

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 I. Allgemeine Fragen des Wärme- und Kälteschutzes

Nummer 6

Messung der Oberflächentemperaturen
und der Wärmeabgabe
großer industrieller Objekte
von ungleichmäßiger Temperatur

Von Jos. Seb. Cammerer, Fr. C. Cammerer und G. Fischer

Messung der Oberflächentemperaturen und der Wärmeabgabe großer industrieller Objekte von ungleichmäßiger Temperatur

Von Jos. Seb. Cammerer, Fr. C. Cammerer und G. Fischer*)

Die Wärmeabgabe großer industrieller Objekte konnte bisher nicht gemessen werden, weil das Temperaturfeld so ungleichmäßig ist, daß man eine sehr große Anzahl von zeitraubenden Messungen durchführen müßte, die oft auch durch die Unzugänglichkeit einzelner Meßstellen unmöglich gemacht wurden. Es wurde ein Hohlspiegel-Strahlungsmessgerät hoher Empfindlichkeit (Übertemperatur der Meßfläche über der Lufttemperatur bis herab zu 30 Grad) und geringer Trägheit (Einstellzeit 1 bis 2 min) entwickelt, das von einer einzigen oder von wenigen Beobachtungsstellen aus das ganze Temperaturfeld des Versuchsobjekts und dessen Wärmeabgabe in kurzer Zeit durch Anvisieren aus Entfernungen bis zu 10 m bestimmen läßt. Die Leistungsfähigkeit des Geräts (Parallelität des Strahlungsbündels, die Einhaltung des Cosinusetzes und das Auflösungsvermögen des Geräts) wurden sorgfältig geprüft und an einem praktischen Versuch nachgewiesen.

Aufgabenstellung

Es ist eine noch ungelöste meßtechnische Aufgabe, die Wärmeabgabe großer Flächen von ungleichmäßiger Temperatur zu bestimmen, die bei großen industriellen Objekten, z. B. bei Dampferzeugern, metallurgischen Öfen, Drehöfen, Winderhitzern, chemischen Reaktionsanlagen, vorliegen, denn man kann nur Teilmessungen an einzelnen Stellen ausführen. Außerdem würde es einen untragbaren Aufwand verursachen, wollte man aus einer großen Anzahl solcher Teilmessungen einen Mittelwert für die Gesamtfläche bilden, weil für jede Messung mindestens 1 Stunde

benötigt wird und jede Teilfläche zugänglich sein muß. Das Ergebnis wäre auch ungenau, da der Betriebszustand des Objekts und die Verhältnisse der Umgebung während der erforderlichen langen Meßzeit Schwankungen unterworfen sein können.

Benötigt wird eine Apparatur mit folgenden Möglichkeiten:

- 1) Bestimmung der Wärmeabgabe an kleinen Teilflächen von etwa $25 \times 25 \text{ cm}^2$ bis $50 \times 50 \text{ cm}^2$ Größe, um das ungleichmäßige Temperaturfeld genau ausmessen zu können;
- 2) kurze Meßzeit je Teilfläche, allerhöchstens 5 min;
- 3) Messung ohne unmittelbare Berührung des Objekts, da oft viele Teilflächen nicht zugänglich sind;
- 4) Durchführung einer größeren Anzahl von Messungen von einem einzigen Standpunkt aus;
- 5) Meßbereich bis herab zu etwa 30 Grad Übertemperatur.

*) Dr.-Ing. habil. J. S. Cammerer war Leiter des inzwischen stillgelegten Forschungsbau Tutzing, Obb., jetzt als P. Caspar Cammerer OSB in der Erzabtei St. Ottilien (Obb.); Dr. rer. nat. Friedrich C. Cammerer ist tätig im Halbleiterwerk der Siemens & Halske AG, München; Günther Fischer ist Hilfsassistent am I. Physikal. Institut der Universität München.

Das Meßverfahren konnte dank der Unterstützung der Fraunhofergesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung eV, München, entwickelt werden. Die neue Apparatur wird im Rahmen einer Forschungsarbeit des Forschungsheims für Wärmeschutz eV, München, mit Hilfe von Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft noch weiter entwickelt.

Der Vorgang der Wärmeabgabe zerfällt physikalisch in zwei Teile¹⁾:

- in die Wärmeabgabe durch Strahlung und
- in die Wärmeabgabe durch Berührung mit der umgebenden Luft.

Gegenstand der vorliegenden Untersuchung ist in erster Linie die Wärmeabgabe durch Strahlung, deren Messung die genannten fünf Forderungen erfüllen muß. Die auf dem Markt befindlichen Strahlungs-Meßgeräte sind nicht brauchbar, schon weil sie bei weitem nicht die erforderliche Empfindlichkeit haben.

Für die Wärmeabgabe durch Berührung mit der umgebenden Luft ist im Forschungsbau Tutzing durch den Berichterstatter bereits eine Meßeinrichtung entwickelt worden²⁾, so daß diese nur kurz beschrieben sei.

Zur Lösung der Aufgabe notwendige Meßgrößen

Um die Wärmeabgabe eines Objektes bestimmen zu können, müssen vier Größen gemessen werden:

- a) die Temperatur des Objekts, die sowohl zur Ermittlung der Wärmeabgabe durch Strahlung als auch für die Berechnung der Wärmeabgabe durch Berührung mit der umgebenden Luft benötigt wird,
- b) die mittlere Temperatur des das Objekt umgebenden Halbraums, die die abgestrahlte Wärme mitbestimmt,
- c) die Wärmeübergangszahl durch Berührung zwischen der untersuchten Fläche und der umgebenden Luft,
- d) die Lufttemperatur, die für die Wärmeabgabe durch Berührung bekannt sein muß.

Die Messung unter d) bedarf keiner Erläuterung. Man kann sie nach einem üblichen Verfahren vornehmen, und sie ist ohnedies bei der Bestimmung der Wärmeübergangszahl durch Berührung nach c) nötig. Die letztere wird im folgenden Abschnitt vorweggenommen.

Messung der Wärmeabgabe durch Berührung

So verwickelt das Temperaturfeld des Meßobjekts sein mag, so genügt es doch, die Wärmeübergangszahl durch Berührung an einigen wenigen Stellen zu bestimmen, deren Anzahl sich nach dem Bewegungszustand der umgebenden Luft richtet: Ist dieser an den einzelnen Teilen des Meßobjekts ungleichmäßig, so wird man an fünf bis sechs Stellen zu messen haben, bei gleichmäßiger Luftbewegung genügen schon drei. Denn da das Temperaturfeld auf der Oberfläche des Meßobjekts durch die Messung der Strahlungstemperatur bestimmt wird, braucht man zur Berechnung der Wärmeabgabe durch Berührung nur noch die Kenntnis der Abhängigkeit der Wärmeübergangszahl von der Oberflächentemperatur und der Luftbewegung. Man kann also für diese Messung einen wesentlich größeren Zeitaufwand als für die vielen Strahlungsmessungen zulassen, besonders wenn man an mehreren Stellen zur gleichen Zeit mißt, was keinen sehr großen apparativen Aufwand erfordert, da nur ein einziges Anzeige- oder Schreibgerät benötigt wird. Mehr als eine oder zwei Stunden werden keinesfalls gebraucht.

Man sucht am Objekt gut zugängliche Stellen und vor allem solche aus, an denen die höchsten und die tiefsten Temperaturen sowie die ruhigste und die stärkste Luftbewegung zu vermuten sind. Auf diese klebt man mit doppelseitigen Klebefolien Spezial-Folien-Wärmestrommesser nach *W. L. Lustig* und *J. S. Cammerer*, etwa mit einer Fläche von $15 \times 15 \text{ cm}^2$ und mit einer Dicke von $0,5$ bis $1,5 \text{ mm}^3$). Es empfiehlt sich, bei der Herstellung der Folien-

Wärmestrommesser ein Thermoelement mit einzubauen, so daß man nicht noch ein eigenes Thermoelement zur Bestimmung seiner Oberflächentemperatur anzubringen hat. Der Folien-Wärmestrommesser muß auf der der Luft zugekehrten Seite einen blanken, glänzend polierten Belag haben, also ein dünnes Gold- oder Silberblech oder einfach eine Aluminiumfolie. Dann gibt er durch Strahlung nur etwa 2 bis 3% der Wärme ab, die das Objekt selbst abstrahlt, d. h. er mißt praktisch nur die Wärmeabgabe durch Berührung.

Vor der Mitte des Folien-Wärmestrommessers spannt man in einem Abstand von etwa 3 bis höchstens 5 cm ein sehr dünnes Thermoelement in der Luft aus, um die für die Wärmeabgabe an dieser Stelle maßgebliche Lufttemperatur zu ermitteln. Da es nahe vor der blanken Oberfläche des Wärmestrommessers liegt und daher keine Wärme von der stark strahlenden Objektoberfläche selbst zugestrahlt bekommt, ist es nicht nötig, das Thermoelement mit dem üblichen Strahlungsschutz (Zylinder aus Aluminiumfolie) zu umgeben, doch ist dies unschwer durchzuführen.

Es spielt keine Rolle, daß durch die Aufbringung des Folien-Wärmestrommessers mit seiner nicht abstrahlenden Oberfläche die Oberflächentemperatur des Meßobjekts an dieser Stelle etwas über den ursprünglichen Betrag erhöht wird. Die Konvektionsverhältnisse des zu untersuchenden Körpers selbst werden dadurch praktisch kaum beeinflusst. Den kleinsten Fehler wird man deshalb machen, wenn man die Wärmeübergangszahl zwar mit dem veränderten Temperaturwert berechnet, aber für die ursprüngliche Temperatur gelten läßt.

Grundlagen der Oberflächentemperaturmessung mittels Strahlung

Jeder Körper strahlt Wärme an den ihn umgebenden Raum entsprechend seiner Temperatur, seiner „Farbe“ und seiner mechanischen Struktur ab. Die in der Praxis vorkommenden Oberflächen sind fast durchweg so rau, daß ihre Abstrahlung keine Vorzugsrichtung hat, die Strahlung sich also nach dem Lambertischen Cosinusetz auf den Halbraum verteilt. Im Gegensatz dazu stünde eine polierte Oberfläche, ein „Spiegel“.

Dagegen kann die „Farbe“ auch bei den in der Praxis vorkommenden Meßobjekten sehr unterschiedlich sein. Setzt man für den schwarzen Strahler, der die physikalisch größtmögliche Abstrahlungsleistung hat, die Strahlungskonstante (Emissionskonstante) gleich 1, so ergeben sich für einige häufig vorkommende Oberflächen folgende Strahlungskonstanten:

Frisch bearbeitete Metalloberflächen	0,08
alte, korrodierte Metalloberflächen	0,4 bis 0,8
Aluminiumlack ganz frisch	0,4
Alle übrigen Lacke (auch weiß)	0,83 bis 0,96
Baustoffe	0,85 bis 0,97

Wie in einem Meßbeispiel gezeigt werden wird, kann diese Strahlungskonstante aus einem Vergleich der mit einem Thermoelement gemessenen und der mit dem Strahlungsmeßgerät unter Zugrundelegung eines schwarzen Strahlers ermittelten Temperatur gewonnen werden. Hat man es mit einer verstaubten, schmutzigen Oberfläche zu tun, so wird man mit Annahme einer Strahlungskonstanten von 0,8 bis 0,9 nicht viel fehlgehen.

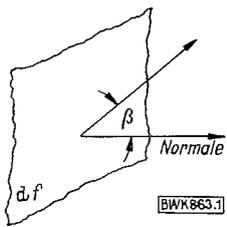
Jeder Körper steht mit seiner Umgebung in einem Strahlungsaustausch, was im stationären Fall zu einem Leistungsgleichgewicht führt. Man kann die Zu- und Abstrahlung rechnerisch trennen, indem man zunächst annimmt, daß der strahlende Körper mit der Kelvintemperatur T gegen den absoluten Nullpunkt strahlt; dann berechnet man die Zustrahlung der Umgebung mit der Kelvintemperatur T_u auf den Körper, für den man ebenfalls 0°K annimmt. Die Summe dieser beiden Strahlungsleistungen ergibt je nach Vorzeichen den vom Körper ab- bzw. dem Körper zugestrahlenen Wärmestrom.

¹⁾ Auf die Wärmeabgabe in festen Bauteilen, z. B. durch die Fundamente in das Erdreich, braucht hier nicht eingegangen zu werden, da man sie genügend genau rechnerisch ermitteln kann. Sie ist auch von untergeordnetem Interesse.

²⁾ *Cammerer, J. S.*: Der Wärmeübergang an Wandflächen unter Berücksichtigung des Wärmeaustausches durch Strahlung. Beitrag in: Wärme und Feuchtigkeit. Verlag von Wilhelm Ernst und Sohn, Berlin 1960.

³⁾ Ausführliche Angaben über die Konstruktion und Anfertigung von Folien-Wärmestrom-Messern siehe *Cammerer, J. S.*: Der Wärme- und Kälteschutz in der Industrie. 4. Aufl. Springer-Verlag Berlin/Göttingen/Heidelberg 1961.

Die Strahlungsdichte q_0 eines Oberflächenelements df eines Körpers gegen den absoluten Nullpunkt wird definiert und beschrieben durch



$$q_0 = \frac{J_\beta}{df \cdot \cos \beta} = \frac{\sigma}{\pi} T^4 \quad \dots \quad (1)$$

Hierin ist β der Winkel zwischen Beobachtungsrichtung und Flächennormale, Bild 1, J_β die in Richtung β gemessene Strahlungsleistung je Raumwinkeleinheit und σ die Strahlungskonstante der Oberfläche.

Bild 1. Strahlungsgesetz.

In Gl. (1) ist die Unabhängigkeit der Strahlungsdichte von der Beobachtungsrichtung für alle in diesem Zusammenhang praktisch vorkommenden Fälle gültig. Diese Unabhängigkeit ermöglicht aus jeder Beobachtungsrichtung eine richtige Strahlungsdichte-Messung (q_0).

Integriert man Gl. (1) über den Halbraum, so ist die abgegebene Leistung

$$dQ_0 = q_0 \pi df = df \sigma T^4 \quad \dots \quad (2)$$

Für den Strahlungsweg in der umgekehrten Richtung (der Halbraum strahlt zum Flächenelement mit der Dichte q_u) ergibt sich entsprechend

$$dQ_u = q_u \pi df = df \sigma T^4 \quad \dots \quad (3)$$

Aus Gl. (2) und (3) ergibt sich somit für die vom Flächenelement in die Halbraumumgebung abgegebene Strahlungsleistung Q_{ab}

$$dQ_{ab} = dQ_0 - dQ_u = df \sigma (T^4 - T_u^4) \quad \dots \quad (4)$$

Durch Integration der Strahlungsleistungen über die Gesamtfläche des zu untersuchenden Körpers entsprechend Gl. (4) erhält man den Strahlungsanteil am Wärmeverlust des Körpers.

Für ein Strahlungsmeßgerät zur Oberflächen-Temperaturbestimmung gelten prinzipiell die gleichen Überlegungen. Nur die Flächenverhältnisse sind anders, da sich einer kleinen Empfängerfläche eine begrenzte strahlende Fläche gegenüber befindet und nicht der ganze Halbraum. Der Einfluß des Öffnungswinkels der Apparatur braucht aber nicht berechnet zu werden, er geht in die Eichkonstante der Apparatur ein. Wenn diese eine der Größe Q_0 entsprechende elektromotorische Kraft liefert, muß man nur die Temperatur ihres Strahlungsfühlers kennen, um die Objekt-Oberflächentemperatur finden zu können.

Das Strahlungsmeßgerät

Um über die Temperaturverteilung einer größeren Fläche eine Aussage machen zu können, muß man einzelne kleine Teilflächen getrennt messen. Dazu kann

- der „Sichtkreis“ des Empfängers durch einen Tubus eingengt werden,
- mit Hilfe einer Linsenanordnung die Teilfläche auf dem Empfänger abgebildet werden,
- mit einem Hohlspiegel eine Abbildung auf dem Empfänger erreicht werden.

Bei der Anordnung a ist zum Erreichen einer kleinen Teilfläche, insbesondere bei großen Abständen, ein langer Tubus erforderlich. Dies ist nicht nur unpraktisch, sondern führt vor allem zu einer zu kleinen Strahlungsintensität.

Die Anordnung b hat ihre Schwierigkeiten in einem Linsenmaterial, das im ultraroten Bereich noch genügend durchlässig ist. Diese Materialien sind wegen ihrer großen Hygroskopizität praktisch kaum noch zu handhaben. Nur zum Ausmessen von Körpern mit sehr hohen Temperaturen, die schon eine beachtliche Emission im

sichtbaren Bereich haben, kann man brauchbare Linsen herstellen. Dieser Fall ist bei unserer Aufgabe nicht gegeben.

Die einfachste Lösung ist die Anordnung c, besonders wenn ein parabolischer Metallhohlspiegel verwendet wird. Benutzt man einen Glasspiegel, dann muß der Reflexionsbelag an der Vorderseite aufgebracht werden, da Glas das langwellige ultrarote Licht absorbiert. Das Reflexionsvermögen der Metalle, soweit sie vollständig blank sind, beträgt im Ultraroten nahezu 100%. Die Wahl des Metalls richtet sich vor allem nach der Beständigkeit gegenüber mechanischen und chemischen Einflüssen. Für die Praxis hat sich ein Aluminiumbelag mit einer aufgedampften Quarzschicht zum Schutze der reinen Oberfläche bewährt. Die Quarzschicht muß dabei dünn ($0,5 \mu\text{m}$) gegenüber den Wellenlängen des Ultrarotgebiets (einige μm) sein.

Durch die Anordnung eines Empfängers im Brennpunkt des Parabolspiegels wird ein Flächenstück der strahlenden Oberfläche von der gleichen Größe wie die Öffnung des Spiegels erfaßt, wobei eine störende Strahlung aus anderen Richtungen nicht zum Empfänger gelangen kann, Bild 2.

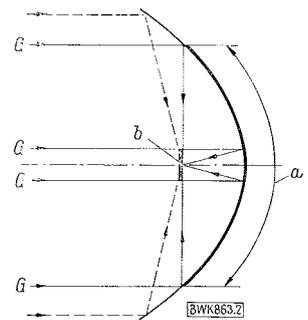


Bild 2. Wirksame Fläche (a) des Spiegels und Grenzstrahlen (G) des wirksamen Strahlungsbandels, bestimmt durch die Lage des Empfängers (b).

Der Abstand der Spiegelapparatur vom Meßobjekt ist dann ohne Einfluß.

Die im Brennpunkt des Spiegels gesammelte Leistung hängt ab vom Durchmesser des Spiegels. Über diese Größe entscheiden wirtschaftliche Gesichtspunkte. Die Mindestgröße wird durch die Empfindlichkeit des Strahlungsempfängers und die gewünschte Meßgenauigkeit bestimmt.

Die unten beschriebenen Versuche wurden mit einem Spiegel von 260 mm Durchmesser und einer Brennweite von 62,5 mm durchgeführt. Der Brennpunkt muß außerhalb des Spiegels liegen, sonst würde der nutzbare Spiegeldurchmesser durch den noch zu beschreibenden Kühlkörper des Empfängers begrenzt werden.

An den Empfänger sind folgende Forderungen zu stellen: geringe Größe — hohe Empfindlichkeit — kleine Trägheit.

Geringe Größe. Die erwähnten geometrisch-optischen Eigenschaften eines Parabolspiegels gelten streng nur für einen punktförmigen Strahlungsempfänger im Brennpunkt. Ein flächenhafter Empfänger erhält auch noch Strahlen, die gegen die optische Achse geneigt sind. Dadurch wird die vom Empfänger gemessene Fläche abhängig von der Entfernung des zu messenden Gegenstandes.

Hohe Empfindlichkeit. Sie ist erwünscht, um mit einem kleinen Spiegeldurchmesser auszukommen sowie um die Meßergebnisse mit einem einfachen Verstärkergerät aufzeichnen zu können. Eine große Gesamtempfindlichkeit des Geräts gestattet es, auch kleine Temperaturunterschiede am Meßobjekt aufzulösen.

Kleine Trägheit. Eine geringe Trägheit ermöglicht die nötigen raschen Einzelmessungen der Teilflächen des Objekts. Mit der Trägheit nimmt freilich aus konstruktiven Gründen auch die Empfindlichkeit ab. Es konnte aber erreicht werden, daß sich 95% des Endausschlags schon nach 60 s mit der gewünschten Meßgenauigkeit einstellen.

Der strahlungsempfindliche Empfängerteil durfte nicht nach Art der bekannten Strahlungsmeßgeräte gebaut sein, wobei die warme Gruppe einer Thermosäule durch die Strahlung erheblich über Lufttemperatur aufgeheizt wird und die kalte Gruppe Instrumententemperatur, also prak-

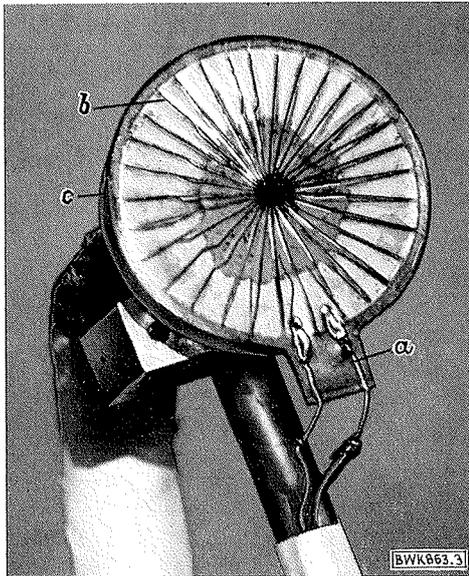
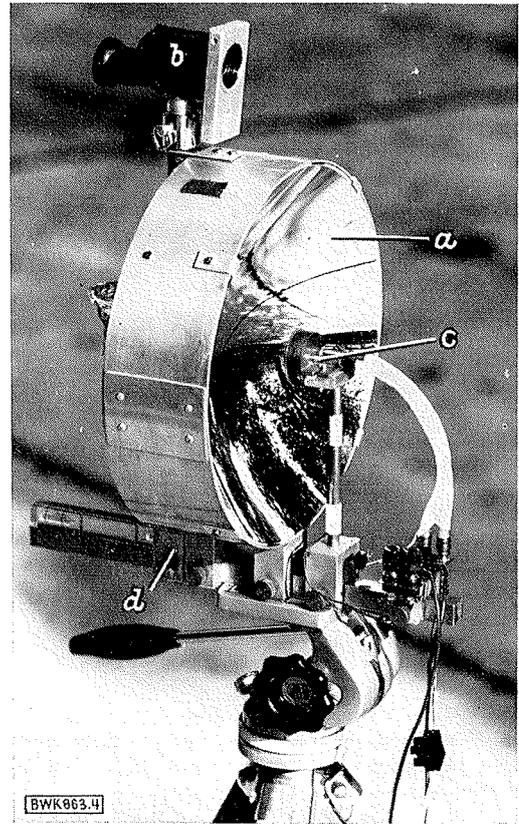


Bild 3.
 Ansicht des Strahlungsempfängers.
 a Messfolie
 b Thermoelementwicklung
 c Kühlplatte mit Zuleitungen
 Der Bereich der warmen Lötstellen der Thermoelemente ist geschwärzt

Bild 4. (rechts)
 Gesamtansicht des Meßgeräts.
 a Parabolspiegel mit Fassung
 b Visierfernrohr
 c Strahlungsempfänger
 d Stativaufsatz mit optischer Bank



Die Ausführung des Meßgeräts

tisch Lufttemperatur, hat. Die warme Gruppe gibt hier Wärme ab, die Anzeige des Geräts wird von der Luftbewegung abhängig. Das ergibt freilich keinen unzulässigen Fehler, wenn Temperaturen von etwa 600 °C aufwärts gemessen werden sollen und Linsen verwendet werden können, so daß der Strahlungsempfänger in einem geschlossenen Gehäuse sitzt.

Anders ist dies bei der vorliegenden Aufgabe. Die Übertemperatur der zu untersuchenden Oberflächen geht herab bis zu 30 grd, und man muß offene Parabol-Hohlspiegel verwenden, bei denen der eigentliche Empfänger einige Zentimeter vor der Öffnungsebene angebaut ist. Seine Temperatur würde also stark von der Luftbewegung beeinflusst werden, wenn er nicht selbst Lufttemperatur hat.

Aus diesem Grunde wurde die Thermosäule in Form des Folien-Wärmestrommessers nach *Lustig* und *Cammerer* als Empfangsglied verwendet, d. h. durch die Meßschicht wird die auftreffende Wärmestromdichte gemessen. Die kreisförmige Folie von etwa 2,5 cm Durchmesser und einer Gesamtdicke einschließlich der beiderseitigen Schutzschichten von 0,4 mm ist mit 30 Thermopaaren wechselseitig beiderseitig belegt und auf eine kleine wasserdurchflossene Kupferdose als Kühlkörper geklebt. Das Wasser wird durch diesen Kühlkörper und einen großflächigen, der Umgebungsluft ausgesetzten Rippenkühler gepumpt. Dadurch wird das Wasser praktisch auf Lufttemperatur gehalten.

Die ursprüngliche Kühlung des Kühlkörpers mittels vergoldeter Kühlrippen erwies sich in der Praxis als nicht ausreichend, da Übertemperaturen bis zu 3 grd. auftraten. Die dem Hohlspiegel zugewandte Meßfolienfläche ist geschwärzt⁴⁾. Auf diese Weise erhält der Kühlkörper und mit ihm die dünne Meßfolie nahezu die Lufttemperatur, die Anzeige der Meßfolie bleibt also von der Luftbewegung unbeeinflusst.

Die Meßfolie muß eine gewisse Fläche haben, sie kann also nicht das im Spiegelbrennpunkt gesammelte Parallelstrahlenbündel allein auffangen. Um aber dem Idealfall möglichst nahe zu kommen, ist nach **Bild 3** in der Mitte der Meßfolie eine kleine Öffnung von etwa zwei mm Durchmesser ausgestanzt. Von den hintereinandergeschalteten Thermoelementen liegen die warmen Elemente sehr nahe dieser Öffnung und damit beim Brennpunkt.

Der Kühlkörper hat eine feine Bohrung nahe der Empfängerfläche. Ein dort eingekittetes Thermoelement erlaubt die Bestimmung der Temperatur.

⁴⁾ Die über die Meßfolie etwas hinausragende, dem Spiegel zugewandte Seite des Kühlkörpers ist hochglanzvergoldet, da die schräg gegen die optische Achse einfallende Strahlung dort abgebildet wird und eine zusätzliche Aufheizung des Kühlkörpers bewirken würde.

Bild 3 zeigt die strahlenförmige Führung der Thermopaare aus dem zentralen Loch der Meßfolie an den äußeren Kreisrand. Die Meßfolie trägt unten einen kleinen Lappen zur Sicherung der Drahtzuleitungen gegen mechanische Beanspruchungen. Rechts liegt die Abführung des Thermoelements zur Bestimmung der Kühlkörpertemperatur unter dem Folien-Wärmestrommesser. Die Schwärzung der Folie beschränkt sich natürlich auf jene Fläche, auf der die warmen Thermoelementenköpfe der Thermosäule liegen.

Bild 4 zeigt die Gesamtapparatur. Der Glas-Parabolspiegel *a* ist in einer kräftigen Blechfassung mit etwas Spiel

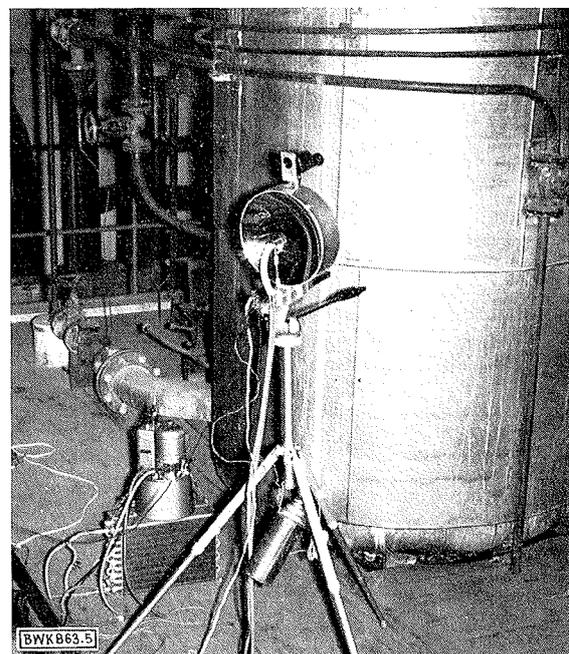


Bild 5. Aufstellen der Meßeinrichtung während einer Messung.

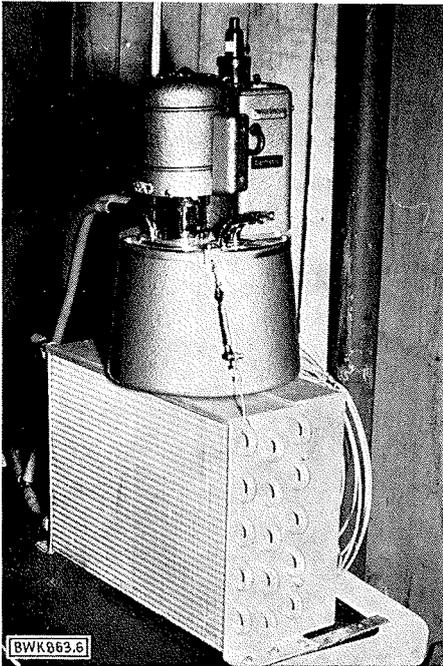


Bild 6. Kühltssystem des Empfängers mit einem Thermostaten als Umlaufpumpe.

Bild 7 (rechts). Eichkurven des Meßgeräts (EMK des Empfängers abhängig von der Temperatur t_w der Meßwand). T_k Kühlkörpertemperatur

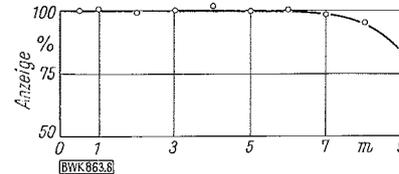
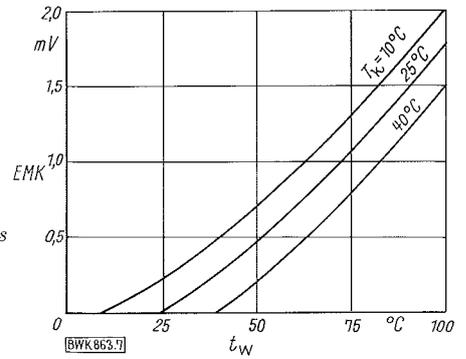


Bild 8. Abhängigkeit der Anzeige von der Objektentfernung und Bestimmung des Öffnungswinkels des Spiegels.

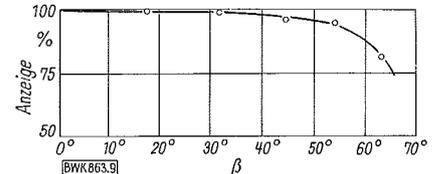


Bild 9. Nachprüfung des Cosinusetzes mit der Meßeinrichtung: Abhängigkeit der Anzeige vom Beobachtungswinkel β .

für Wärmedehnungen gehalten. Oben auf der Fassung ist ein Visierfernrohr b befestigt. Man muß ja eine größere Anzahl Teilflächen von etwa Spiegelgröße auf Entfernungen bis zu etwa 10 m abtasten, zu welchem Zweck man, wenn möglich, Kreidemarkierungen auf der Meßfläche anbringt. Je nach den Temperaturen, mit denen man zu rechnen hat, wird man diese Teilfläche bis zur engen Berührung wählen oder in größeren Abständen. Ist eine Markierung nicht möglich, so muß man die Einstellung der Visierichtung vom Beobachtungsstand aus rechnerisch ermitteln, weshalb der Stativkopf einen Teilkreis hat. Der eigentliche Strahlungsempfänger ist an einem Stab befestigt und kann zur genauen Justierung im Spiegelbrennpunkt auf einer optischen Bank verschoben werden.

Bild 5 zeigt das Gerät während einer Messung, **Bild 6** den Kühler mit Thermostat, der den Empfänger auf die gewünschte Temperatur einstellt.

Justierung und Eichung des Meßgeräts

Der Empfänger wurde im Spiegel mit Hilfe eines Lämpchens im Spiegel justiert. Der Glühfaden ist dann im Brennpunkt des Spiegels, wenn das ausgestrahlte Lichtbündel parallel ist. An diese Stelle des Lämpchens im Spiegel wird dann der auf seinem Kühlkörper aufgeklebte Folien-Wärmestrommesser gebracht.

Zur Eichung wurde das Gerät auf eine an der Wand aufgehängte Thermostatenplatte bekannter, von einem Thermostaten geregelter Temperatur gerichtet. Die Fläche dieser Platte muß größer sein als die vom Empfänger erfaßte Fläche. Die im Folien-Wärmestrommesser des Empfängers erzeugte Elektromotorische Kraft (EMK) kann man entweder in Beziehung zur abgestrahlten Leistung der Thermostatenplatte setzen oder man kann sie bei bekannter Lufttemperatur unmittelbar der Oberflächentemperatur der anvisierten Fläche zuordnen.

Aus der Thermostaten-Plattentemperatur und der Kühlkörpertemperatur kann man nach Gl. (4) die Gesamtstrahlung des Flächenelementes in einen Halbraum, der die Oberflächentemperatur des Kühlkörpers haben würde, berechnen. Bezieht man diese Strahlung auf die Flächeneinheit und auf die gemessene EMK, so ist hiermit die Eichung des Geräts durchgeführt. Durch Veränderung der Temperatur der Thermostatenplatte kann das Eichergebnis nachgeprüft werden.

Für praktische Messungen ist es bequemer, der EMK des Empfängers in Abhängigkeit von der Kühlkörpertemperatur unmittelbar eine Oberflächentemperatur zuzuordnen. Man erhält daraus nach **Bild 7** eine Kurvenschar, deren Parameter die Kühlkörpertemperatur ist.

Die Meßgenauigkeit der Apparatur

Die Parallelität des Strahlungsbündels

Im Idealfall sollte der Folien-Wärmestrommesser nur die Strahlung eines streng parallelen Strahlenbündels erhalten. Infolge unvermeidlicher Abweichung der exakten Justierung und der Flächenausdehnung des Folien-Wärmestrommessers ist ein kleiner Einfluß des Abstands zu erwarten.

Zur Prüfung wurde eine quadratische Heizplatte in verschiedenen Abständen mit dem Spiegel anvisiert. Die Seitenlänge der Heizplatte war etwas größer als der Spiegeldurchmesser. Hat der Spiegel einen kleinen Öffnungswinkel, so muß bei jener Entfernung, bei der außer der Meßfläche noch Teile der dahinter liegenden kälteren Wand erfaßt werden, der Meßwert abfallen.

Bild 8 zeigt das Ergebnis. Bei Entfernungen unterhalb etwa 6,5 m ist die Anzeige sehr gut konstant, bei größeren ergibt sich erwartungsgemäß eine schnell zunehmende Verringerung, weil nun auch außerhalb der Heizplatte liegende Flächen von geringer Temperatur auf den Folien-Wärmestrommesser strahlen. Daraus errechnet sich ein halber Öffnungswinkel der Apparatur von rd. 2° , was als sehr befriedigend anzusehen ist. Man kann also ohne weiteres bis zu Entfernungen von 10 m und mehr arbeiten, wie in der Praxis zu wünschen ist, wenn die abzutastende Teilfläche genügend groß ist.

Das Cosinusetzes

Es ist bekannt, daß man die ganze Sonnenscheibe bis zum Rand gleichmäßig hell sieht, obwohl die Sonne eine Kugel ist, weil zwar die Strahlung am Rande in einem Winkel zur Normalen nach dem Cosinusetzes der Gl. (1) abnimmt, aber das Auge im gleichen Maße eine vergrößerte Fläche übersieht. In gleicher Weise mißt der Strahlungsempfänger die richtige Strahlungsdichte, gleichgültig unter welchem Winkel man die Objektoberfläche abtastet. Dies ist für den Gebrauch des Geräts natürlich sehr willkommen, da man aus diesem Grunde von einem günstig gewählten Standpunkt eine größere Anzahl von Teilflächen messen kann, ohne den Ort wechseln zu müssen.

Zur experimentellen Prüfung wurde eine Heizplatte auf einen Drehteller mit Winkerteilung gestellt, so daß die Platte um die senkrechte Achse gedreht werden konnte. Nach Bild 9 ist die Anzeige des Meßgeräts bis zu einem Winkel von nahezu 45° praktisch konstant, dann beginnt ein stärkerer Abfall der Meßkurve, weil die Heizplatte so verkleinert erscheint, daß in das „Gesichtsfeld“ des Meßgeräts die dahinterliegende kältere Wand kommt. Wenn sehr große Flächen auszumessen sind, kann man von ein und demselben Standpunkt aus ohne weiteres bis zu einem Winkel von 60° und mehr die richtige Temperatur der Fläche messen.

Selbstverständlich muß man bei der Ausrechnung der tatsächlichen Strahlungsverluste die wahre Ausdehnung der Fläche, die vom Standpunkt der Apparatur aus gesehen wird und die vom Visierwinkel abhängt, berücksichtigen.

Das Auflösungsvermögen des Meßgeräts

Das Auflösungsvermögen des Meßgeräts ist die Angabe, wie „scharf“ es einen Streifen erhöhter Temperatur erfaßt, z. B. über dem Stahlskelett einer Kesseleinmauerung. Zur Prüfung wurde eine Messung an einem senkrecht ausgespannten heißen Draht ausgeführt. Nach Bild 10 ist bereits

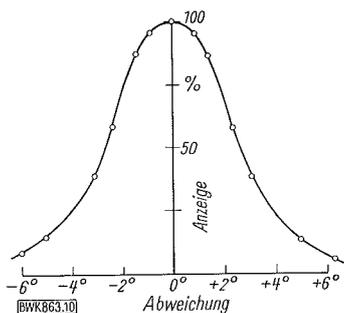


Bild 10. Prüfung des Auflösungsvermögens des Meßgeräts bei einem geheizten Draht: Anzeige abhängig von der Abweichung der Visierlinie vom Heizdraht.

bei 2,5° Abweichung von der optischen Achse der Ausschlag des Meßgeräts auf die Hälfte abgefallen.

Ergebnis einer Oberflächentemperaturmessung

Ein Temperatur-Meßversuch an einer heißen Platte hatte folgendes Ergebnis:

Eichkonstante des Strahlungsempfängers	75,4 kcal/m ² h mV
Anzeige des Geräts 0,21 mV entsprechend	16 kcal/m ² h
Kühlkörpertemperatur	17 °C
Gemessene Oberflächentemperatur nach dem T ⁴ -Gesetz	31,4 °C
Kontrollmessung mit einem Thermoelement	30,5 °C
Unterschied zwischen der Angabe des Geräts und des Thermoelements	3%.

Dabei lieferte das Thermoelement nur die Temperatur einer Fläche von etwa 2 × 2 cm², während der Strahlungsempfänger die mittlere Temperatur einer Fläche von ungefähr 40 × 40 cm² angab. Die Differenz ist also nicht ohne weiteres als Meßungenauigkeit anzusehen. Aber selbst wenn man sie so betrachtet, wäre sie sehr befriedigend, denn die Übertemperatur des Meßobjekts über Lufttemperatur war ja nur 14 grd. Man kann mit dem Gerät also zuverlässig Objekte mit Übertemperaturen von nur 10 grd messen. Von dieser Größenordnung ist etwa der Temperaturunterschied zwischen dem Gesicht eines Menschen und seiner Kleidung in einem geheizten Raum. In der Tat liefert das Anvisieren eines Menschen aus einigen m Entfernung bereits entsprechende Unterschiede der Ausschläge.

Messung der mittleren Temperatur des Halbraums

Für die Gl. (3) und (4) muß man die mittlere Temperatur des Halbraums kennen, dem die Oberfläche des Meßobjekts gegenübersteht. Das Meßprinzip ist grundsätzlich das gleiche, wie für den Empfänger im Hohlspiegel beschrieben, nur entfällt hier die optische Anordnung des Hohlspiegels, da ja der ganze Halbraum und nicht eine kleine Teilfläche erfaßt werden soll. Man ist deshalb auch nicht an besonders kleine Abmessungen des die Strahlung empfangenden

Folien-Wärmestrommessers gebunden. Bei den vorliegenden Versuchen wurde ein Format von 15 × 15 cm² benutzt, die Dicke der Meßschicht betrug etwa 1 mm, die Anzahl der Thermopaare war rd. 200. Die die Strahlung empfangende Oberfläche ist geschwärzt, mit der Gegenseite ist der Folien-Wärmestrommesser auf eine wasserdurchflossene Thermostatenplatte geklebt, damit er trotz des Strahlungsaustausches mit dem Halbraum möglichst die Lufttemperatur beibehält; dann wird er durch Schwankungen in der Luftbewegung nicht gestört und steht nicht in Wärmeaustausch mit der Luft.

Aus der EMK der Messung kann zusammen mit der Kühlplattentemperatur nach dem T⁴-Gesetz die mittlere Halbraumtemperatur bestimmt werden. Auch dafür läßt sich eine Kurvenschar entsprechend Bild 7 aufstellen.

Nach unserer Aufgabenstellung interessiert für den Strahlungsaustausch des Versuchsobjekts nur die abgegebene Wärmestromdichte. Die Oberflächentemperatur benötigt man nur für die Bestimmung des durch Berührung an die umgebende Luft übertragenen Wärmestroms explizit. Man kann daher für Gl. (4) mit dem Hohlspiegelempfänger und dem Halbraumstrahlungsempfänger unmittelbar die Differenz der beiden Strahlungsleistungen bilden, wenn die Empfängerteile auf gleicher Lufttemperatur während der beiden Messungen sind, so daß ein Einfluß der Luftbewegung nicht ins Gewicht fällt, was leicht rechnerisch geprüft werden kann. Man hat dann den Vorteil, etwaige Schwankungen der Lufttemperatur nicht berücksichtigen zu müssen.

Soweit mit der Hohlspiegelapparatur in schräger Richtung gemessen wurde, muß man natürlich die wahre Fläche, die beobachtet wurde, in die Berechnung einführen.

Die Leistung des Geräts bei praktischen Messungen

Mit dem beschriebenen Gerät läßt sich sehr einfach und schnell ein ungleichmäßiges Temperaturfeld von großer Fläche ausmessen und damit die Strahlungswärmeabgabe großer industrieller Objekte finden. Die rechnerische Auswertung ist formelmäßig etwas umständlich, man kann sie jedoch unschwer durch Zeichnung von Auswertkurven, Tabellen oder Näherungsformeln vereinfachen.

Für die praktische Anwendung der neuen Meßeinrichtung ergeben sich folgende Hinweise:

- 1) Da der Empfänger auf der Temperatur der umgebenden Luft gehalten werden muß, findet ihm gegenüber ein Strahlungsaustausch aus dem „mittleren Halbraum“ vor der Meßfläche statt, wenn dieser nicht ebenfalls die Lufttemperatur hat. Heiße Flächen im Halbraum, die keine sehr große Ausdehnung haben, spielen dabei jedoch keine Rolle, da der gesamte Halbraum in Betracht zu ziehen ist. Es kann vorkommen, daß bei den einzelnen Meßpunkten des Versuchs diese Strahlungswärme ihr Vorzeichen wechselt.
- 2) Handelt es sich nicht um Meßobjekte, deren Oberfläche die Absorptionskonstante normaler, farbig gestrichener, verstaubter oder verschmutzter technischer Oberflächen hat, sondern um Oberflächen aus Aluminiumblech, verzinktem Eisenblech oder mit Aluminiumfarbanstrich, so muß die Absorptionskonstante der Oberfläche gesondert gemessen werden. Man kann sie an irgendeiner Stelle durch Vergleich einer Messung der vom Objekt abgestrahlten Wärme mit einer Oberflächentemperaturmessung durch ein Thermoelement erhalten. Aus dem Meßwert der abgestrahlten Wärme kann man nämlich die „schwarze Temperatur“ der betreffenden Stelle finden und daraus dann die Absorptionskonstante der Fläche berechnen.
- 3) Für die Wärmeabgabe des Meßobjekts muß neben der Strahlungswärme auch die Wärmeabgabe durch Konvektion in bekannter Weise ermittelt werden. Das Verhältnis der beiden Wärmemengen kann je nach der Intensität der Luftbewegung sehr verschieden sein.

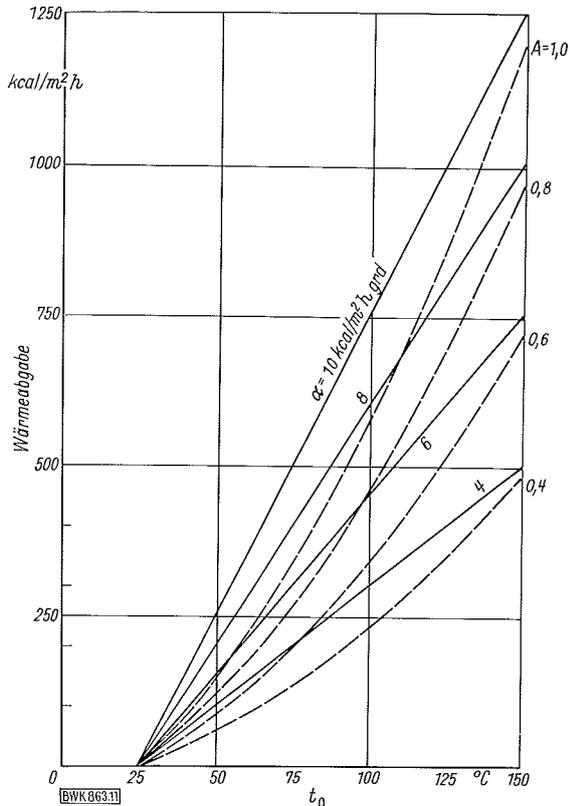


Bild 11. Wärmeabgabe durch Strahlung und Konvektion je nach Absorptionskonstante A und Wärmeübergangszahl α der Konvektion abhängig von der Oberflächentemperatur t_0 . Empfänger- und Lufttemperatur $+ 25^\circ\text{C}$

Bild 11 zeigt die Wärmeabgabe durch Strahlung bei verschiedenen Absorptionskonstanten in Abhängigkeit von der Objekttemperatur und die Wärmeabgabe durch Konvektion bei verschiedenen Wärmeübergangszahlen α . Das Bild gibt einen guten Überblick, wie stark sich das Verhältnis der beiden Teil-Wärmeabgaben je nach den Verhältnissen verschieben kann.

Beispiel für eine praktische Messung

Es wurden drei sehr verschiedenartige Versuchsobjekte ausgewählt, die die Leistungsfähigkeit und den meßtechnischen Fortschritt der Einrichtung erkennen lassen. Im folgenden werden die Ergebnisse einer Messung mitgeteilt, für die möglichst einfache, übersichtliche Verhältnisse gewählt wurden. Es war dies ein großer zylindrischer Heißwasserkessel von 10 m Länge und 1,8 m Durchmesser, **Bild 12**.

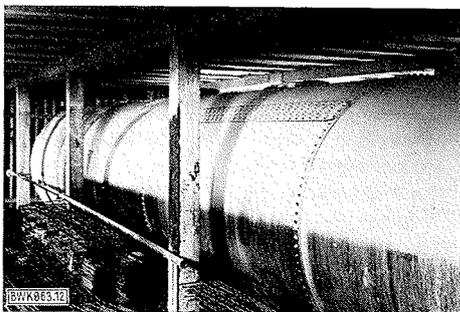


Bild 12. Heißwasserspeicher, Längsansicht.

Die Temperatur mit rd. 70°C war sehr gleichmäßig über den ganzen Körper verteilt und auch über längere Zeit konstant. Außerdem war sie genügend hoch, um große Meßausschläge zu bekommen.

Die Kesseloberfläche war stark staubig und rostig. Man kann also gut mit der Annahme eines nahezu schwarzen Körpers (Absorptionskonstante 0,95) rechnen. Auch ist das Lambertsche Cosinusetz in guter Näherung erfüllt.

Gemessen wurde die Abstrahlung einer Längsseite an sechs und einer Stirnseite an zwei Stellen, **Bild 13**. Zur Kontrolle wurde außerdem jeweils mit einem Thermoelement die Temperatur und an zwei Stellen die Konvektions-Wärmeabgabe bestimmt. Da der Raum ringsum geschlossen und nicht begangen war und auch keine anderen,

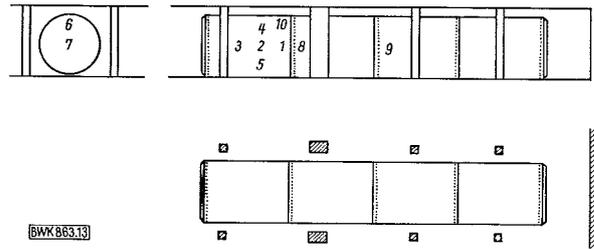


Bild 13. Versuch am Heißwasserkessel.

Die Zahlen bedeuten die Meßstellen; die jeweiligen Spiegelstellen sind eingezeichnet

Luftbewegung erzeugenden Maschinen im Raum waren, war von vornherein zu erwarten, daß sich niedrige Wärmeübergangszahlen α der Konvektion ergeben würden.

Die umgebenden Wände waren drei gemauerte Innenwände sowie Decke und Boden und eine Außenwand mit großen Garagentoren. Diese Verhältnisse spiegeln sich auch in den Meßwerten.

Die Auswertung des Versuchs ergab:

Mittelwerte der Messungen an 10 verschiedenen Stellen:

Mittlere Oberflächentemperatur des Heißwasserkessels, mit Thermoelementen gemessen	76,5 °C
Abgestrahlte Wärmestromdichte gegen 25°C (Temperatur des Meßgeräts)	336 kcal/m ² h
Schwarze Temperatur des Heißwasserkessels, berechnet aus der abgestrahlten Wärmemenge	75,3 °C
Absorptionskonstante der Kesseloberfläche, berechnet aus der gemessenen wahren und der schwarzen Oberflächentemperatur des Kessels	0,97
Wärmeübergangszahl an der Kesseloberfläche durch Konvektion, wie oben beschrieben gemessen,	4,35 kcal/m ² h grad
Oberfläche des Kessels	63,1 m ² .

Daraus ergibt sich:

Gesamtwärmeabgabe des Kessels durch Strahlung zu	21 200 kcal/h.
Gesamtwärmeabgabe des Kessels durch Konvektion zu	15 450 kcal/h.

Außer dieser Gesamtwärmeabgabe durch Strahlung, bezogen auf 25°C Instrumententemperatur, und der Gesamtwärmeabgabe durch Konvektion ist noch der Strahlungsaustausch zu berücksichtigen, der zwischen der Temperatur des Halbraums und der Bezugstemperatur des Geräts besteht. Er findet sich aus folgenden Messungen:

Mittelwert der Messungen an vier verschiedenen Stellen:

Strahlungsaustausch nach oben	- 45,7 kcal/h
Strahlungsaustausch nach unten	+ 101,5 kcal/h
Strahlungsaustausch nach den Seiten	+ 327,7 kcal/h
Strahlungsaustausch der Stirnflächen	+ 27,8 kcal/h
Summe:	+ 411,3 kcal/h

Die Wärmebilanz des Kessels lautet also:

Abstrahlung des Kessels	21 200 kcal/h
Wärmeabgabe des Kessels durch Konvektion	15 450 kcal/h
Halbraumstrahlung	411 kcal/h
Insgesamt:	37 061 kcal/h

Da die mittlere Halbraumtemperatur kleiner war als die Bezugstemperatur von 25°C , so erhöht sich die Wärmeabgabe des Kessels durch Strahlung und Konvektion noch durch die Halbraumstrahlung, wie in der Bilanz berücksichtigt wurde.

BWK 863