

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

**Band:** 34 (1943)

**Heft:** 5

**Artikel:** Die Wärmestrahlung : Zusammenfassung der für die Praxis wichtigen Strahlungsgesetze

**Autor:** Sauter, O.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1061715>

#### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 22.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

Vom Unterwerk Voltastrasse aus sind nach Kleinbasel durch die Dreirosenbrücke 6-kV-Kabelleitungen verlegt, die drei charakteristische Verlegungsarten aufweisen:

1. Zwischen Unterwerk (Grossbasel) und Brücke sind die Kabel im Erdboden in ca. 1,2 m Tiefe in Sand gebettet und mit Zementpanzern und Zementsteinen zugedeckt.

2. In der Brücke, welche eine Länge von 255 m hat, sind die Kabel in Mannesmannrohre von 100 mm  $\varnothing_i$  und 108 mm  $\varnothing_a$  eingezogen. Die Rohre ruhen auf einem Rost aus Holzbrettern. In einem Reserverohr ist zur Ermittlung der Umgebungs temperatur ein Temperaturmesskabel eingezogen.

3. Auf der Seite Kleinbasel sind die Kabel in der Zufahrtsrampe zur Brücke in einen Beton kanal unter dem Trottoir eingelegt.

Einige Kabel haben auf diesen drei Teillängen Temperaturmeßschleifen unter dem Bleimantel<sup>1)</sup>, die ermöglichen, die mittlere Bleimanteltemperatur während des Betriebes zu messen. Um die Temperaturverhältnisse auf den drei Teilstrecken zu ermitteln, wurden an einem Kabel am 2. und 3. August 1941 Erwärmungs- und Abkühlungsversuche durchgeführt. Das Kabel wurde zuerst mit 200 A im Kurzschluss belastet. Die graphische Auswertung des Versuchs ist in Fig. 1 dargestellt. Der Zusammenhang zwischen Leiter temperatur und Bleimanteltemperatur wurde bereits früher untersucht<sup>2)</sup>.

Die Temperaturdifferenz zwischen Bleimantel und Umgebung ist mit 18° C am grössten bei der Verlegung in Mannesmannrohren, weniger gross mit 12° C bei der Verlegung im Kanal der Kleinbasler Brückenrampe und noch kleiner mit 8,8° C bei der normalen Verlegung im Erdboden (in Grossbasel). Die Dauer bis zum Erreichen der maximalen Ueber temperatur beträgt ca. 8 Stunden für die Anordnung in der Rohrleitung und ca. 3 Stunden für das normal im Erdboden verlegte Kabel.

Die Temperatur des Messkabels durch die Brücke stieg dauernd an, und zwar von 14,6° C auf 20,7° C, um am folgenden Morgen wieder auf 17,7° Celsius abzusinken. Grösser war die Schwankung, gemessen an einem Temperaturelement im Kabelkanal der Rampe Kleinbasel. Die Temperatur stieg von 19,7° C auf 28,2° C; am folgenden Morgen wurden 22,4° C gemessen.

<sup>1)</sup> Fig. 1 des vorhergehenden Artikels.

<sup>2)</sup> Fig. 8 des vorhergehenden Artikels.

Sehr gering waren hingegen die Schwankungen der Bodentemperaturen auf der Grossbasler Seite. Die Variationen lagen innert 0,5° C während der ganzen Versuchsdauer.

Während der Versuche herrschte warmes Sommerwetter mit leichtem Wind rheinaufwärts, bedeckter Himmel zwischen 13 h und ca. 15 h, sonst während der ganzen Versuchsdauer Sonne.

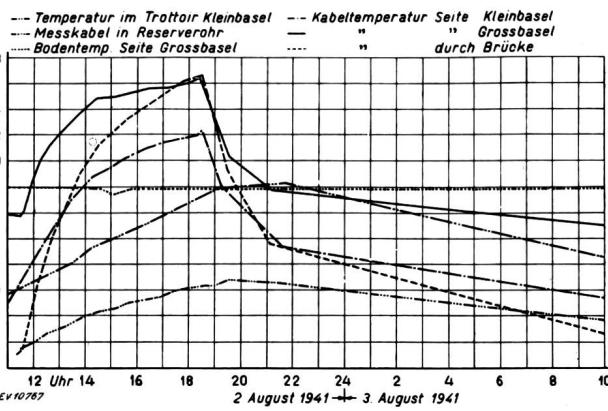


Fig. 1.

Nach den Angaben des VDE beträgt die zulässige Erwärmung im Dauerbetrieb für Hochspannungskabel 25° C; die VDE-Tabelle gibt hierfür als extrapolierten Wert bei der Verlegung im Erdboden 250 A an. Auf Grund der an der Augster Leitung durchgeführten Versuche ergibt sich ein Temperaturgefälle zwischen Leiter und Bleimantel von 7° C bei 200 A Belastung. Die Uebertemperatur von 25° C wird somit erreicht:

für 200 A in der Rohrleitung  
entsprechend 80 % des VDE-Wertes  
für 220 A im Kanalstück  
entsprechend 87 % des VDE-Wertes  
für 245 A in der Rampe Grossbasel  
entsprechend 98 % des VDE-Wertes

Bei tieferen Boden- und Aussentemperaturen kann die zulässige Belastung des Kabels gesteigert werden. Die Versuche vom 2. und 3. August ermöglichen die Berechnung dieser maximalen Belastung für kurzzeitigen und Dauerbetrieb. Die benachbarten Kabel waren während der Versuche (Samstag) sehr schwach belastet; ihr Einfluss auf die Erwärmung des gemessenen Kabels kann vernachlässigt werden.

## Die Wärmestrahlung Zusammenfassung der für die Praxis wichtigen Strahlungsgesetze

Von O. Sauter, Aarau.

536.33

Die Begriffe, die zur Charakterisierung eines strahlenden Körpers dienen, werden erläutert und die physikalischen Gesetze der Wärmestrahlung kurz repetiert. Dann folgen die in der Praxis üblichen Formeln zur Berechnung der Wärmestrahlung technischer Oberflächen. Eine Tabelle enthält die Strahlungszahlen für Temperaturen bis ungefähr 200° C für die gebräuchlichsten technischen Oberflächen. Der Artikel stellt eine für den Praktiker bestimmte Zusammenstellung der wichtigsten, der Literatur entnommenen Angaben auf dem Gebiete der Wärmestrahlung dar.

Exposé des caractéristiques d'un corps rayonnant et rappel des lois physiques du rayonnement thermique. Formules pratiques pour le calcul du rayonnement thermique de surfaces techniques. Tableau des indices de rayonnement des surfaces les plus courantes jusqu'aux températures d'environ 200° C. Destiné aux praticiens, cet article fournit les données les plus importantes parues à ce sujet dans la littérature technique.

## Allgemeines

Wärmestrahlen sind elektro-magnetische Strahlen, ähnlich den Lichtstrahlen. Sie unterscheiden sich von diesen durch ihre grössere Wellenlänge. In Tab. I sind die verschiedenen Strahlenarten mit ihren Wellenlängenbereichen aufgeführt.

Da die Wärmestrahlen den Lichtstrahlen wesensgleich sind, so können auch die aus der Optik bekannten Gesetze über die Fortpflanzung, Reflexion (Spiegelung) und Refraktion (Brechung) auf die Wärmestrahlen angewandt werden.

### Wellenlängen der elektro-magnetischen Strahlung. (Nach Westphal, Physik)

Tabelle 1.

| Art der Strahlen             | Wellenlänge in $\mu$ <sup>1)</sup>            |
|------------------------------|---|
| Kurze Gammastrahlen . . .    | $0,466 \cdot 10^{-6}$                         |
| Röntgenstrahlen . . . .      | $0,158 \cdot 10^{-4} \dots 660 \cdot 10^{-4}$ |
| Ultraviolette Strahlen . . . | $1,3 \cdot 10^{-2} \dots 36 \cdot 10^{-2}$    |
| Sichtbare Strahlen . . . .   | $0,36 \dots 0,78$                             |
| Ultrarote (Wärme)-Strahlen . | $0,78 \dots 340$                              |
| elektrische Wellen . . . .   | $340 \dots \infty$                            |

1)  $1 \mu = 0,001 \text{ mm}$     $1 \mu = 10^4 \text{ Å} (\text{Angström})$     $1 \text{ Å} = 10^{-8} \text{ cm}$

Die Charakterisierung der emittierenden Schichten erfolgt auf Grund ihres Verhaltens bei der Reflexion. *Vollkommen schwarz* nennt man denjenigen Körper, der alle auffallenden Strahlen absorbiert. Vollkommen schwarze Körper existieren jedoch nicht. Man kann hingegen Körper herstellen, die praktisch schwarz sind, in Form eines Hohlraumes mit einer kleinen Öffnung (Fig. 1). Die Innenwände des Hohlraumes sind mit einer Schicht bedeckt, die die Wärmestrahlung sehr stark absorbiert, so dass die durch die Öffnung einfallenden Strahlen nach einigen Reflexionen an den Innenwänden praktisch absorbiert sind, d. h. es gelangen keine Strahlen mehr durch die Öffnung ins Freie. Dieses System wird bei Strahlungsmessungen benutzt.

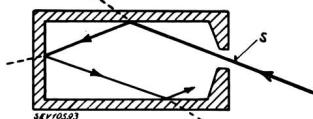


Fig. 1.  
Darstellung eines schwarzen Körpers  
Die Hohlraumöffnung  $s$  wirkt als schwarze Fläche.

Der Begriff «Schwarz» versteht sich gemäss vorstehender Definition nicht in optischem Sinn. Auch ein Körper mit heller Oberfläche kann unter Umständen in bezug auf die Wärmestrahlung als beinahe schwarzer Körper gelten.

*Graue Körper* sind solche, die Strahlen aller Wellenlängen gleich stark reflektieren. *Farbige Körper* reflektieren selektiv, d. h. gewisse Wellenlängen werden erheblich stärker reflektiert als andere. Ist die Rückstrahlung regelmässig, d. h. tritt von einem einfallenden Strahl nur ein einziger reflektierter Strahl auf, so spricht man von einer *glatten Oberfläche*. Wird dagegen ein auftreffender Strahl diffus reflektiert, so haben wir es mit einer *rauen Oberfläche* zu tun. Die Bezeichnungen «glatt» und «rau» beziehen sich natürlich nur auf Strahlen bestimmter Wellenlängen, denn eine für langwellige Strahlung als glatt befundene Oberfläche kann für sehr kurzwellige Strahlung rauh wirken, weil dann die Unebenheiten der Oberfläche im Vergleich zu den Wellenlängen nicht mehr vernachlässigt werden können.

Reflektiert eine glatte Fläche sämtliche auftreffenden Strahlen, so heisst man sie *spiegelnd*. Für den gleichen Fall spricht man bei einer rauen Fläche als von einer *weissen*.

## Die technisch wichtigen Strahlungsgesetze

### A) Strahlung schwarzer Körper.

Für den vollkommen schwarzen Körper ist es möglich, die Strahlungsgesetze abzuleiten. Für die grauen oder farbigen Körper sind diese Gesetze mit gewissen Einschränkungen unter Umständen ebenfalls gültig.

Das Emissionsvermögen  $P_s$  ist die Wärmeleistung, die von der Flächeneinheit des schwarzen Körpers mit der absolu-

ten Temperatur  $T$  (in °K<sup>1)</sup>) in der Zeiteinheit an einen Körper mit der absoluten Temperatur Null ( $-273^\circ\text{C}$ ) abgegeben wird. Das Emissionsvermögen ist gegeben durch das Gesetz von Stefan-Boltzmann:

$$P_s = \sigma \cdot T^4 \quad \sigma: \text{Strahlungskonstante des schwarzen Körpers.}$$

In der Praxis hat sich dieses Gesetz in folgender Schreibweise eingebürgert:

$$P_s = C_s \cdot \left( \frac{T}{100} \right)^4 \quad C_s: \text{Strahlungszahl des schwarzen Körpers.} \quad (1)$$

$$C_s = 4,96 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ({}^\circ\text{K})^4$$

Die Gesamtstrahlung eines Körpers mit der absoluten Temperatur  $T$  und der Oberfläche  $A$  in der Zeiteinheit beträgt demnach:

$$P = A \cdot C_s \cdot \left( \frac{T}{100} \right)^4 \quad (2)$$

$P$  in kcal/h wenn  $A$  in  $\text{m}^2$ ,  $C_s = 4,96 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ({}^\circ\text{K})^4$  und  $T$  in °K.

In Gleichung (1) ist über die Richtung der Strahlung nichts gesagt. Ueber diese Frage gibt das Gesetz von Lambert Auskunft.

Wenn  $P_\varphi$  die von der Flächeneinheit in der Zeiteinheit ausgestrahlte Energie bedeutet (Strahlungsintensität in der Richtung  $\varphi$ ) so gilt für

$$P_\varphi = P_n \cdot \cos \varphi, \quad (3)$$

wobei  $P_n$  die Intensität in Richtung der Flächennormalen (Fig. 2) ist.

Das Gesetz von Lambert gilt genau genommen nur für absolut schwarze Körper, jedoch mit guter Annäherung auch für die meisten technischen Oberflächen mit Ausnahme po-

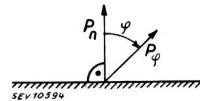


Fig. 2.

lierter Metallflächen. Es besagt, dass die Intensität der Strahlung in Richtung der Flächennormalen am stärksten ist und mit wachsendem Ausstrahlwinkel  $\varphi$  abnimmt. Ist  $P_s$  die Intensität der Gesamtstrahlung so wird diese

$$P_s = P_n \cdot \pi \quad (4)$$

d. h. gleich dem  $\pi$ -fachen der Intensität in Richtung der Flächennormalen.

Der Energieanteil der verschiedenen Wellenlängen an der schwarzen Strahlung ist bestimmt durch das Plancksche Strahlungsgesetz. Zur Berechnung des Strahlungsanteils, der auf eine bestimmte Wellenlänge entfällt dient Gleichung (5):

$$P_\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot (e^{c_2/\lambda T} - 1)} \quad (5)$$

$c_1$  und  $c_2$  sind Konstanten,  $P_\lambda$  in  $\text{W/cm}^3$  wenn  $c_1 = 3,69 \text{ W/cm}^2$ ,  $c_2 = 1,43 \text{ cm} \cdot {}^\circ\text{K}$ .

$\lambda$  Wellenlänge in cm.

$T$  Temperatur in °K.

$e$  Basis der nat. Log. = 2,71828.

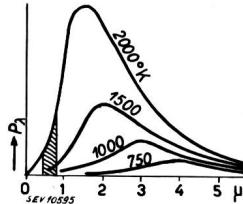


Fig. 3.  
Energieverteilung im Spektrum des schwarzen Körpers  
Der sichtbare Bereich ist schraffiert.

In Fig. 3 ist die Energieverteilung nach (5) für einige Temperaturen aufgezeichnet. Das Energiemaximum verschiebt sich dabei wie ersichtlich für wachsende Temperatu-

1) Temperaturen in °K (Grad Kelvin) = Temperaturen in °C + 273° C.

ren ins Gebiet der kürzeren Wellenlängen. Diese Verschiebung des Maximums ist ausgedrückt durch das Wiensche Verschiebungsgesetz. Es lautet:

$$\lambda_m \cdot T = 2880 \quad \lambda_m \text{ Wellenlänge im Energie-} \\ \text{maximum [\mu]} \quad T \text{ Temperatur [°K]} \quad (6)$$

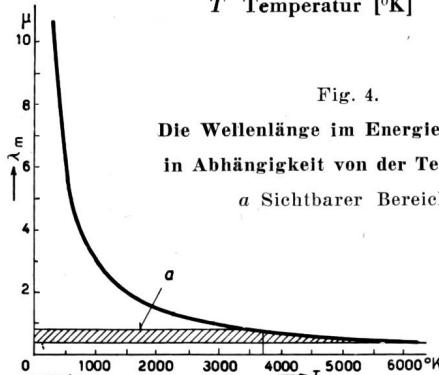


Fig. 4.

Die Wellenlänge im Energemaximum  
in Abhängigkeit von der Temperatur  
a Sichtbarer Bereich.

Fig. 4 zeigt (6) für Temperaturen von 500...6000 °K.

### B) Strahlung technischer Oberflächen.

#### a) Elektrisch nicht leitende Körper.

Wie bereits ausgeführt, können die für die schwarze Strahlung abgeleiteten Gesetze annäherungsweise auch für nichtschwarze Körper angewendet werden mit Ausnahme polierter Metallflächen. Nach dem Kirchhoff'schen Gesetz gilt für das Emissionsvermögen eines beliebigen Körpers:

$$P = \alpha \cdot P_s \quad P_s \text{ Emissionsvermögen des} \\ \text{schwarzen Körpers} \quad \alpha \text{ Absorptionsverhältnis} \quad (7) \\ \alpha = \frac{\text{absorbierte Energie}}{\text{auffallende Energie}}$$

Das Kirchhoff'sche Gesetz gilt sowohl für die Gesamtstrahlung, als auch für jede Wellenlänge. In Analogie zu (1) gilt

$$P = C \cdot \left( \frac{T}{100} \right)^4 \quad C \text{ Strahlungszahl für den} \\ \text{grauen Körper} \quad (8)$$

und daraus

$$C = \alpha \cdot C_s \quad (9)$$

Statt der Strahlungszahl  $C$  ist in Tabellen oft das Absorptionsverhältnis  $\alpha$  (auch Schwärzegrad genannt) aufgeführt. Die Strahlungszahl  $C$  kann durch Messungen gefunden werden.

Da für den schwarzen Körper  $\alpha=1$  ist, für alle andern Körper jedoch kleiner als 1, so ist auch  $C$  für alle grauen Körper kleiner als  $C_s$ , d. h. die Strahlung des schwarzen Körpers kann nicht übertroffen werden.

Bei undurchlässigen Körpern zerfällt die einfallende Energie in einen absorbierten und einen reflektierten Teil. Ist  $\alpha$  das Absorptionsverhältnis nach (7) und  $\varrho$  das Reflexionsverhältnis, so gilt

$$\alpha + \varrho = 1 \quad (10)$$

oder

$$P = (1 - \varrho) \cdot P_s \quad \varrho = \frac{\text{reflektierte Energie}}{\text{auffallende Energie}} \quad (11)$$

Für durchlässige Körper kommt noch der Anteil der durchgehenden Strahlung hinzu:

$$\alpha + \varrho + \tau = 1 \quad \tau \text{ Durchlässigkeitsverhältnis} \\ \tau = \frac{\text{durchgehende Energie}}{\text{auffallende Energie}} \quad (12)$$

Die meisten technisch gebräuchlichen Körper sind undurchlässig. Die Schichtdicken, die nötig sind, um die eindringende Wärmestrahlung zu absorbieren, sind sehr klein. Bei Metallen erfolgt die Absorption nach einer Eindringtiefe von ca. einer Wellenlänge, während bei dielektrischen Körpern eine Tiefe von mehreren Wellenlängen nötig ist.

In Gleichung (11) ist das Emissionsvermögen eines undurchlässigen Körpers zurückgeführt auf sein Reflexionsverhältnis  $\varrho$  und das Emissionsvermögen des schwarzen Körpers.

Die Brechungs- und Reflexionsverhältnisse an der Grenze zweier Medien bei regelmässiger Strahlung sind in Fig. 5

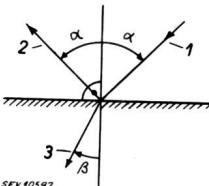


Fig. 5.  
Reflexion und Brechung eines Strahles

1 einfallender Strahl. 2 reflektierter Strahl. 3 gebrochener Strahl.

dargestellt und durch das Brechungsgesetz von Snellius ausgedrückt. Es lautet:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n \quad n \text{ Brechungsindex} \quad (13)$$

Für die meisten elektrischen Nichtleiter liegen die Werte von  $n$  zwischen 1,4 und 1,7. Die Emission solcher Körper bei regelmässiger Reflexion lässt sich zurückführen auf den Brechungsindex  $n$  und den Ausstrahlwinkel  $\varphi$ .

Beim Eintritt eines Strahles von einem Medium in ein anderes ändert die Wellenlänge des Strahles, während die Frequenz konstant bleibt.

Die Emission eines Nichtleiters in Abhängigkeit von der Strahlungsrichtung und vom Brechungsindex zeigt Fig. 6 in Polarkoordinaten.

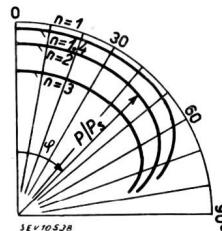


Fig. 6.  
Emissionsverhältnis von Nichtleitern mit verschiedenem Brechungsindex in Abhängigkeit vom Ausstrahlwinkel

Diese Emissionsverhältnisse gelten für die in der Technik üblichen niederen Temperaturen. Die Abhängigkeit von der Temperatur pflegt man dadurch zu berücksichtigen, dass man der Strahlungszahl  $C$  einen von der Temperatur abhängigen Wert gibt.

Versuche haben gezeigt, dass sehr viele Stoffe grau strahlen, d. h. alle Wellenlängen gleich reflektieren. Für diese Graustrahler gilt auch das Gesetz von Lambert. Die Strahlung von schlecht absorbierenden Schichten wird durch Aufrauhen der Oberfläche verschlechtert.

#### b) Blanke Metalle.

Im Gegensatz zu nichtleitenden Körpern strahlen blanke Metalle mit grösser werdendem Ausstrahlwinkel  $\varphi$  stärker bis  $\varphi \approx 80^\circ$ , um dann zurückzufallen.

Die Strahlung senkrecht zur Fläche ist kleiner als schräg zu ihr. Das Gesetz von Lambert ist nicht mehr gültig. Fig. 7 zeigt das Polardiagramm der Strahlungsverteilung für einige Metalle.

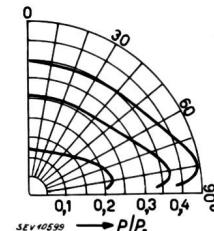


Fig. 7.  
Emissionsverhältnis verschiedener Metalle in Abhängigkeit vom Ausstrahlwinkel

Ferner zeigt sich bei der Strahlung blanker Metalle, dass die ausgestrahlte Wärme  $P$  prop. ist  $\sqrt{\varrho_0 \cdot T^5 \cdot \varrho}$ , bezeichnet den spez. elektrischen Widerstand in  $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ . Um das Gesetz von Stefan-Boltzmann trotzdem auch für Metalle verwenden zu können, nimmt man die Strahlungszahl  $C$  als mit der Wurzel aus dem spez. Widerstand bei 0°C und der abso-

luten Temperatur  $T$  proportional an. Für das kleinstmögliche Absorptionsverhältnis  $\alpha = C/C_s$  eines Metalls gilt Gleichung (14) (angenähert nach ten Bosch, in anderer Fassung):

$$\alpha = 0,0005 \cdot \sqrt{\rho_0} \cdot T \quad (14)$$

In Fig. 8 ist der Wert  $\alpha$  für einige Temperaturen aufgetragen.

Gleichung (14) gilt für hochglanzpolierte Oberflächen. In der Praxis ist mit mehr oder weniger starken Abweichungen zu rechnen, je nach dem Polierzustand und nach der Stärke event. vorhandener Verunreinigungen oder Oxydschichten.

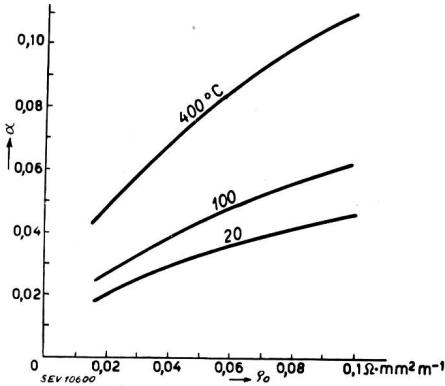


Fig. 8.

Absorptionsverhältnis von Metallen in Abhängigkeit vom spezifischen Widerstand bei 0°C

Die Gesamtstrahlung blunker Metalle ist ungefähr gleich dem 1,3-fachen der Strahlung in Richtung der Flächennormalen.

Es ist zu beachten, dass das vorstehend Gesagte nur für blanke Metalloberflächen gilt. Rauhigkeit und nichtmetallische Oxydschichten erhöhen die Strahlungszahl. Bei rostigem Eisen z. B. haben wir es nicht mehr mit der Strahlung des Eisens zu tun, sondern noch mit der Strahlung der Oxydschicht. Oxydschichten, die so dünn sind, dass die Anlauffarben des Metalls noch durchschimmern, sind praktisch noch ohne Einfluss auf die Strahlung.

Rauhe Metallflächen reflektieren diffus, so dass für sie auch das Gesetz von Lambert gilt. Damit wird die Gesamtstrahlung rauher Metallflächen gleich dem  $\pi$ -fachen der Normalstrahlung.

### C) Gegenseitige Strahlung.

Bisher wurde nur vom Emissionsvermögen eines Körpers gesprochen, d. h. angenommen, dass dieser Körper selber nicht bestrahlt werde. Dieser Fall kommt nun aber in der Praxis nicht vor. Auf jeden strahlenden Körper treffen wiederum Wärmestrahlungen von der Umgebung. Von zwei einander gegenüberliegenden Flächen  $A_1$  und  $A_2$  strahlt  $A_1$  entsprechend ihrer Temperatur  $T_1$  und der Strahlungszahl  $C_1$  auf die Fläche  $A_2$ . Für die Fläche  $A_2$  gilt sinngemäß das Gleiche. Und zwar ist die Eigenstrahlung von  $A_1$  gleich gross, ob  $T_2$  grösser oder kleiner als  $T_1$  ist.

Die von  $A_1$  an  $A_2$  ausgestrahlte resultierende Wärmemenge  $P_1$  beträgt

$$P_1 = C_r \cdot A_1 \cdot \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (15)$$

$C_r$  resultierender Strahlungsfaktor der beiden Körper.

$$C_r = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{A_1}{A_2} \cdot \left( \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_s} \right)} \quad (16)$$

Ist  $A_1$  klein gegenüber  $A_2$  (in der Praxis meistens der Fall) so wird  $C_r \approx C_1$  und damit

$$P_1 = C_1 \cdot A_1 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (17)$$

Für parallele Flächen mit  $A_1 = A_2$  wird

$$P_1 = C_r \cdot A \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (18)$$

$$C_r = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_s}} \quad (19)$$

Werden zwischen den Flächen  $A_1$  und  $A_2$

$n$  Platten aus dem gleichen Material angebracht, so wird die durch Strahlung übertragene Wärme

$$P = \frac{1}{n+1} \cdot P_0 \quad P_0 \text{ Uebertragene Wärme ohne dazwischengestellte Platten} \quad (20)$$

Dieser Fall kommt häufig vor beim Einbau von polierten Metallflächen als Strahlungsschutz zwischen strahlende Körper und Umgebung, z. B. Alfol-Umhüllung bei elektrischen Backöfen.

Durch Einbau vieler Reflektoren kann die durch Strahlung abgegebene Wärme beliebig verkleinert werden.

In der Praxis wird Gleichung (15) in abgeänderter Form benutzt. Durch Einführung einer Wärmeübergangszahl  $a_s$  für die Strahlung wird (15) vereinfacht:

$$a_s = \frac{C_r \cdot \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{T_1 - T_2} = C_r \cdot f_{\vartheta} \quad (21)$$

$f_{\vartheta}$  Temperaturfaktor.

Mit  $a_s$  [kcal/m<sup>2</sup>·h·°C] wird dann die von einem Körper mit der Oberfläche  $A$  [m<sup>2</sup>] durch Strahlung abgegebene Wärmefluss.

$$P_s = a_s \cdot A \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) \quad [\text{kcal/h}] \quad (22)$$

$\vartheta_1, \vartheta_2$  Temperatur des strahlenden Körpers bzw. der Umgebung [°C]

Die Rechnung vereinfacht sich bedeutend, wenn  $f_{\vartheta}$  aus Kurventafeln oder Tabellen entnommen werden kann. In Tabelle II sind die Strahlungszahlen für die gebräuchlichsten technischen Oberflächen angegeben. Die meisten sind bei einer Temperatur von ca. 20°C gemessen. Sie gelten bis ungefähr 200°C. Als Orientierungswerte können sie auch noch für Temperaturen bis 400°C Verwendung finden. Es ist jedoch zu beachten, dass in der Praxis unter Umständen erhebliche Abweichungen auftreten können, da die Oberflächenbeschaffenheit von starkem Einfluss auf die Strahlungszahl ist.

### Schlussbemerkungen

Immer noch ist die Ansicht stark verbreitet, dass die Oberflächen von Körpern, die intensiv strahlen sollen, in dunklem Ton, möglichst schwarz, gehalten werden müssen. Dem ist nun aber nicht so, wie schon ein Blick in die Tabelle der Strahlungszahlen zeigt. In solchen Fällen wird der Begriff «schwarzer Körper» wörtlich aufgefasst und man denkt dabei unwillkürlich an die sichtbaren Strahlen. Stoffe, deren Absorptionsverhältnis für sichtbare Strahlen gering ist, können im Bereich der Wärmestrahlungen stark absorbieren, sie strahlen dann eben selektiv. Aus diesem Grunde ist es nötig, zur Beurteilung der Strahlungseigenschaften eines Körpers nebst seiner Strahlungszahl auch die Temperatur, für welche diese Strahlungszahl gilt, zu kennen. Für die in der Praxis am häufigsten vorkommenden Fälle, nämlich bei Radiatoren, elektrischen Öfen, Wandungen von elektrischen Kochherden, Kachelöfen, Hausmauern u. a. mit Temperaturen bis maximal 100°C ist die Strahlung zur Hauptsache langwellig und der Anteil der sichtbaren Strahlung Null. Die Energieverteilung nach Gleichung (6) zeigt, dass der Anteil der sichtbaren Strahlen erst bei Temperaturen über 5000°K beträchtlich wird. Im Bau von Elektroöfen, die nach dem Prinzip der Widerstandsheizung arbeiten, erreicht man für

*Strahlungszahlen verschiedener Stoffe, gültig bis ca. 200° C.  
(Nach Hütte I)*

Tabelle II.

| Stoff und Oberflächenbeschaffenheit                | Temperatur der Messung<br>°C | C<br>kcal/m <sup>2</sup> ·h.<br>(°K) <sup>4</sup> |
|--|------------------------------|---|
| Aluminium  | poliert . . . . .            | 20 0,25   |
|  | roh . . . . .                | 20 0,35   |
| Kupfer   | hochglanzpoliert . .         | 20 0,2  |
|  | matt . . . . .               | 20 1,1  |
|  | rauh, mit Oxydschicht . .    | 20 3,8  |
| Messing  | poliert . . . . .            | 20 0,25   |
|  | rohe Walzfläche . .          | 20 0,34   |
|  | frisch geschmiedet . .       | 20 1,02   |
| Nickel   | poliert . . . . .            | 20 0,3  |
| Eisen  | rohes Gusseisen . .          |   |
|  | oxydiert . . . . .           | 40 4,6  |
|  | Schmiedeisen oxydiert . .    | 20 4,5  |
|  | glatt gezogen . .            | 3,7   |
|  | poliert . . . . .            | 40 1,3  |
|  | verzinkt . . . . .           | 20 1,13   |
| Silber   | poliert . . . . .            | 0,15  |
| Zinn   |                              | 0,6   |
| Zink   |                              | 20 1,3  |
| Aluminiumlack mit Zapon . . .                      | 20                           | 2,0   |
| Emaillack dicke Schicht . . .                      | 20                           | 4,5   |
| Glänzender schwarzer Lack, dünne Schicht . . . . . | 20                           | 4,3   |
| Schmelzemail . . . . .                             | 20                           | 4,5   |
| Eis durchsichtig . . . . .                         |                              | 4,7   |
| Gips . . . . .                                     | 20                           | 4,5   |
| Glas . . . . .                                     | 20                           | 4,6   |
| Gummi, weich . . . . .                             | 20                           | 4,3   |
| Eichenholz, gehobelt . . . . .                     | 20                           | 4,4   |
| Porzellan, glasiert . . . . .                      | 20                           | 4,6   |
| Ziegelstein . . . . .                              | 20                           | 4,6   |
| Kalkmörtel . . . . .                               | 20                           | 4,5   |

die heute gebräuchlichen Heizleitermaterialien im Maximum Heizdrahttemperaturen von 1300° C.

Es gibt nun, wie bereits gesagt, Stoffe, deren Absorptionsvermögen mit der Wellenlänge stark ändert. z. B. Glas, das für Strahlen im sichtbaren Bereich diatherman ist, dagegen langwellige Wärmestrahlen stark absorbiert. Will man, wie das beispielsweise bei elektrischen Ofen der Fall sein kann, durch Glaswände hindurch Wärme durch Strahlung abgeben, so wird der emittierende Körper eine möglichst hohe Temperatur aufweisen müssen, damit die Strahlung hauptsächlich kürzere Wellenlängen aufweist, sonst wird die Glaswand einen grossen Teil der Strahlung absorbieren und statt durch Strahlung wird die Wärme durch Konvektion an die Umgebung abgegeben.

Ferner ist zu beachten, dass bei stark gewellten Oberflächen oder solchen mit erheblichen Vertiefungen (Radiatoren) nur jene Flächen, die frei nach aussen strahlen können, für die Wärmestrahlung in Frage kommen. Die Vertiefungen bewirken lediglich eine geringe Erhöhung der Strahlungszahl.

Bei glatten, polierten Metallflächen, die als Strahlungsschutz Verwendung finden, ist darauf zu achten, dass keine Feuchtigkeit darauf haftet (Kondenswasser, Öl) da solche Schichten, auch wenn sie relativ dünn sind, Wärmestrahlen stark absorbieren und den Strahlungsschutz dieser Flächen illusorisch machen.

In diesem Zusammenhang soll auch noch der Begriff der sog. «kalten Strahlung» korrigiert werden. Man meint damit die geringe Strahlung von kalten Gegenständen wie Hausmauern, Fensterflächen usw. Eine Strahlung ist weder kalt noch warm, erst beim Auftreffen auf einen andern Körper verwandelt sie sich in Wärme. Je nach ihrer Intensität und nach den Reflexionseigenschaften des auffangenden Körpers ist die dabei entstehende Wärmemenge grösser oder kleiner.

#### Literatur:

Westphal: Physik. Verlag: Julius Springer, Berlin 1941.

Ten Bosch: Die Wärmeübertragung. Verlag: Julius Springer, Berlin 1936. Enthält ausführliche Zahlenangaben, Rechnungsbeispiele, Kurven für den Temperaturfaktor, ausführliches Literaturverzeichnis.

Hütte, Bd. I, 26. Aufl. Verlag: Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin.

E. Schmidt: Die Wärmestrahlung technischer Oberflächen bei gewöhnlicher Temperatur. Beiheft zum Gesundheits-Ingenieur, Reihe I, Heft 20. Verlag: R. Oldenbourg, München.

## Verluste und Maschinengrösse bei kurzzeitigen und aussetzenden Betrieben

Von W. Schuisky, Harbin

621.3.017.73

Zur besseren Nachbildung der Erwärmungsvorgänge in elektrischen Maschinen wird ihre Erwärmungskurve als Zusammensetzung zweier Exponentialkurven aufgefasst. Mit solcher Erwärmungskurve werden dann die Verluste bei kurzzeitiger und aussetzender Belastung sowie die mögliche Leistungssteigerung von Maschinen bei derartigen Belastungen berechnet.

Die Verluste können bei kurzzeitigem oder aussetzendem Betrieb gegenüber denen beim Dauerbetrieb wesentlich höher zugelassen werden. Demzufolge fällt die Maschinengrösse bei derselben Nennleistung für jene Betriebsarten kleiner aus. Diese aus Erwärmungsgründen zulässige Erhöhung der Verluste oder Verkleinerung der Maschinengrösse wurde von vielen Autoren untersucht. Die Ergebnisse sind in praktisch sehr brauchbaren Formen in allen Lehrbüchern (z. B. von Richter) zu finden.

Les échauffements des machines électriques peuvent être relevés avec une plus grande précision, en établissant la courbe des échauffements à l'aide de deux courbes exponentielles. Cette courbe des échauffements permet de calculer les pertes en charge de brève durée et intermittente, ainsi que l'augmentation possible de la puissance des machines sous de telles charges.

Alle diese Untersuchungen leiden an dem Mangel, dass die ihnen zu Grunde gelegte Erwärmungskurve als reine Exponentialkurve angenommen wird. Die an den Maschinen gemessenen Erwärmungskurven weichen jedoch von der einfachen Exponentialkurve ab, und zwar hauptsächlich im unteren Teil, also beim Beginn der Erwärmung. Die Abweichung röhrt daher, dass eine elektrische Maschine kein homogener Körper ist. Schon in grober Betrachtung sind 3 verschiedene Teile, Wicklung, Eisen und Kühlluft zu unterscheiden, welche