

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

Reihe II. Wärmeschutz in der Industrie

Nummer 3

Wärmeschutztechnische Garantien
bei Kesseleinmauerungen

Von

W. F. Cammerer und J. Achtziger, München

DK 662.998 : 621.18

Wärmeschutztechnische Garantien bei Kesseleinmauerungen

Von W. F. Cammerer und J. Achtziger, München.

Mitteilung aus dem Forschungsheim für Wärmeschutz e. V., München

Aufgabenstellung

Zur Erzielung eines günstigen Wirkungsgrades von Dampfkesseln ist es notwendig, die äußeren Wärmeverluste, die bei der Wärmebilanz im sogenannten Restglied zusammengefaßt werden, möglichst gering zu halten. Dieser unerwünschte Energieverlust setzt sich im allgemeinen zusammen aus dem Wärmefluß durch das Kesselmauerwerk und den zusätzlichen Wärmeverlusten durch die meist metallischen Wärmebrücken des Kesselgerüsts. Weitere Verluste durch Gasdurchlässigkeit der Isolierung können durch ein gut ausgeführtes Mauerwerk und eine gasdicht verschweißte Blechverkleidung weitgehend verhindert werden.

Im Kesselbau spricht man im allgemeinen von der Abstrahlung des Mauerwerks, wenn auch die Kesselabdeckung nur einen Teil der Wärme als langwellige elektromagnetische Strahlungsenergie abgibt. Der Rest wird

durch Wärmeleitung der Luft und Wärmemittelführung bewegter Luftteilchen (Konvektion) abgeführt. Die Luftbewegung an der Kesseloberfläche entsteht einerseits durch den Auftrieb der von ihr erwärmten Luft, die sogenannte freie Konvektion, und andererseits durch Zuglufterscheinungen im Kesselhaus, die erzwungene Konvektion. Das Zusammenwirken der beiden Vorgänge nennt man Mischkonvektion. Der prozentuale Anteil der drei Wärmeübertragungsarten, Leitung, Konvektion und Strahlung, die in der sogenannten Wärmeübergangszahl¹⁾ zusammengefaßt werden, kann je nach den örtlichen Verhältnissen verschieden groß sein.

Es ist verständlich, daß der Dampfkesselbesitzer eine Gewähr dafür wünscht, daß die äußeren Wärmeverluste des Kessels einen gewissen Betrag nicht überschreiten. Unter gleichen Wärmeübergangsbedingungen gibt eine

¹⁾ Definition siehe im Abschnitt „Physikalische Grundlagen“.

heiße Oberfläche mehr Wärme an die Raumluft ab als eine kältere, so daß sich im Kesselbau die Garantie einer bestimmten Oberflächentemperatur eingebürgert hat. Da aber diese von der Lufttemperatur abhängig ist, ging man dazu über, die Garantie der Übertemperatur der Kesselisolierung zu fordern, also des Temperaturunterschiedes zwischen Kesseloberfläche und Raumluft.

Die Dampfkessel älterer Bauart trugen keine Blechabdeckung, sondern wiesen eine Mauerwerksoberfläche auf. Die Kesseloberfläche wurde daher nicht durch metallische Wärmebrücken aufgeheizt. Außerdem erweckt warmes Mauerwerk beim Betasten den Eindruck einer relativ niedrigen Oberflächentemperatur²⁾. Es gab daher selten Reklamationen bezüglich einer ungenügenden Wärmeisolierung. Im modernen Kesselbau wird jedoch zur Erzielung eines gasdichten Abschlusses des Mauerwerks eine Blechverkleidung angebracht, deren Halterungen und sonstige metallische Verbindungen mit dem Feuerraum Wärmebrücken darstellen. Meist erhält die Blechabdeckung noch einen Anstrich von Aluminiumbronze mit geringer Strahlungsfähigkeit. Außerdem geht man zur Verringerung der Speicherwärme des Kesselmauerwerks zu immer geringeren Wanddicken über. Eine Überschreitung der gewährleistetsten Oberflächentemperaturen und entsprechende Beschwerden von seiten der Kesselbesitzer sind daher heute häufiger als früher.

Weil erfahrungsgemäß die Gewährleistung der Oberflächentemperatur bzw. der Übertemperatur für ein sicheres Urteil über die wärmeschutztechnische Güte des Kesselmauerwerks nicht ausreicht, wurde auch die Einhaltung eines bestimmten Wärmeverlustes vorgeschrieben. In den „Richtlinien für die Einmauerung von Hochleistungsdampfkesseln“ der Vereinigung der Grosskesselbesitzer e. V., Ausgabe 1951 [2], waren folgende Gewährleistungen für die Wärmeisolierung eines Kessels vorgesehen:

1. Einhaltung einer bestimmten Oberflächentemperatur bei gegebener Kesselhaustemperatur und Luftgeschwindigkeit (Auftrieb).
2. Einhaltung eines bestimmten Wärmeverlustes in kcal/m²h bei gegebenen Temperatur- und Druckverhältnissen in der Feuerung und in den Zügen und unter Beachtung der Richtlinien für Austrocknen und Anheizen. Die zulässige Toleranz beträgt + 10%, an Einzelstellen + 20%, wobei in einem Mindestabstand von 1/2 m von Wärmebrücken zu messen ist.

Die Formulierung dieser Gewährleistungen läßt erkennen, daß bei Kesseleinmauerungen schwierigere Verhältnisse vorliegen als bei anderen Isolierungen, beispielsweise bei Heißdampfleitungen. Es soll nun untersucht werden, wieweit diese Forderungen auf Grund der tatsächlichen physikalischen Vorgänge ein Urteil über die wärmeschutztechnische Güte des Mauerwerks zulassen.

Physikalische Grundlagen³⁾

Die wichtigste Grundgröße des Wärmeschutzes ist die Wärmeleitfähigkeit oder Wärmeleitzahl λ ⁴⁾ eines homogenen Stoffes. Man versteht darunter eine von der

²⁾ Eisen von z. B. 50°C Temperatur fühlt sich bekanntlich heiß an, während Mauerwerk oder gar Kork bei gleicher Temperatur infolge einer Temperaturabsenkung bei der Berührung durch ungenügende Wärmeführung als verhältnismäßig kühl empfunden wird [1].

³⁾ Ausführliche Darstellung siehe [4].

⁴⁾ Eine Zusammenstellung der verwendeten Zeichen befindet sich am Schluß des Aufsatzes.

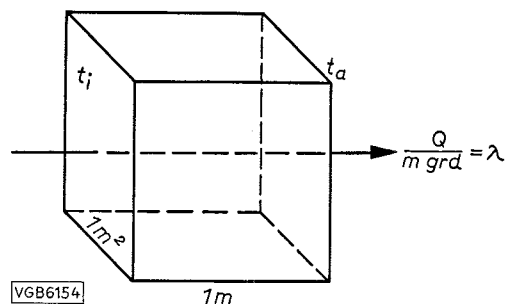


Abb. 1.
Anschauliche Darstellung der Wärmeleitfähigkeit oder Wärmeleitzahl ($t_i - t_a = 1 \text{ grad}$).

Temperatur abhängige Stoffeigenschaft, die bei einem gegebenen Temperaturgefälle einen bestimmten Wärmefluß hervorruft oder, in technischen Maßeinheiten anschaulicher ausgedrückt, diejenige Wärmemenge in kcal, die in 1 h durch 1 m² einer plattenförmigen Schicht von 1 m Dicke senkrecht zu den Oberflächen hindurchfließt, wenn sich deren Temperaturen um 1 Grad Celsius (grad) unterscheiden (Abb. 1). Die Maßeinheit ist dann kcal/m h grad. Die Wärmeleitfähigkeit wird der sogenannten Mitteltemperatur, d. h. dem arithmetischen Mittel der Oberflächentemperaturen, zugeordnet.

Weil eine Wandisolierung um so mehr Wärme hindurchläßt, je größer die Wärmeleitfähigkeit des Isoliermaterials und je geringer die Wanddicke ist, kann der Wärmeschutz einer Wand durch das Verhältnis von Wärmeleitfähigkeit λ und Wanddicke s gekennzeichnet werden. In der Wärmeschutztechnik nennt man diesen Quotienten die Wärmedurchlaßzahl Λ , die einen möglichst geringen Wert aufweisen soll. Es ist somit

$$\Lambda = \lambda/s \text{ [kcal/m}^2 \text{ h grad]} \quad (1)$$

Der reziproke Wert $1/\Lambda$ wird mit Wärmedurchlaßwiderstand oder Wärmedämmwert bezeichnet.

Da der Wärmefluß durch eine plattenförmige Schicht durch die Gleichung

$$Q = \lambda \cdot \frac{F}{s} \cdot (t_i - t_a) \text{ [kcal/h]} \quad (2)$$

gegeben ist, wobei F die Fläche, t_i die Temperatur der warmen und t_a diejenige der kalten Oberfläche bedeutet, kann Λ entsprechend der Definition der Wärmeleitfähigkeit anschaulich als diejenige Wärmemenge in kcal erklärt werden, die in 1 h durch 1 m² einer plattenförmigen Schicht von gegebener Ausführungsdicke senkrecht zu den Oberflächen hindurchfließt, wenn sich deren Temperaturen um 1 grad unterscheiden (Abb. 2).

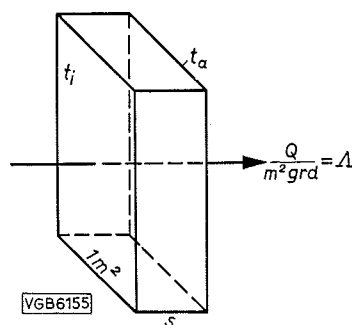


Abb. 2.
Anschauliche Darstellung der Wärmedurchlaßzahl einer Wandisolierung ($s = \text{Ausführungsdicke}$, $t_i - t_a = 1 \text{ grad}$).

Bezeichnet man den Wärmefluß je m^2 Wandfläche mit q , so ist unter Verwendung der Gleichungen 1 und 2:

$$q = \Lambda \cdot (t_i - t_a) \text{ [kcal/m}^2 \text{ h]} \quad (3).$$

Es soll noch einmal darauf hingewiesen werden, daß t_i und t_a die Oberflächentemperaturen der Wand darstellen. Im allgemeinen sind diese jedoch nicht bekannt, sondern nur die Temperaturen der angrenzenden Medien, z. B. von Luft, Wasserdampf, Rauchgasen oder dgl. Diese Temperaturen bezeichnet man in der Wärmeschutztechnik mit t_1 und t_2 , und die durch die Wand fließende Wärmemenge ist dann gegeben durch die Gleichung

$$q = k \cdot (t_1 - t_2) \text{ [kcal/m}^2 \text{ h]} \quad (4).$$

k wird als Wärmedurchgangszahl bezeichnet und besitzt die gleiche Dimension wie die Wärmedurchlaßzahl, nämlich $\text{kcal/m}^2 \text{ h grad}$. Sie wird mittels folgender Gleichung berechnet:

$$1/k = 1/\alpha_i + 1/\Lambda + 1/\alpha_a \text{ [m}^2 \text{ h grad/kcal]} \quad (5).$$

α_i und α_a bedeuten die Wärmeübergangszahlen auf der inneren und äußeren Wandoberfläche. Die Wärmeübergangszahl erfaßt die verschiedenen Wärmeübertragungsarten an einer Oberfläche und ist als diejenige Wärmemenge definiert, die in 1 h von $1 m^2$ einer Oberfläche von dem angrenzenden Medium aufgenommen bzw. an dasselbe abgegeben wird, wenn sich die jeweiligen Temperaturen um 1 grad unterscheiden. Die Maßeinheit ist wieder $\text{kcal/m}^2 \text{ h grad}$.

Der Unterschied zwischen der Oberflächentemperatur und der Temperatur des angrenzenden Mediums ist um so kleiner, je größer α ist.

Die an die warme Oberfläche einer Wand übertragene und die von der kalten abgeführte Wärmemenge sind dann durch folgende Gleichungen gegeben:

$$q = \alpha_i \cdot (t_1 - t_i) \text{ [kcal/m}^2 \text{ h]} \quad (6)$$

$$q = \alpha_a \cdot (t_a - t_2) \text{ [kcal/m}^2 \text{ h]} \quad (7).$$

Im Beharrungszustand der Wärmeströmung, d. h., wenn sich der Wärmestrom zeitlich und örtlich nicht ändert, wenn also von der kalten Oberfläche je Zeiteinheit ebensoviel Wärme abgegeben wie von der warmen aufgenommen wird, ist der Wärmefluß q in den Gleichungen 3, 4, 6 und 7 gleich groß, und die in der Wand herrschenden Temperaturen bleiben zeitlich unverändert (Abb. 3).

Besteht eine Wand aus mehreren, im Sinne des Wärmestromes hintereinanderliegenden planparallelen Schichten, so ergibt sich der Wärmedurchlaßwiderstand aus der Summe der Einzelwiderstände

$$1/\Lambda = s_1/\lambda_1 + s_2/\lambda_2 + s_3/\lambda_3 + \dots \text{ [m}^2 \text{ h grad/kcal]} \quad (8).$$

Die Temperaturverteilung in einer solchen mehrschichtigen Wand läßt sich im Beharrungszustand sehr einfach berechnen, weil sich die Temperaturdifferenzen an den einzelnen Schichten wie deren Wärmedurchlaßwiderstände verhalten. Für den Temperaturabfall $t' - t''$ an der zweiten Schicht gilt z. B.:

$$t' - t'' = (t_1 - t_2) \cdot \frac{s_2/\lambda_2}{1/k} = q \frac{s_2}{\lambda_2} \text{ [grad]} \quad (9).$$

Das gleiche gilt für die Wärmeübergangswiderstände $1/\alpha_i$ und $1/\alpha_a$. Die Übertemperatur der Isolierungsoberfläche $t_a - t_2$ ergibt sich beispielsweise aus folgender Gleichung:

$$t_a - t_2 = (t_1 - t_2) \frac{1/\alpha_a}{1/k} = q/\alpha_a \text{ [grad]} \quad (10).$$

In Abb. 3 sind der Wärmedurchgang durch eine Wandisolierung aus drei hintereinanderliegenden Schichten und

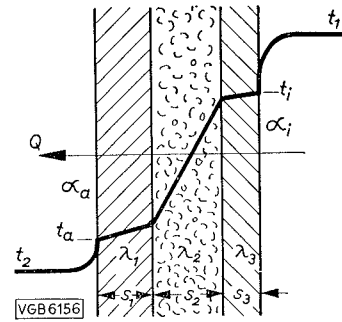


Abb. 3.

Schematische Darstellung einer Wandisolierung aus drei hintereinanderliegenden Schichten mit eingezeichnetem Temperaturgefälle.

die sich auf Grund der Wärmeübergangszahlen, Wärmeleitfähigkeit und Schichtdicken einstellende Temperaturverteilung schematisch dargestellt.

Abb. 4 zeigt eine Isolierung aus Schichten, die, bezogen auf die Wärmestromrichtung, nebeneinanderliegen. Durch die einzelnen Schichten fließen verschiedene Wärmemengen, und der Gesamtwärmefluß kann mittels einer mittleren Wärmeleitfähigkeit λ_m berechnet werden, die sich aus der Gleichung

$$\lambda_m = f_1 \cdot \lambda_1 + f_2 \cdot \lambda_2 + f_3 \cdot \lambda_3 + \dots \text{ [kcal/m h grad]} \quad (11)$$

ergibt, in der f den Flächenanteil der einzelnen Schichten bedeutet. Der Flächenanteil der dritten Schicht ist z. B. gegeben durch die Beziehung

$$f_3 = \frac{F_3}{F_1 + F_2 + F_3 + \dots} \quad (12).$$

Auf diese Weise läßt sich beispielsweise die mittlere Wärmeleitfähigkeit von Mauerwerk, bestehend aus Steinen und Mörtelfugen, leicht berechnen.

Diese Rechenverfahren für Schichtisolierungen sind jedoch nur gültig, wenn die Wärmestromlinien stets parallel und senkrecht zu den Oberflächen gerichtet sind, wenn also keine guten Wärmeleiter, wie z. B. Eisenkonstruktionen, als Wärmebrücken wirken und die Isolierung von der Seite oder von vorne, beispielsweise durch die äußere Blechverkleidung, aufheizen (Abb. 5).

Besteht eine Isolierung nur aus einer Schicht, so bestimmen die Wärmeleitfähigkeit des Materials und die Dicke ihren Wärmeschutz. Da bei vielen Isolierungsarten die Dicke nachprüfbar ist, wird die Wärmeleitfähigkeit (Wärmeleitzahl) in den VDI-Richtlinien für den Wärme- und Kälteschutz [3] als eine völlig eindeutige und am genauesten nachprüfbare Garantiegröße bezeichnet.

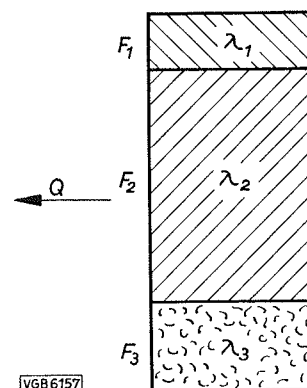


Abb. 4.

Wandisolierung aus drei nebeneinanderliegenden Schichten.

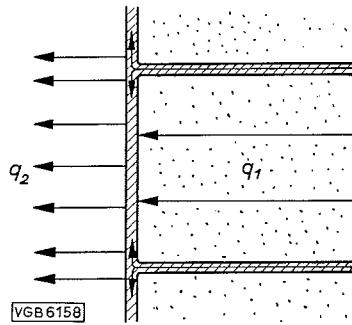


Abb. 5.

Schematische Darstellung der Wirkung von Wärmebrücken bei einer Wandisolierung mit Blechverkleidung (q_1 = Wärmefluß durch das Mauerwerk, q_2 = Wärmeverlust der Blechverkleidung).

net. Sie ermöglicht eine unmittelbare Gegenüberstellung von verschiedenen Materialien bezüglich ihrer Wärmeschutzwirkung. Darum ist bei Rohr- und Behälterisolierungen die Garantie der Betriebswärmeleitfähigkeit üblich, welche an einer ausgeführten Anlage die durch Ausführungsungenauigkeiten erhöhte Wärmeleitfähigkeit des Isoliermaterials in Abhängigkeit von der Mitteltemperatur darstellt.

Bei einer Mehrschichtenisolierung aus hintereinanderliegenden Schichten tritt an die Stelle der Wärmeleitfähigkeit die äquivalente oder gleichwertige Wärmeleitfähigkeit der ganzen Wand, das ist diejenige Wärmeleitfähigkeit einer gedachten homogenen Isolierung, die die gleiche Wärmedurchlaßzahl wie die Mehrschichtenisolierung aufweist. Ihr Nachweis ist jedoch nur dann möglich, wenn sich die Gesamtdicke genau feststellen läßt. Da diese bei Kesselisolierungen nicht nachgeprüft werden kann, eignet sich die Wärmedurchlaßzahl Δ besser zur Kennzeichnung des Wärmeschutzes und zum Vergleich verschiedener Ausführungen als die getrennte Angabe von Betriebswärmeleitfähigkeit und Isolierdicke.

Die Wärmedurchgangszahl k ist hierfür weniger zweckmäßig, weil sie die Wärmeübergangsbedingungen enthält, die in der Praxis schwer feststellbar sind und für die bei Berechnungen nur Annahmen zugrunde gelegt werden können. Ihre Bedeutung liegt nur in der Abschätzung der ungefähren Wärmeverluste und der Temperaturverteilung in der Isolierung.

Verhältnisse in der Praxis

Zur Beurteilung der Zweckmäßigkeit der in der Ausgabe 1951 der VGB-Richtlinien niedergelegten Gewährleistungen ist zu prüfen, ob die Oberflächentemperatur bzw. die Übertemperatur und der Wärmeverlust des Mauerwerks die Wärmedurchlaßzahl der Isolierung eindeutig kennzeichnen.

Nach Gleichung 3 kann die Wärmedurchlaßzahl aus dem Wärmeverlust und der Differenz der beiden Oberflächentemperaturen des Mauerwerks ermittelt werden. Ist daher die innere Oberflächentemperatur der Isolierung bekannt, so ist der Wärmeschutz durch die Angabe des Wärmeverlustes und der äußeren Oberflächentemperatur festgelegt. Die angeführten Gewährleistungen der VGB-Richtlinien scheinen daher die wärmeschutztechnische Güte des Mauerwerks eindeutig zu charakterisieren, und deshalb interessiert die Frage, warum in der Praxis die abgegebenen Garantien trotz sorgfältiger Wärmedurch-

gangsberechnungen und fachgerechter Ausführung des Mauerwerks oft überschritten werden.

Für die Abweichung der Berechnungsergebnisse von den Wärmeverlust- und Temperaturverhältnissen, die sich nach Ausführung der Kesselisolierung im Betrieb einstellen, gibt es mehrere Ursachen, die wegen ihrer großen Bedeutung für Besteller und Lieferer eingehend besprochen werden sollen.

Zunächst ist festzustellen, daß die Wärmedurchlaßzahl einer Wandisolierung nicht durch die absolute Höhe der Oberflächentemperaturen und des Wärmeverlustes festgelegt ist, sondern nur durch das Verhältnis von Wärmeverlust und zugehöriger Temperaturdifferenz der Wärmedämmschicht. Werden für die Berechnung Temperaturen des Feuerraumes und des Kesselhauses, vor allem aber Wärmeübergangsverhältnisse angenommen, die in der Praxis nicht zutreffen, so müssen sich dort selbstverständlich andere Temperaturen und Wärmeverluste ergeben. Der Quotient aus Wärmefluß und Temperaturdifferenz der Oberflächen dagegen bleibt unverändert, sofern im ausgeführten Mauerwerk nicht wesentlich geänderte Mitteltemperaturen und damit auch Wärmeleitfähigkeiten der einzelnen Schichten gelten. Voraussetzung ist allerdings die bereits erwähnte Bedingung, daß der Wärmefluß, der an der warmen Oberfläche in das Mauerwerk eintritt, ungestört und in derselben Größe die kalte Oberfläche wieder verläßt. Auf diese wichtigste Ursache der Abweichungen zwischen Berechnung und Praxis wird später noch ausführlich eingegangen werden.

Wie bereits oben gesagt wurde, können für die Berechnung nur Schätzwerte der Feuerraum- und der Kesselhaustemperatur sowie der Wärmeübergangszahlen verwendet werden. Nur bei dicht geschlossenem Rohrschirm und Stampfmassenverkleidung ist die innere Oberflächentemperatur des Mauerwerks gleich der Sattdampfentemperatur des in den Rohren strömenden Dampfes. Liegen die Rohre nicht eng aneinander, so wirkt sich je nach Rohrleitung die durch Gaswirbel und Flammenstrahlung bedingte innere Wärmeübergangszahl unterschiedlich aus. Die hierfür bekannten Faustformeln sind sehr unsicher und liefern widersprechende Ergebnisse. Sie sollen deshalb hier nicht besprochen werden.

Vor allem aber wirkt sich der äußere Wärmeübergang auf die Oberflächentemperatur der Kesselabdeckung stark aus [1]. Die Luftbewegung und die Zustrahlung von benachbarten warmen Oberflächen können sowohl örtlich als auch zeitlich stark wechseln, so daß eine sichere Erfassung dieser Einflüsse nicht möglich ist. Ein Anstrich mit Aluminiumbronze kann beispielsweise – je nach der Größe des Strahlungsanteils an der Gesamtwärmeübergangszahl und deren Anteil am Wärmedurchgangswiderstand des Mauerwerks – die Oberflächentemperatur gegenüber dem ungestrichenen Zustand wesentlich erhöhen, weil die Strahlungsfähigkeit der Oberfläche stark vermindert wird.

Ferner ist die der Oberflächentemperatur zugeordnete Umgebungstemperatur in den seltensten Fällen eindeutig definiert. Meist wird bei Nachmessungen die Kesselhaustemperatur in 1 m Abstand von der Kesseloberfläche für die Bestimmung ihrer Übertemperatur verwendet. Diese Lufttemperatur, auch wenn sie strahlungsgeschützt gemessen wird, ist jedoch im allgemeinen am Wärmeübergang nicht unmittelbar beteiligt. Die Gleichung 7 gilt nur für den Idealfall, daß für den Wärmeübergang durch Leitung und Konvektion und denjenigen durch Strahlung

die gleiche Temperatur t_2 maßgebend ist. Diese Voraussetzung trifft aber für Oberflächen und Kessel in geschlossenen Räumen nicht zu. Für die konvektiv abgegebene Wärmemenge gilt als t_2 die Temperatur der unmittelbar an der Oberfläche mit merklichem Auftrieb vorbeistreichenden Luft, während für die Wärmeabstrahlung die Temperaturen der in der Nähe befindlichen Körperoberflächen wirksam sind. Eine Zusammenfassung aller Einflüsse in einer Gesamtwärmeübergangszahl ist daher bei Kesselisolierungen im allgemeinen nicht möglich, und eine Trennung in Berührungs- und Strahlungsanteil hat mangels Kenntnis der tatsächlichen Gegebenheiten ebenfalls keinen Sinn.

Den größten Unsicherheitsfaktor bei jeder Wärmedurchgangsberechnung von Kesselmauerwerk stellt aber der Einfluß von metallischen Wärmebrücken zwischen der inneren Wandseite bzw. warmen Zonen der Isolierung und der äußeren Blechverkleidung dar, der lediglich bei den heute seltener gewordenen unverkleideten Kesseln entfällt. Als solche Wärmebrücken wirken vor allem Stiele, Wandabfangungen, Rohrhalterungen, Stichöffnungen und dergleichen. Diese leiten durch die hohe Wärmeleitfähigkeit des Eisens unter Umgehung des Mauerwerks zusätzliche Wärme auf die äußere Blechverkleidung und haben höhere Oberflächentemperaturen und größere Wärmeverluste zur Folge, als die Wärmedurchgangsberechnung ergibt (Abb. 5). Außerhalb des Mauerwerks liegende Stiele und Bandagen wirken außerdem als Kühlrippen und rufen ebenfalls Querströme in der Blechabdeckung hervor. Für die von der Verkleidung abgegebene Wärmemenge gilt daher nicht mehr die Gleichung 4, sondern die zusätzlichen Wärmeverluste müssen durch Zuschläge auf den berechneten Wärmeverlust berücksichtigt werden. Der Einfluß solcher Wärmebrücken im Kesselbau ist aber auch nicht annähernd bekannt.

Wegen dieser physikalischen Gesetzmäßigkeiten und ihrer praktischen Auswirkungen sind die Oberflächentemperatur bzw. die Übertemperatur und der auf der Blechoberfläche gemessene Wärmeverlust als Garantiergrößen ungeeignet.

Als Gewährleistungsgröße kommt nach den bisherigen Ausführungen nur die Wärmedurchlaßzahl des reinen Mauerwerks einschließlich der Mörtelfugen in Frage. Sie ist ebenso wie die Betriebswärmeleitfähigkeit nur von der Mitteltemperatur des Isoliermaterials bzw. der einzelnen Schichten abhängig und damit unbeeinflusst von Betriebsbedingungen und örtlichen Wärmeübergangsverhältnissen an den Oberflächen der Kesselisolierung.

Diese Größe kann vor Ausführung der Isolierung auf Grund der im Laboratorium ermittelten Wärmeleitfähigkeiten der Wandbaustoffe nach den Gleichungen 8 und 11 berechnet werden. Sie wird in Abhängigkeit von der Mitteltemperatur der einzelnen Schichten angegeben und nach Gleichung 3 durch Messung des Wärmeverlustes des Mauerwerks unter der Blechabdeckung und der Temperaturdifferenz der Gesamtsolierung ohne Blechverkleidung eindeutig nachgeprüft.

Wenn kein dicht geschlossener Rohrschirm vorliegt und damit nicht die Sattdampf Temperatur als t_1 in die Rechnung eingesetzt werden kann, muß allerdings die innere Oberflächentemperatur mit Thermoelementen gemessen werden, die bereits während der Einmauerung anzubringen sind.

Voraussetzung einer Übereinstimmung zwischen Berechnung und Praxis ist selbstverständlich ein einwandfrei ausgeführtes Mauerwerk, was ja durch die Nachprüfung festgestellt werden soll.

Planung und Durchführung von Wärmeverlust- und Temperaturmessungen an einer Dampfkesselisolierung

Zur Nachprüfung dieser theoretischen Überlegungen wurden an der Isolierung eines in Betrieb befindlichen Kessels Wärme- und Temperaturmessungen durchgeführt. Ein Vergleich der Meßwerte des Wärmeverlustes der Blechverkleidung und deren Übertemperatur mit den entsprechenden Rechenwerten konnte Aufschluß über die Zweckmäßigkeit der bisher üblichen Gewährleistungen geben⁵⁾.

Zur Untersuchung des eventuellen Einflusses von Wärmebrücken waren Vergleichsmessungen zwischen der von der äußeren Blechverkleidung und der vom Mauerwerk unter dieser Abdeckung abgegebenen Wärmemenge erforderlich.

Aus den gemessenen Wärmeverlusten und den Oberflächentemperaturen des Mauerwerks konnten ferner Wärmedurchlaßzahlen ermittelt und diese mit den jeweiligen Rechenwerten verglichen werden. Es war sodann eine Aussage über die Eignung dieser Größe als Garantierwert für eine ausreichende Wärmeisolierung des Mauerwerks möglich.

Außerdem gaben die Messungen Auskunft über die Größenordnung der äußeren Wärmeübergangszahl der Oberflächen von Kesselisolierungen.

Die Vereinigung der Grosskesselbesitzer stellte Mittel zur Durchführung dieser Messungen zur Verfügung. Es wurde ein geeigneter Hochleistungsdampfkessel ausgewählt, und zwar ein Strahlungskessel mit Zyklonfeuerung und geschlossener Berohrung bei 100 t/h Regellast und 80 atü Betriebsdruck. Die Kesselisolierung bestand an den für die Messungen zugänglichen Stellen aus fünf hintereinanderliegenden Schichten, und zwar, vom Rohrschirm ausgehend, aus Schamotte, gebranntem Kieselgurstein, Putz, Glaswolle und Luftschicht.

⁵⁾ Siehe Abschnitt „Aufgabenstellung“ und [2].

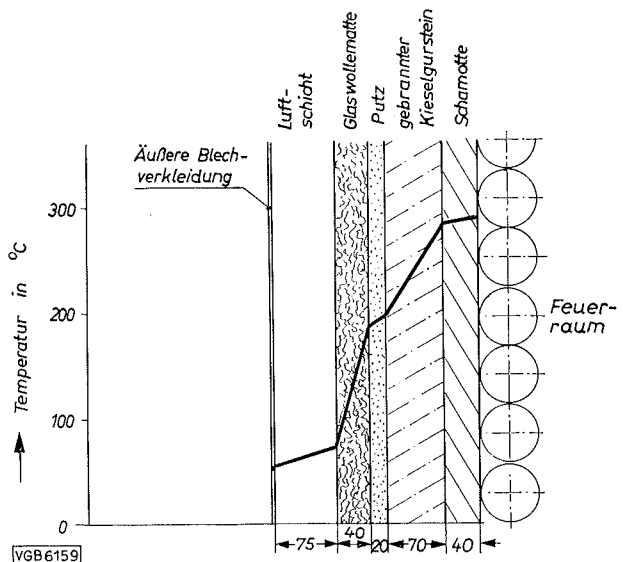


Abb. 6.

Schnitt durch das Kesselmauerwerk und berechnete Temperaturverteilung.

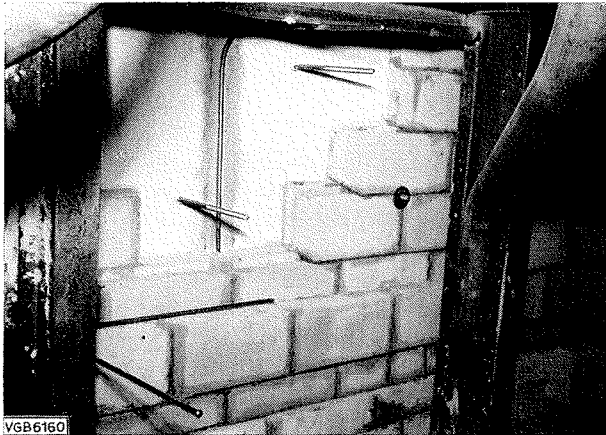


Abb. 7.

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

Isolierputz, Glaswolleplatten und einer Luftschicht mit verschweißter Blechverkleidung (Abb. 6). Die Stiele mit Doppel-T-Profil lagen außerhalb der Isolierung in einem Abstand von 1 m.

Während der Einmauerung waren mit Genehmigung des Kesselbesitzers 19 Temperaturmeßstellen eingebaut worden. Sie lagen sowohl an der inneren Mauerwerks-oberfläche als auch zwischen den einzelnen Schichten. Entsprechend den Erfahrungen bei früheren Messungen wurden die Thermoelementendrähte aus Nickelchrom-Nickel nicht direkt eingemauert, sondern es wurden dünne Stahlschutzrohre mit einem lichten Durchmesser von 6 mm zur Aufnahme der Thermoelemente eingebracht. Wie bei allen thermoelektrischen Temperaturmessungen waren die Thermoelemente und damit auch die Schutzrohre eine gewisse Strecke in einer Zone gleicher Temperatur verlegt, bevor sie nach außen zum Meßgerät geführt wurden. Auf diese Weise wurden Meßfehler durch Wärmeableitung von den Lötstellen vermieden. Die Abb. 7 und 8 zeigen Schutzrohre während der Einmauerung, und zwar eines unmittelbar am Rohrschirm und das andere zwischen zwei Kieselgursteinen bzw. zwischen Schamotteplatten und Kieselgursteinen. Die Schutzrohre wurden durch Anschweißen an Halterungen befestigt.

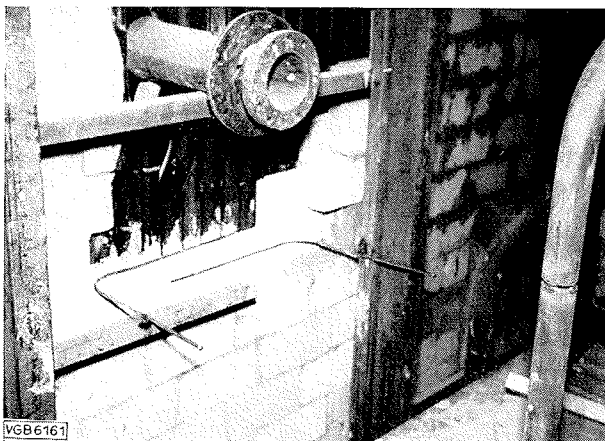


Abb. 8.

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

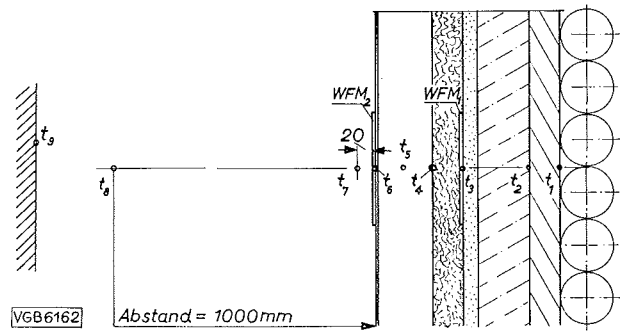


Abb. 9.

Anordnung der Temperaturmeßstellen und Wärmeflußmesser.

Die Messung der Oberflächentemperatur der Blechverkleidung erfolgte durch aufgeklebte Thermoelemente. Ferner wurde die Bestimmung der Lufttemperatur sowohl in etwa 1 m Entfernung als auch unmittelbar an der Blechoberfläche in einem Abstand von etwa 20 mm vorgesehen. Für die Wärmeabgabe durch Leitung und Konvektion ist ja die Temperatur des Luftstromes maßgebend, der unmittelbar an der Oberfläche vorbeistreicht. Weil die Wärmeabstrahlung nicht von der Kesselhaustemperatur, sondern von den Oberflächentemperaturen gegenüberliegender Körper, wie Rohre, Behälter, Kessel, Kesselhauswände und dergleichen, abhängt, wurden auch diese ermittelt.

Als wichtigste Messung war die gleichzeitige Bestimmung des Wärmeverlustes auf und unter der Blechverkleidung unmittelbar auf dem Mauerwerk durchzuführen. Abb. 9 zeigt die Temperatur- und Wärmeflußmeßstellen im Querschnitt der Kesselisolierung.

Die im Forschungsheim hergestellten Gummi-Wärme- flußmesser nach dem von E. Schmidt weiterentwickelten Hilfswandverfahren [3, 5], dessen Meßprinzip in Abb. 10 dargestellt ist, sind höchstens auf der äußeren Blechverkleidung verwendbar. Sie erfordern nämlich bei etwa 8 mm Dicke breite Seitenschutzplatten und können nur einer Höchsttemperatur von 80°C ausgesetzt werden.

Es mußten daher neue dünne Wärme flußmesser mit einer Temperaturbeständigkeit von etwa 200°C entwickelt werden. Unter Ausnutzung der Erfahrungen von J. S. Cammerer mit Folien-Wärme flußmessern [6] wurden dünne quadratische Wärme fluß-Meßplatten aus Glas-seidewebe, das mit Silikonharz bzw. Silikonkautschuk beschichtet war, angefertigt. Diese Folien-Wärme flußmesser enthalten nicht die üblichen verlöteten Thermo- elemente (Abb. 10), deren Lötstellen stark auftragen, sondern eine galvanisch hergestellte Thermosäule aus einem in regelmäßigen Abständen verkupferten Konstantanband. Die Übergangsstellen von Konstantan auf Kupfer wirken dabei als Lötstellen. Die Wärme flußmesser hatten eine Größe von 150 × 150 mm und eine Dicke von

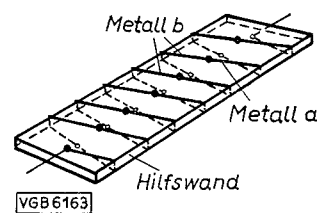


Abb. 10.

Konstruktionsschema des Wärme flußmessers nach E. Schmidt.

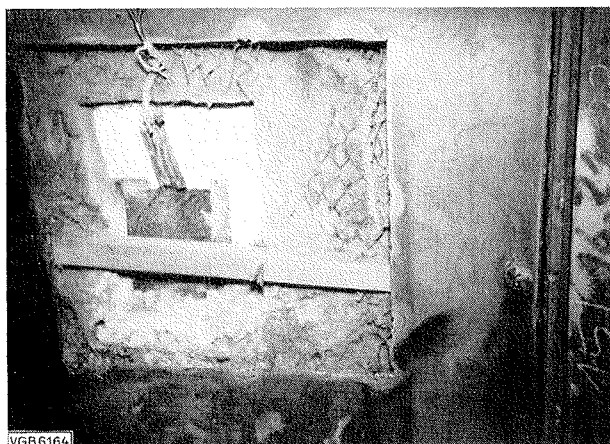


Abb. 11.
Einbringung des Wärmeflußmessers auf die verputzte Mauerwerks-
oberfläche hinter der Glaswolleplatte bei Meßstelle II.



Abb. 13.
Temperatur- und Wärmeverlustmessung
mit überklebter Aluminiumfolie.

etwa 1 mm. Zur Bestimmung der Temperatur des Wärmeflußmessers, dessen Anzeige temperaturabhängig ist, war ein Thermoelement eingebaut, das gleichzeitig zur Messung der Wandtemperatur benutzt werden konnte. Die Wärmeflußmesser wurden im Forschungsheim vor und nach den Messungen geeicht, um eine eventuelle Änderung der Thermokraft durch Alterung der Silikonschicht zu berücksichtigen.

Zur gleichzeitigen Messung des Wärmeverlustes auf und unter der Blechverkleidung mußte ein quadratisches Blechstück von etwa 500 mm Kantenlänge herausgeschnitten und nach Einbringung des Wärmeflußmessers wieder eingeschweißt werden (Abb. 11 und 12). Vergleichsmessungen zwischen einer an mehreren Stellen nur eingehafteten und einer vollkommen eingeschweißten Blechplatte ergaben die gleichen Temperaturen und Wärmeverluste, wenn die Fugen der eingehafteten Platte durch Klebstreifen gut abgedichtet waren.

Unter der Blechverkleidung befand sich nach einer Luftschicht eine Glaswolleplatte (siehe Abb. 6, 9 und 11). Auf dieser Matte konnte der Wärmeflußmesser nicht so dicht anliegend befestigt werden, daß zuverlässige Meßwerte erwartet werden konnten. Es wurde daher bei Meßstelle I (Tafel 1) zum Vergleich der Meßergebnisse einmal ein Wärmeflußmesser in die halbe Schichtdicke der Matte eingelegt (q_1') und dann hinter die Matte auf das verputzte

Mauerwerk aufgebracht (q_2). Das ausgeschnittene Mattenstück wurde sodann wieder eingesetzt (Abb. 11). Auf dem Mauerwerk war die Wärmefluß-Meßplatte mittels temperaturbeständiger Klebefolie und mit mehreren Klammern dicht anliegend befestigt. Abb. 12 zeigt den auf der Blechverkleidung aufgeklebten Wärmeflußmesser in der Mitte der eingeschweißten Blechplatte, unmittelbar davor ein durch Aluminiumfolie strahlungsgeschütztes Thermoelement und die aus dem Mauerwerk herausführenden Meßleitungen.

Tafel 1.
Meßwerte an den Meßstellen I, II und III.

Meß- größen	Meßstelle I		Meßstelle II		Meß- stelle III ohne Alu-Folie	Maß- einheiten
	ohne Alu-Folie	mit Alu-Folie	ohne Alu-Folie	mit Alu-Folie		
t_1	—	—	289,5	289	288	°C
t_2	272,5	274	—	—	279	°C
t_3	213	217	166	—	224	°C
t_4	81	84,5	70,5	—	—	°C
t_5	69	72	65,5	67	—	°C
t_6	61	63,5	55	57,5	63	°C
t_7	44,5	45	43	46,5	45	°C
t_8	43	43	38	39	38	°C
t_9	57	57	49,5	51	—	°C
q_1	103	105	174	172	88	kcal/m ² h
q_1'	68	—	—	—	—	kcal/m ² h
q_2	108	126	83	63	163	kcal/m ² h
q_2'	—	—	78	—	—	kcal/m ² h

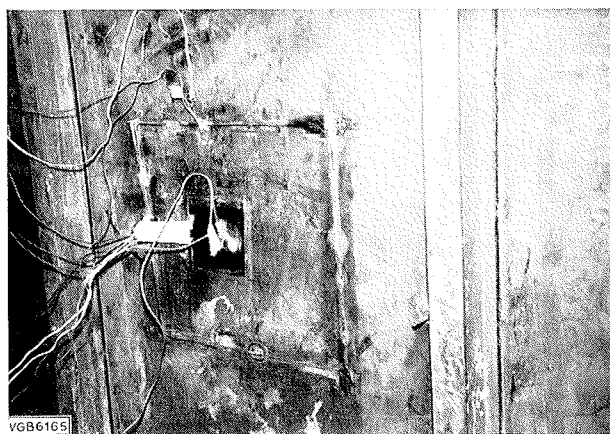


Abb. 12.
Temperatur- und Wärmeverlustmessung auf der wieder
eingeschweißten Blechplatte.

Um einen Überblick über die Wärmeübergangsverhältnisse zu gewinnen, wurden an zwei Meßstellen auch Wärmeverlustmessungen mit überklebter Aluminiumfolie durchgeführt (Abb. 13). Durch die geringe Strahlungszahl der Aluminiumfolie wird eine Wärmeübertragung durch Strahlung praktisch verhindert, und es kann die allein durch Wärmeleitung und Konvektion der Luft abgegebene Wärme ermittelt werden.

Für die Temperatur- und Wärmeflußmessungen standen ein elektronischer Kompensations-Zwölfachsreiber und ein Zählgerät des Forschungsbaues Tutzing [7] zur Verfügung (Abb. 14). Während das Registriergerät den zeitlichen Verlauf der Meßwerte aufzeichnete, konnten mit dem Zählgerät auf einfache Weise Mittelwerte bei schwankenden Meßgrößen gebildet werden, z. B. bei dem stark streuenden Wärmeverlust der Blechverkleidung, der durch eine unterschiedliche Luftbewegung hervorgerufen wurde.

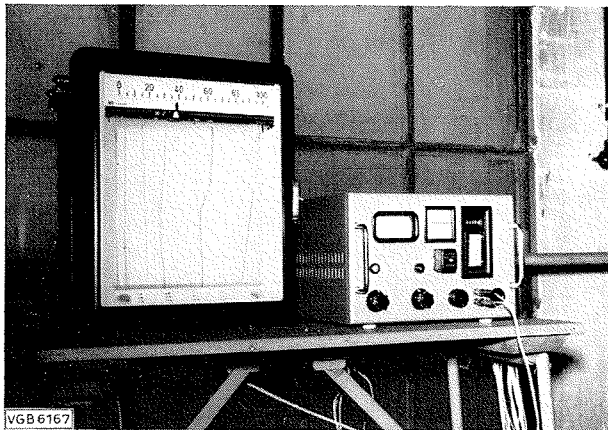


Abb. 14.

Elektronischer Kompensations-Zwölfachsreiber (links) und Zählgerät für Temperatur- und Wärmeverlustmessungen.

Es waren drei leicht zugängliche Meßstellen für die Wärmeverlustmessungen ausgewählt worden. An den anderen Stellen des Kessels, wo ebenfalls Schutzrohre eingebaut waren, konnten nur Temperaturmessungen durchgeführt werden.

Schwierigkeiten traten durch den Ausfall mehrerer Wärmeflußmesser auf, die beim Ein- und Ausschweißen der Blechplatten beschädigt wurden und durch neue ersetzt werden mußten. Um sichere Meßergebnisse zu erhalten, wurden die Wärmeverlustmessungen über mehrere Tage ausgedehnt und mit ausgetauschten Wärmeflußmessern wiederholt. Außerdem waren beim Befestigen der Schutzrohre an Halterungen einige Rohre versehentlich zugeschweißt worden, so daß diese Meßstellen ausfielen.

Das Kraftwerk war ein Spitzenkraftwerk. Der Kessel wurde gegen 5 Uhr angefahren und um 22 Uhr herausgenommen. Etwa ab 16 Uhr befand sich das Mauerwerk im Beharrungszustand. Es stand somit eine genügend lange Zeit für genaue Messungen zur Verfügung, weil auch die Abendstunden durch Registrierung der Meßwerte erfaßt wurden. Auf diese Weise war es möglich, den zeitlichen Verlauf der Temperaturen und des Wärmeverlustes vom Anfahren des Kessels bis zum Beharrungszustand aufzuzeichnen (Abb. 15 und 16).

Meßergebnisse und ihre Auswertung

In Tafel 1 sind die Meßergebnisse im Beharrungszustand für die drei ausgewählten Meßstellen entsprechend den Bezeichnungen der Abb. 9 eingetragen. q_1 und q_2 bedeuten den Wärmefluß in kcal/m² h unter der Glaswollematte und auf der Blechverkleidung, während q_1' sich auf den Meßwert innerhalb der Glaswollematte bezieht und q_2' auf denjenigen an der Rückseite der Blechabdeckung. Die fehlenden Werte konnten wegen Ausfalls von Temperaturmeßstellen oder fehlender Wärmefluß-Meßplatten nicht ermittelt werden.

Die an anderen Stellen des Kessels innerhalb des Mauerwerks gemessenen Temperaturen lagen in der gleichen Größenordnung wie diejenigen der Tafel 1.

Nach Tafel 1 ergaben sich innere Wandtemperaturen zwischen Rohrschirm und Schamotteplatten von etwa 289°C. Der Kessel wurde mit einem Betriebsdruck von etwa 80 atü gefahren, was einer Sattdampf-temperatur von etwa 294°C entspricht. Weil die Schamotteplatten mit

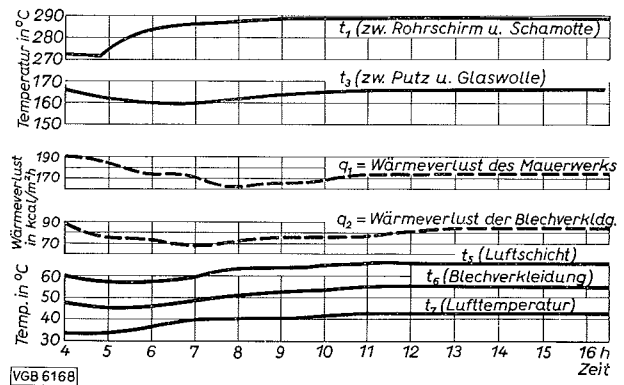


Abb. 15.

Zeitlicher Verlauf von Temperaturen und Wärmeverlusten bei Meßstelle II.

Stampfmasse angesetzt waren, muß zwischen den Rohren und der Oberfläche des Mauerwerks ein geringer Temperaturunterschied bestehen. Andererseits konnte die Oberflächentemperatur mit den in den Schutzrohren liegenden Thermo-Elementen nicht genau erfaßt werden, weil an den Schamotteplatten Aussparungen für die Schutzrohre angebracht werden mußten. Die innere Wandtemperatur wurde daher bei der Auswertung der Meßergebnisse mit 290°C angenommen.

Die Temperaturmessung zwischen den Schamotteplatten und dem Kieselgurstein-Mauerwerk ergab Werte zwischen 272,5 und 279°C. Diese Zahlen sind zu niedrig, weil die Temperaturdifferenz an den Schamotteplatten entsprechend der Wärmeleitfähigkeit von Schamotte kleiner sein mußte. Die Ursache hierfür war, daß die im Schutzrohr von 6 mm Durchmesser befindlichen Lötstellen der Thermo-Elemente nicht genau in der Oberfläche der Schamotteplatten lagen, sondern in einer Aussparung des Kieselgursteins eingebracht werden mußten. Zur Erzielung genauer Meßergebnisse von Temperaturen innerhalb eines Kesselmauerwerks ist es daher zweckmäßig, die inzwischen auf den Markt gekommenen dünnen geschützten Thermo-Elemente zu verwenden, bei denen in einen Stahlmantel von 1 mm Außendurchmesser zwei dünne Thermodrähte eingebettet sind.

Das wichtigste Meßergebnis ist der Unterschied zwischen den Wärmeverlusten auf und unter der Blechabdeckung auf dem Mauerwerk, die

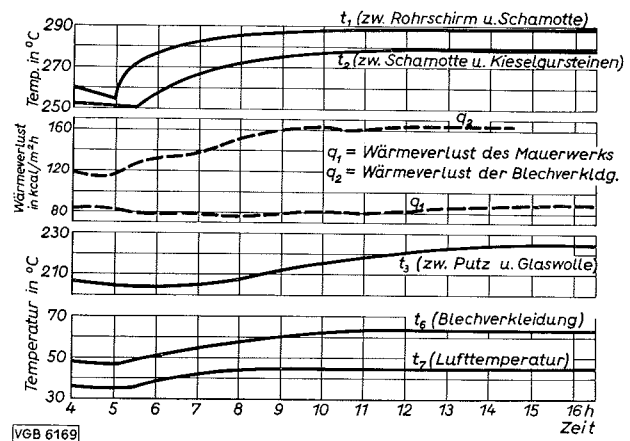


Abb. 16.

Zeitlicher Verlauf von Temperaturen und Wärmeverlusten bei Meßstelle III.

ohne den Einfluß von Wärmebrücken im Beharrungszustand gleich groß sein müßten.

Bei Meßstelle I waren die beiden Meßwerte tatsächlich gleich. Die Messung innerhalb der Glaswolle (q₁) ergab jedoch einen zu kleinen Wert, was auf eine Luftkonvektion innerhalb der Matte schließen läßt⁶⁾. Auch die Oberflächentemperatur t₄ der Fasermatte steht in keinem Verhältnis zur Wärmeleitfähigkeit der Glaswolle. Die Ursache lag wahrscheinlich in einem Luftaustausch der Matte mit der angrenzenden Luftschicht. Eine zuverlässige Temperatur- und Wärmeflußmessung war daher nur unter der Fasermatte auf dem Mauerwerk möglich (Abb. 11). Da die Wärmeverluste der Blechverkleidung und des Mauerwerks gleich groß waren, ist an dieser Stelle kein Einfluß von Wärmebrücken erkennbar.

Ein anderes Bild zeigte Meßstelle II. Hier war der Wärmeverlust der Blechverkleidung nur halb so groß wie derjenige des Mauerwerks. Zur Nachprüfung dieses merkwürdigen Ergebnisses wurde auch der Wärmefluß auf der Rückseite der Blechabdeckung gemessen (q₂). Dieser wies jedoch dieselbe Größenordnung auf wie derjenige auf der Vorderseite. Die Temperatur t₅ innerhalb der Luftschicht war außerdem höher als die Blechtemperatur t₆. Der Differenzbetrag von q₁ und q₂ floß daher nicht im Blech nach den Seiten ab oder wurde nicht von der Blechverkleidung an die Luftschicht abgegeben, sondern kann nur durch die Luftschicht konvektiv abgeführt worden sein.

Der entgegengesetzte Fall lag bei Meßstelle III vor. Der Wärmeverlust der Blechabdeckung war etwa doppelt so groß wie derjenige des Mauerwerks. An dieser Stelle führten Rohrstützen Wärme auf die Blechverkleidung und erhöhten die Wärmeabgabe.

Da an allen drei Meßstellen gleiche Verhältnisse bezüglich der Innentemperatur und der Zusammensetzung des Mauerwerks herrschten, könnte man überall den gleichen Wärmeverlust erwarten. Dieser war jedoch an den einzelnen Meßstellen sehr verschieden, wie Tafel 1 zeigt, und zwar betrug der Unterschied sowohl auf als auch unter der Blechverkleidung bis zu 100%.

Berechnet man unter Verwendung der geschätzten Wärmeleitfähigkeiten⁷⁾ und Dicken der einzelnen Schichten, einer äußeren Wärmeübergangszahl von 10 kcal/m²h grd und einer Lufttemperatur von 40°C nach den Gleichungen 4, 5 und 8 den Wärmeverlust, so ergibt sich ein Wert von 145 kcal/m²h. Die Abweichungen der Meßwerte von diesem Rechenwert betragen demnach auf der Blechverkleidung — 43 bis + 11% und auf dem Mauerwerk — 39 bis + 20%.

Die Übertemperatur der Blechverkleidung gegenüber der Lufttemperatur in 1 m Entfernung vom Kessel errechnet sich aus den Messungen zu 17 bis 25 grd, während die Rechnung bei Einsetzung eines α_a von 10 kcal/m²h grd einen Wert von 14,5 grd ergibt.

Diese Abweichungen des Wärmeverlustes und der Übertemperatur von den Rechenwerten zeigen die Unzuverlässigkeit der Berechnung auf Grund unbekannter Einflüsse von Wärmebrücken und der äußeren Wärmeübergangszahl. Die Größen eignen sich daher nicht als

⁶⁾ Im Forschungsheim werden zur Zeit Messungen zur Klärung des Konvektionseinflusses bei senkrechten Fasermatten durchgeführt.

⁷⁾ Schamotte 0,9, gebrannte Kieselgursteine 0,12, Isolierputz 0,3, Glaswolle 0,05 und Luftschicht 0,6 kcal/m h grd.

Garantiewerte zur Gewährleistung einer gut ausgeführten Kesselisolierung.

Aus den gemessenen Wärmeverlusten und den Oberflächentemperaturen lassen sich nun Wärmedurchlaßzahlen des Mauerwerks berechnen, und zwar sowohl der gesamten Kesselisolierung als auch des reinen Mauerwerks ohne Glaswolle.

In Tafel 2 sind die Wärmeverluste der Blechverkleidung mit den zugehörigen Temperaturdifferenzen der gesamten Kesselisolierung und die daraus berechneten Wärmedurchlaßzahlen für die drei Meßstellen zusammengestellt. Zum Vergleich wurden auch die Rechenwerte beigefügt, die sich aus den bereits erwähnten Wärmeleitfähigkeiten und den Schichtdicken ergeben. Da das Mauerwerk an allen drei Meßstellen die gleiche Zusammensetzung aufwies, sind die Rechenwerte selbstverständlich gleich. Außerdem wurden die Mitteltemperaturen der gesamten Kesselisolierung angegeben.

Tafel 2.

Vergleich der gemessenen und berechneten Wärmeverluste der Blechverkleidung und der sich daraus ergebenden Wärmedurchlaßzahlen Λ .

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

Diese Wärmedurchlaßzahlen weisen sowohl untereinander als auch gegenüber dem Rechenwert erhebliche Unterschiede auf, und zwar bis zu 100 bzw. 43%. Es war auch wegen des Einflusses von Wärmebrücken und der Konvektion in der Luftschicht kein besseres Ergebnis zu erwarten. Die Wärmedurchlaßzahl der Kesselisolierung, die sich aus dem Wärmeverlust der äußeren Blechverkleidung ergibt, eignet sich daher nicht als Garantiewert.

Vergleicht man dagegen in Tafel 3 die Wärmedurchlaßzahlen, die sich aus der Wärmeverlustmessung unter der Blechabdeckung für das Mauerwerk ohne Glaswolle und Luftschicht ergeben, sowohl untereinander als auch mit dem entsprechenden Rechenwert, so ist eine sehr gute Übereinstimmung festzustellen. Die größte Abweichung der Meßwerte untereinander beträgt etwa 5% und vom Rechenwert 8%. Berücksichtigt man, daß für die Berechnung nur Schätzwerte der Wärmeleitfähigkeiten zur Verfügung standen, so muß das Ergebnis als sehr befriedigend bezeichnet werden. Bemerkenswert ist, daß die Wärmedurchlaßzahlen des Mauerwerks an den einzelnen Meßstellen trotz unterschiedlicher Wärmeverluste und damit Temperaturdifferenzen praktisch gleich sind. Der Grund liegt in der Unabhängigkeit der Wärmedurchlaßzahl von Betriebsbedingungen und damit von der Höhe des Wärmeflusses. Nur die Mitteltemperatur der einzelnen Schichten ist von Einfluß. Weichen die der Berechnung zugrunde gelegten Mitteltemperaturen nicht wesentlich von den in der Praxis sich einstellenden Temperaturverhältnissen ab, so genügt auch die Angabe der Mitteltemperatur der gesamten betrachteten Mehrschichtenisolierung, wie in Tafel 3 verfahren wurde. Eine Abhängigkeit der Wärmedurchlaßzahlen von der Mitteltemperatur ist darin nicht festzustellen, was bei dem geringen Unterschied der Mitteltemperaturen und einer Meßgenauigkeit von etwa $\pm 5\%$ auch nicht erwartet werden kann.

Tafel 3.

Vergleich der gemessenen und berechneten Wärmeverluste des Mauerwerks und der sich daraus ergebenden Wärmedurchlaßzahlen Λ .

Meßstelle	Meßwerte				Rechenwerte			
	q_1	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

Aus dem gemessenen Wärmeverlust der Blechverkleidung, ihrer Oberflächentemperatur und der Lufttemperatur kann ferner die Wärmeübergangszahl α_a abgeschätzt werden. Wird die Lufttemperatur in 1 m Entfernung von der Kesselwand zugrunde gelegt, so erhält man für die Meßstellen I und II Wärmeübergangszahlen von 5 und 6 kcal/m² h grd. Berechnet man jedoch den Anteil der Wärmeübergangszahl für Wärmeleitung und Konvektion aus den Meßwerten bei Abdeckung mit Aluminiumfolie unter Benutzung der unmittelbar an der Oberfläche herrschenden Lufttemperatur, so ergeben sich Werte in der Größenordnung von 6 und 7, die somit höher sind als die Gesamtwärmeübergangszahlen. Die Wärmeabstrahlung war in den betrachteten Fällen gering, weil bei Meßstelle I die Kesseloberfläche des Überhitzers mit etwa 57°C gegenüberlag und bei Meßstelle II eine Heißluftleitung mit etwa 50°C Oberflächentemperatur vorbeiführte. Aus diesem Grund und wegen der unübersichtlichen Strahlungsverhältnisse ist eine Abschätzung des Strahlungsanteils der Wärmeübergangszahl schwer möglich. Es kann jedoch der Anteil für Leitung und Konvektion im vorliegenden Fall nicht größer als die Gesamtwärmeübergangszahl sein.

Die Messungen bestätigen daher die theoretischen Überlegungen, daß die Kesselhaustemperatur in 1 m Entfernung von der Kesseloberfläche nicht in unmittelbarem Zusammenhang mit dem Wärmeverlust des Kessels steht.

Die Abb. 15 und 16 zeigen den zeitlichen Verlauf von Temperaturen und Wärmeverlusten im Aufheizvorgang des Kesselmauerwerks an den Meßstellen II und III. Die beiden Abbildungen sind insofern sehr interessant, als bei Abb. 15 deutlich zu erkennen ist, daß der Aufheizvorgang von innen nach außen mit Phasenverschiebung infolge des Wärmewiderstandes der Isolierung erfolgt. Die Temperatur am Rohrschirm (t_1) steigt bereits kurz vor 5 Uhr an, während die Temperatur der Putzoberfläche (t_3) noch infolge des Auskühlungsvorganges der Nacht absinkt. Auch die Wärmeflüsse q_1 und q_2 fallen noch und nehmen erst gegen 8 Uhr zu. Ähnlich verhalten sich die Temperaturen in der Luftschicht und auf der Blechverkleidung sowie die Lufttemperatur an der Kesseloberfläche. An dieser Stelle sind daher keine Wärmebrücken zwischen Rohrschirm und der Blechverkleidung zu erkennen. Der Unterschied zwischen q_1 und q_2 ist auf andere Einflüsse zurückzuführen, auf die bereits eingegangen wurde.

Ein andersgearteter Kurvenverlauf ist jedoch auf Abb. 16 (Meßstelle III) zu erkennen. Gleichzeitig mit der Rohrschirmtemperatur t_1 steigen nämlich die äußere Blechtemperatur t_6 und der zugehörige Wärmeverlust q_2 an, während die Temperatur der Putzoberfläche t_3 wie bei Abb. 15 noch abfällt und später erst zunimmt. Auch beim Wärmeverlust des Mauerwerks (q_1) ist zunächst ein leichtes Abnehmen zu erkennen, bevor er gegen 8 Uhr wieder ansteigt.

Dieser Kurvenverlauf bestätigt eindrucksvoll den Einfluß von Wärmebrücken zwischen Rohrschirm und Blech-

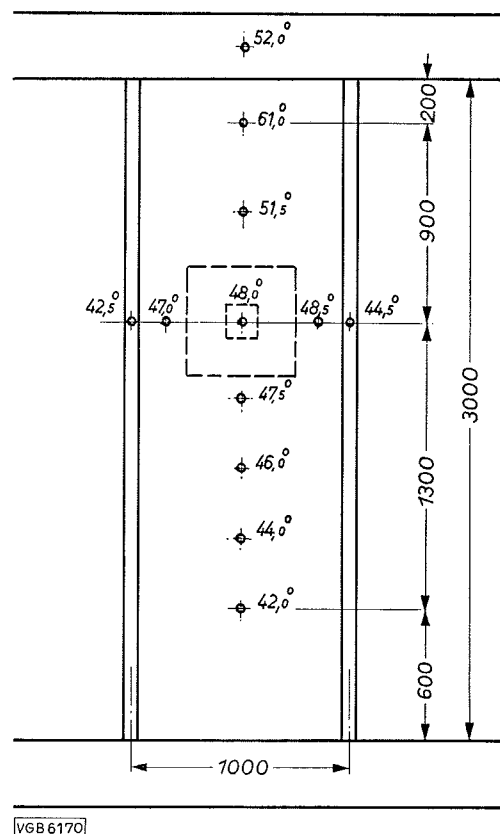
verkleidung, der aus dem größeren Wärmeverlust der Kesseloberfläche gegenüber demjenigen des Mauerwerks geschlossen worden war.

Die in Abb. 17 dargestellte Temperaturverteilung beweist die Vermutung, daß außerhalb des Mauerwerks liegende Teile der Kesselkonstruktion, wie z. B. Stiele und Bandagen, als Kühlrippen wirken, weil ihre Temperaturen niedriger sind als diejenigen der benachbarten Blechoberfläche. Während die Temperatur von der Meßstelle nach unten stetig abnimmt, steigt sie nach oben allerdings zunächst an, um dann zur Bandage wieder abzufallen. Die Ursache ist die Luftkonvektion an der Blechverkleidung.

Folgerungen

Die Wärmefluß- und Temperaturmessungen an einer Kesselisolierung und ihre Auswertung bestätigen eindrucksvoll die Richtigkeit der theoretischen Überlegungen. Der Einfluß von Wärmebrücken der eisernen Kesselkonstruktion konnte eindeutig nachgewiesen werden. Der Wärmeverlust der Blechabdeckung wird dadurch größer als der tatsächliche Wärmeverlust des eigentlichen Kesselmauerwerks. Störungen des Wärmefflusses innerhalb der Isolierung, z. B. durch nicht zu erfassende Konvektionserscheinungen in Fasermatten und Luftschichten, können aber auch bewirken, daß die Blechverkleidung weniger Wärme abgibt, als durch das Mauerwerk fließt.

Der auf der Blechverkleidung gemessene Wärmeverlust ist daher kein Maß für den tatsächlichen Wärmeschutz des Mauerwerks. Die Oberflächentemperatur bzw. die Über-temperatur der Blechabdeckung gegenüber der Raumluft ermöglicht ebenfalls kein Urteil über die Kesselisolierung.



VGB 6170

Abb. 17. Temperaturverteilung auf der Blechverkleidung von Meßstelle II.

Der Wärmeverlust des Mauerwerks und die äußere Oberflächentemperatur können nur unter Zugrundelegung vorsichtiger Annahmen geschätzt und unter Angabe der Voraussetzungen mitgeteilt werden. Solange aber über den Einfluß von Wärmebrücken bei Kesselisolierungen keine Zahlenwerte vorliegen, sind diese Werte sehr ungenau.

Verantwortungsbewußte Einmauerungsfirmen können daher solche Größen nur mit so großen Sicherheitszuschlägen mitteilen, daß diese Werte als Garantien wertlos sind.

Aber auch der Wärmeverlust des Mauerwerks ohne Berücksichtigung der zugehörigen Temperaturdifferenz der Isolierung kann nichts über die Güte der Isolierung aussagen.

Als Garantiegröße für den Wärmeschutz einer Kesselisolierung kommt daher nur die Wärmedurchlaßzahl bzw. der Wärmedurchlaßwiderstand des reinen Mauerwerks ohne Blechverkleidung in Frage. Diese Größen kennzeichnen eindeutig die Wärmedurchlässigkeit der Kesselisolierung einschließlich der Mörtelfugen. Sie können vor Ausführung der Einmauerung auf Grund von Laboratoriumswerten der Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Wandbaustoffe in Abhängigkeit von der Mitteltemperatur angegeben werden. Die Nachprüfung dieses Garantiewertes an dem im Betrieb befindlichen Kessel ist durch Wärmeflußmessungen unter der Blechabdeckung und gleichzeitige Temperaturmessungen der warmen und kalten Oberflächen des Mauerwerks im Beharrungszustand möglich. Die Blechverkleidung muß während der Messung geschlossen werden, wobei ein Einheften der ausgeschnittenen Platte an einigen Stellen genügt. Die Fugen sind jedoch mit Klebestreifen luftdicht abzudecken. Bei Verwendung geeigneter Wärmeflußmesser kann dieser Wert mit einer Meßtoleranz von $\pm 5\%$ nachgeprüft werden.

Befinden sich innerhalb des Mauerwerks Luftschichten oder Fasermatten mit merklicher Luftkonvektion, die bei größeren Schichthöhen infolge der Temperaturunterschiede auftritt, so ist eine Nachprüfung der Wärmedurchlaßzahl nur möglich, wenn diese Schichten bei der Messung ausgespart werden. Die Wärmeübertragung durch Konvektion findet dann nämlich in einer Ausdehnung von der Größe der Schichthöhe statt, so daß die an kleineren Ausschnitten gemessenen Wärmeflüsse nicht dem gesamten, auf die Flächeneinheit bezogenen Wärmeverlust zugeordnet werden können.

Ist der Rohrschirm nicht dicht geschlossen, so daß nicht die Satttdampfentemperatur als Warmseitentemperatur des Mauerwerks angenommen werden kann, so sind während der Einmauerung Temperaturmeßstellen an der inneren Mauerwerksoberfläche einzubringen^{*)}.

Auf Grund dieser Untersuchungen wurde in der Neufassung der VGB-Richtlinien für die Einmauerung von Dampfkesseln [8] zur Gewährleistung der Wärmeisolierung des Kesselmauerwerks die Wärmedurchlaßzahl als Garantiegröße festgelegt. Dieser Wert muß bei der Nachprüfung mit einer Toleranz von 10% eingehalten werden.

Da praktisch in allen Kesselhäusern sehr enge Verhältnisse herrschen und damit die Kesselwände in Strahlungs-

austausch mit warmen Körperoberflächen stehen, ist die Wärmeabstrahlung meist sehr gering. Es wird daher vorgeschlagen, zur Abschätzung der Oberflächentemperatur mit einer niedrigen äußeren Wärmeübergangszahl von etwa $6 \text{ kcal/m}^2 \text{ h grad}$ zu rechnen. Der nach Gleichung 10 ermittelte Rechenwert ist ja um so größer, je kleiner die Wärmeübergangszahl angenommen wird. Andererseits ist es zweckmäßig, bei überschlägigen Berechnungen des Wärmeverlustes aus Sicherheitsgründen eine höhere Wärmeübergangszahl, etwa $10 \text{ bis } 12 \text{ kcal/m}^2 \text{ h grad}$, zugrunde zu legen.

Zusammenfassung

Theoretische Überlegungen und praktische Temperatur- und Wärmeflußmessungen an einer Kesselisolierung zeigten die Unzweckmäßigkeit der bisher üblichen Garantiegrößen, nämlich des Wärmeverlustes der Blechverkleidung und deren Oberflächentemperatur. Die Messungen bestätigten ferner, daß die Wärmedurchlaßzahl den Wärmeschutz der Kesselisolierung eindeutig kennzeichnet, weil sie eine Stoffeigenschaft der verwendeten Wandbaustoffe einschließlich der Mörtelfugen darstellt und von Betriebs- und Umgebungsbedingungen unabhängig ist. Diese Größe wurde daher in der Neufassung der VGB-Richtlinien für die Einmauerung von Dampfkesseln als Garantiewert für die Gewährleistung der Wärmeisolierung festgelegt.

*

Die Untersuchung wurde im Auftrag und mit Mitteln der Vereinigung der Grosskesselbesitzer e. V., Essen, durchgeführt, wofür auch an dieser Stelle der Dank der Verfasser ausgesprochen sei.

Benutzte Zeichen:

Q	Wärmefluß in kcal/h
q	Wärmefluß in kcal/m ² h
k	Wärmedurchgangszahl in kcal/m ² h grad
Λ	Wärmedurchlaßzahl in kcal/m ² h grad
t_1	Temperatur des Mediums auf der warmen Seite, z. B. von Rauchgasen, in °C
t_i	Temperatur der warmen Isolierungsoberfläche in °C
t_a	Temperatur der kalten Isolierungsoberfläche in °C
t_2	Temperatur des Mediums auf der kalten Seite, z. B. von Raumluft, in °C
$t' - t''$	Temperaturdifferenz an einer beliebigen Schicht in grad
°C	Temperatur
grad	Temperaturdifferenz
α_i	Wärmeübergangszahl an der inneren (warmen) Seite der Isolierung in kcal/m ² h grad
α_a	Wärmeübergangszahl an der äußeren (kalten) Seite der Isolierung in kcal/m ² h grad
s_1, s_2	Dicken der einzelnen Schichten in m
$s_3 \dots$	
λ_1, λ_2	Wärmeleitfähigkeiten (Wärmeleitzahlen) der einzelnen Schichten in kcal/m h grad
$\lambda_3 \dots$	
f_1, f_2	Anteil der im Sinne des Wärmestromes nebeneinanderliegenden Schichten an der Gesamtisolierungsfläche
$f_3 \dots$	
F_1, F_2	Fläche der einzelnen nebeneinanderliegenden
$F_3 \dots$	Schichten

*) Für diese Temperaturmessungen eignen sich dünne geschützte Thermoelemente, die in einem Stahlmantel von 1 mm Durchmesser zwei isolierte Thermoelementendrähte enthalten.

Schrifttum

- [1] W. F. Cammerer: Gewährleistungen von Oberflächentemperaturen an isolierten Anlagen. Mitt. a. d. Forschungsheim f. Wärmeschutz e.V., München, H. 9 (1955), S. 46–52.
- [2] Vereinigung der Grosskesselbesitzer (VGB): Richtlinien für die Einmauerung von Hochleistungsdampfkesseln. Essen 1951.
- [3] VDI-Richtlinien (VDI 2055): Wärme- und Kälteschutz (Berechnungen, Garantien, Meßverfahren und Lieferbedingungen für Wärme- und Kälteisolierungen). Berlin 1958.
- [4] J. S. Cammerer: Der Wärme- und Kälteschutz in der Industrie. 3. Auflage. Springer, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1951.
- [5] E. Raisch und K. Schropp: Die thermoelektrische Temperatur- und Wärmeflußmessung. Mitt. a. d. Forschungsheim für Wärmeschutz e. V., München, H. 8 (1930).
- [6] W. L. Lustig und J. S. Cammerer: Folien-Wärmestrom-Messer für technische und physiologische Untersuchungen. Ges.-Ing. 76 (1955), S. 289–293.
- [7] W. F. Cammerer und Fr. C. Cammerer: Die Verwendung von Zählgeräten für Abnahmeversuche im industriellen Wärme- und Kälteschutz. BKW 11 (1959), S. 17–20.
- [8] Vereinigung der Grosskesselbesitzer (VGB): Richtlinien für die Einmauerung von Dampfkesseln. 2., neubearbeitete Ausgabe, Essen 1960.

