

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 35 (1944)
Heft: 24

Artikel: Zur Frage des Zusammenhangs zwischen Oberflächenbelastung und Übertemperatur von Elementen elektrischer Widerstandsöfen
Autor: Weibull, Jvar
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1057009>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 26.04.2025

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

dessen Eingangskreis anbieten muss, um am Ausgang ein Störverhältnis von 1 zu erhalten.

Die Grenzempfindlichkeit ist in diesem Fall einzusetzen mit

$$P_{Grenz} = 1 \cdot k \cdot T \text{ oder gleich } 4 \cdot 10^{-21} \text{ Watt/Hz}$$

wenn T zu 300^o Kelvin angenommen ist.

Aus Fig. 3 geht die erreichbare Empfindlichkeit P in Abhängigkeit von den früher definierten Faktoren a , b und c hervor.

Wenn die Temperatur des Strahlungswiderstandes weniger als Zimmertemperatur beträgt, muss von den Werten nach Fig. 3 oder denjenigen, die mit dem Meßsender bestimmt wurden, der konstante Betrag $1 - c$ abgezogen werden.

Aus Fig. 4 geht der Verlauf der Empfindlichkeit eines von der Autophon A.-G., Solothurn, gebauten Empfängers hervor. Zum Vergleich sind auch einige in einer ruhigen Juragegend aufgenommene Messpunkte des äusseren Störpegels aufgetragen.

Fig. 5 zeigt die Meßstation, Fig. 6 den Standort der Meßstation auf der Jurakette nordöstlich Solothurn.

Aus Fig. 7 ist der Aufbau des Hochfrequenzteiles des Empfängers E 52 ersichtlich. Die Anwendung

eines Spulenrevolvers mit umschaltbarer Abstimmkapazität, sowie die Verwendung einer Spezialröhre ermöglichten ein gutes Verhältnis $R_{\bar{a}}/R_{res}$ und somit die aus Fig. 4 ersichtliche gute Empfindlichkeit über den grossen Frequenzbereich von 0,1...38 MHz.

Literatur

- 1) Standards on Radio Receivers, 1938. The Institute of Radio Engineers, N. Y. 1938.
- 2) K. Fränz, Hochfrequenztechn. u. Elektroakust. Bd. 59 (1942), Nrn. 4 u. 5, S. 105 u. 143.
- 3) H. Nyquist, Phys. Rev., Bd. 32, S. 113.
- 4) K. Fränz, Elektr. Nachr.-Techn., Bd. 16(1939), S. 92.
- 5) Documents du Comité Consultatif International des Radio-Communications, Bucarest, 1937, S. 581.
- 6) Vilbig, Lehrbuch der Hochfrequenztechnik, 1942, Bd. I, S. 531.
- 7) M. J. O. Strutt, Moderne Kurzwellenempfangs-Technik, 1939, S. 147 und Anhang.
- 8) K. E. Jansky, Proc. Inst. Radio Engrs. N. Y., Bd. 25 (1937), S. 1517.
- 9) F. B. Llewellyn, Proc. Inst. Radio Engrs. N. Y., Bd. 19 (1931), S. 416.
- 10) F. Läng, Mitteilungen aus dem Laboratorium der Autophon A.-G., Nr. 2, S. 45.
- 11) D. O. North und W. R. Ferris, Proc. Inst. Radio Engrs. N. Y., Bd. 29(1941), S. 49.
- 12) K. Fränz, Elektr. Nachr.-Techn., Bd. 17(1940), S. 215.
- 13) P. Kotowsky, Telefunken-Hausmitteilungen Nr. 80, S. 30.
- 14) G. Reber, Proc. Inst. Radio Engrs. N. Y., Bd. 28(1940), Nr. 2, S. 68.

Zur Frage des Zusammenhangs zwischen Oberflächenbelastung und Ubertemperatur von Elementen elektrischer Widerstandsöfen

Von Ivar Weibull, Halstahammar (Schweden)

621.365.4

Der Autor berichtet auf Grund der Literatur und der Erfahrungen der Kanthal-Werke über die rechnermässigen Zusammenhänge zwischen der Temperatur des Heizelementes, derjenigen des Ofens und der zulässigen spezifischen Oberflächenbelastung des Elementes.

S'appuyant sur des travaux déjà publiés et sur les expériences faites par la Société Kanthal, l'auteur indique quelles sont les relations qui existent entre la température de l'élément chauffant, la température à l'intérieur du four et la charge spécifique à la surface de l'élément.

Die Berechnung von Elementen eines elektrischen Widerstandsofens hat — nachdem die rein wärmetechnischen Daten bestimmt sind — zur Aufgabe, die Zahl und Abmessungen der Elemente, deren geeignetste Unterbringung usw. festzulegen sowie die Elementtemperatur, die im allgemeinen nicht unwesentlich höher als die Temperatur der Ofenwände und der Charge ist, zu erfassen. Die Elementtemperatur ist der wichtigste der Faktoren, die die Lebensdauer des Elementes bestimmen, und hat daher vom ökonomischen Gesichtspunkt aus eine grosse Bedeutung. In der Folge sollen die Umstände, die einen Einfluss hierauf ausüben, näher berührt werden.

Ausser in sehr einfachen Fällen ist es unmöglich, die genannten Grössen genau zu berechnen. Speziell gilt dies für die Elementtemperatur. Man hat daher versucht, eine einfache und gleichzeitig ausreichend generelle Methode zu finden, welche zumindest grössenordnungsmässig eine richtige Auffassung von dieser Temperatur gibt. Hierbei ist man zu dem Begriff Oberflächenbelastung gekommen, d. h. die Belastung pro Flächeneinheit der Gesamtelementfläche, eine Grösse, die der vom Element austretenden Leistung am nächsten entsprechen dürfte. Bei den in diesem Zusammenhang vor-

kommenden Temperaturen wird nämlich der überwiegende Teil der Wärmeenergie durch Strahlung überführt. Die Hersteller von Heizelementen geben gewöhnlich für jeden Wert der Ofentemperatur einen Höchstwert der Oberflächenbelastung an, der nicht überschritten werden darf. Dem sollte also ein Maximalwert der Ubertemperatur des Elementes entsprechen.

Indessen ist die Oberflächenbelastung nur in dem Fall ein eindeutiges Mass dieser Ubertemperatur, wenn das Element frei strahlen kann, und zwar mit seiner Gesamtfläche. Im allgemeinen sind die geometrischen Verhältnisse derart, dass dieser Idealfall nicht verwirklicht werden kann. Die Elemente bestehen ja in der Praxis nie aus einem geraden Draht oder Band, sondern sind spiralig oder gewellt, so dass sich die einzelnen Teile gegenseitig teilweise abschirmen. Gewöhnlich müssen ausserdem die Elemente auf Träger gelegt oder in Nuten in die Ofenwände eingelegt werden. Hierdurch wird ein weiterer grosser Teil der direkten Strahlung abgeschirmt. Die Ueberführung der Strahlungswärme vom Element zur Charge erfolgt zum überwiegenden Teil indirekt durch Rückstrahlung von den verschiedenen Teilen der Ofenwand.

Damit die Oberflächenbelastung ein eindeutiges Mass für die Uebertemperatur wird, muss sie zu einer äquivalenten Strahlungsfläche ins Verhältnis gesetzt werden, die geringer als die Gesamtelementfläche ist. Diese äquivalente Fläche lässt sich nicht generell berechnen, sondern beruht auf den ange-deuteten geometrischen Daten, die von Fall zu Fall variieren.

Berechnungen wurden in gewissen Spezialfäl-
len^{1) 2) 3) 4) 5) 6)} ausgeführt; sie weisen jedoch ge-
wisse Verschiedenheiten im Resultat auf, die auf
verschiedenen Näherungen beruhen, welche zur
Vereinfachung der oft schwierigen Berechnungen
vorgenommen wurden.

Vorausgesetzt, dass die äquivalente Fläche be-
stimmt ist, braucht man nur das einfache Strah-
lungsgesetz anzuwenden, um die Elementtemperatur
zu erhalten:

$$\Phi = C \cdot A_{\bar{a}} \cdot (T_e^4 - T_o^4) \quad (1)$$

wo Φ die Gesamtleistung, C die Strahlungskonstante,
 $A_{\bar{a}}$ die äquivalente Fläche, T_e die absolute Element-
temperatur und T_o die absolute Ofentemperatur dar-
stellen. In den folgenden Tabellen und Figuren und
bei den numerischen Angaben im Text dagegen sind
die Temperaturen vom Eispunkt an gerechnet, was
durch die Bezeichnung $t (= T - 273^\circ)$ und $^\circ C$ nach
den Zahlenwerten angedeutet wird.

Bei der schätzungsweise Berechnung geht man
von $\Phi = p \cdot A_{tot}$ aus, wo p der Oberflächenbelastung

Ein einfaches Beispiel für den Begriff «äquiva-
lente Strahlungsfläche» ist eine frei strahlende, dicht
gewickelte, zylindrische Bandspirale. Die äquiva-
lente Fläche ist hierbei die äussere Mantelfläche des
Zylinders, welche gleich der Hälfte der totalen
Bandfläche ist, wenn man von den Kanten absieht.

Wie bereits vorher angedeutet, wurden mehrere
Versuche gemacht, um in Sonderfällen die äquiva-
lente Fläche oder eine entsprechende äquivalente
Oberflächenbelastung zu berechnen. Jung¹⁾ emp-
fiehlt für Spiralelemente teils einen Formkoeffi-
zient K_f nach Tabelle I, der auf dem Durchmesser D

Formkoeffizient K_f für verschiedene Werte D/d und s/d
Tabelle I

| s/d | D/d | | | | | | | |
|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 1,25 | 2,17 | 2,27 | 2,32 | 2,35 | 2,38 | 2,40 | 2,42 | 2,44 |
| 1,50 | 2,06 | 2,17 | 2,22 | 2,25 | 2,28 | 2,30 | 2,32 | 2,34 |
| 1,75 | 1,96 | 2,07 | 2,12 | 2,16 | 2,19 | 2,22 | 2,25 | 2,27 |
| 2,00 | 1,89 | 1,99 | 2,04 | 2,08 | 2,12 | 2,15 | 2,18 | 2,21 |
| 2,25 | 1,82 | 1,92 | 1,98 | 2,02 | 2,06 | 2,09 | 2,12 | 2,15 |
| 2,50 | 1,76 | 1,86 | 1,93 | 1,97 | 2,01 | 2,04 | 2,07 | 2,10 |
| 2,75 | 1,71 | 1,81 | 1,89 | 1,93 | 1,97 | 2,00 | 2,03 | 2,06 |
| 3,00 | 1,67 | 1,77 | 1,85 | 1,89 | 1,93 | 1,96 | 1,99 | 2,02 |
| 3,50 | 1,61 | 1,70 | 1,78 | 1,83 | 1,87 | 1,91 | 1,94 | 1,97 |
| 4,00 | 1,55 | 1,64 | 1,72 | 1,77 | 1,81 | 1,85 | 1,89 | 1,92 |
| 4,50 | 1,50 | 1,58 | 1,66 | 1,71 | 1,75 | 1,79 | 1,83 | 1,86 |
| 5,00 | 1,45 | 1,53 | 1,60 | 1,65 | 1,70 | 1,74 | 1,78 | 1,81 |
| 6,00 | 1,45 | 1,46 | 1,53 | 1,58 | 1,63 | 1,67 | 1,71 | 1,74 |
| 7,00 | 1,45 | 1,46 | 1,48 | 1,53 | 1,58 | 1,62 | 1,66 | 1,69 |
| 8,00 | 1,45 | 1,46 | 1,48 | 1,49 | 1,54 | 1,58 | 1,62 | 1,65 |

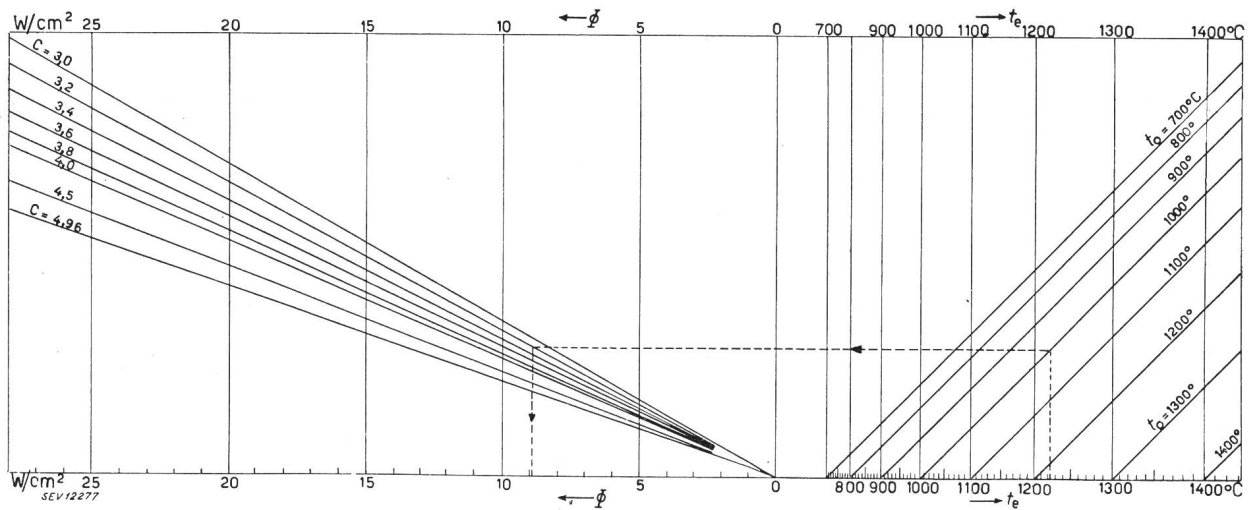


Fig. 1.
Nomogramm für $\Phi = C(T_e^4 - T_o^4) = C[(t_e + 273)^4 - (t_o + 273)^4]$

und A_{tot} der Elementtotalfläche entsprechen. Man
kann daher sagen:

$$\Phi = p \cdot A_{tot} = C \cdot A_{tot} (T_e^4 - T_o^4) \quad (1a)$$

Da $A_{tot} > A_{\bar{a}}$, ist $T_e > T'_e$, d. h. die Uebertempera-
tur steigt mehr, je geringer $A_{\bar{a}}$ ist. Mit Rücksicht
auf die Schwierigkeiten, $A_{\bar{a}}$ zu berechnen, soll man
daher bei den präliminaren Elementberechnungen
eher einen zu geringen als zu hohen Wert für die
Oberflächenbelastung anwenden.

1) Siehe Literatur am Schluss.

der Spirale und der Steigung s im Verhältnis zum
Drahtdurchmesser d beruht, teils einen Montage-
koeffizient K_m , der auf dem Einbau der Spirale in
die Ofenwand basiert.

Die Oberflächenbelastung p' (gehörig zu der äqui-
valenten Fläche), aus welcher die Elementtempera-
tur berechnet wird, erhält man aus

$$p' = p \cdot \frac{K_f}{K_m} \quad (2)$$

Die Elementtemperatur erhält man dann aus dem
Nomogramm Fig. 1.

Eine Berechnung wurde hieraus für eine Spirale ausgeführt, die in einer Nute nach Fig. 2 verlegt ist.

Für diese Bauart gilt nach Jung $K_m = 0,60$. Weiterhin wird $D/d = 5$ und $s/d = 2,5$ angenommen, so dass $K_f = 1,86$ ist. Die Strahlungskonstante C wird zu 3,2 angenommen. Das Resultat fin-

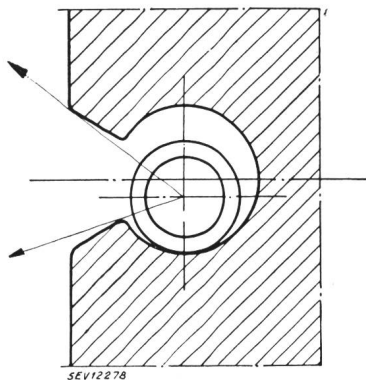


Fig. 2.
Spiralelement in Nute verlegt

det sich in Tabelle II, in welcher auch die Temperatur angegeben wird, die ein frei strahlender Draht bei den angegebenen Werten für die Oberflächenbelastung erhalten soll.

Element- und Ofentemperaturen für die Anordnung Fig. 2
Tabelle II

| | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|
| Ofentemp. $t_0 = (T_0 - 273^\circ) \text{ }^\circ\text{C}$ | 1000 | 1100 | 1200 | 1300 |
| Oberflächenbelastung $p \text{ W/cm}^2$ | 4 | 3 | 2 | 1,5 |
| $p' = p \cdot K_f / K_m \dots \dots \dots$ | 12,4 | 9,3 | 6,2 | 4,7 |
| Elementtemperatur $t_e = (T_e - 273^\circ) \dots \dots \text{ }^\circ\text{C}$ | 1285 | 1285 | 1315 | 1375 |
| Temperatur des frei strahlenden Drahtes $\dots \dots \text{ }^\circ\text{C}$ | 1115 | 1170 | 1240 | 1330 |

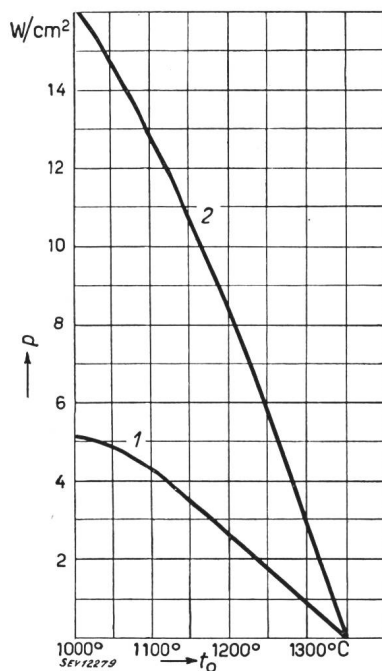


Fig. 3.
Oberflächenbelastung p in Funktion der Ofentemperatur t_0 für eine Elementtemperatur t_e von 1350°C
1 Element nach Fig. 2
2 Freistrahrender Draht (im Ofen).

Auf die gleiche Weise kann man für den angeführten Fall die Oberflächenbelastung berechnen, welche eine Elementtemperatur von 1350°C ergibt,

also die nominelle Grenze für das Arbeitsgebiet neuerzeitlicher Elementlegierungen. Das Resultat geht aus Fig. 3 hervor.

Das Diagramm enthält auch eine Kurve, welche die entsprechende Oberflächenbelastung für einen frei strahlenden Draht zeigt.

Gränzer²⁾ hat eine etwas andere Berechnung des Formkoeffizienten für eine Spirale ausgeführt, doch scheinen die hierbei gemachten Vereinfachungen allzu gross zu sein und ergeben Resultate, die recht bedeutend von den für Tabelle I berechneten Werten abweichen.

Eine weitere Berechnungsgrundlage, für den Fall, dass die Elemente in Nuten der Ofenwand verlegt sind, benutzt den Begriff «Belastung pro Flächeneinheit der Nutenöffnung». Für einen bestimmten Wert dieser Belastung kann man mit Hilfe des Nomogrammes Fig. 1 eine repräsentative innere Nutentemperatur erhalten. Darauf wird diese Nutentemperatur auf die gleiche Weise wie vorher auf die Ofentemperatur angewendet, um die Elementtemperatur zu erhalten, wobei man also den Montagekoeffizienten weglässt, jedoch den Formkoeffizienten beibehält. An Stelle des Montagekoeffizienten erhält man einen Koeffizienten, welcher den Unterschied zwischen der Fläche der Nutenöffnung und der «äquivalenten Fläche» berücksichtigt. Im vorliegenden Beispiel wird diese für eine Ofentemperatur von $1000^\circ\text{C} = 1$ eingesetzt und für die höheren Temperaturen derart angenommen, dass das Verhältnis zwischen den beiden Oberflächenbelastungen nach Tabelle III aussieht, welche den Gang der Berechnung zeigt.

Elementtemperaturen für Ausführung gemäss Fig. 2, berechnet aus der Leistung pro Flächeneinheit der Nutenöffnung
Tabelle III

| | | | | |
|--------------------------------------------------------|------|------|------|------|
| Ofentemperatur $\dots \dots \text{ }^\circ\text{C}$ | 1000 | 1100 | 1200 | 1300 |
| W/cm^2 Nutenöffnung $\dots \dots$ | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Nutentemperatur $\dots \dots \text{ }^\circ\text{C}$ | 1110 | 1190 | 1280 | 1370 |
| Oberflächenbelastung $p \text{ W/cm}^2$ | 4 | 3 | 2 | 1,5 |
| $p' = p \cdot K_f \dots \dots \text{ W/cm}^2$ | 7,4 | 5,6 | 3,7 | 2,8 |
| Elementtemperatur $\dots \dots \text{ }^\circ\text{C}$ | 1270 | 1295 | 1340 | 1400 |

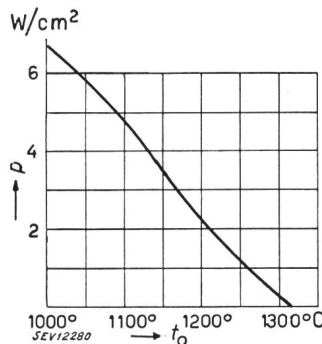


Fig. 4.
Oberflächenbelastung p in Funktion der Ofentemperatur t_0 bei der Elementtemperatur von 1350°C , berechnet aus der Leistung pro Flächeneinheit der Nutenöffnungen

Im Diagramm Fig. 4 finden sich die Werte für die Oberflächenbelastung, welche eine Elementtemperatur von 1350°C ergeben.

Bei den bisher gemachten Berechnungen wurde die Wärmeableitung durch die Ofenwand nicht be-

rücksichtigt; diese erhöht die angeführten Werte etwas.

In einem anderen Beispiel soll eine mehr allgemeine Berechnungsmethode zur Verwendung gelangen. Das Beispiel gilt dem oft vorkommenden Fall eines in Nuten verlegten, gewellten Bandelementes (Fig. 5).

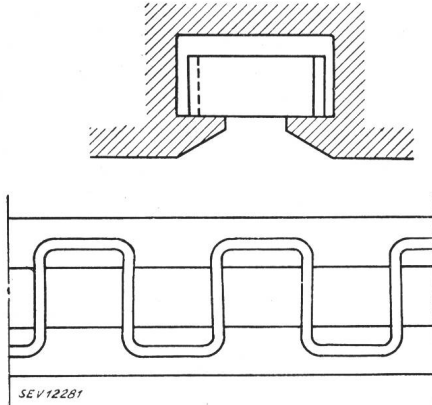


Fig. 5.

In Nute verlegtes gewelltes Bandelement

Die von dem Band ausstrahlende Wärmeenergie wird hierbei teils auf die Nutenwände, teils durch die Nutenöffnung in den Ofenraum überführt. Die von den Nutenwänden durch Strahlung aufgenommene Energie wird teilweise durch die Nutenöffnungen in den Ofenraum reflektiert, teilweise wird sie in die Ofenwand geleitet, von wo sie teilweise von den zwischen den Nuten liegenden Teilen wieder in den Ofenraum ausgestrahlt wird. Noch ein Teil wird durch die Ofenwand abgeleitet und geht also verloren. Im folgenden bezeichnen wir mit:

- p die Oberflächenbelastung des Elementes, bezogen auf die Gesamtelementfläche A ;
 $A_1 = K_1 Y$; $A_2 = K_2 Y$ usw. die äquivalenten Flächen;
 T_o die absolute Elementtemperatur;
 T_n die absolute Temperatur der Nutenwände;
 T_o die absolute Ofenraumtemperatur;
 C die Strahlungskonstante, wird bei allen Strahlungsverläufen gleich angenommen;
 η den Koeffizienten < 1 für die durch die Wärmeableitung verlorene Energie.

Demzufolge gilt gemäss oben:

$$CA_1 (T_e^4 - T_n^4) + CA_2 (T_e^4 - T_o^4) = p \cdot A$$

$$\eta CA_1 (T_e^4 - T_n^4) = CA_3 (T_n^4 - T_o^4), \text{ woraus folgt:}$$

$$p = C (T_e^4 - T_o^4) \left(\frac{K_1 K_3}{\eta K_1 + K_3} + K_2 \right) \quad (3)$$

Die Einführung des Koeffizienten η bedeutet insofern eine Näherung, als dieser von den Temperaturen nicht abhängig sein dürfte. Er bringt jedoch eine bedeutende Vereinfachung der Berechnungen mit sich und dürfte das Ergebnis nicht stark verändern, was auch für eine andere Näherung, die Annahme einer gleichen Strahlungszahl C , gilt. Ferner dürfte es nicht genau zutreffen, einen bestimmten Wert für die verschiedenen Temperaturen anzunehmen, besonders da die Ofentemperatur an verschiedenen Stellen ungleich ist.

Für die durch die Nutenöffnung strahlende Energie gilt:

$$p_n \cdot A_n = CA_2 (T_e^4 - T_o^4) + CA_3 (T_n^4 - T_o^4) \quad (4)$$

wo p_n die pro Flächeneinheit der Nutenöffnung ausgestrahlte Leistung und A_n die Oeffnungsfläche der Nut darstellen. Wird $A_n = K_n \cdot A$ eingeführt, so ist

$$p_n = C (T_e^4 - T_o^4) \left(\frac{K_2}{K_n} + \frac{\eta K_1 K_3}{K_n (\eta K_1 + K_3)} \right) \quad (4a)$$

Die pro Flächeneinheit der totalen Wandfläche berechnete Leistung wird etwas geringer als der Wert p_n , da ja die Fläche zwischen den Nuten weniger intensiv strahlt.

Die Gleichungen (3), (4) und (4a) gelten natürlich auch für andere Elementformen als gewellte Bänder.

Eine numerische Berechnung soll nun für den idealisierten Fall (Fig. 6) ausgeführt werden, wo die Breite des gewellten Bandes gleich der Wellen-

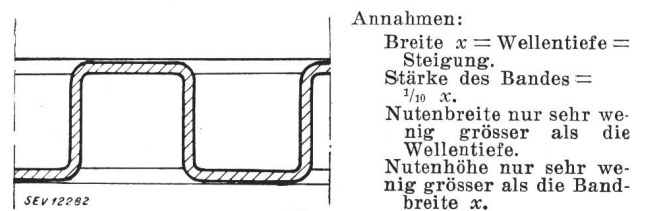


Fig. 6.

Gewelltes Bandelement, Sonderfall

Annahmen:

- Breite $x =$ Wellentiefe = Steigung.
 Stärke des Bandes = $\frac{1}{10} x$.
 Nutenbreite nur sehr wenig grösser als die Wellentiefe.
 Nutenhöhe nur sehr wenig grösser als die Bandbreite x .

tiefe und Steigung ist. Die Stärke des Bandes wird zu $\frac{1}{10}$ der Bandbreite angenommen. Ausserdem soll die Nutenhöhe nur wenig grösser als die Bandbreite sein und das gleiche soll für die Nutenbreite im Verhältnis zur Wellentiefe gelten.

Um den Koeffizienten K zu erhalten, muss man den Strahlungsaustausch zwischen den verschiedenen Teilen des Elementes und der Nutenwände (K_1), zwischen dem Element und dem Ofenraum (K_2) sowie zwischen den Nutenwänden und dem Ofenraum (K_3) berechnen. Zu diesem Zweck wird nach Fig. 6 eine «Periode» des Elementes betrachtet. Wenn wir den Strahlungsaustausch zwischen zwei parallelen, in sehr kleinem Abstand voneinander gelegenen quadratischen Flächen mit a bezeichnen, den Austausch zwischen zwei gegenüberliegenden Seiten eines Würfels mit b und mit d den Austausch zwischen zwei zueinander rechtwinkligen Würfelflächen, so wird unter Berücksichtigung der Strahlung von den Kantenflächen des Bandes:

der Strahlungsaustausch zwischen Element und Nute $= 6 \cdot 0,1a + 2a + 2b + 10d$;

der Strahlungsaustausch zwischen Element und Ofen $= 2 \cdot 0,1a + 6d$;

der Strahlungsaustausch zwischen Nute und Ofen $= 2b + 2d$.

a kann nach den gemachten Voraussetzungen von der gegenseitigen Lage und dem gegenseitigen Abstand der quadratischen Flächen ohne grossen Fehler gleich $Cx^2 f(T)$ gesetzt werden, wo x die Bandbreite und $f(T) = T_1^4 - T_2^4$ ist; T_1 und T_2 bezeichnen die absoluten Temperaturen der Strahlungsflächen. Weiter nach Gerbel 7):

$$\frac{B}{Cx^2 f(t)} = \frac{2}{\pi} \left(2\sqrt{2} \arctan \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{2} \lg \frac{4}{3} - \frac{\pi}{2} \right) = 0,200$$

$$\frac{D}{Cx^2 f(t)} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\pi}{2} - \sqrt{2} \arctan \frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{1}{4} \lg \frac{4}{3} \right) = 0,199$$

Die Gesamtfläche $A = 8,8 x^2$, so dass

$$K_1 = \frac{A_1}{A} = \frac{2,6x + 2B + 10D}{C f(t) A} = 0,57$$

und in derselben Weise $K_2 = 0,16$; $K_3 = 0,09$; $K_n = 0,23$.

Nimmt man $\eta = 0,70$, so erhält man für $t_e = 1350^\circ\text{C}$; $C = 3,2$ und

| | | | |
|--------------------|--------------|--------------|----------------------|
| $t_o = 1000^\circ$ | 1100° | 1200° | 1300°C |
| $p = 4,3$ | $3,4$ | $2,2$ | $0,8\text{ W/cm}^2$ |

Fig. 7 zeigt den Zusammenhang zwischen p und t_o .

| | | | |
|------------------------|--------------|--------------|----------------------|
| Mit $p = 4$ | 3 | 2 | $1,5\text{ W/cm}^2$ |
| für $t_o = 1000^\circ$ | 1100° | 1200° | 1300°C |

erhält man $t_e = 1330^\circ$ 1325° 1335° 1390°C
und $p_n = 16,3$ $12,2$ $8,2$ $6,2\text{ W/cm}^2$.

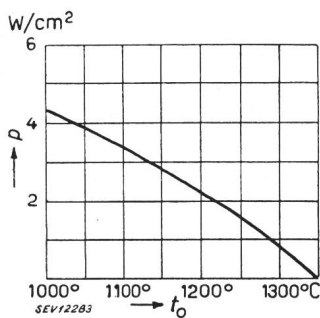


Fig. 7.
Oberflächenbelastung p
in Funktion der Ofentemperatur t_o für eine Elementausführung nach Fig. 6 und eine Elementtemperatur von 1350°C

Die durchgerechneten Beispiele wurden hauptsächlich aufgeführt, um die Einwirkung verschiedener Faktoren auf die Grösse der Oberflächenbelastung zu zeigen. Die erhaltenen Werte erheben keinen Anspruch darauf, genau zu sein. Es geht indessen hervor, dass der Elementeinbau sowie dessen Form grosse Bedeutung hat, was ein Vergleich zwischen den beiden Kurven der Fig. 3 am besten zeigt. Man findet weiterhin, dass die Resultate in den verschiedenen Fällen grössenordnungsmässig gleichwertig sind, was speziell für die höheren Temperaturen zutrifft. Die Methode, dass bei praktischen Berechnungen gewisse Höchstwerte der Oberflächenbelastung vorgeschrieben werden, führt demnach keine wesentlichen Fehler mit sich, sobald man eine zuverlässige Sicherheitsmarge einführt. Mit Rücksicht auf die starke Abhängigkeit der Lebensdauer von der Arbeitstemperatur und deren dominierende wirtschaftliche Bedeutung darf diese

Sicherheitsmarge nicht zu tief angesetzt werden. Wenn man in einem solchen Fall etwas hinsichtlich Elementgewicht und -kosten gewinnt, verliert man erheblich mehr durch die verkürzte Element-Lebensdauer.

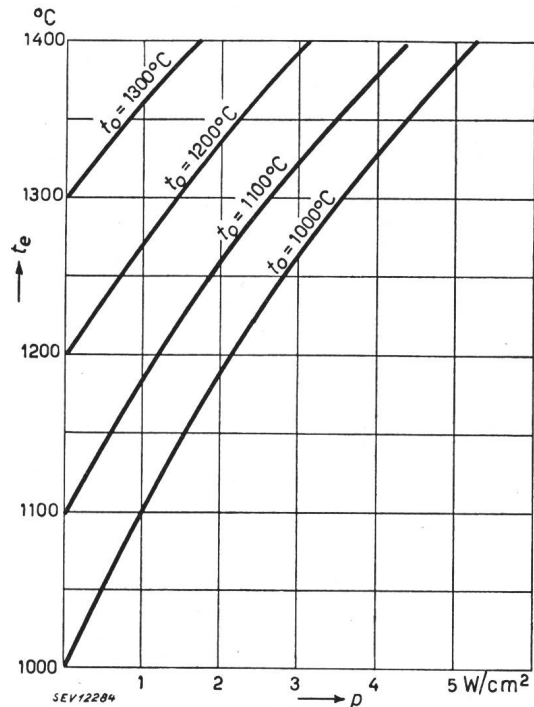


Fig. 8.
Die Elementtemperatur t_e bei Ausführung nach Fig. 6 in Funktion der Oberflächenbelastung p und der Ofentemperatur t_o

Bei der Wahl passender Werte der Oberflächenbelastung kann das Diagramm Fig. 8 nützlich sein; es gibt für den letztberechneten Fall die Elementtemperatur als Funktion der Oberflächenbelastung für die Ofentemperaturen 1000° , 1100° , 1200° und 1300° .

Literatur

- 1) Jung, Méthode de calcul des éléments chauffants. Electricité, Bd. 20(1936), S. 289.
- 2) R. Gränzer, Anordnung der Heizelemente im elektrischen Widerstandsofen und Bestimmung ihrer zulässigen Belastung. Elektrowärme, Bd. 2(1932), S. 222.
- 3) R. Gränzer, Einfluss der Heizkörperform und -anordnung auf die Wärmeübertragung in indirekt beheizten Widerstandsofen. Elektrowärme, Bd. 5(1935), S. 35.
- 4) A. Keene und G. Luke, Rating of Heating Elements for Electric Furnaces. J. Amer. Inst. Electr. Engrs., Bd. 45 (1926), S. 222.
- 5) N. R. Stansel, Industrial Electric Heating, VIII: The Resistor Furnace. Gen. Electr. Rev., Bd. 31(1928), S. 662.
- 6) V. Paschkis, Elektrische Industrieöfen für Weiterverarbeitung. Springer, Berlin 1932.
- 7) M. Gerbel, Die Grundgesetze der Wärmestrahlung. Springer, Berlin 1917.