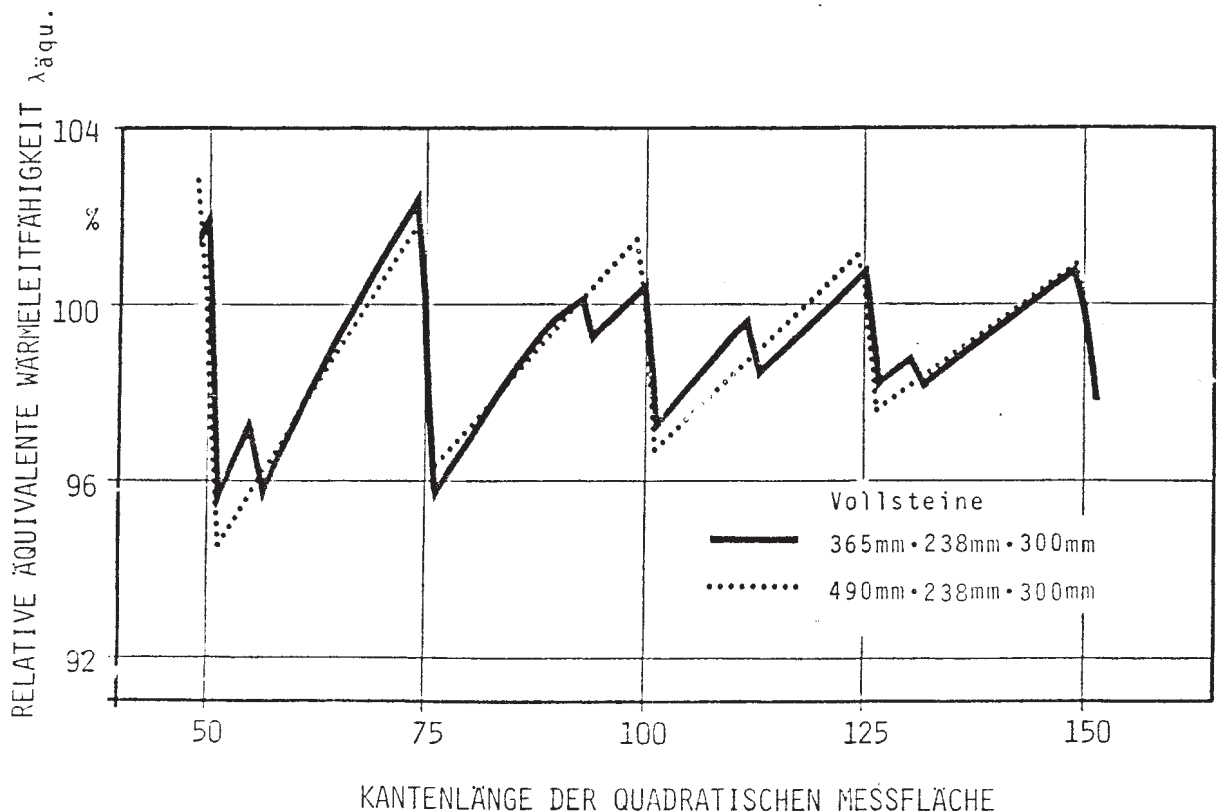


BILD 37: Einfluß der Meßflächengröße auf das Ergebnis des Wärmehaßwiderstandes bei Mauerwerk aus Vollsteinen mit 12 mm Lagerfugen und 10 mm Stoßfugen mit

$\lambda_{\text{Stein}} = 0,14 \text{ W/m K};$
 $\lambda_{\text{Mörtel}} = 0,87 \text{ W/m K};$
 Mauerdicke $s = 300 \text{ mm}.$

5.5 DIE OBERFLÄCHENTEMPATURMESSUNG BEI PROBEKÖRPERN MIT NICHTISOTHERMEN OBERFLÄCHEN.

Zur Ermittlung des Wärmedurchlaßwiderstandes nach Gleichung (1) sind bei nichtisothermen Probenoberflächen die mittleren Oberflächentemperaturen im Meßausschnitt zu ermitteln. In der Praxis kann das nur mit einer begrenzten Anzahl von Meßstellen erfolgen.

Am Beispiel eines Mauerwerks ($\lambda_{\text{Stein}} = 0,14 \text{ W/m K}$; Steinformat: $365 \text{ mm} \cdot 238 \text{ mm} \cdot s$) im Verbund mit Kalkzementmörtel ($\lambda_{\text{Mörtel}} = 0,87 \text{ W/m K}$, Lagerfuge 12 mm und Stoßfuge 10 mm dick) wurden für Waddicken s von 175 mm , 240 mm , 300 mm und 365 mm die Oberflächentemperaturen durch Simulation berechnet. Der Fugenanteil innerhalb eines repräsentativen Ausschnitts dieser Wand beträgt $7,34 \%$.

Bei bekannter Lage der Fugen kann mit der Steintemperatur und der Mörteltemperatur (vergleiche Bild 38) mit Berücksichtigung des Flächenanteils ein Mittelwert berechnet werden.

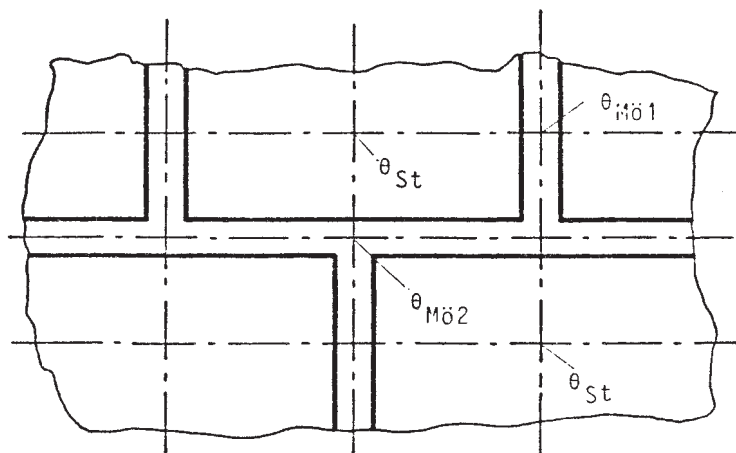


BILD 38: Beispiel für die Temperaturmessstellenanordnung bei inhomogenen Bauteilen.

Wie aus Tabelle 9 ersichtlich ist, kann dieser Mittelwert infolge unterschiedlicher Gradienten im Stein und im Mauerwerk vom Integralmittelwert abweichen und zu einem weiteren Fehler im Ergebnis führen. Die Mitberücksichtigung einer zweiten Mörteltemperaturmessstelle (vergleiche Bild 38, $\theta_{Mö1}$) führt zu keiner wesentlichen Verbesserung.

Nur durch weitere Temperaturmeßstellen zwischen Steinmitte und Fuge kann die Abweichung verringert werden.

Ist die Lage der Fugen nicht bekannt, oder werden Oberflächentemperaturmeßstellen nicht sorgfältig angebracht, können bei der Ermittlung des Wärmedurchlaßwiderstandes zusätzliche Fehler in der Größenordnung von 1 % bis 3 % entstehen.

Mauerwerk: $b \cdot h = 365 \text{ mm} \cdot 238 \text{ mm}$;

Lagerfuge: 12 mm;

Stoßfuge: 10 mm;

Fugenanteil: 7,34 %;

λ_{Stein} : 0,14 W/m K;

$\lambda_{\text{Mörtel}}$: 0,87 W/m K.

WAND NR.	s	SIMULATIONSERGEBNISSE					OBERFLÄCHENTEMPERATURERMITTLUNG AUS EINZELMESSWERTEN UND EINFLUSS AUF $1/\Lambda$				
		q	θ_1	θ_2	$\Delta\theta$	$1/\Lambda$	$\theta_{\text{St}1}$	$\theta_{\text{St}2}$	$\theta_{\text{M}02}$	$\theta_{\text{M}01}$	$\delta^{1)}$
-	m	W/m ²	°C	°C	K	m ² K/W	°C	°C	°C	°C	%
M1	0,175	17,8	15,6	0,8	14,9	0,834	16,1	0,6	14,6	2,1	2,5
M2	0,240	13,7	16,6	0,6	16,1	1,171	17,0	0,5	15,8	1,6	1,9
M3	0,300	11,1	17,2	0,5	16,8	1,505	17,5	0,4	16,5	1,4	1,5
M4	0,365	9,5	17,7	0,4	17,3	1,818	17,9	0,3	17,1	1,1	1,3

1)

$$\delta = \left(\frac{\Lambda}{\Lambda_g} - 1 \right) \cdot 100$$

TABELLE 9: Mauerwerkssimulation (Einfluß nichtisothermer Oberflächen).

5.6 STÖREINFLOSSE AUS DER UMGEBUNG.

Die durch den Übergangswiderstand an der Probenoberfläche bedingte Differenz zwischen Probenoberflächentemperatur und Umgebung, führt bei den Kastenmethoden zu unterschiedlichen Wechselwirkungen zwischen Probenoberfläche und Kasteninnenoberflächen. Bei unterschiedlichem Strahlungswärmeaustausch zwischen Probenoberfläche und den Heizkasteninnenoberflächen können, in Abhängigkeit von der Probenoberflächentemperatur, Verhältnisse eintreten, die eine Regelung der Kasteninnenoberflächentemperatur auf ein einheitliches Außenoberflächentemperaturniveau (Wärmestrom durch die Heizkastenwand $\Phi_3 = 0$) unmöglich machen.

Um die Größenordnung des Fehlers bei nicht vorhandenen entsprechenden Einrichtungen am Heizkasten abzuschätzen und seine Abhängigkeit von verschiedenen Parametern aufzuzeigen, wurden nachfolgend einige Näherungsberechnungen durchgeführt.

In einer vereinfachten Kastenkonstruktion ohne Einbauten (vergleiche Bild 39) wird die Wärmebilanzgleichung der inneren Kastenoberfläche für verschiedene vereinfachende Randbedingungen iterativ gelöst.

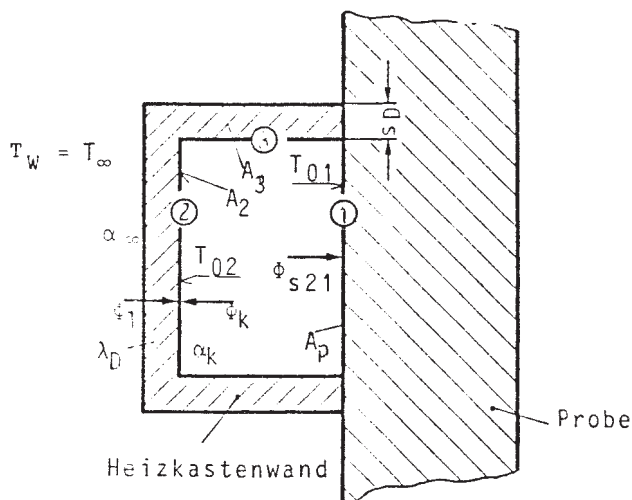


BILD 39: Einfache Kastenkonstruktion zur Ermittlung der Wärmebilanz an der Kasteninnenoberfläche.

Das Temperaturniveau der Heizkastenwand liegt versuchsbedingt über dem der Probenoberfläche; es werden jeweils isotherme Oberflächen angenommen. Im stationären Zustand muß dann der von der Probe durch Strahlung an die Heizkastenoberfläche übertragene Nettowärmestrom (Φ_s) aus dem Heizkasten konvektiv (Φ_k) und/oder mittels Leitung (Φ_l) durch die Kastenwand zugeführt werden.

$$\Phi_s = \Phi_l + \Phi_k \quad (84)$$

mit

$$d\phi_1 = \frac{\lambda_D}{s_D} \cdot (T_\infty - T_{0i}) dA$$

$$d\phi_k = \alpha_k \cdot (T_1 - T_{0i}) dA$$

$$d\phi_S = \frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot c_S \cdot \phi_{1i}}{1 - (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2) \phi_{1i} \cdot \phi_{i1}} \left[\left(\frac{T_{01}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{0i}}{100} \right)^4 \right] dA \quad (84)$$

für $i = 2, 3$.

Am Beispiel der Wand 3 (vergleiche Tabelle 2) mit einem Heizkasten (1,5 m • 1,5 m • 0,5 m Innenabmessungen und 10 cm Wanddicke) wurden für verschiedene Kastenwanddicken und unterschiedliche, jedoch jeweils über der ganzen Wandoberfläche konstanten Wärmeübergangskoeffizienten die jeweiligen Einflüsse abgeschätzt.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 10 zusammengefaßt. Sie stellen, gemäß der Annahmen und der Berechnungsmethode, nur Orientierungswerte dar, verdeutlichen jedoch, daß die Herstellung idealer Versuchsbedingungen mit Heizkasten praktisch nicht möglich ist, daß die Fehler durch entsprechende Maßnahmen jedoch minimiert werden können.

$$\phi_{12} = \phi_{21} = 0,545; \quad \varepsilon_1 = 0,93;$$

$$\phi_{13} = 0,12; \quad \phi_{31} = 0,34;$$

$$s_D = 10 \text{ cm};$$

$$\alpha_k = 8 \text{ W/m}^2 \text{ K}.$$

T_{01}	ϕ_1	ε_2	T_{02}	ϕ_{21}	ϕ_{31}	ϕ_{k2}	ϕ_{k3}	ϕ_{kges}	δ
°C	W	-	°C	W	W	W	W	W	%
10,07	178,7	0,93	18,2	47,5	12,2	1,2	0,4	1,6	1,0
10,07	178,7	0,049	19,9	3,1	0,67	0,1	0	0,1	0,1

TABELLE 10: Störeinflüsse aus der Umgebung;
(Beispiel: Wand Nr. 3; vergleiche Tabelle 2).

5.7 MESSUNG FEUCHTER PROBEKÖRPER.

Infolge des vom Temperaturgefälle im Bauteil abhängigen Wasserdampf-Partialdruckgefälles, sowie der durch die Mikrostruktur bedingten Kapillarkräfte und der physikalisch-chemischen Stoffeigenschaften, kann in feuchten Baustoffen von einer homogenen Feuchteverteilung nicht ausgegangen werden.

Bei bekannter Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit der Baustoffe vom Feuchtegehalt und bekannter Feuchteverteilung können diese feuchten Bauteile wie inhomogene Baustoffe betrachtet werden. Für die Definition des Wärmedurchlaßwiderstandes dieser feuchten Bauteile gelten dann die für inhomogene Bauteile abgeleiteten Bedingungen.

Stehen während der Messung die Oberflächen der Probekörper mit Feuchte enthaltender und Feuchte aufnehmender oder abgebender Umgebung in Wechselwirkung, so findet ein Stofftransport in oder durch den Bauteil statt. Bei einer Enthalpieänderung längs des Transportweges ist damit ein zusätzlicher Energietransport verbunden.

Ohne exakte Erfassung der Einflußfaktoren entstehen erhebliche Unsicherheiten bei der Ermittlung des Wärmedurchlaßwiderstandes solcher Bauteile. Nur durch exakte Parameterstudien können hier die Einzeleinflüsse aufgeklärt werden.

Finden innerhalb des Bauteils oder an den Bauteiloberflächen Phasenänderungen des transportierten Stoffes statt, ist die Angabe eines Wärmedurchlaßwiderstandes für dieses Bauteil nur mit Angabe des besonderen Meßzustandes sinnvoll.

Der Wärmedurchlaßwiderstand wird damit zu einer "Energiedurchlaß-Kennzahl" bei ganz bestimmten physikalisch definierten Bedingungen.

Bei der Genauigkeitsabschätzung für das Meßergebnis einer solchen Messung mit Heizkastenmethoden dürften absolute Unsicherheiten in der Größenordnung des Meßwertes zu erwarten sein.

6. ZUSAMMENFASSUNG DER UNSICHERHEITEN BEI DER MESSUNG DES WÄRMEDURCHLAßWIDERSTANDES UND DES WÄRMEDURCHGANGSKOEFFIZIENTEN MIT DEN DERZEIT ANGEWANDTEN VERSUCHSEINRICHTUNGEN.

Bei der Messung des Wärmedurchlaßwiderstandes oder des Wärmedurchgangskoeffizienten als charakteristische Größen für die Wärmedämmeigenschaften von Bauteilen sind Unsicherheiten im Meßergebnis zwar unvermeidbar, aber minimierbar; auf jeden Fall sollten sie kalkulierbar sein.

Zur Ermittlung der Unsicherheiten der Meßergebnisse können die Fehlerquellen in zwei Gruppen unterteilt werden:

1. Fehlerquellen bei der Erfassung des bei der Messung tatsächlich vorliegenden Istzustandes.
Fehlerhafte Meßfühler, falsche Meßfühleranbringung, fehlerhafte Meßsignalerfassung und Auswertung, nicht exakte Erfassung des Istzustandes, zum Beispiel durch falsche Meßfühlerplatzierung oder durch nicht ausreichende Meßfühleranzahl, um nur einige Beispiele zu nennen.
2. Fehlerquellen die dadurch entstehen, daß der Istzustand bei der Messung vom definitionsgemäß vorausgesetzten Zustand abweicht.

Nichtkonstante Umgebungstemperatur, ortsabhängige Wärmeübergangskoeffizienten, also keine eindimensionalen Temperaturfelder; Regelschwankungen und damit nichtstationäre Temperaturfelder; nicht-adiabate Randstirnflächen, konstruktions- oder funktionsbedingt; Abweichung der Randbedingungen von vorgegebenen Sollwerten.

Die aus der Fehlergruppe (1.) resultierenden Unsicherheiten können weitgehend als bekannt angenommen werden. Die aus der Fehlergruppe (2.) resultierenden Unsicherheiten können weit größer sein, als die der Gruppe (1.). Durch Kalibrierung mit Probekörpern bekannter Wärmedämmeigenschaften versucht man diese Unsicherheiten zu verringern. Bei Kalibrierung mit homogenen Probekörpern bleiben bei der Messung inhomogener Probekörper noch beträchtliche Unsicherheiten.

Bei der Messung mit Wärmestrommessern die funktionsbedingt nur eingeschränkt angewendet werden können, ergeben sich weitere Unsicherheiten mit der Erfassung nichtrepräsentativer Ausschnitte. Außerdem kann durch die Anbringung des Wärmestrommessers das Temperaturfeld im Probekörper negativ beeinflusst werden (Annahme: eindimensionale Temperaturfelder).

Das für die Anwendung der Heizkastenmethoden angeführte Argument der praxisbezogenen Prüfung würde damit gegen die Anwendung von Wärmestrommessern sprechen.

7. FEHLERMINIMIERUNG DURCH KONZIPIERUNG EINER NEUEN MESSAPPARATUR.

Wie die vorangegangenen Untersuchungen zeigten, muß bei der Messung des Wärmedurchlaßwiderstandes von Bauteilen, zwischen homogenen und inhomogenen Probekörpern unterschieden werden.

Für **homogene** Proben kann der Wärmedurchlaßwiderstand bei beliebigen Temperaturfeldern, unter der Voraussetzung, daß die Summe der Wärmeströme durch die Randstirnflächen im Meßausschnitt Null ist, mit den Oberflächentemperaturen und dem Wärmestrom durch die Meßausschnittsoberflächen eindeutig beschrieben werden.

In **inhomogenen** Probekörpern können unterschiedliche Temperaturfelder bei gleichen mittleren Oberflächentemperaturen unterschiedliche Wärmeströme und damit vom jeweiligen Temperaturfeld abhängige Wärmedurchlaßwiderstände ergeben. Einfache Zusammenhänge mit den Abmessungen und den Wärmeleitfähigkeiten der Teilbereiche können nur für eindimensionale Temperaturfelder angegeben werden.

Bei der Messung des Wärmedurchlaßwiderstandes hängt die Genauigkeit des Ergebnisses neben Fehlern der Meßwerterfassung die im jeweiligen Anwendungsfall minimiert werden können, auch noch von der Meßmethode ab. Unsicherheiten entstehen dadurch, daß der Meßwärmestrom nicht mit dem Wärmestrom durch die Oberfläche des Meßausschnittes identisch ist (Heizkasten-Methoden), oder daß undefinierte Wärmeströme durch die Randstirnflächen des Meßausschnittes vorliegen (Heizkasten-Methoden, Wärmestrommeßplatten-Methoden), allgemein: daß exakt definierte Randbedingungen nicht herstellbar sind.

An die Entwicklung einer neuen Meßapparatur sind somit folgende Anforderungen zu stellen:

1. Die Apparatur muß Einrichtungen zur Erzeugung und Aufrechterhaltung genau definierter Randbedingungen haben. Die Randbedingungen müssen in einem weiten Bereich so variierbar sein, daß für alle in Frage kommenden Bauteile durch entsprechende Temperaturfelder meßbare Wärmeströme eingestellt werden können;
2. Die Erfassung repräsentativer Wandausschnitte muß gewährleistet sein;
3. Die Randstirnflächen des Meßausschnittes müssen adiabat sein. Ist das nicht der Fall, muß der Wärmestrom durch die Randstirnflächen und der sich daraus ergebende Einfluß auf das Meßergebnis bekannt sein.
4. Es müssen alle Meßgrößen, die zu einem sicheren reproduzierbaren Meßergebnis erforderlich sind, erfaßt werden. Zusätzlich müssen alle die Meßgrößen, mit denen die Abhängigkeit des Ergebnisses von bestimmten Parametern angegeben werden kann, erfaßt werden.

Zur systematischen Untersuchung des Einflusses einzelner Parameter, zu Messungen bei Baustoffentwicklungen und zur Kontrolle der wärmeschutztechnischen Eigenschaften, ohne Berücksichtigung des Speicherverhaltens, wird nachfolgend eine Konstruktion zur Erzeugung stationärer Temperaturfelder bei definierten Randbedingungen beschrieben.

7.1 MESSPRINZIP.

Das Meßprinzip ist in Bild 40 schematisch dargestellt.

Auf der Warmseite wird durch eine Heizplatte die konstante Temperatur θ_W und auf der Kaltseite durch eine Kühlplatte die konstante Temperatur θ_K in einer Parallelebene zur Probekörperoberfläche erzeugt.

Durch eine Schutzring- und eine Gegenheizung auf der Warmseite wird eine konstante Umgebungstemperatur gewährleistet.

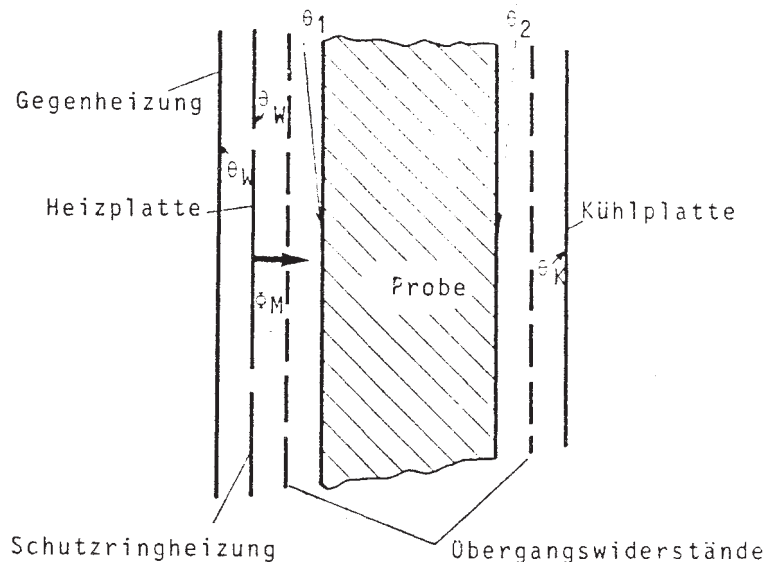


BILD 40: Meßprinzip einer Heiz- /Kühlplatten-Methode.

Da die Erzeugung isothermer Probekörperoberflächen, in inhomogenen Probekörpern praktisch nur durch sehr aufwendige Konstruktionen angenähert werden kann und um die Problematik des Kontaktwiderstandes auch bei homogenen Probekörpern auszuschalten, wird zwischen Heiz- sowie Kühlplatte und Probekörper jeweils ein definierter Übergangswiderstand geschaltet, der konstante Bedingungen an der Heiz- und Kühlplatte gewährleistet.

Bei homogenen Proben kann dieser Übergangswiderstand eine Luftschicht sein. Es muß nur gewährleistet werden, daß längs der Probekörperoberfläche konstante Wärmeübergangskoeffizienten vorliegen.

Bei inhomogenen Proben muß der Übergangswiderstand vom Temperaturfeld unabhängig sein. Er muß so konstruiert sein, daß die Heiz- und die Kühlplatte, unabhängig von der Inhomogenität der Probe, jeweils isotherm gehalten werden kann, das heißt, die "Hilfswand" (Versuchswand + Übergangswiderstände) muß isotherme Oberflächen haben. Der dann für eine Probe ermittelte Wärmedurchlaßwiderstand hängt zwar von den jeweiligen Übergangswiderständen ab, ist jedoch mit diesen zusammen eindeutig definiert.

7.2 HERSTELLUNG KONstanTER DEFINIERTER RANDBEDINGUNGEN IM MESSAUSSCHNITT.

Voraussetzung für die Ermittlung des Wärmedurchlaßwiderstandes nach Gleichung (1) sind stationäre definierte Temperaturfelder im Probekörper.

Stationäre Temperaturfelder sind mit ausreichender Genauigkeit herstellbar. Der Genauigkeitsgrad ist nur eine Frage des Mitteleinsatzes. Um bei inhomogenen Bauteilen Ergebnisse aus verschiedenen Messungen vergleichen zu können, müssen diese bei vergleichbaren Bedingungen, das heißt bei identischen Randbedingungen ermittelt werden.

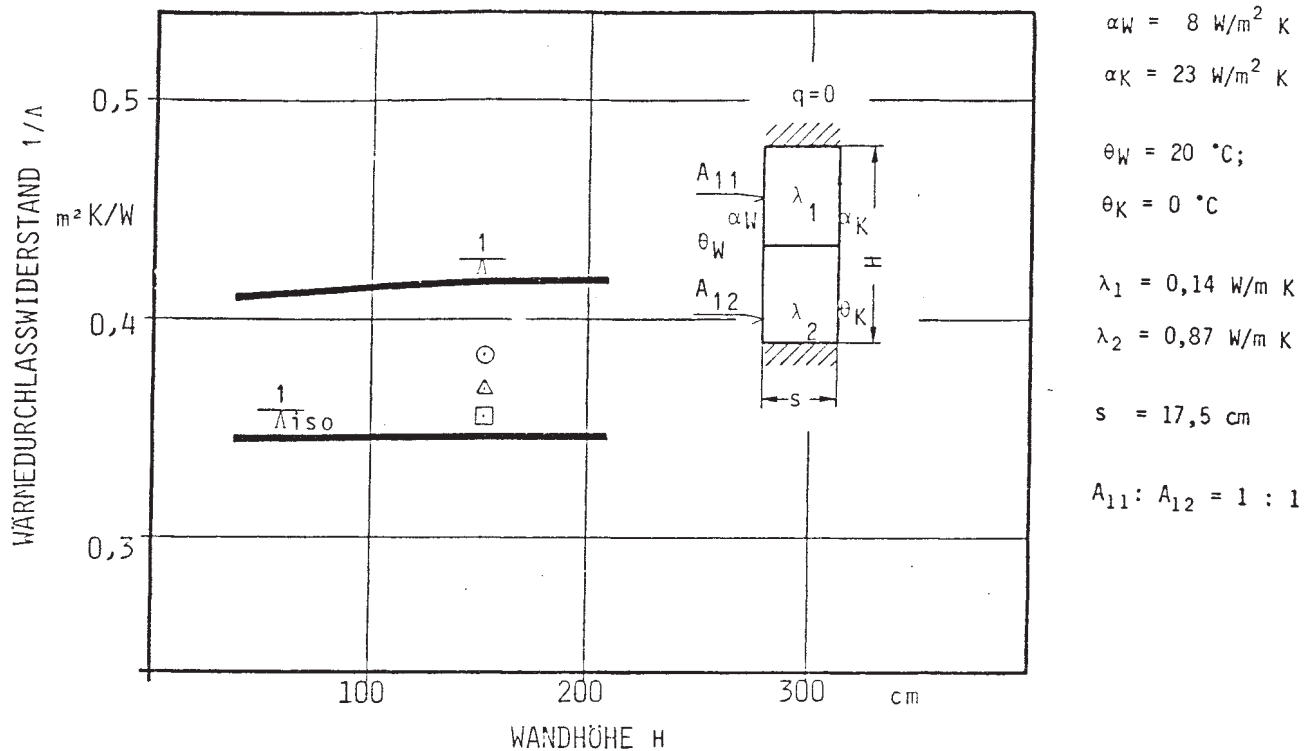
Für Bauteilbeurteilungen und Bauteilentwicklungen kann auch das Verhalten bei Variation der Randbedingungen von Interesse sein.

Die Herstellung **definierter** Temperaturfelder ist schwierig da sie mit apparativen Mitteln erfolgen muß. Verschiedene Bauteile ergeben jeweils andere Wechselwirkungen mit der Apparatekonstruktion und beeinflussen damit die Randbedingungen.

Die Erzeugung isothermer Oberflächen ist bei großflächigen Bauteilen nicht möglich.

Der Versuch der praktischen Realisierung durch Anbringung gut wärmeleitender Schichten ($\lambda_A = 229 \text{ W/m K}$, Aluminium) auf den Oberflächen der Probekörper (idealer Wärmeleitkontakt vorausgesetzt), führt zu den in Bild 41 als Einzelpunkte angegebenen Wärmedurchlaßwiderständen.

Selbst bei 3 cm dicken Schichten beträgt der Temperaturunterschied zwischen der wärmsten und der kältesten Stelle an der Probekörperoberfläche bei dem in Bild 41 angegebenen Beispiel mit $H = 1,5 \text{ m}$ noch 1,6 K.



- ⊙ 3 mm dicke Schichten mit $\lambda_A = 229 \text{ W/m K}$ (Aluminium) auf beiden Oberflächen.
- △ 3 cm dicke Schicht (λ_A) auf der wärmeren Oberfläche.
- 3 cm dicke Schichten (λ_A) auf beiden Oberflächen.

jeweils idealer Wärmekontakt angenommen.

BILD 41: Abhängigkeit des Wärmedurchlaßwiderstandes eines Bauteils von der Probengröße bei beidseitig konvektiver Wärmeübertragung.

Durch Oberflächenunebenheiten werden in der Praxis ortsabhängige Kontaktwiderstände die Verhältnisse noch weiter verschlechtern.

Wie bereits in vorangegangenen Abschnitten gezeigt wurde, ist die Erzeugung einer konstanten Wärmestromdichte an der wärmeren Oberfläche bei konvektiver Wärmeübertragung an der kälteren Oberfläche bei inhomogenen Probekörpern praktisch ebenfalls nicht realisierbar.

Praktisch realisierbar sind Konstruktionen nach der "Hilfsschicht-Methode". Isotherme Ebenen werden nicht an den Bauteiloberflächen, sondern in Parallelebenen davor erzeugt. Zwischen Isothermenebene und Bauteiloberfläche sind definierte Übergangswiderstände zu schalten.

Die Übergangswiderstände müssen temperaturfeldunabhängig sein. Bauteil und Übergangswiderstände stellen dann ein System mit exakt definierten Randbedingungen dar. Bei bekannten Übergangswiderständen kann damit der Wärmedurchlaßwiderstand auf einfache Weise aus dem Wärmedurchlaßwiderstand des Gesamtsystems abzüglich der Übergangswiderstände ermittelt werden:

$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{\Lambda_{WK}} - \frac{1}{\Lambda_{OW}} \quad (86)$$

mit

$$\Lambda_{WK} = \frac{q}{\Delta\theta_{WK}}$$

Hiermit besteht eine Kontrollmöglichkeit zur Ermittlung des Wärmedurchlaßwiderstandes aus der Differenz der mittleren Oberflächentemperaturen und der mittleren Wärmestromdichte.

Der Unterschied zu den Heizkastenmethoden besteht in der Minimierung der dort auftretenden Unsicherheiten durch andere Realisierung der "Isothermenebenen", durch andere Wärmestromdichteinspeisung und -abführung sowie durch andere Übergangswiderstände.

Bei der Realisierung sind die Übergangswiderstände der einzige Problempunkt. Durch Hintereinanderschaltung gut und schlecht wärmeleitender Schichten können die geforderten Bedingungen gut angenähert werden. Je größer die Differenz zwischen dem höchsten und niedrigsten jeweiligen Oberflächentemperaturwert ist, desto mehr Schichten sind zum Ausgleich erforderlich, oder umso dicker sind die einzelnen Schichten auszuführen.

Für die Auslegung der nachfolgenden Konstruktion kann von einer maximalen Temperaturdifferenz an der jeweiligen Oberfläche von 20 K ausgegangen werden.

8. KONSTRUKTION EINER HEIZPLATTENAPPARATUR.

8.1 KONSTRUKTIVE AUSFÜHRUNG DER WARMSEITE.

Das Temperaturniveau der Warmseite muß funktionsbedingt über, oder beim Umgebungstemperaturniveau liegen. Durch einen Dämmschutz der Gegenheizung nach außen können Umgebungstöreinflüsse vermindert werden.

Bei über Umgebungstemperaturniveau liegender Heizplattentemperatur werden Fehlerströme an den Randstirnflächen durch die Schutzringheizung verhindert. Die Wärmedämmschicht zwischen Heizplatte und Gegenheizung wird so dimensioniert, daß bei der durch die Regeleinrichtung bedingten größtmöglichen Temperaturdifferenz zwischen Heizplatte und Gegenheizplatte, der dann entstehende Fehlerwärmestrom klein ist gegen den kleinstmöglichen Meßwärmestrom und daß ebenso die Wärmekapazität dieser Dämmschicht so gering ist, daß die Änderung der gespeicherten Wärme bei entsprechenden Regelschwankungen klein ist gegen die in der Zeiteinheit durch die Probe fließende Wärmemenge.

Die Heizplatten (ebenso die Kühlplatten) können in beliebigen Größen angefertigt werden. Die Prototyp-Ausführung erfolgte in 1,5 m • 1,5 m.

Die Meßfläche für homogene Probekörper und Mauerwerk betrug 50 cm • 75 cm in zentraler Lage; die Restfläche bildet den Schutzring.

Damit für inhomogene Probekörper auch die Meßfläche 1,5 m • 1,5 m zur Verfügung steht, kann ein weiterer Schutzring angebracht werden.

Die Heizplattenkonstruktion ist in Bild 42 schematisch dargestellt.

Als geeignete Dämmschichtdicken für die rückwärtige Dämmung und die Zwischenschicht zwischen Heizplatte und Gegenheizung wurden 5 cm ermittelt, mit Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_2 < 0,04$ W/m K. Die Heizfolie und die Gegenheizfolie sind auf 3 mm dicken Aluminiumplatten aufgeklebt. Auf der der Probe zugewandten Seite ist eine 2 mm dicke Kunststoffschicht ($\lambda_3 = 0,1$ W/m K) zwischen Heizfolie und einer weiteren 1 mm dicken Metallschicht angeordnet.

Bild 42 zeigt die am Prototyp ausgeführte Warmseite. Als Übergangswiderstand wurde eine 8 mm dicke Luftfiltermatte verwendet. Die einzelnen Schichten werden in zusammensteckbaren Holzrahmenkonstruktionen gehalten. Die Dämmschicht der Gegenheizung enthält eine Versteifungskonstruktion.

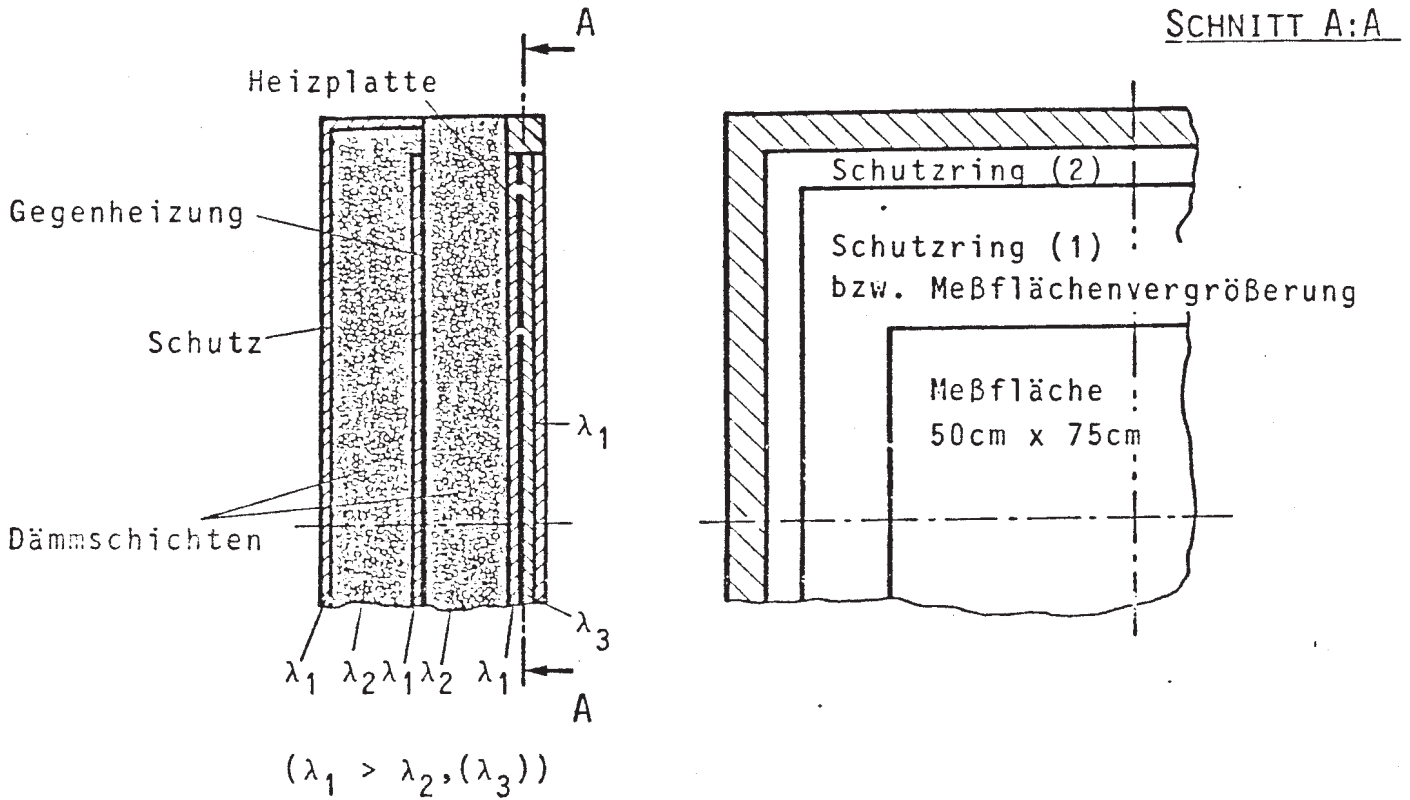


BILD 42: Schematische Darstellung der Heizplatte mit Gegenheizung und Schutzring.

Bild 43 zeigt die Warmseite des Prototyps der Heizplattenapparatur mit Übergangswiderstand.

Die Gesamtkonstruktion wird in Bild 44 gezeigt.

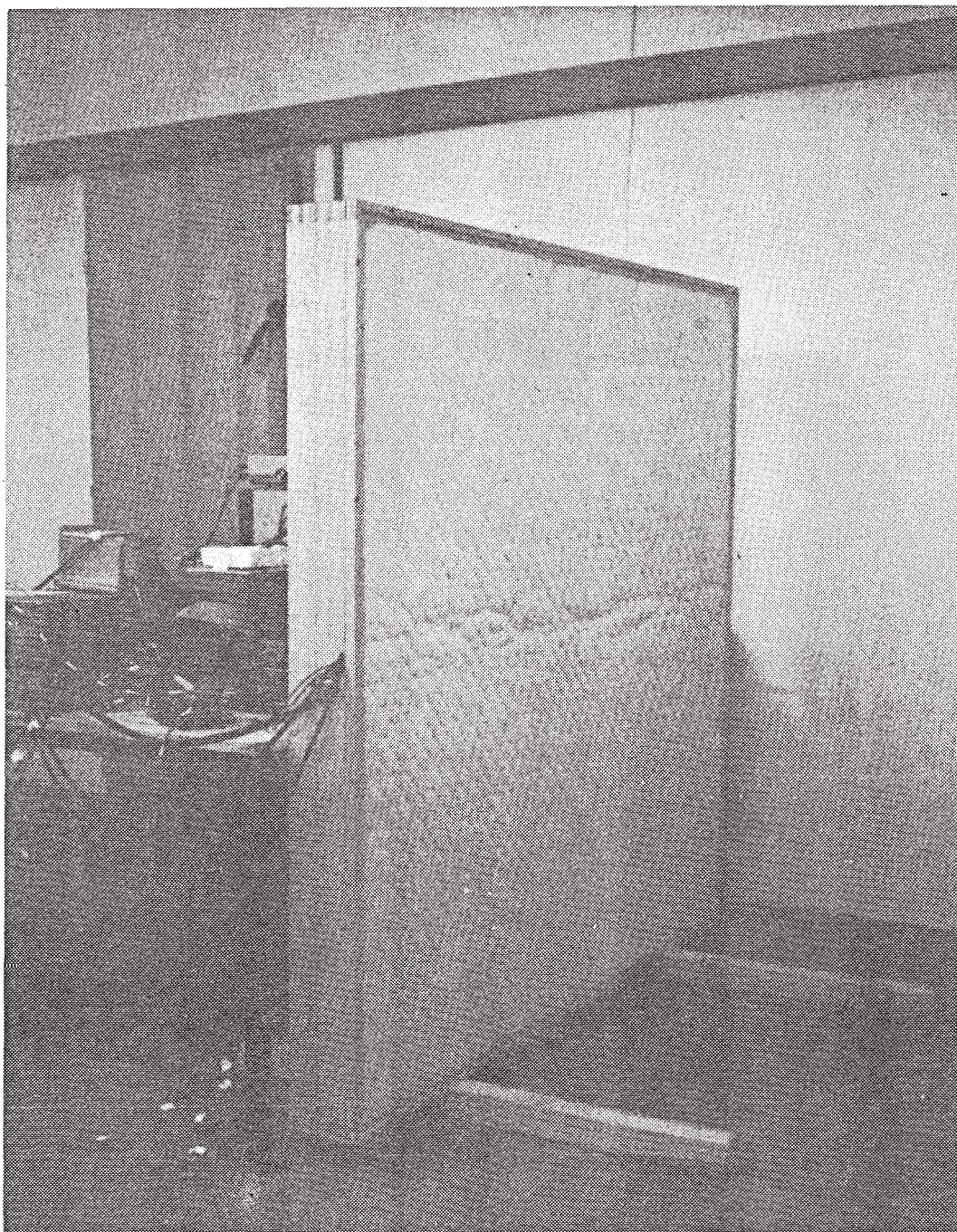


BILD 43: Warmseite des Prototyps der Heizplattenapparatur mit Übergangswiderstand.

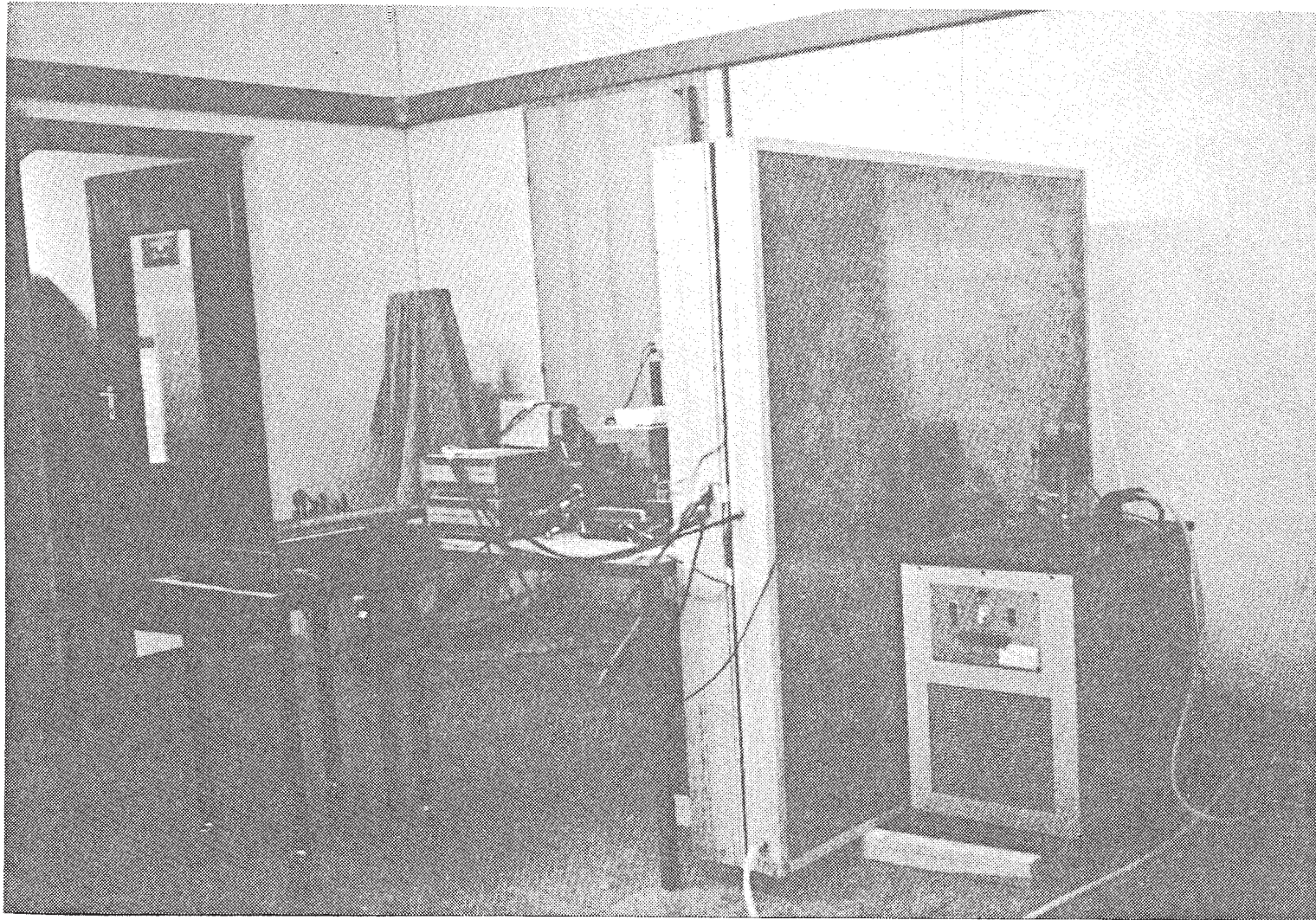


BILD 44: Prototyp der Heizplattenapparatur.

8.2 KONSTRUKTIVE AUSFÜHRUNG DER KALTSEITE.

Prinzipiell kann die Kaltseite symmetrisch zur Warmseite aufgebaut werden. Bei Wärmestromermittlung auf der Warmseite entfällt die "Gegenkühlung und die "Schutzringkühlung".

Eine elektrische Kühlung mittels Peltier-Elementen ist für diese Anwendung möglich, jedoch sehr teuer.

Zur Variabilität in einem größeren Temperaturbereich wurde ein Flächenkühler verwendet der über einen Flüssigkeitskreislauf temperiert werden kann. Durch geeignete Stromführung im Kühler kann die Isothermie der Kühlfläche gut angenähert werden.

An der beim Prototyp verwendeten Konstruktion, die in Bild 45 dargestellt ist, konnte das durch qualitative Thermogramme mit einem Auflösungsvermögen $\ll 0,1$ K bei linienförmiger Objektabtastung nachgewiesen werden.

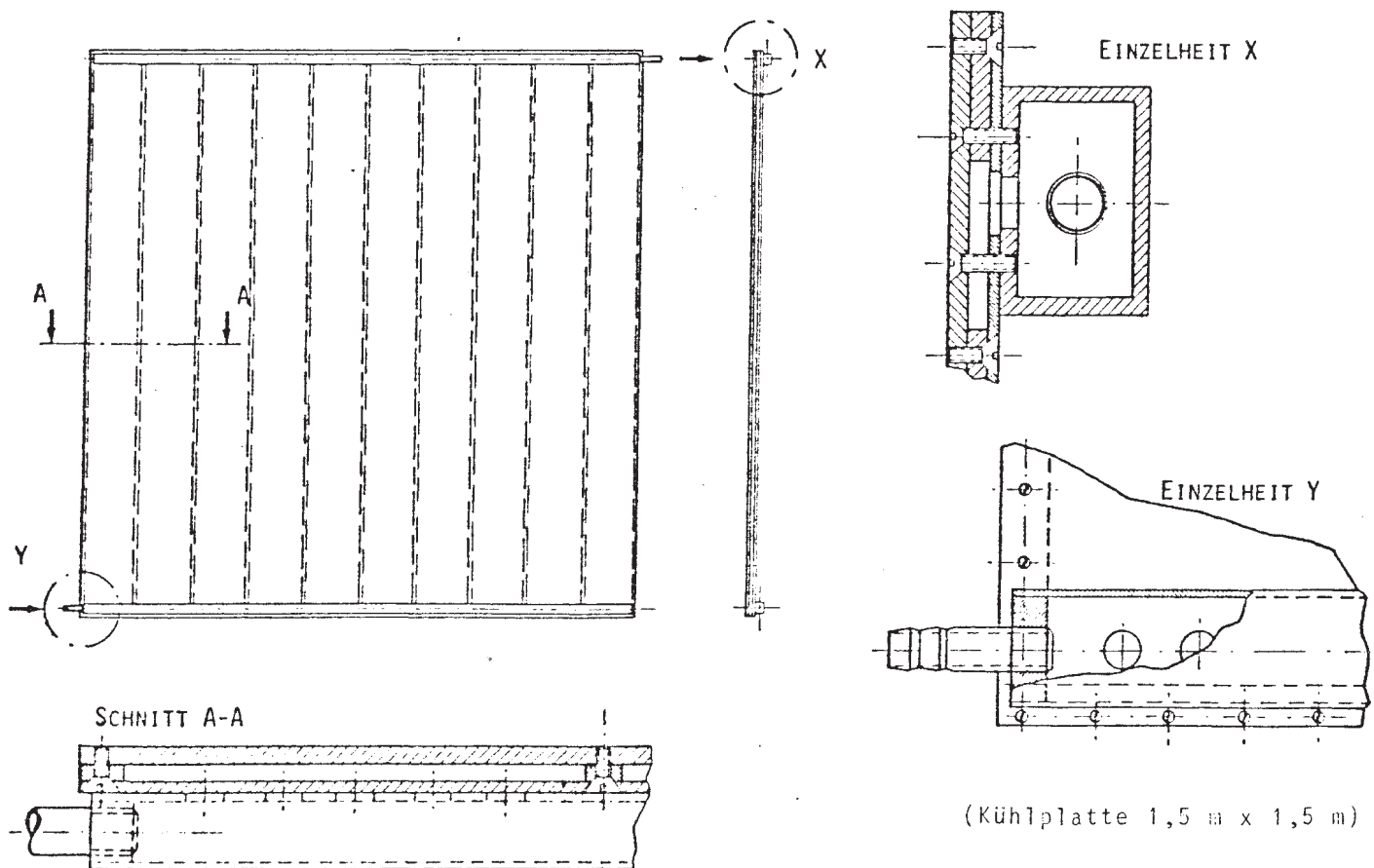


BILD 45: Kühlplattenkonstruktion.

8.3 RANDSTIRNFLÄCHEN.

Wie die vorangegangenen Untersuchungen zeigten, kann der Randstirnflächeneinfluß durch konstruktive Maßnahmen minimiert werden. Da die Heizflächengröße prinzipiell der jeweiligen Anwendung angepaßt werden kann, können durch einen ausreichend dimensionierten Schutzring im Meßausschnitt adiabate Randstirnflächen in den meisten Fällen gut angenähert werden.

Probekörper, bei denen dies aufgrund ihres Aufbaus nicht möglich ist, bedürfen der gesonderten Untersuchung mit Messung bei verschiedenen Randbedingungen und möglichst paralleler rechnerischer Untersuchung.

8.4 MESSWERTERFASSUNG.

Als Temperaturmeßfühler werden Cu-CuNi-Thermoelemente und Widerstands-Meßfühler Pt 1000 verwendet. Im Bereich von Heizplatte, Schutzring und Gegenheizung wurden Thermodrähte mit 0,1 mm Durchmesser, im übrigen Bereich mit 0,2 mm Durchmesser verwendet. Vergleichstemperatur ist eine externe 0 °C Vergleichsstelle.

Es liegen sowohl Einzeltemperaturmeßfühler-Schaltungen als auch Meßfühler-Reihenschaltungen von 10 Meßstellen (zur Signalverstärkung oder zur Mittelwertbildung) sowie Differenzschaltungen vor.

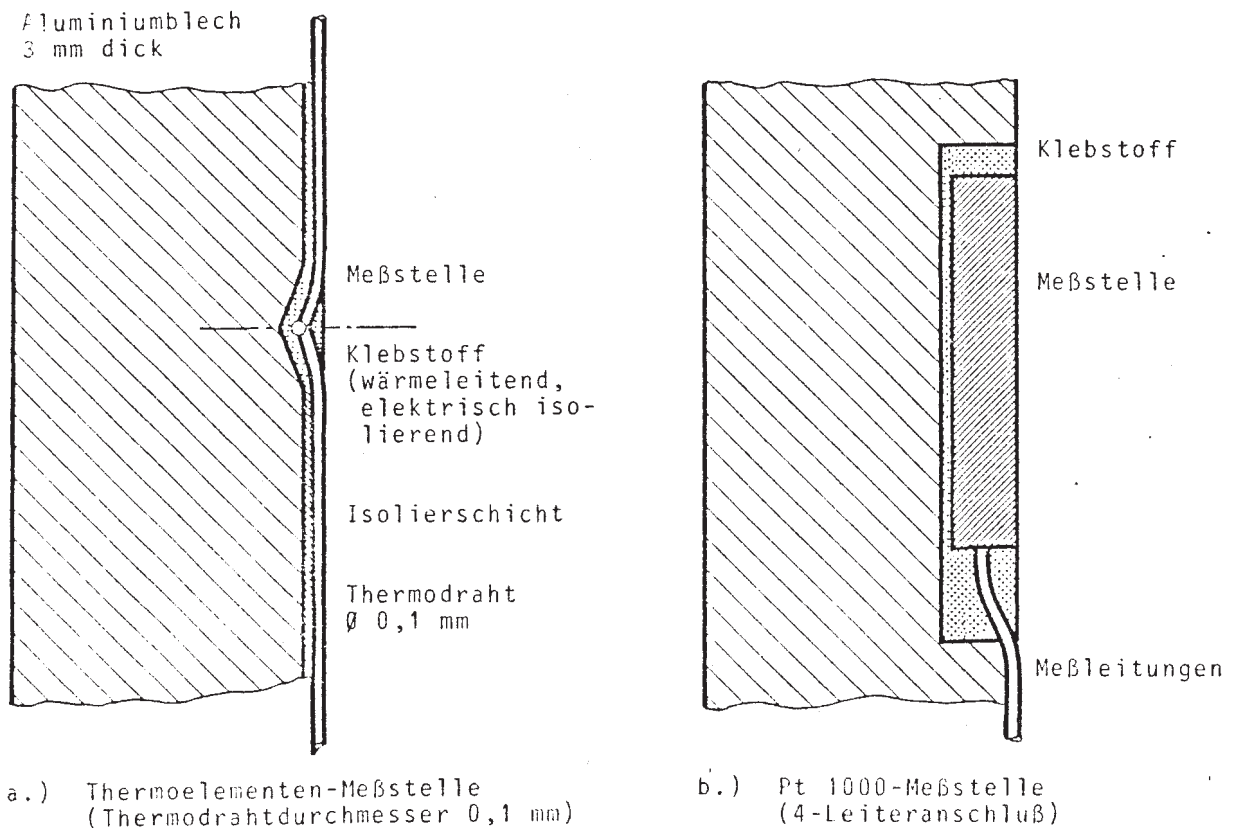
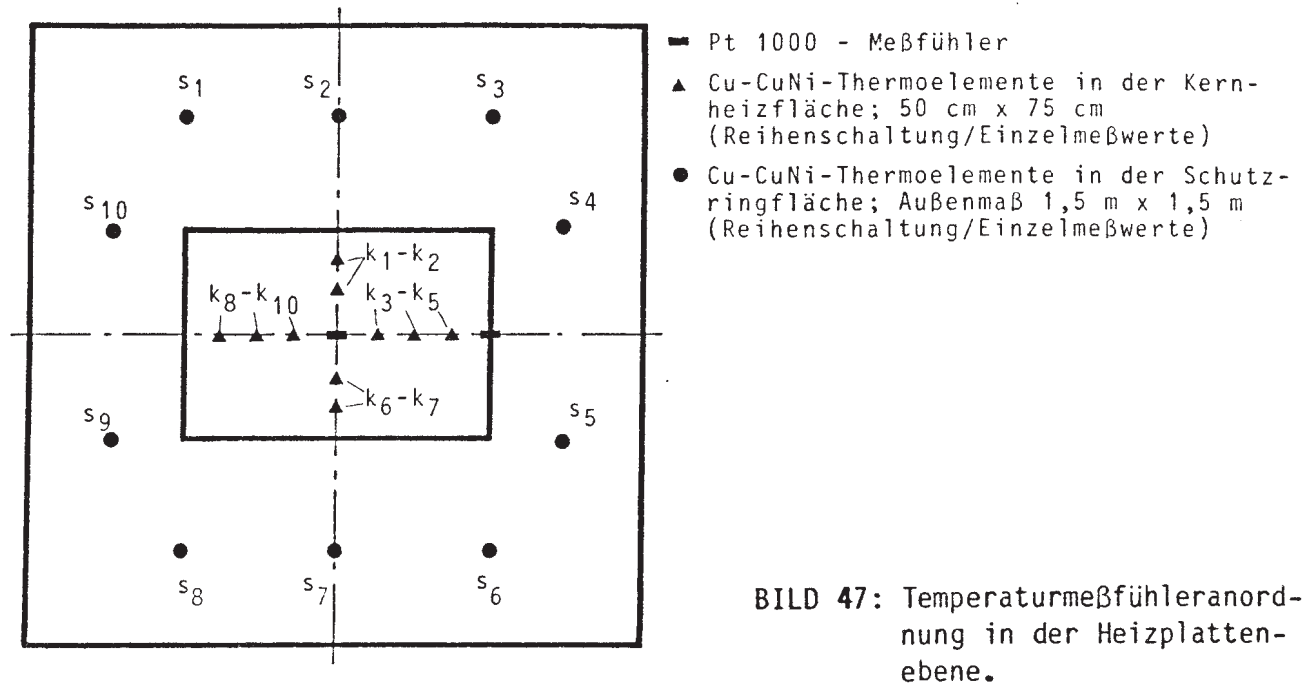


BILD 46: Temperaturmeßstellen.

Die Ausführungen der Temperaturmeßstellen in der Heizplattenebene sind in Bild 46 skizziert, die Anordnungen in Bild 47.



Sowohl in der Kernheizfläche, als auch im Schutzring liegen Reihenschaltungen mit jeweils 10 Meßstellen vor; es können jedoch auch die Einzelmeßstellen erfaßt werden (vergleiche Bild 48).

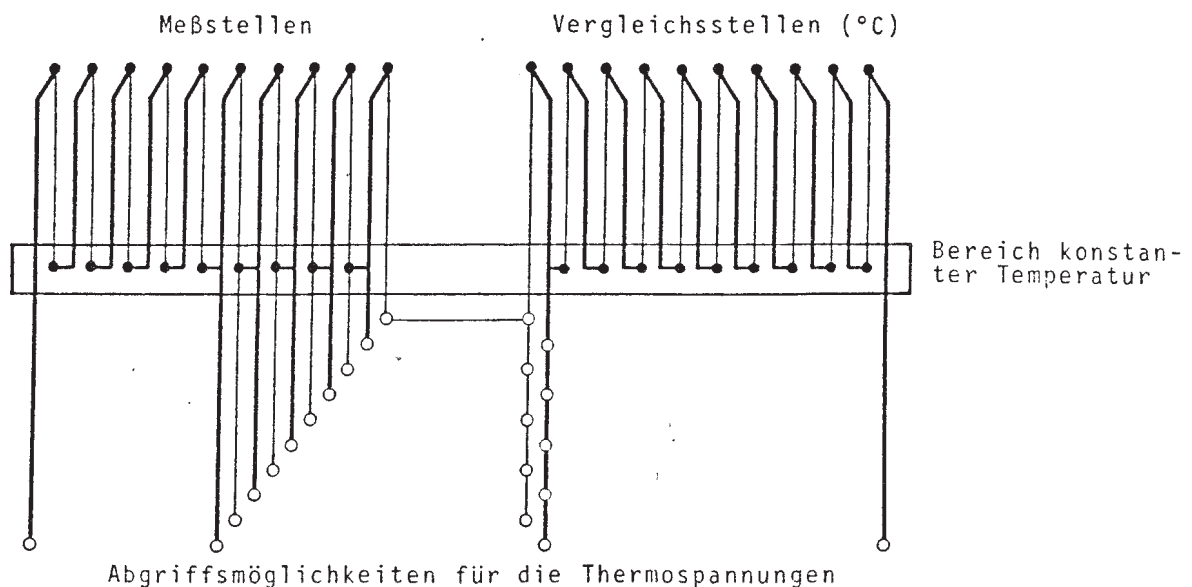


Bild 48: Thermoelementen-Reihenschaltung zur Signalverstärkung und Mittelwertbildung; wahlweise Einzelelementmessung.

Zusätzlich ist eine Differenzschaltung zwischen dem Rand der Kernheizfläche und dem äußeren Rand der Schutzringheizfläche mit jeweils 100 Meßstellen installiert (vergleiche Bild 49).

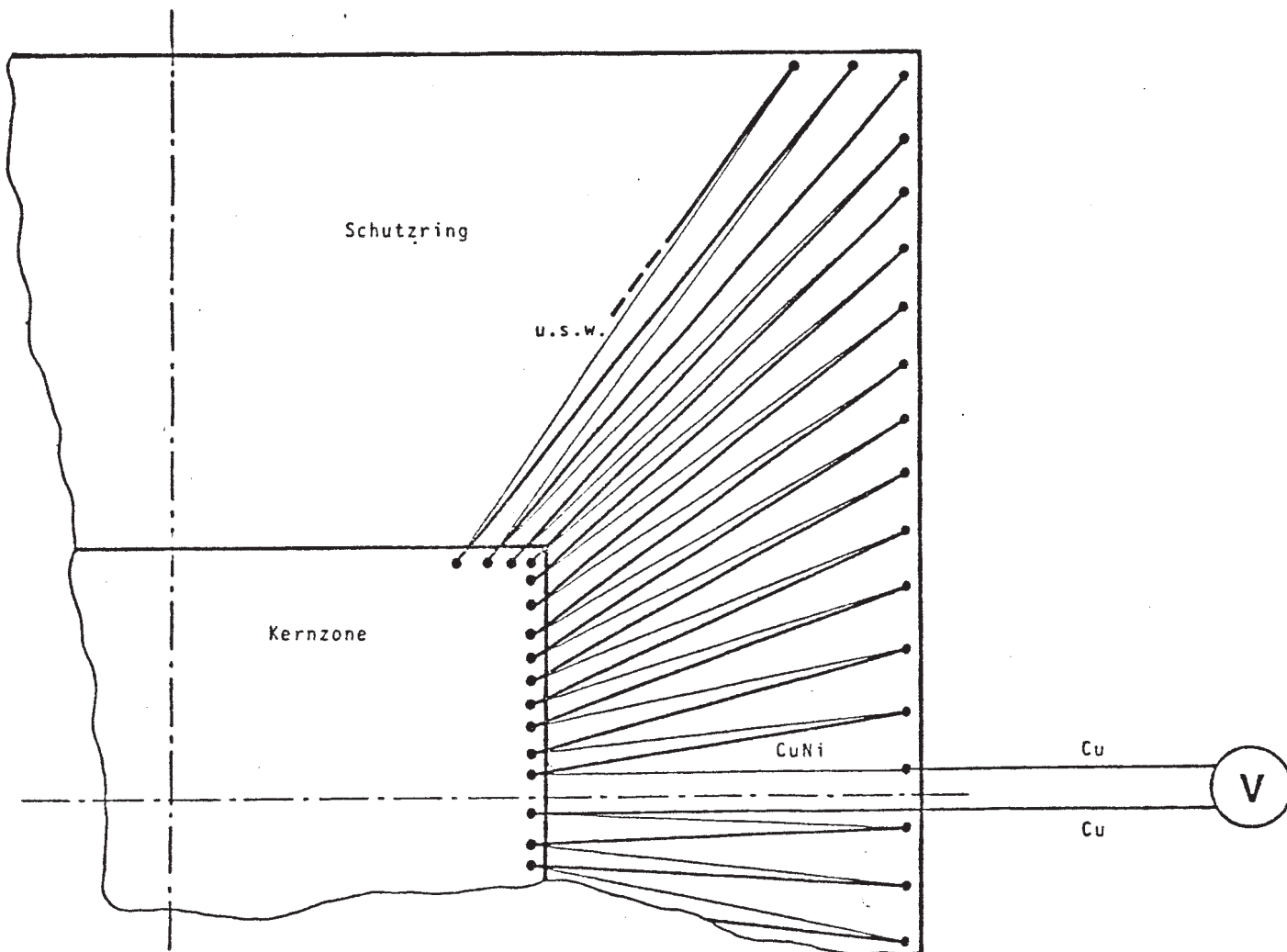


Bild 49: Thermoelementendifferenzschaltung: Heizfläche - Schutzring.

Für die Temperaturmessung und die Temperatur- sowie die Heizungsregelung stehen damit für verschiedene Untersuchungen voneinander unabhängige Meßfühler zur Verfügung.

In der Gegenheizplattenebene liegt im Kernbereich eine entsprechende Reihenschaltung mit 10 Meßstellen vor. Zur Ermittlung eventueller Temperaturschwankungen in der Höhe sind zwei weitere Reihenschaltungen im Randbereich installiert und zusätzlich 4 über der Gesamtfläche verteilte Einzelmeßstellen.

Weitere Temperaturkontrollmeßstellen wurden in den Zwischenschichten und den jeweils an die Umgebung grenzenden Schutzflächen angebracht.

Die Temperaturmeßstellen der Kühlplatte sind in Bild 50 dargestellt.

Durch Rohroberflächentemperaturmessungen am Eintritt und Austritt des Kühlers kann die Temperaturänderung im Kühler relativ ermittelt werden. Das Überschreiten eines vorgegebenen Erwärmungsgrenzwertes (zum Beispiel 0,2 K oder 0,1 K) kann durch Kühlmittelmassenstromerhöhung verhindert werden. Zur Ermittlung der Kühlplattenoberflächentemperatur sind, bei gleichmäßiger Durchströmung des Kühlers über der gesamten Breite, Meßstellen in Kühlplattenmitte ausreichend. Die gleichmäßige Durchströmung wird durch Kontrollmeßstellen im Verteiler und Sammlerbereich an der Kühlplattenoberfläche überwacht.

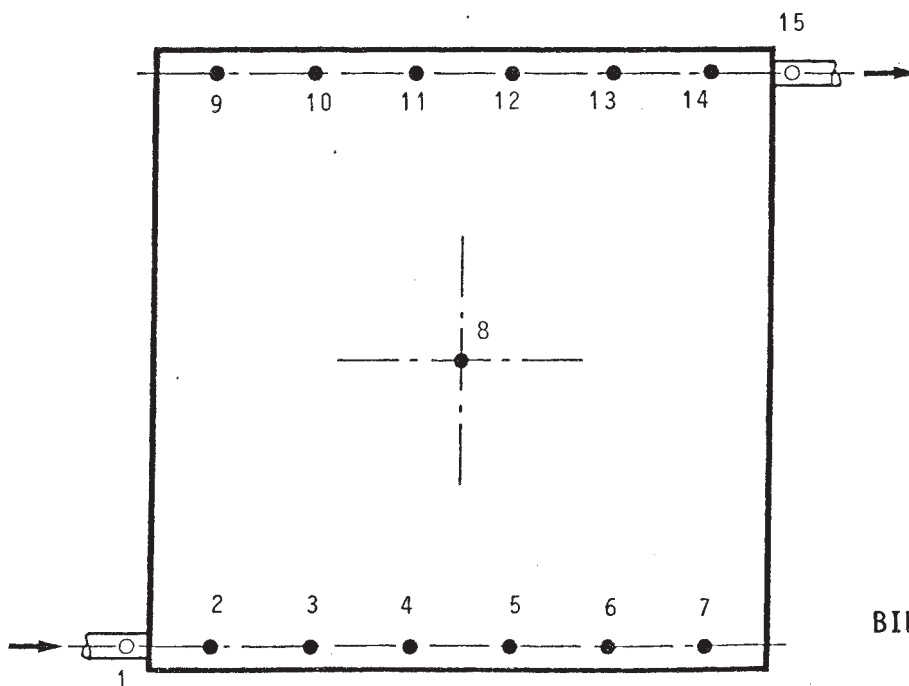


BILD 50: Temperaturmeßstellen an der Kühlplatte.

Für Heizfläche, Schutzring und Gegenheizung werden jeweils homogene Flächenheizfolien verwendet, deren spezifische Heizwärmestromdichte bei 60 V Gleichspannung 200 W/m^2 beträgt. Die Heizfolien sind jeweils auf 3 mm dicken Aluminiumplatten verklebt. Jede dieser Folien ist an einen steuerbaren Präzisionsspannungskonstanthalter geschaltet (vergleiche Bild 51).

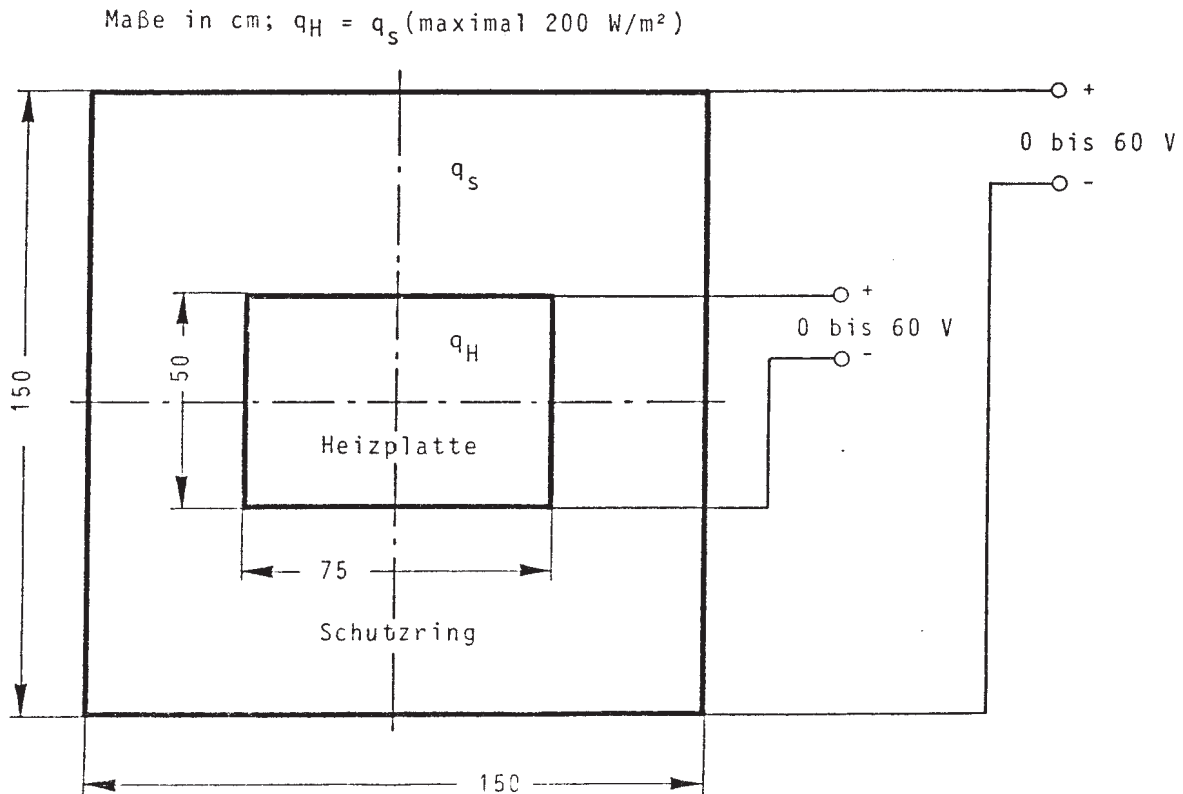


BILD 51: Heizplatte und Schutzring.

Die Heizspannung wird über eine Spannungsteilerschaltung 1:10 mit Präzisionswiderständen erfaßt. Der Heizstrom wird indirekt über den Spannungsabfall eines Shunt-Widerstandes ($14 \text{ A} \cong 140 \text{ mV}$) ermittelt. Sämtliche Meßsignale werden in einer mit Rechenlogik versehenen elektronischen Meßwerterfassungseinrichtung erfaßt, die auch die Auswertung der Meßsignale bis zum Endmeßergebnis durchführen kann.

Für die Messung feuchter Proben ist zur Ermittlung des Wasserdampfpartialdruckes an beiden Probenoberflächen ein Feuchtefühler vorgesehen.

8.5 REGELEINRICHTUNGEN.

Aufgabe der Regeleinrichtungen ist die Erzeugung und Aufrechterhaltung stationärer Temperaturfelder durch konstante definierte Randbedingungen.

Führungsgröße (Sollwert) bei der vorliegenden Meßaufgabe ist die gewünschte Heizplattentemperatur. Stimmt diese nicht mit der Regelgröße (Istwert, über einen Meßfühler an der Heizplatte analog ermittelter Wert) überein, liegt also eine Regelabweichung vor, so ermittelt der Regler (PID-Verhalten) eine der Regelabweichung entgegenwirkende Stellgröße. Im vorliegenden Fall wird die Heizspannung der Heizfolie verändert. Störeinflüsse in der Regelstrecke, wie Umgebungstemperaturschwankungen, Netzspannungsschwankungen, Kühlplattentemperatureinflüsse und anderes, beeinflussen den Istzustand zusätzlich. Zur Regelkreisoptimierung können am Regler proportional-, integral- und differentialwirkende Parameter variiert werden.

Für die Schutzring- und für die Gegenheizung ist jeweils der Istwert der Heizplatte die Führungsgröße. Es kann aber auch die jeweilige Istwertdifferenz ($\Delta\theta$ Heizplatte - Schutzring und Heizplatte - Gegenheizung), die Null sein soll, als Führungsgröße herangezogen werden.

Die Regelung erfolgt ebenso über die Heizspannungsverstellung von Schutzring und Gegenheizung. Das ganze System bildet somit eine 3-Zonen-Temperaturregelung.

Die Regelgrößen sind Spannungen im mV-Bereich und die Stellgrößen Spannungen im Bereich 0 bis 5 V.

Unabhängig von der Warmseite wird die Kühlplatte auf einen vorgegebenen Sollwert geregelt. Zur Gewährleistung einer isothermen Kühlfläche kann der Kühlmittelmassenstrom variiert werden.

Kontrollfunktionen übernehmen je ein in der Heizplattenebene und in der Gegenheizplattenebene eingebaute Temperaturbegrenzungsschalter, die die gesamte Anlage außer Betrieb setzen, falls eine Grenztemperatur (gewählt wurde 55 °C) überschritten wird.

9. WARMEDURCHLASSWIDERSTANDSMESSUNGEN MIT DER NEU ENTWICKELTEN HEIZPLATTENAPPARATUR.

Mit der beschriebenen Ausführung eines Heizplattenapparatur-Prototyps wurden Messungen zur Anlagenfunktion durchgeführt.

Probemessungen wurden an homogenen Probekörpern, an einem symmetrischen inhomogenen und an einem inhomogenen Bauteil mit strukturierter Oberfläche durchgeführt. Dabei wurde die Reproduzierbarkeit bei Wiederholungsmessungen, die Abhängigkeit von den Randbedingungen und die Vergleichbarkeit mit Simulationsrechnungen untersucht.

9.1 MESSUNG HOMOGENER PROBEKÖRPER.

Die drei untersuchten Probekörper werden nachfolgend mit Probekörper Nr. 1 bis Probekörper Nr. 3 bezeichnet. Bei Probekörper Nr. 1 handelt es sich um eine 13 mm dicke Tischlerplatte mit den Abmessungen 156 cm • 156 cm. Probekörper Nr. 2 ist eine 50 mm dicke Polystyrol-Hartschaumplatte mit den Abmessungen 162 cm • 175 cm und Probekörper Nr. 3 eine 60 mm dicke Polystyrol-Hartschaumplatte mit den Abmessungen 150 cm • 160 cm.

Probekörper Nr.1 und Nr. 2 wurde in Ausschnitten zusätzlich am Zweiplattenapparat gemessen.

In Tabelle 11 sind die Meßergebnisse angegeben.

Wie die Ergebnisse in Tabelle 11 zeigen, liefert die Messung homogener Probekörper mit der Heizplattenapparatur und mit dem Plattengerät übereinstimmende Ergebnisse. Die Streuung der Meßergebnisse bei Wiederholungsmessungen liegt unter ± 2 %.

9.2 MESSUNG INHOMOGENER PROBEKÖRPER.

Im homogenen Probekörper Nr. 2 wurde ein zentrischer Ausschnitt der Größe 50 cm • 25 cm durch ein Material der gleichen Dicke, jedoch mit höherer Wärmeleitfähigkeit, ersetzt. Dieser inhomogene Probekörper wird nachfolgend mit Nr. 4 bezeichnet.

Die Meßergebnisse bei verschiedenen Bedingungen sind in Tabelle 12 angegeben.

Auch hier lag die Streuung der Meßergebnisse bei Wiederholungsbedingungen unter ± 2 %. Bei Variation der Übergangswiderstände zeigten sich die auch schon durch rechnerische Untersuchungen ermittelten Abhängigkeiten des Wärmedurchlaßwiderstandes von den Randbedingungen.

Die Meßergebnisse und zum Vergleich einige Simulationsergebnisse sind ebenfalls in Tabelle 12 angegeben.

In Bild 52 ist das bei der Messung ermittelte Oberflächentemperaturprofil des inhomogenen Probekörpers, dem bei der Simulation ermittelten gegenübergestellt. Es ist eine sehr gute Übereinstimmung festzustellen.

PROBEKÖRPER		MITTELWERTE + SCHWANKUNGEN IM MESSZEITRAUM 1) (Heizplattenapparat)							BEMERKUNGEN
Nr.	Dicke s	θ_W	θ_K	$\Delta\theta$	q	1/ Λ	λ	θ_m	
-	mm	°C	°C	K	W/m ²	m ² K/W	W/m K	°C	-
1	13,1	10,38	6,86	3,53	27,27	0,129	0,101	8,7	Messung mit dem Plattengerät nach DIN 52 612
1	13,1	19,87	16,42	3,45	27,00	0,128	0,102	18,3	
1	13,1	20,52 ±0,07	0,10 ±0,03	3,17 ±0,02	24,02 ±0,01	0,132 ±0,00	0,099	10,2	Messung mit der Heizplattenapparat
1	13,1	21,67 ±0,07	0,13 ±0,03	3,11 ±0,1	24,02 ±0,01	0,129 ±0,004	0,101	10,9	
1	13,1	25,47 ±0,1	5,15 ±0,04	3,25 ±0,06	26,14 ±0,01	0,135 ±0,005	0,097	15,3	
2	50,2	16,59	6,05	10,54	6,048	1,743	0,0288	11,3	Messung mit dem Plattengerät nach DIN 52 612
2	50,2	25,76	15,71	10,05	5,988	1,678	0,0299	20,7	
2	50,2	23,17 ±0,04	1,29 ±0,06	13,43 ±0,02	8,013 ±0,01	1,676 ±0,032	0,030	12,2	Messung mit der Heizplattenapparat
2	50,2	22,88 ±0,04	1,21 ±0,06	13,61 ±0,04	8,406 ±0,01	1,619 ±0,032	0,031	12,0	
2	50,2	26,73 ±0,08	7,5 ±0,05	14,96 ±0,06	9,537 ±0,02	1,569 ±0,042	0,032	17,1	
3	60,1	25,05 ±0,12	2,53 ±0,06	14,09 ±0,03	7,77 ±0,02	1,813 ±0,009	0,033	13,8	
3	60,1	24,68 ±0,09	7,51 ±0,04	14,03 ±0,24	7,77 ±0,00	1,817 ±0,006	0,034	16,1	

1)

Nach Erreichen des stationären Zustandes noch mindestens 3 Stunden.

TABELLE 11: Ergebnisse von Wärmedurchlaßwiderstandsmessungen und Wärmeleitfähigkeitsmessungen an homogenen Probekörpern.

PROBEKÖRPER		SIMULATIONSERGEBNISSE UND MESSERGEBNISSE Mittelwerte + Schwankungen im Meßzeitraum 1)									BEMERKUNGEN
Nr.	Dicke s	θ_W	θ_K	θ_1	θ_2	q	1/ Λ	θ_m	1/ α_W	1/ α_K	
-	mm	°C	°C	°C	°C	W/m ²	m ² K/W	°C	m ² K/W	m ² K/W	-
4	50,0	30	3	24,43	12,37	15,8	0,783	18,4	0,37	0,55	Simulationsergebnisse
4	50,0	20	0	20,0	0,0	34,0	0,588	10,0	0	0	
4	50,2	24,21 ±0,09	1,94 ±0,05	17,71 ±0,07	8,84 ±0,05	10,72 ±0,03	0,83 ±0,03	13,27 ±0,1	0,61	0,65	Meßergebnisse der Heizplattenapparatemessung
4	50,2	29,51 ±0,18	3,11 ±0,03	22,64 ±0,13	9,78 ±0,27	15,18 ±0,01	0,85 ±0,04	16,21 ±0,2	0,45	0,45	
4	50,2	24,62 ±0,21	1,96 ±0,05	18,07 ±0,21	8,97 ±0,13	10,71 ±0,00	0,85 ±0,03	13,52 ±0,17	0,61	0,65	
4	50,2	25,35 ±0,16	2,31 ±0,04	18,67 ±0,15	9,44 ±0,08	10,71 ±0,00	0,86 ±0,02	14,06 ±0,12	0,61	0,65	

1)

Nach Erreichen des stationären Zustandes noch mindestens 3 Stunden.
Die Werte beziehen sich auf den symmetrisch in der Probekörpermitte liegenden Ausschnitt von 50 cm • 75 cm.

TABELLE 12: Meßergebnisse und Simulationsergebnisse für den Wärmedurchlaßwiderstand des inhomogenen Probekörpers Nr. 4 (Bauteileinheiten siehe Bild 52).

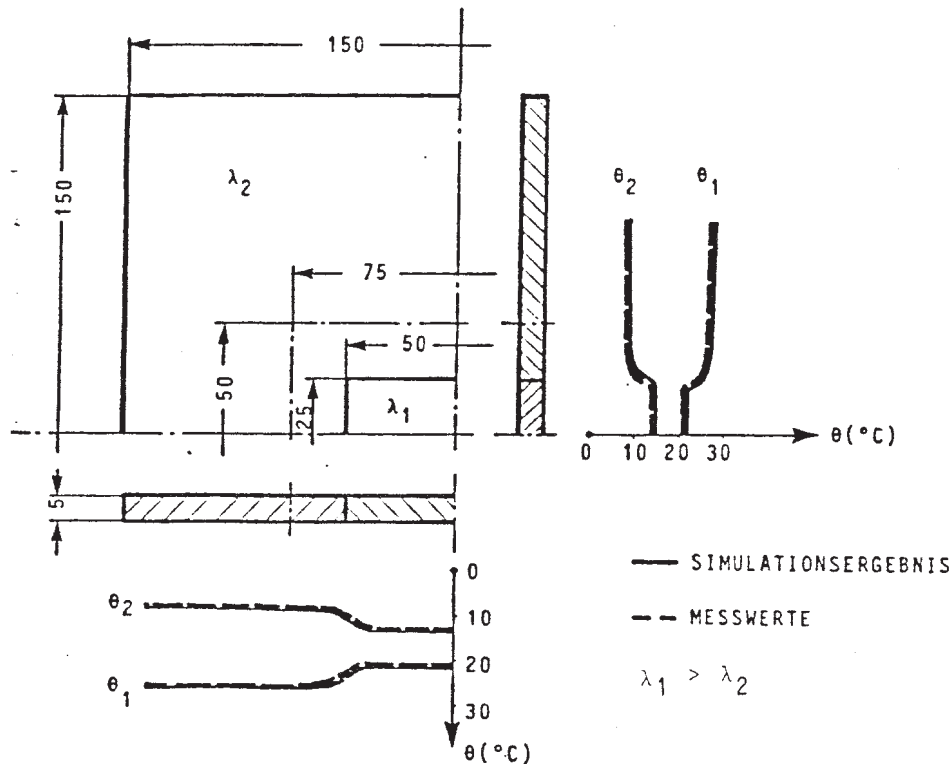


BILD 52: Vergleich des Oberflächentemperaturprofils aus Messung und Rechnung beim inhomogenen Probekörper Nr. 4.

9.3 MESSUNG INHOMOGENER BAUTEILE MIT STRUKTURIERTEN OBERFLÄCHEN.

An einem Dachelement, nachfolgend mit Probekörper Nr. 5 bezeichnet, wie in Bild 9 schematisch dargestellt, Außenabmessungen 112 cm · 139 cm mit $s = 160$ mm, $B = 200$ mm, wurden ebenfalls Messungen und parallel dazu Simulationsberechnungen durchgeführt.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 13 angegeben.

Durch absichtliche Verstellung der Wärmestromdichten zwischen Kernheizfläche und Schutzringheizungsfläche können bei der Messung mit der Heizplattenapparatur die Verhältnisse nachgebildet werden, die sich bei Heizkastenmeßmethoden einstellen, wenn am Randbereich andere Wärmeübergangskoeffizienten vorliegen als in der Mitte. Diese Ergebnisse sind in Tabelle 13 ebenfalls mit angegeben. Die in den rechnerischen Untersuchungen ermittelten Abhängigkeiten lassen sich mit der Heizplattenapparatur nachweisen, so daß Meßergebnisse der Heizplattenapparatur bei definierten Randbedingungen Grundlage für eine rechnerische Weiterverarbeitung der Meßwerte sein können.

PROBEKÖRPER		SIMULATIONSERGEBNISSE UND MESSERGEBNISSE Mittelwerte + Schwankungen im Meßzeitraum 1)												BEMERKUNGEN
Nr.	Dicke s	θ_W	θ_K	θ_{11}	θ_{12}	θ_{1L}	θ_2	q_H	q_S	α_{W1}/α_{W2}	α_K	θ_m	$1/\Lambda$	
-	mm	°C	°C	°C	°C	°C	°C	W/m ²	W/m ²	W/m ² K	W/m ² K	°C	m ² K/W	-
5	115	20,00	0,0	18,25	17,25	20,0	1,81	8,31	8,31	12/2	5	9,73	1,906	Simulationsergebnisse
5		20,00	0,0	19,9	16,2	20,0	0,48	11,00	11,0	8/4	23	9,44	1,680	
5		20,00	0,0	19,7	18,9	20,0	0,52	12,00	12,0	8/8	23	9,57	1,540	
5	115	25,59 ±0,11	0,64 ±0,04	22,29 ±0,07	21,31 ±0,07	22,85 ±0,46	3,99 ±0,03	9,02 ±0,18	9,31 ±0,00	2,97 3,05	3,05	12,94	1,98 ±0,06	Meßergebnisse der Heizplattenapparatemessung
5	115	25,86 ±0,15	0,70 ±0,09	22,56 ±0,02	21,63 ±0,11	23,33 ±0,07	4,14 ±0,04	9,23 ±0,05	9,20 ±0,08	2,97 3,05	3,05	13,16	1,96 ±0,03	
5	115	26,03 ±0,14	0,72 ±0,05	22,71 ±0,13	21,69 ±0,12	23,44 ±0,12	4,10 ±0,04	9,64 ±0,24	9,63 ±0,25	2,98 5,96	3,03	13,20	1,89 ±0,07	

1)

Nach Erreichen des stationären Zustandes noch mindestens 3 Stunden.

TABELLE 13: Meßergebnisse und Simulationsergebnisse für den Wärmedurchlaßwiderstand des inhomogenen Probekörpers Nr. 5 (Bauteileinheiten siehe Bild 9).

10. GENAUIGKEITSGRAD DER HEIZPLATTENAPPARATUR.

Gegenüber den derzeit angewandten Heizkasten-Verfahren unterscheidet sich die hier entwickelte Heizplattenmethode vor allem darin, daß genau definierte, über der gesamten Meßfläche konstante Randbedingungen in Parallelebenen zu den Probenoberflächen erzeugt, eingehalten und kontrolliert werden können.

Durch die Konstruktion mit kleineren Flächen zwischen "Meßfläche" und Umgebung sind selbst bei gleichen Regelschwankungen, die jedoch konstruktionsbedingt bei der Heizplattenapparatur niedriger gehalten werden können als bei Heizkasten- und Wärmestrommeßplatten-Methoden die Fehlerwärmeströme der Heizplattenapparatur geringer.

Zu den jeweiligen Meßergebnissen können definierte Randbedingungen angegeben werden.

Der Genauigkeitsgrad des Ergebnisses der Heizplattenapparatur hängt entsprechend nur noch von der Meß- und Regelunsicherheit ab.

Die Meßunsicherheiten wurden in Abschnitt 5 diskutiert. Die ersten Probemessungen haben gezeigt, daß in der Prototyp-Konstruktion nach Erreichen des stationären Zustandes die Regelschwankungen so gering sind, daß sie nicht mehr meßbar sind.

11. ANWENDUNGSVORTEILE UND ANWENDUNGSNOTWENDIGKEITEN DER HEIZPLATTENAPPARATUR.

Durch die konstruktive Ausführung der Heizplattenapparatur bietet sie in der Anwendung für die Messung des Wärmedurchlaßwiderstandes Handhabungsvorteile. Diese Konstruktion ist prinzipiell in jeder erforderlichen Größe ausführbar. Sie kann sowohl für Labormessungen als auch für Messungen am ausgeführten Bau eingesetzt werden (vergleiche Bild 53).

Durch einfaches Anlegen der Versuchseinrichtungen an den Probekörper sind Messungen in jeder beliebigen Lage möglich, von horizontal bis vertikal.

Durch Verwendung von Übergangswiderständen können bei entsprechenden Bauteilen durch deren Variation Einflüsse auf den Wärmedurchlaßwiderstand auf einfache Weise meßtechnisch ermittelt werden. Außerdem ist auf diese Weise auch die Messung von inhomogenen Bauteilen und Bauteilen mit Wärmebrücken mit Variation der Übergangswiderstände möglich.

Durch den symmetrischen Aufbau mit jeweils gleichen Übergangswiderständen auf beiden Seiten des Probekörpers werden auch die in Abschnitt 2 beschriebenen Probleme bei der Messung mit Maske vermieden (vergleiche Bild 54)

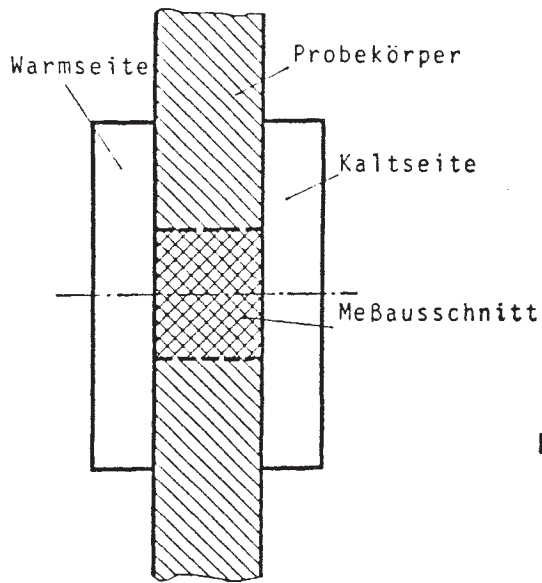


BILD 53: Schematische Darstellung der Messung am ausgeführten Bau.

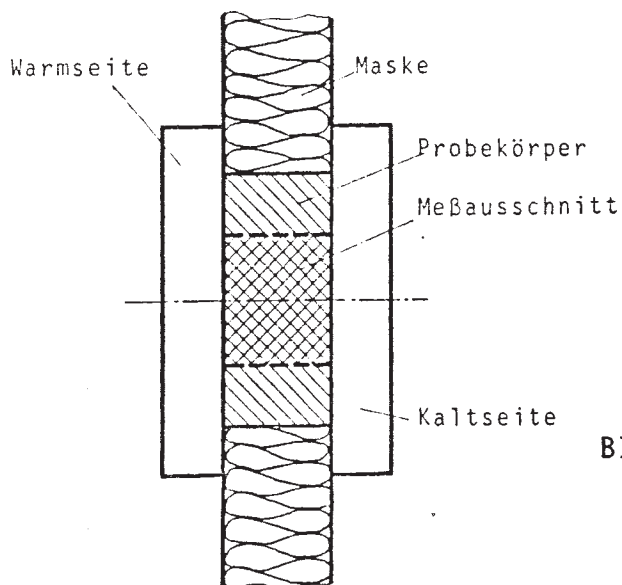


BILD 54: Schematische Darstellung der Messung mit Maske.

12. ZUSAMMENFASSUNG.

Die Definition des Wärmedurchlaßwiderstandes und des Wärmedurchgangskoeffizienten von Bauteilen wurde durch theoretische Untersuchungen der Temperaturfelder in Bauteilen und durch rechnerische Simulation von homogenen und heterogenen ebenen planparallelen und unebenen Bauteilen sowie durch Meßapparatusimulation analysiert.

Es wurde gezeigt, daß neben den rein meßtechnisch bedingten Fehlern bei der experimentellen Bestimmung des Wärmedurchlaßwiderstandes von Bauteilen zusätzliche und je nach Bauteil unter Umständen weit größere Fehler dadurch entstehen, daß mit den verwendeten Prüfeinrichtungen die definitionsgemäß zugrunde gelegten Meßbedingungen nicht hergestellt oder nur unzureichend angenähert werden können.

Die Untersuchungen haben ergeben, daß bei homogenen Bauteilen der Wärmedurchlaßwiderstand vom Temperaturfeld unabhängig ist, wenn die Summe der Wärmeströme durch die Randstirnflächen des Meßausschnittes Null ist. Bei heterogenen und unebenen Bauteilen variiert der Wärmedurchlaßwiderstand mit der Temperaturfeldvariation. Zur eindeutigen Definition des Meßergebnisses müssen bei diesen Bauteilen exakt definierte Randbedingungen mit angegeben werden.

Schon bei der Messung des Wärmedurchlaßwiderstandes von Mauerwerk können, falls die Wärmeleitfähigkeit des Mörtels von der der Steine abweicht, Unsicherheiten entstehen, wenn nicht bei definierten Wärmeübergangskoeffizienten gemessen wird. Weitere Unsicherheiten entstehen mit der Messung der mittleren Oberflächentemperatur und in der Erfassung repräsentativer Bauteilausschnitte.

Zur Messung des Wärmedurchlaßwiderstandes inhomogener und unebener Bauteile sind Wärmestrommesser nur bedingt anwendbar. Aus dem Funktionsprinzip der Heizkastenmethoden ergibt sich für diese Bauteile eine bedingte Anwendbarkeit aus der Forderung nach exakt definierten Randbedingungen die hierbei nicht oder nur durch einen unvertretbar großen meß-, regel- und anlagentechnischen Aufwand garantiert und kontrolliert werden können.

Durch Simulation ganzer Versuchsaufbaukonstruktionen, insbesondere der Heizkastenmethoden, wurden Fehleranalysen durchgeführt. Für die meß- und regeltechnisch bedingten Unsicherheiten werden Anleitungen zur Fehlerabschätzung des Meßergebnisses gegeben und Konstruktionshinweise zur anlagentechnischen Fehlerminimierung abgeleitet.

Am Beispiel der Messung mit Maske wird gezeigt, wie durch einfache Maßnahmen, in diesem Fall durch gleiche Wärmeübergangskoeffizienten auf beiden Wandseiten, eine Fehlerminimierung möglich ist.

Aus den Fehleranalysen ergab sich ein Konstruktionsentwurf für eine fehlerarme Prüfapparatur nach der Hilfsschichtmethode.

In Parallelebenen zur Probekörperoberfläche werden isotherme Ebenen erzeugt. Durch definierte, jedoch variierbare Übergangswiderstände wird die Isothermie in den Heiz- und Kühlplattenebenen auch bei inhomogenen Bauteilen erreicht. In einem einfachen kompakten Heiz- und Kühlplattenaufbau mit Schutzring- und Gegenheizung sowie mit definierten Übergangswiderständen, sind definierte Randbedingungen einfach herstellbar und kontrollierbar. Die entwickelte Heizplattenapparatur kann als Modifikation des geregelten Heizkastens bezeichnet werden.

Die Anwendung bei Messungen an homogenen und inhomogenen Bauteilen, sowie an einem Bauteil mit strukturierter Oberfläche zeigten mit begleitenden Plattengerätmessungen nach DIN 52612 bei homogenen Probekörperausschnitten und mit parallelen Simulationsrechnungen die Funktionsfähigkeit der Heizplattenprüfapparatur und deren Meßgenauigkeit.

Bei den Vergleichsmessungen mit dem Plattengerät war eine Übereinstimmung der Meßergebnisse im Rahmen der Meßunsicherheit festzustellen.

Für inhomogene Bauteile konnte bei Übereinstimmung zwischen gemessenen und den der Simulationsrechnung zugrunde gelegten Randbedingungen die Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Oberflächentemperaturen und Wärmeströmen gezeigt werden.

Die kompakte Bauweise und das Funktionsprinzip der Apparatur erlaubt die Anwendung in jeder beliebigen Probekörperorientierung im Labor und am ausgeführten Bau.

Die Laborprobemessungen erfolgten in vertikaler und horizontaler Lage. Die konstruktive Ausführung ist in Sondergrößen jedem repräsentativen Bauteilausschnitt anpaßbar.

Die Prototypausführung hat eine Kern-Meßfläche von 50 cm x 75 cm, entsprechend dem repräsentativen Ausschnitt von Mauerwerk aus genormten Mauerwerkssteinen und eine Schutzringaußenabmessung von 1,5 m x 1,5 m.

Das Funktionsprinzip ist auch in kleineren Konstruktionen für statistische Untersuchungen der Eigenschaften trockener und feuchter Baustoffe bei verschiedenen Randbedingungen geeignet. Außerdem ist die Erzeugung definierter instationärer Temperaturgänge möglich, womit der Apparatur ein weiterer Anwendungsbereich der Ermittlung von Bauteileigenschaften offensteht.

13. LITERATURVERZEICHNIS.

- [1] DIN 52 611, Teil 1 (April 1978)
Bestimmung des Wärmedurchlaßwiderstandes von Wänden und Decken.
Prüfung im Laboratorium.
- [1a] DIN 52 611, Teil 2 (Juni 1976)
Bestimmung des Wärmedurchlaßwiderstandes von Wänden und Decken.
Weiterbehandlung der Meßwerte für die Anwendung im Bauwesen.
- [1b] DIN 52 611 (Oktober 1971)
Bestimmung des Wärmedurchlaßwiderstandes von Wänden und Decken.
- [1c] DIN 52 611 (Entwurf, Februar 1965)
Bestimmung des Wärmedurchlaßwiderstandes von Wänden und Decken.
- [1d] DIN 52611 (August 1944)
Prüfung der Wärmedurchlässigkeit von Wänden und Decken.
- [2] Gertis, K., Werner, H.:
Die Problematik der Porenanalyse von Baustoffen.
Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 258.
- [3] Woodside, W.:
Analysis of errors due to edge heat loss in guarded hot plates.
Symposium on Thermal Conductivity Measurements and Applications of
Thermal Insulations.
ASTM Special Technical Publication No. 217 (1957).
- [4] Bode, K.H.:
Wärmeleitfähigkeitsmessungen mit dem Plattengerät: Einfluß der Schutz-
ringbreite auf die Meßunsicherheit.
Int. J. Heat Mass Transfer Vl. 23 (180), Seite 961.

- [5] **Knoblauch, O., Reiher, H.:**
Wärmeübertragung.
AVG, Leipzig (1929).
- [6] **Jakob, M.:**
Ober einige neuere praktische Verfahren zur Messung des Wärmeleitvermögens von Bau- und Isolierstoffen.
Z. d. V. d. J. (1919).
- [7] **Grün, R.:**
Zement (1919), Seite 246.
- [8] **Hencky, K.:**
Gesundheitsingenieur (1918), Seite 89.
- [9] **Hencky, K.:**
Ein einfaches praktisches Verfahren zur Bestimmung des Wärmeschutzes verschiedener Bauweisen.
Gesundheitsingenieur (1919), Seite 469.
- [10] **Schmidt, E.:**
Die Messung von Wärmeverlusten in Betrieben.
Archiv für Wärmewirtschaft (1924), Seite 9.
- [11] **Schmidt, E., Grossmann, A.:**
Mitteilung aus dem Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München, Heft 4, 30 (1924).
- [12] **Krüger, H., Eriksson, A.:**
Untersuchungen über das Wärmeisolierungsvermögen von Baukonstruktionen.
Springer Verlag, Berlin (1923).
- [13] **Bugge, A., Kolflaath, A.:**
Ergebnisse von Versuchen für den Bau warmer und billiger Wohnungen an den Versuchshäusern der Norwegischen TH;
Springer-Verlag, Berlin (1924).

- [14] **Cammerer, J.S.:**
Mitteilung aus dem Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V., München und Regeln für die Prüfung von Wärme- und Kälteschutzanlagen. VDI-Verlag, Berlin (1930).
- [15] **Hofbauer:**
Wärmeschutz von Gebäuden.
Archiv für Wärmewirtschaft (1929), Seite 398.
- [16] **Meissner, W., Gerloff, G.:**
Über eine neue Methode zur Bestimmung der Wärmedurchlaßzahl von ausgeführten Wänden und über Wärmedurchlaßbestimmungen in nicht völlig stationärem Zustand.
Wärme- und Kälte-Technik 38 (1936), Heft 6, Seite 1.
- [17] **Babbitt, J.D.:**
A large-scale thermal conductance Apparatus used for the testing of building materials.
Canad. J. Research (1939), Seite 164.
- [18] **ASTM Standard C 236-60:**
Thermal Conductance and Transmittance of Built-up Sections by Means of the Guarded Hot Box.
- [19] **ASTM Standard C 236-60:**
Standard test method for steady-state thermal performance of buildings assemblies by Means of a Guarded Hot Box (1981).
- [20] **Schüle, W.:**
Wärme- und feuchtigkeitstechnische Untersuchungen an Außenwänden aus verschiedenen Löchziegeln und aus Leichtbeton-Hohlblocksteinen.
Berichte aus der Bauforschung, Heft 23 (1962), Seite 29.
- [21] **Achtziger, J.:**
Einfluß von Wärmebrücken auf den Wärmeschutz von Konstruktionen des Wohn- und Industriebaus.
Gesundheitsingenieur 98 (1977), Heft 11, Seite 289 und 353.

[22] **Haller, P.:**

Physik des Backsteins, II. Teil, Wärmeprüfgeräte.
Verband Schweizerischer Ziegel- und Steinfabriken, Zürich.

[23] **Gertis, K.:**

Der instationäre Wärmedurchgang durch Außenbauteile.
Berichte aus der Bauforschung, Heft 103.