

Reihe II

Nr. 5

Wärmeflußmessungen an Kesselmauerwerk

Von W. F. Cammerer

Wärmeflußmessungen an Kesselmauerwerk

Von W. F. Cammerer *)

(Vortrag beim Kolloquium „Wärmeleitfähigkeit feuerfester Baustoffe“ des Instituts für Gesteinshüttenkunde Aachen und des Forschungsinstituts der Feuerfest-Industrie Bonn am 8. Dez. 1961 in Aachen)

Inhalt:

Seit Beginn der wissenschaftlichen Erforschung des Wärme- und Kälteschutzes stand neben der experimentellen Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Bau- und Isolierstoffen im Laboratorium die Nachprüfung von ausgeführten Isolieranlagen. Der von E. Schmidt 1924 entwickelte Wärmeflußmesser nach der Hilfswandmethode ermöglicht die Messung von Wärmeverlusten in der Praxis und damit die Bestimmung von Betriebswärmeleitfähigkeiten von Wänden und Rohrinsulierungen.

Zur Feststellung der Wärmeverluste von Kesselmauerwerk mit Blechverkleidung war die Entwicklung eines Spezial-Wärmeflußmessers von geringer Dicke, ausreichender Thermokraft und einer Temperaturbeständigkeit bis etwa 200° C erforderlich. Er wurde aus mit

Silikonharz getränktem Glasseidgewebe hergestellt unter Verwendung von galvanisch gefertigten, lötkopffreien Thermoelementen.

Mit Hilfe dieses Kesselwärmeflußmessers konnte die Wärmeabgabe des Kesselmauerwerks sowohl auf als auch unter der Blechverkleidung und damit der Einfluß von Wärmebrücken ermittelt werden. Als eindeutige wärmeschutztechnische Garantiegröße für Kesselmauerungen wurde die Wärmedurchlaßzahl des reinen Mauerwerks einschließlich Mörtelfugen ermittelt.

Der Kesselwärmeflußmesser bedarf jedoch noch einer Vervollkommnung hinsichtlich der mechanischen Festigkeit und Konstanz der Thermokraft. Außerdem machen die zunehmenden messtechnischen Aufgaben in der Wärme- und Kälteschutztechnik die Entwicklung von dünnen Wärmeflußmeßdecken wünschenswert.

Heat flow measurements on boiler linings

Abstract:

Since the beginning of scientific research on thermal insulation, laboratory values for the thermal conductivity of structural and insulating materials have been supplemented by measurements on existing thermally-insulated installations. In 1924 E. Schmidt developed a heat-flow meter (the auxiliary wall method) which enables heat losses occurring in practice to be determined thus giving data on the thermal conductivity of walls and pipe insulations.

For determining the thermal losses in iron-clad boiler linings it was necessary to develop a special heat-flow meter of small thickness, adequate thermal capacity, and suitable for use up to 200° C. Such an apparatus was produced from a glass-silk fabric saturated

with a silicone resin. The thermocouples used in this apparatus are made by the galvanic method and are free from junctions.

With the aid of this apparatus the heat release by the boiler lining could be measured both on and under the sheet-iron cladding, thus indicating the influence of heat bridges. The heat-flow number of the masonry itself (incl. mortar joints) was determined as a guaranteed value for the thermal-insulation capacity of boiler linings.

However, the heat-flow meter for boilers still requires some improvements with respect to its mechanical strength and the constancy of its thermal capacity. Moreover, the ever-increasing problems of the heat-insulation industry necessitate the development of thin heat-flow measurement contacts.

Les mesures du flux de chaleur sur des maçonneries de chaudières

Résumé:

Depuis le début des recherches scientifiques relatives à la protection contre la chaleur et contre le froid on a, parallèlement à la détermination expérimentale en laboratoire de la conductibilité thermique des matériaux de construction et des matériaux isolants, cherché à vérifier la conductibilité thermique d'installations en service. Le thermofluxmètre mis au point par E. Schmidt en 1924 permet d'appliquer la méthode de la paroi auxiliaire à la mesure des pertes de calories dans la pratique et de déterminer les coefficients de conductibilité thermique des parois et du calorifugeage des canalisations.

Pour déceler les pertes de chaleur d'une maçonnerie de chaudière avec revêtement en tôle il était nécessaire d'étudier un thermofluxmètre spécial de faible épaisseur ayant une puissance thermique suffisante et résistant aux températures d'environ 200° C. Un tel appareil a été construit en tissu de soie de verre imprégné de résines

aux silicones; il est équipé de couples thermo-électriques confectionnés galvaniquement, sans soudures.

A l'aide de ce thermofluxmètre pour chaudières, la déperdition de chaleur de la maçonnerie a pu être mesurée aussi bien au-dessus qu'en-dessous du revêtement en tôle ce qui a permis de déceler les ponts thermiques. A titre de caractéristique probante de garantie de la protection thermique assurée par une maçonnerie de chaudière on a déterminé le coefficient de transmission thermique de la maçonnerie seule, y compris les joints au mortier.

Le thermofluxmètre doit cependant être perfectionné au point de vue de la résistance mécanique et de la constance de la puissance thermique. En outre les problèmes techniques qui en nombre croissant se présentent dans le domaine de la protection thermique rendent souhaitable la mise au point de protecteurs minces pour thermo fluxmètres.

Seit Beginn der wissenschaftlichen Erforschung des Wärme- und Kälteschutzes, der man sich zu Beginn dieses Jahrhunderts im Laboratorium für Technische Physik der Technischen Hochschule München unter O. Knoblauch besonders widmete, stand die experimentelle Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit (Wärmeleitfähigkeit) von Bau- und Isolierstoffen im Mittelpunkt dieses Forschungsgebietes. In diesem Laboratorium entstanden das bekannte Plattenmeßgerät mit Schutzringheizung für plattenförmige Stoffe nach R. Poensgen^{1,2)}, das Versuchsrohr für Rohrinsulierungen von

W. van Rinsum^{3,4)} und die Prüfkugel für körnige und faserförmige Stoffe von W. Nusselt⁵⁾. Diese Geräte wurden später im Forschungsheim für Wärmeschutz e.V., München, das aus dem Laboratorium für Technische Physik durch Zusammenschluß von interessierten Firmen hervorgegangen ist⁶⁾ (gegründet 1918), weiterentwickelt. So ist beispielsweise ein Plattenmeßgerät für einen Bereich bis etwa 1000° C Mittel-

*) Dipl.-Phys. W. F. Cammerer, Wissenschaftl. Leiter des Forschungsheimes für Wärmeschutz e.V., München 27, Donaust. 46.

¹⁾ R. Poensgen: Ein technisches Verfahren zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit plattenförmiger Stoffe. Z. VDI 56 (1912), 1653—1658.

²⁾ DIN 52 612: Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät. Ausg. Juli 1959.

³⁾ W. van Rinsum: Die Wärmeleitfähigkeit von feuerfesten Steinen bei hohen Temperaturen sowie von Dampfrohrschutzmassen und Mauerwerk unter Verwendung eines neuen Verfahrens der Oberflächentemperaturmessung. Z. VDI 62 (1918), 601—607.

⁴⁾ DIN 52 613: Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit nach dem Rohrverfahren. Ausg. April 1961.

⁵⁾ W. Nusselt: Die Wärmeleitfähigkeit von Wärmeisolistoffen. Forschung.-Arb. Ing.-Wes. 1909, H. 63/64.

⁶⁾ E. Raisch: Das Forschungsheim für Wärmeschutz e.V., München (historischer Rückblick). Mitt. Forschungsh. Wärmeschutz München 1955, H. 9, 7—12.

temperatur der zu untersuchenden Proben gebaut worden, das, wenn auch meßtechnisch verbessert, noch heute bei der Materialprüfung von Isolier- und Feuerleichtsteinen Verwendung findet⁷⁾.

1. Thermoelektrische Wärmeflußmessung

Es zeigte sich jedoch bald die Notwendigkeit, nicht nur im Laboratorium Wärmeleitzahlen zu messen, sondern die gefundenen Werte auch an ausgeführten Anlagen nachzuprüfen. Der Abnehmer einer Wärmedämmung sollte die Gewähr besitzen, daß bei der Ausführung der Isolierung einwandfreies Material verwendet wurde und die Anbringung ohne Mängel erfolgte⁸⁾. Da aber in der Praxis im allgemeinen die Möglichkeit des Laboratoriums fehlt, die erzeugte Wärmemenge unmittelbar zu messen, mußte eine andere Form gefunden werden, die durch die Isolierung fließende Wärmemenge zu bestimmen. Es gibt hierfür verschiedene Lösungen; die einfachste und sicherste ist die sog. Hilfswandmethode⁹⁻¹²⁾.

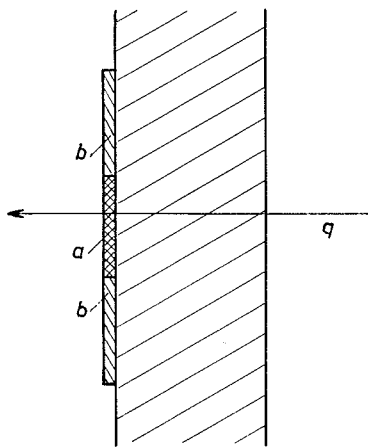


Bild 1. Wärmeflußmessung an einer Wand.
 q = Wärmefuß, a = Wärmefuß-Meßplatte, b = Seitenschutzplatten.

In Bild 1 ist das Meßprinzip skizziert. Auf die Oberfläche, deren Wärmeabgabe oder -aufnahme bestimmt werden soll, wird eine Schicht bekannter Dicke und Wärmeleitfähigkeit, die sog. Hilfswand, aufgebracht, so daß durch diese im Beharrungszustand der Wärmeströmung die gleiche Wärmemenge fließt wie durch die darunter liegende Schicht, z. B. eine Wandisolierung. Durch eine Temperaturdifferenzmessung und aus den Eichdaten der Hilfswand, des sog. Wärmefußmessers, kann der gesuchte Wärmefuß ermittelt werden. Je dünner der Wärmefußmesser ist, desto weniger wird der ursprüngliche Wärmefuß verringert. Eine eindeutige Messung, d. h. eine richtige Beziehung des Meßwertes auf den Eichwert des Wärmefußmessers

⁷⁾ E. Raïsch: *Neuere Prüfverfahren des Forschungsheims für Wärmeschutz*. Arch. Wärmewirtsch. u. Dampfkesselw. 10 (1929), Nr. 11, 369–373.

⁸⁾ VDI 2055: *Wärme- und Kälteschutz*. Ausg. Dez. 1958.

⁹⁾ C. Christiansen: *Einige Versuche über die Wärmeleitung*. Wiedem. Ann. 14 (1881), 23.

¹⁰⁾ K. Hencky: *Ein einfaches praktisches Verfahren zur Bestimmung des Wärmeschutzes verschiedener Bauweisen*. Gesundheits-Ing. 42 (1919), 469.

¹¹⁾ E. Schmidt: *Die Messung von Wärmeverlusten im Betriebe*. Arch. Wärmewirtsch. 5 (1924), 9–11.

¹²⁾ E. Raïsch und K. Schropp: *Die thermoelektrische Temperatur- und Wärmefußmessung*. Mitt. Forschungsh. Wärmeschutz München 1930, H. 8.

setzt jedoch voraus, daß die Wärmestromlinien senkrecht zu den zugehörigen Flächenelementen verlaufen. Je höher der Wärmedurchlaßwiderstand des Wärmefußmessers, d. h. je größer seine Dicke und je kleiner seine Wärmeleitfähigkeit ist, desto größer werden eventuelle Randstörungen durch seitliche Wärmeverluste. Der gemessene Wärmeverlust ist dann zu klein. Die Messung kann aber auch einen zu großen Wert ergeben, wenn dem Wärmefußmesser seitlich Wärme zufließt, z. B. bei Messungen auf metallischen Oberflächen geringer Strahlungsfähigkeit. Diese geben nämlich weniger Wärme ab als der Wärmefußmesser mit im allgemeinen hoher Strahlungszahl, so daß die unter dem Wärmefußmesser liegende Metallfläche eine niedrigere Oberflächentemperatur besitzt als die benachbarten freien Flächen. Zur Vermeidung dieser Meßfehler bringt man Seitenschutzstreifen oder -platten an, damit die Randstörungen außerhalb des Meßfeldes verlegt werden, und gleicht die Strahlungszahl von Wärmefußmesser und Körperoberfläche einander an, z. B. bei Rohrleitungen durch Umwickeln des Blechmantels mit Krepppapierbinden^{*}).

Zur Erhöhung der Genauigkeit der Temperaturdifferenzmessung an der Meßschicht des Wärmefußmessers kann man eine Serienschaltung von Thermoelementen verwenden und auf diese Weise sehr kleine Temperaturunterschiede und damit geringe Wärmemengen ermitteln. Eine vom Forschungsheim hergestellte Wärmefuß-Meßplatte von der Größe 50×50 cm enthält beispielsweise 500 Thermoelemente aus Eisen-Konstantan. In Bild 2 ist das Schaltschema wiedergegeben.

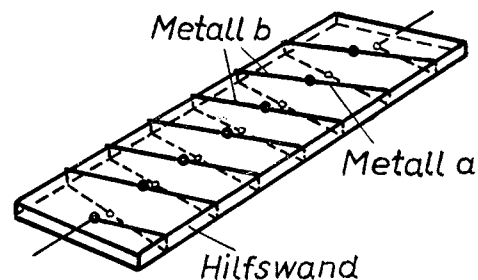


Bild 2. Konstruktionsschema des Wärmefußmessers nach E. Schmidt.

Die ersten Ausführungen der Wärmefußmesser bestanden aus Glas und Kork, E. Schmidt ging zu Gummi über, um das Meßgerät auch auf gekrümmten Oberflächen, z. B. Rohrisolierungen aufbringen zu können¹¹⁾. Zum Schutz der Thermoelemente werden diese in Gummieinwand evulkanisiert. Bild 3 zeigt eine Betriebswärmefußmessung an einer Rohrisolierung in einem Kraftwerk, und zwar eine Vergleichsmessung zwischen einem herkömmlichen Registriergerät und einem neuzeitlichen Zählgerät. Mit diesem Zählgerät, das auf Bild 4 noch einmal gezeigt wird, können zeitlich veränderliche Millivoltwerte, z. B. auf Grund von schwankenden Wärmeflüssen und Temperaturen, auf einfache Weise gemittelt werden¹³⁾. E. Schmidt fertigte auch einen Wärmefußmesser für hohe Tempe-

^{*} Es ist einfacher, die metallische Oberfläche bezüglich ihrer Emissionsfähigkeit „schwarz“ zu machen, als dem Wärmefußmesser die in weiten Grenzen variierende und damit unbekannt Strahlungszahl der Metallfläche zu geben.

¹³⁾ W. F. Cammerer und Fr. C. Cammerer: *Die Verwendung von Zählgeräten für Abnahmeversuche im industriellen Wärme- und Kälteschutz*. Brennstoff-Wärme-Kraft 11 (1959), 17–20.

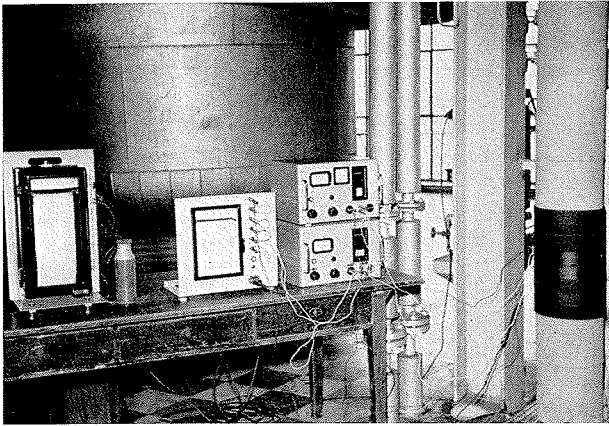


Bild 3. Vergleichsmessung mit Schreib- und Zählgeräten zur Bestimmung der Betriebswärmeleitzahl einer Rohrisolierung in einem Kraftwerk.

raturen an, wobei er als Meßschicht einen keramischen Werkstoff und Thermolemente aus Nickelchrom-Konstantan bzw. Platin-Platinrhodium verwendete¹⁴⁾. Selbstverständlich sind in der Literatur noch viele Ausführungsformen von Wärmeflußmessern bekannt geworden, auf die hier nicht eingegangen werden kann, z. B. ^{15, 16)}. Die Weiterentwicklung des Wärmeflußmessers geht heute dahin, die Meßschichtdicke immer mehr zu verringern, um die ursprüngliche Größe des Wärmeflusses möglichst wenig zu verändern. J. S. Cammerer hat kleine Folien-Wärmestrommesser für physiologische Untersuchungen aus Kunststoff entwickelt mit einer Dicke von nur wenigen Zehnteln von Millimetern¹⁷⁾. Für die Prüfung der Wärmeableitung von Fußböden, deren Normung z. Z. vorbereitet wird (DIN E 52 614), ist ein Wärmeflußmesser von der Größe 3×3 cm und einer Dicke von 0,3 mm vorgesehen¹⁸⁾.

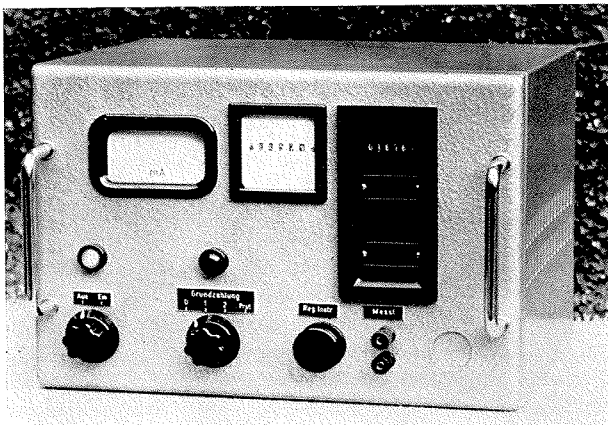


Bild 4. Einfach-Zählgerät, System Fr. C. Cammerer, für Temperatur- und Wärmeverlustmessungen.

¹⁴⁾ E. Schmidt und J. Werneburg: *Wärmeflußmesser für hohe Temperaturen*. Z. VDI 78 (1934), Nr. 11, 343 bis 346.

¹⁵⁾ P. O. Persson: *Värmeflödesmätare*. Kyltekn. Tidskr. 17 (1958), Nr. 4, 45–48.

¹⁶⁾ P. Eckhoff und H. E. Schwiete: *Untersuchungen über den Einfluß der Textur und der Ofenatmosphäre auf die Wärmeleitfähigkeit von Schamottesteinen bei hohen Temperaturen*. Sprechs. 93 (1960), 506–512, 539–542, 557–561.

¹⁷⁾ W. L. Lustig und J. S. Cammerer: *Folien-Wärmestrom-Messer für technische und physiologische Untersuchungen*. Gesundheits-Ing. 76 (1955), Nr. 19/20, 289–293.

¹⁸⁾ J. S. Cammerer: *Untersuchungen über die Voraussetzungen für die Wärmeableitung von Fußböden bei verschiedenen Instituten*. Gesundheits-Ing. 82 (1961), Nr. 9, 270–275.

Für Wärmeflußmesser von so geringer Dicke können jedoch nicht die üblichen Thermolemente mit Löt-köpfen verwendet werden, da diese zu stark aufragen. J. S. Cammerer benutzte daher galvanisch hergestellte Thermolemente, die durch abschnittsweises Verkupfern oder Versilbern von Konstantandrähten oder -bändern entstehen¹⁹⁾. Bild 5 zeigt Herstellung und Wirkungsweise einer Thermosäule aus galvanisch gefertigten Kupfer-Konstantan-Thermolementen.

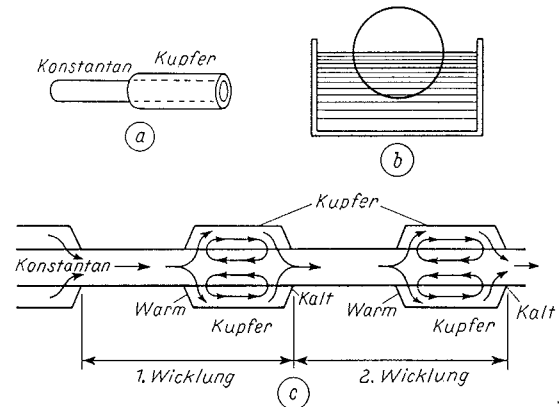


Bild 5. Thermolemente mit galvanischer Verkupferung (nach H. Wilson und T. D. Epps¹⁹⁾).

a = Konstantandraht mit Verkupferung.

b = Schema der Anordnung des auf einem nicht leitenden Zylinder aufgewickelten Konstantandrahtes in dem galvanischen Bad.

c = Stromverlauf in den hintereinander geschalteten Thermolementen beim Gebrauch.

Die Thermokraft von diesen extrem dünnen Wärmeflußmessern ist selbstverständlich geringer als diejenige der Schmidtschen Gummi-Wärmeflußmesser mit einer Dicke von etwa 6 bis 8 mm. Zur Erzielung einer ausreichenden Meßgenauigkeit sind daher ggf. hochwertige Millivoltmeßgeräte, z. B. Fotozellenkompensatoren erforderlich.

Es soll noch darauf hingewiesen werden, daß die durch die endliche Dicke des Wärmeflußmessers bedingte Veränderung des Wärmeflusses bei Wärmeleit- oder Wärmedurchlaßzahl-Messungen ohne Bedeutung ist, da sich bei einer Verringerung des Wärmeflusses die an der zu prüfenden Isolierung liegende Temperaturdifferenz entsprechend ändert. Das Verhältnis von Wärmefluß zu Temperaturdifferenz und damit die berechnete Wärmeleit- oder Wärmedurchlaßzahl werden daher nicht beeinflusst. Interessiert der tatsächliche Wärmeverlust, so ist der Wärmedurchlaßwiderstand des Wärmeflußmessers ggf. zu berücksichtigen¹²⁾.

2. Aufgabenstellung bei der Nachprüfung des Wärmeschutzes von Kesselmauerwerk

An das Forschungsheim, als Hersteller der Schmidtschen Wärmeflußmesser, trat vor einigen Jahren die Aufgabe heran, sich mit einer Weiter- bzw. Neuentwicklung von Wärmeflußmessern zu befassen, als der Wunsch, den Wärmeschutz von Kesselmauerwerk nachzuprüfen, immer häufiger geäußert wurde. Bekanntlich besteht die übliche Garantie bezüglich einer ausreichenden Wärmeisolierung von Kesseleinmauerungen darin, die Oberflächentemperatur bzw. die Übertemperatur

¹⁹⁾ J. Lecomte in: *Techniques générales du laboratoire de physique, Vol. II*. Centre National de la Recherche Scientifique, Paris 1950.

der Oberfläche gegenüber der Kesselhausluft zu gewährleisten²⁰). Es zeigte sich aber oft die Unzuverlässigkeit dieser Garantiegroße, da die gewährleisteten Werte, trotz sorgfältig durchgeführter Berechnungen und fachgemäß ausgeführter Isolierungen, häufig überschritten wurden.

Die Oberflächentemperatur bzw. der Temperaturunterschied zwischen Kesseloberfläche und Raumluft ist jedoch kein eindeutiges Kennzeichen für den Wärmedurchlaßwiderstand einer Isolierung, da bei der metallischen Abdeckung der heutigen Kessel in vielen Fällen Wärme durch sog. Wärmebrücken, wie Halterungen, Wandabfahrungen, Stichöffnungen usw., unter Umgehung des Mauerwerks auf die äußere Blechverkleidung übertragen und infolge der hohen Wärmeleitfähigkeit von Eisen dort verteilt wird, so daß sich die Oberflächentemperatur und die Wärmeabgabe gegenüber den Rechenwerten erhöht. Ferner ist die Wärmeübertragung von der Blechverkleidung an die Luft ein aus Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung zusammengesetzter Vorgang, wobei für die einzelnen Übertragungsarten im allgemeinen verschiedene Temperaturunterschiede maßgebend sind.

Als Garantiegroße kommt daher nur ein Wert in Frage, der die Wärmeschutzwirkung der Kesselisolierung, unbeeinflusst von Umgebungs- und Betriebsbedingungen, besonders Wärmebrücken, eindeutig charakterisiert, nämlich die sog. Wärmedurchlaßzahl des Mauerwerks²¹). Unter diesem Begriff, der in der Wärmeschutztechnik mit Δ bezeichnet wird, versteht man diejenige Wärmemenge in kcal, die in 1 Std. durch 1 m² einer Wandisolierung von gegebener Ausführungsdicke senkrecht zu den Oberflächen fließt, wenn sich deren Temperaturen um 1° C unterscheiden. Die Wärmedurchlaßzahl in kcal/m²·h·grad ergibt sich daher im Beharrungszustand als Quotient aus der Wärmestromdichte in kcal/m²·h und der Temperaturdifferenz zwischen innerer und äußerer Oberflächentemperatur der Kesselisolierung in grad.

Die innere Oberflächentemperatur kann bei Kesseln mit geschlossener Berohrung gleich der Sattdampfentemperatur des in den Rohren strömenden Dampfes gesetzt werden, die äußere Oberflächentemperatur ist leicht zu messen. Bei Kesseln mit Rohrteilung müssen allerdings bei der Einmauerung Temperaturmeßstellen angebracht werden.

Die schwierigste Aufgabe besteht jedoch in der Wärmeflußmessung, die von Wärmebrücken nicht beeinflusst werden darf. Es muß daher der Wärmeflußmesser unter der Blechverkleidung unmittelbar auf dem Mauerwerk aufgebracht und die Verkleidung entsprechend den praktischen Verhältnissen wieder verschlossen werden. Besteht die letzte Schicht der Kesselisolierung aus einer Mineralfasermatte, so ist der Wärmeflußmesser zur Vermeidung von Falschmessungen unter der Matte anzubringen^{*)}.

²⁰) Vereinigung der Großkesselbesitzer (VGB): *Richtlinien für die Einmauerung von Hochleistungsdampfkesseln*. Essen 1951.

²¹) Vereinigung der Großkesselbesitzer (VGB): *Richtlinien für die Einmauerung von Dampfkesseln*. 2., neubearbeitete Ausgabe, Essen 1960.

^{*)} Einzelheiten des Meßverfahrens sowie die hier nur kurz erwähnten Meßergebnisse im Rahmen einer größeren Forschungsarbeit wurden in einer eigenen Veröffentlichung ausführlich geschildert²²).

²²) W. F. Cammerer und J. Achtziger: *Wärmeschutztechnische Garantien bei Kesselinmauerungen*. Mitt. Vereinig. Großkesselbes. 1961, Nr. 72, 180–191.

3. Kessel-Wärmeflußmesser

Ein Wärmeflußmesser für den geschilderten Verwendungszweck mußte daher folgende Forderungen erfüllen:

1. Temperaturbeständigkeit bis etwa 150 bis 200° C.
2. Geringe Dicke, höchstens 1 mm.
3. Ausreichend große Thermokraft.
4. Eindeutige Reproduzierbarkeit der Meßwerte.

Nach vielen Versuchen wurde als günstigstes Material für die Meßschicht ein mit Silikonharz getränktes Glasseidewebe gewählt und ein abschnittsweise verkupfertes Konstantanband als Thermosäule eingeflochten. Zur Gewährleistung eines Temperatenausgleiches auf den beiden Oberflächen waren diese mit einer Kupferfolie abgedeckt. Die Größe betrug 15 × 15 cm und die Dicke etwa 1 mm. Die erforderlichen Seitenschutzstreifen von 2,5 cm Breite waren als Schutzring bereits eingearbeitet. Ein eingebautes Thermoelement ermöglichte die genaue Feststellung der Temperatur des Gerätes, da die Thermokraft temperaturabhängig ist.

Der Alterungsprozeß des Silikonharzes machte ein Tempern und ein wiederholtes Eichen erforderlich.

Der C-Faktor, der die Thermokraft kennzeichnet¹²⁾, betrug etwa 100 kcal/m²·h·mV_{EMK}. Er ist somit wesentlich höher als derjenige von Gummi-Wärmeflußmessern (1,5 bis 25 kcal/m²·h·mV_{EMK}), so daß ein hochwertiges Millivoltmeßgerät verwendet werden mußte.

4. Durchgeführte Messungen und Ergebnisse

An einem Hochleistungsdampfkessel mit geschlossener Berohrung wurden während der Einmauerung mehrere durch Schutzrohre gesicherte Thermoelemente eingebaut, um die innere Oberflächentemperatur und die Temperaturverteilung des Mauerwerks kontrollieren zu können. Bild 6 zeigt einen Schnitt durch das Mauerwerk mit berechneter Temperaturverteilung und Bild 7 die angebrachten Temperatur- und Wärmeflußmeßstellen. Zur Klärung der Verhältnisse wurde der Wärmeverlust sowohl am Mauerwerk unter einer Glasfasermatte als auch auf der Blechoberfläche gemessen. Bild 8 läßt die Schutzrohre für die Thermoelemente während

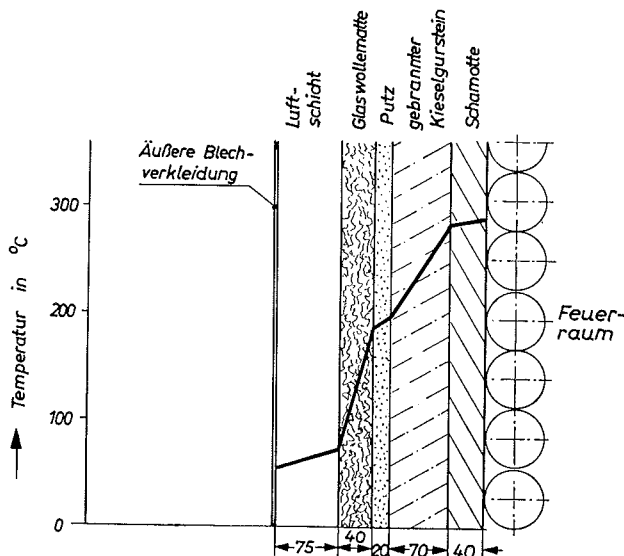


Bild 6. Schnitt durch das Kesselmauerwerk und berechnete Temperaturverteilung.

der Einmauerung und Bild 9 den eingebrachten Wärmeflußmesser zwischen Glasfasermatte und Mauerwerk erkennen. Das ausgeschnittene Mattenstück wurde wieder eingesetzt, ebenso die herausgeschweißte Platte der Blechverkleidung (Bild 10). Auf Bild 11 sind die Meßgeräte, ein elektronischer Kompensations-Zwölffachschreiber und ein Zählgerät zu sehen.

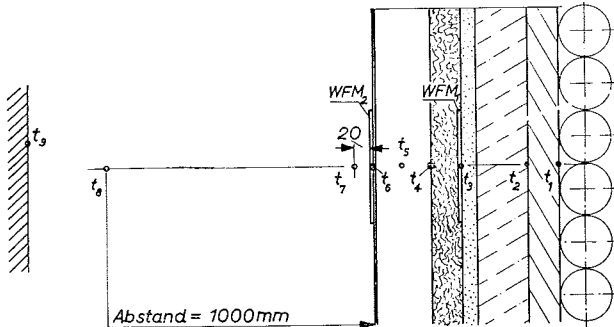


Bild 7. Anordnung der Temperaturmeßstellen und Wärmeflußmessers.

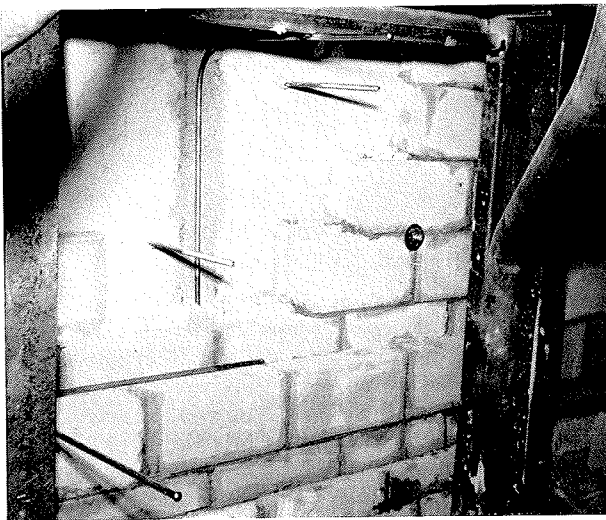


Bild 8. Einbau von Schutzrohren zur Aufnahme von Thermoelementen für Temperaturmessungen auf der inneren Wandoberfläche und innerhalb des Mauerwerks.

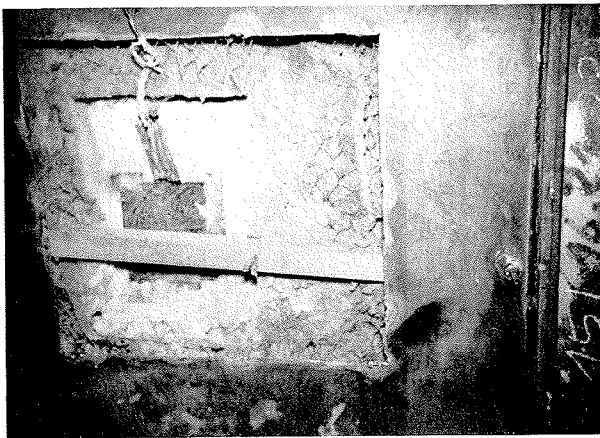


Bild 9. Einbringung des Wärmeflußmessers auf die verputzte Mauerwerksoberfläche hinter der Glaswollematte.

Messungen an drei verschiedenen Stellen des Kesselmauerwerks zeigten im ersten Fall, daß die Wärmeflüsse unter und auf der Blechverkleidung gleich groß, daß also keine Wärmebrücken wirksam waren. An der

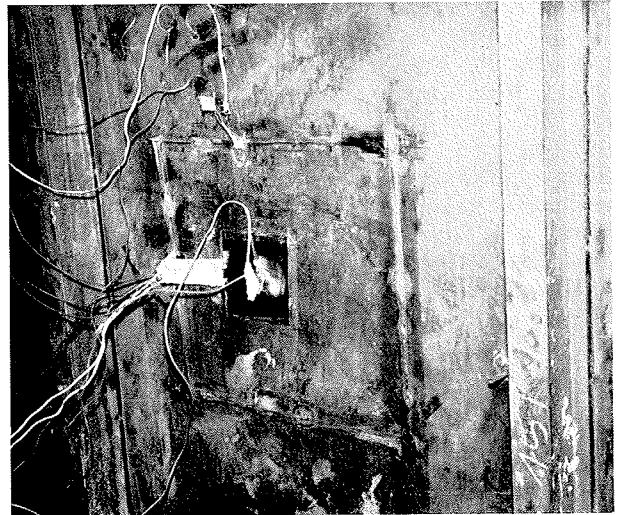


Bild 10. Temperatur- und Wärmeverlustmessung auf der wieder eingeschweißten Blechplatte.

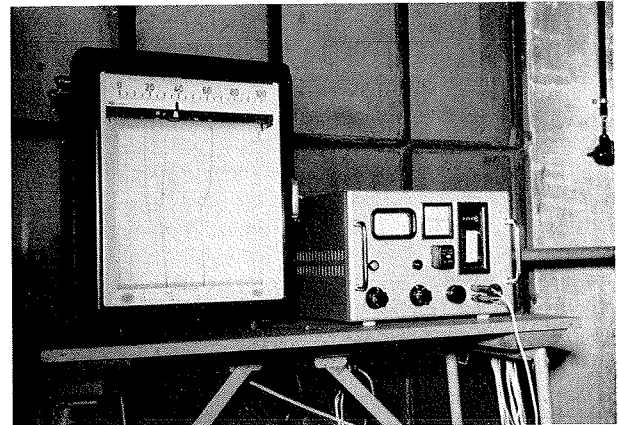


Bild 11. Elektronischer Kompensations-Zwölffachschreiber (links) und Zählgerät für Temperatur- und Wärmeverlustmessungen.

zweiten Meßstelle gab die Blechverkleidung sogar eine geringere Wärmemenge ab als das Mauerwerk, da die unter der Abdeckung liegende Luftschicht Wärme abführte, während an der dritten Stelle der Einfluß von metallischen Wärmebrücken durch einen wesentlich größeren Wärmeverlust der Blechverkleidung gegenüber der Wärmeabgabe des Mauerwerks zu erkennen war. Die letztere Erscheinung ist sehr anschaulich aus zwei Diagrammen zu ersehen, die den zeitlichen Verlauf der Temperaturen und der Wärmeverluste an zwei Meßstellen zeigen. In Bild 12 (kein Einfluß von Wärmebrücken) fallen die äußere Oberflächentemperatur und der Wärmeverlust der Blechverkleidung sowie derjenige des Mauerwerks infolge des Auskühlvorganges der Nacht noch ab, während die innere Oberflächentemperatur bei Anfahren des Kessels sofort ansteigt. Alle Meßgrößen folgen der Innentemperatur entsprechend der Isolierwirkung des Mauerwerks mit einer zeitlichen Phasenverschiebung. Andere Verhältnisse sind aus Bild 13 (Einfluß von Wärmebrücken) zu entnehmen. Beim Anheizen des Kessels nehmen Oberflächentemperatur und Wärmeverlust der Blechverkleidung infolge deren metallischer Verbindung mit dem Rohrschirm gleichzeitig mit der Innentemperatur zu, während der Wärmeverlust und die Oberflächentemperatur des Mauerwerks zunächst davon unbeeinflusst bleiben und in ihrem zeitlichen Verlauf demjenigen von Bild 12 ähneln.

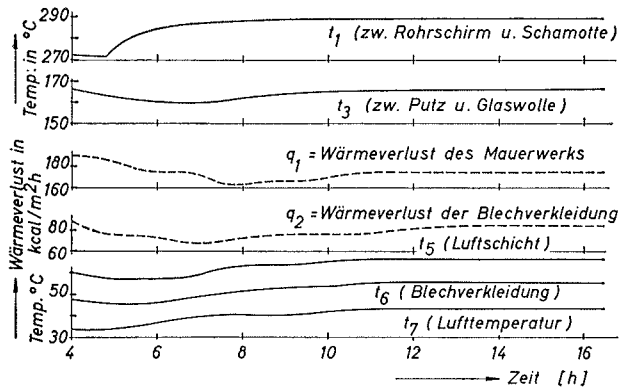


Bild 12. Zeitlicher Verlauf von Temperaturen und Wärmeverlusten ohne Einfluß von metallischen Wärmebrücken²²⁾.

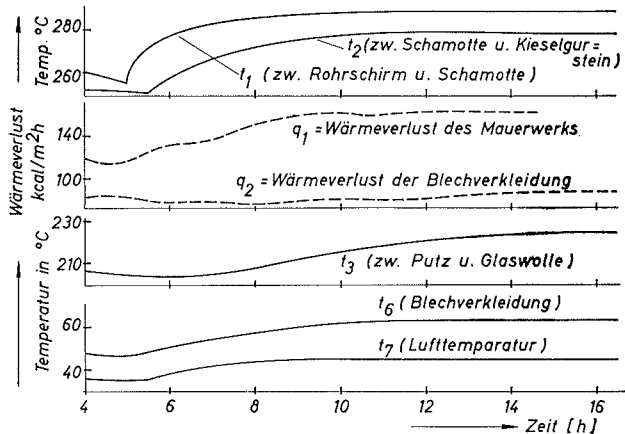


Bild 13. Zeitlicher Verlauf von Temperaturen und Wärmeverlusten mit Einfluß von metallischen Wärmebrücken²²⁾.

Tabelle I

Vergleich der gemessenen und berechneten Wärmeverluste der Blechverkleidung und der sich daraus ergebenden Wärmedurchlaßzahlen λ ²²⁾

Meßstelle	Meßwerte				Rechenwerte			
	q_2	$t_1 - t_6$	λ	t_m	q	$t_1 - t_6$	λ	t_m
I	108	229	0,472	176	145	235	0,618	173
II	83	235	0,353	173	145	235	0,618	173
III	163	227	0,718	177	145	235	0,618	173

In Tabelle I und II sind die Zahlenwerte der Messungen und die ausgewerteten Wärmedurchlaßzahlen zusammengestellt. Aus den Messungen auf der Blechverkleidung (Tab. I) ergeben sich widerspruchsvolle Wärmedurchlaßzahlen, sowohl untereinander als auch bezüglich des Rechenwertes, während die Ergebnisse aus den Messungen auf dem Mauerwerk sehr gut übereinstimmen.

Tabelle II

Vergleich der gemessenen und berechneten Wärmeverluste des Mauerwerks und der sich daraus ergebenden Wärmedurchlaßzahlen λ ²²⁾

Meßstelle	Meßwerte				Rechenwerte			
	q_2	$t_1 - t_3$	λ	t_m	q	$t_1 - t_3$	λ	t_m
I	103	77	1,34	252	145	101	1,44	240
II	174	124	1,40	228	145	101	1,44	240
III	88	66	1,33	257	145	101	1,44	240

5. Weiterentwicklung der Wärmeflußmesser

Obwohl sich die bei den geschilderten Messungen verwendeten Wärmeflußmesser bewährt haben, sind doch noch nicht alle Probleme befriedigend gelöst. Mechanische Festigkeit, Temperaturbeständigkeit und Konstanz der Thermokraft bedürfen noch der Verbesserung. Die rasche Entwicklung der Kunststoffchemie bietet jedoch laufend neue Möglichkeiten, so daß erwartet werden kann, daß diese Kesselwärmeflußmesser in absehbarer Zeit serienmäßig hergestellt werden können.

Eine weitere Aufgabe der Wärme- und Kälteschutztechnik ist die Anfertigung von dünnen Wärmeflußmessern mit größeren Abmessungen, etwa in Form von Wärmeflußmeßdecken oder -tapeten, um den Wärmefluß durch größere Flächen mit flächenanteiliger Erfassung von Wärmebrücken ermitteln zu können. Solche Meßgeräte sind für die Garantienachprüfung von Rohrisolierungen einschließlich Abstandsstützringen und von Behältern, Kühlwagen u. dgl. wünschenswert. Die Herstellung von entsprechend flexiblen Decken mit der erforderlichen Temperaturbeständigkeit und reproduzierbaren Meßwerten erfordert jedoch noch weitere Entwicklungsarbeit.

Eingegangen am 9. 2. 1962.

