

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 34 (1943)
Heft: 12

Artikel: Elektrische Erwärmung von Drähten und Platten
Autor: Kussi, W.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1061744>

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: 13.01.2026

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

Statistik des Verkaufes elektrischer Wärmeapparate für den Haushalt in der Schweiz im Jahre 1942¹⁾

Vom Sekretariat des Schweiz. Wasserwirtschaftsverbandes, Zürich (A. Härry)

31 : 621.364.5(494)

An der Erhebung für das Jahr 1942 beteiligten sich 50 Firmen gegenüber 51 im Jahre 1941. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst. Sie umfassen nur Apparate, die in der Schweiz hergestellt und verkauft wurden, also weder den Import noch den Export.

Statistik des Verkaufes elektrischer Wärmeapparate für den Haushalt in der Schweiz durch die schweizerischen Fabriken elektrothermischer Apparate

| | Zahl der Apparate | | Anschlusswert in kW | |
|--|-------------------|--------|---------------------|---------|
| | 1941 | 1942 | 1941 | 1942 |
| Kochherde mit Backofen | 21 081 | 22 661 | 143 900 | 149 543 |
| Réchauds (ohne Ersatzplatten) | 10 653 | 26 119 | 21 284 | 41 412 |
| Schnellkocher, Tee- u. Kaffeemaschinen | 20 501 | 30 549 | 9 074 | 14 838 |
| Brotröster | 4 760 | 5 866 | 2 390 | 2 728 |
| Bügeleisen | 51 185 | 52 188 | 22 926 | 23 596 |
| Heizöfen: | | | | |
| a) Schnellheizer | 12 577 | | 20 360 | |
| b) Wasser- und Oelradiatoren | 50 829 | 2 664 | 74 174 | 3 643 |
| c) Akkumulieröfen , Strahler | 1 791 | 216 | 3 162 | 519 |
| Heisswasserspeicher | 15 158 | 6 198 | 14 827 | 6 100 |
| Patisserie- und Backöfen | 17 263 | 14 791 | 26 726 | 23 162 |
| Kochkessel | 79 | 98 | 1 426 | 2 020 |
| Waschkessel und Waschmaschinen | 259 | 271 | 2 734 | 3 051 |
| | 338 | 164 | 2 621 | 1 339 |

| | Zahl der Apparate | | Anschlusswert in kW | |
|---|-------------------|---------|---------------------|---------|
| | 1941 | 1942 | 1941 | 1942 |
| Wärme- und Trockenschränke | 236 | 370 | 725 | 1 207 |
| Futterkocher | 143 | 89 | 335 | 294 |
| Div. Apparate (Hausbacköfen, Grills, Bratpfannen, Durchlauferhitzer, kl. Heizapparate, Dörrapparate, Medizin, Apparate, Autokühlerwärmern und ähnliche) | 55 849 | 51 482 | 64 971 | 41 013 |
| Total | 250 125 | 226 303 | 391 275 | 334 825 |

Aus der Tabelle geht hervor, dass die Gesamtzahl der verkauften Apparate im Jahre 1942 rund 226 000 betrug gegenüber 250 000 im Jahre 1941, der Minerverkauf beträgt also 24 000 Apparate. Trotzdem ist die Zahl der verkauften Apparate im Jahre 1942 etwa doppelt so hoch wie im Durchschnitt der Jahre 1930—1939. Eine Zunahme gegenüber 1941 weisen die Kochherde mit Backofen, namentlich aber die Réchauds, ferner die Schnellkocher, Tee- und Kaffeemaschinen auf; zurückgegangen ist vor allem der Verkauf von Heizapparaten aller Art, nämlich von 68 000 auf 22 000 Stück, diese Zahl ist aber immer noch dreimal so gross wie das Mittel der Periode 1930—1939.

¹⁾ 1941 siehe Bull. SEV 1942, Nr. 14, S. 394.

Elektrische Erwärmung von Drähten und Platten

Von W. Kussi, Bussum.

621.3.017.71 : 621.64.14

Es wird zunächst die Wärmestrahlung einer Drahtlocke und eines freiausgespannten Drahtes behandelt. Dann wird dargelegt, dass durch die Grenzluftschicht das Problem des Wärmeüberganges an einem Draht zum reinen Wärmeleitungsproblem wird. Die Grenzschichtdicke wird in freier Luft und in geschlossenen Räumen berechnet. Durch Versuche und Rechnung wird nachgewiesen, dass die Wärmeleistung durch Strahlung im Verhältnis zu der durch Leitung bei niedrigen Temperaturen (bis ca. 600° C) vernachlässigbar klein ist. Eine exakte Gleichung über die Abhängigkeit der Temperatur eines mit konstanter Stromstärke beheizten homogenen Körpers von der Zeit wird aufgestellt. Die Wärmeabgabeziffer, der nur eine beschränkte Bedeutung zukommt ist nicht konstant, sondern temperaturabhängig. Sodann wird eine Gleichung über das Verhältnis der Stromstärken, die in Drähten von verschiedenen Durchmessern gleiche Endtemperaturen hervorbringen, aufgestellt und durch Versuche bestätigt. Die vollständige Gleichung des Wärmeüberganges unter Berücksichtigung der Strahlung für homogene Platten und Drähte wird graphisch gelöst. Zum Schluss wird der intermittierende Betrieb und der Abkühlungsvorgang behandelt.

a) Wärmestrahlung

Die durch Wärmestrahlung abgegebene Wärmeleistung ist nach dem Gesetz von Stefan-Boltzmann

$$P_{Str} = eAC_s \left(\frac{T^4}{100^4} - \frac{T_0^4}{100^4} \right) \quad (1)$$

Après avoir traité du rayonnement thermique d'un fil bouclé et d'un fil tendu, l'auteur montre que, du fait de la couche d'air environnante, le problème de la transmission de la chaleur d'un fil se ramène à un problème de simple conduction thermique. Puis, ayant déterminé l'épaisseur de cette couche en plein air et en local fermé, il prouve par des essais et des calculs que la puissance thermique rayonnée est négligeable par rapport à la puissance transmise par conduction, dans le cas de basses température (jusqu'à environ 600° C). Il établit alors une formule précise de la température d'un corps homogène chauffé par un courant d'intensité constante, en fonction de la durée. Le coefficient de transmission thermique, qui n'a qu'une importance secondaire, n'est pas constant, mais varie avec la température. L'auteur établit ensuite une formule pour le rapport des intensités du courant, capables d'amener à la même température finale des fils de diamètres différents. L'exactitude de cette formule est confirmée par des essais. L'équation complète de la transmission de chaleur est résolue graphiquement, pour le rayonnement de plaques et de fils homogènes. Enfin, l'auteur traite du régime intermittent et du refroidissement.

wo C_s die Strahlungskonstante = 5,77 W/m² (°K)⁴, T die absolute Temperatur in Grad Kelvin und e eine Materialkonstante darstellt, die experimentell gefunden ist.

$$e = 0,1 \quad (2)$$

für Konstantan, Kupfer, Messing etc., gezogen oder gewalzt. A ist die Strahlungsfläche in m^2 . Bei der Festlegung der Strahlungsfläche müssen die Flächen ausgeschieden werden, die sich gegenseitig bestrahlen. Die auszuscheidenden Flächen sind um so grösser, je enger der Draht gewickelt ist. Für geradlinig ausgespannte Drähte ist also die Strahlungsfläche

$$A_{ger} = 2 \pi r l \quad (3)$$

r Drahtradius, l Drahtlänge, $d = 2r$.

Für Locken mit einer Steigung $C = h/n$, wo h die Lockenhöhe, n die Windungszahl bedeutet, gilt nach Fig. 1 (angenähert, da ein kleiner Zwischenraum zwischen den Windungen vorhanden sein muss), folgendes:

Die Länge der Locke ist

$$l = \sqrt{(D-d)^2 + h^2/\pi^2 n^2} \pi n \quad (4)$$

wo D der Lockendurchmesser ist.

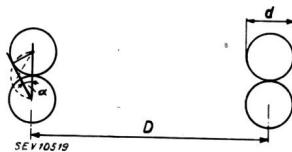


Fig. 1.
Drahtlocke eng gewickelt

Die Innenflächen bestrahlen sich gegenseitig, zum Teil jedoch auch die Außenflächen, und zwar nach Fig. 1 die Bögen von $2 \times 30^\circ$, da

$$\alpha = \frac{\pi}{6} \quad (5)$$

Die Strahlungsaussenfläche beträgt also

$$A = 1,05 ld \quad (6)$$

Eine Locke mit der Steigung $C = h/n = md$ und dem Durchmesser D hat folgende Strahlungsfläche:

$$A = A_{Innen} + A_{Aussen} \quad (7)$$

Die Strahlungsinnenfläche errechnet sich aus Fig. 2 zu:

$$A_{Innen} = \frac{ld [\pi - 2\alpha - 4(\gamma + \varepsilon + \zeta \dots)]}{2 \cdot \pi} \quad (8)$$

und es ergibt sich:

$$\sin \gamma = \frac{d}{2 \sqrt{D^2 + (md/2)^2}} \quad (9a)$$

$$\sin \varepsilon = \frac{d}{2 \sqrt{D^2 + [(m+2)d/2]^2}} \quad (9b)$$

$$\sin \zeta = \frac{d}{2 \sqrt{D^2 + [(m+4)d/2]^2}} \quad (9c)$$

$$\sin \alpha = \frac{1}{2m} \quad (9d)$$

Die Strahlungsaussenfläche ist nach Fig. 2

$$A_{Aussen} = \frac{(\pi - 2\alpha) ld}{2} \quad (10)$$

(α im Bogenmass)

$$\sin \alpha = 1/2 m \quad (11)$$

wie bei der Strahlungsinnenfläche.

Für eine Locke mit den Abmessungen $d = 2,5 \text{ mm}$; $h = 300 \text{ mm}$; $n = 20$; $D = 20 \text{ mm}$; $m = 6$ ergibt sich danach $A = 1,75 ld = 79 \text{ cm}^2$. Die durch Strah-

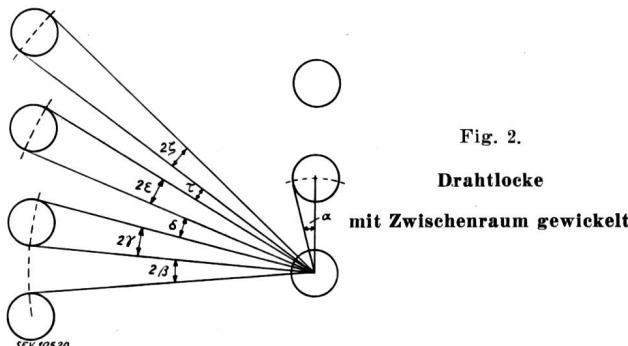


Fig. 2.
Drahtlocke
mit Zwischenraum gewickelt

lung abgegebene Wärme pro cm Länge und Sekunde beträgt bei 20°C Raumtemperatur bei dieser Locke in freier Luft:

Tabelle I.

| ϑ $^\circ \text{C}$ | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| $P_{str} \text{W/cm}$ | 0,005 | 0,013 | 0,028 | 0,051 | 0,09 | 0,145 |

Bei Drähten, die in eng begrenzten Räumen untergebracht werden, ist mit einer durchschnittlichen Strahlungskonstante zu rechnen¹⁾.

b) Konvektion und Wärmeleitung

Am Draht haftet eine dünne Luftsicht. In dieser findet allein Wärmeleitung statt, da durch die Adhäsionskräfte eine Bewegung der Luftteilchen verhindert wird. Die Dicke dieser Luftsicht berechnet sich nach der Formel von Langmuir²⁾. An ihrer Grenze beginnt die Turbulenz. Man kann sich auf die Betrachtung der Grenzschicht beschränken. Das Problem des Wärmeüberganges durch Leitung und Konvektion wird zum reinen Wärmeleitungsproblem.

Bezeichnet man mit λ die Wärmeleitfähigkeit, mit B die Grenzschichtdicke einer ebenen Platte, so gilt im stationären Zustand für die pro cm Länge durch Leitung und Konvektion abgegebene Wärme folgende Gleichung:

$$P_{LK} = P_{Zugef} - P_{Str} = \frac{s}{B} \int_{T_1}^{T_2} \lambda dT \quad (12)$$

Bezeichnet man mit φ_1 und φ_2 die Integralfunktionen, so gilt nach Langmuir:

$$P_{LK} = s/B (\varphi_2 - \varphi_1) \quad (13)$$

Anderseits gilt nach Langmuir, wenn s die Fläche in der Entfernung x , in der Wärmeleitung stattfindet, bezeichnet und aus der bekannten Gleichung der Wärmeleitung:

$$P_{LK} \text{ (für die gesamte Länge)} = \frac{\int \lambda dT}{\int \frac{dx}{s}} \quad (14)$$

¹⁾ S. z. B. Hütte Bd. 1. Ausg. 1941, S. 600.

²⁾ Phys. Review 1912.

Für einen Draht erhält man nun

$$s = 2 \pi l x \quad (15)$$

und in Verbindung mit Gleichung 12 ergibt dies:

$$P_{LK} = \frac{\int \lambda dT}{\ln \frac{b}{d}} = \frac{2 \pi l}{\ln b/d} \int \lambda dT \quad (16)$$

$$s = \frac{2 \pi}{\ln b/d} \quad (17)$$

Durch Vergleich der Formeln für die ebene Platte und den runden Draht kann man folgendes Verhältnis finden:

x Entfernung einer Isotherme von der Platte;
 r Entfernung einer Isotherme vom Drahtmittelpunkt.
Der Temperaturgradient ist unabhängig vom Durchmesser; also gilt innerhalb des Films

$$dr = \frac{r}{b/2} dx; \quad \int_a^b \frac{dr}{r} = \int_0^B \frac{dx}{b} \cdot 2 \quad (18)$$

$$\ln b/d = 2 B/d \quad (19)$$

durch Vergleich mit Gleichung 13 ergibt sich nach Langmuir folgende Gleichung:

$$d/B = \frac{s}{\pi} e^{-\frac{2\pi}{s}} \quad (19)$$

Die Versuche sind sehr sorgfältig auszuführen, da kleine Fehlmessungen schon ziemlich starke Veränderungen von B hervorrufen.

Tabelle II.

| d mm | T $^{\circ}\text{K}$ | $I^2 R = (P)$ W | $\varphi_2 - \varphi_1$ | s | d/B | B mm | Versuch |
|-----------|---------------------------|--------------------|-------------------------|-----|-------|-----------|---------------------|
| 2,5 | 373 | 0,21 | 0,021 | 10 | 1,69 | 1,5 | Schmöle Metallwerke |
| 2,5 | 573 | 0,72 | 0,089 | 8 | 1,19 | 2,1 | |
| 1 | 373 | 0,10 | 0,021 | 4,9 | 0,44 | 2,3 | |
| 2,5 | 528 | 0,68 | 0,071 | 9,5 | 1,56 | 1,6 | |
| 2,2 | 395 | 0,29 | 0,029 | 10 | 1,69 | 1,3 | Verfasser |
| 1,8 | 443 | 0,42 | 0,044 | 9,4 | 1,54 | 1,2 | |

Der Durchschnitt ist also $B = 1,7$ mm (abweichend von Langmuir). Die Filmschichtdicke eines Drahtes errechnet sich nach Formel 19 in freier Luft wie folgt:

Tabelle III.

| d | 0,5 | 1 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 mm |
|-----|------|------|------|------|------|---------|
| b | 2,25 | 3,05 | 3,70 | 4,35 | 4,95 | 5,55 mm |

Als Näherungsformel kann auf Grund dieser Tabelle gesetzt werden für Drähte zwischen 0,5 und 3,0 mm in freier Luft:

$$b = 1,6 + 1,3 d \text{ mm} \quad (20)$$

während man für Drähte mit grossem Durchmesser dieselbe Formel wie für Platten verwenden kann:

$$b - d = 2 B \quad (21)$$

Es ergibt sich für den unter a) in seinen Abmessungen gekennzeichneten Draht nach Gleichung 16 für durch Leitung und Konvektion abgegebene Wärme:

Tabelle IV.

| ϑ $^{\circ}\text{C}$ | λ (Watt/cm $^{\circ}\text{K}$) | λ_{med} (Watt/cm $^{\circ}\text{K}$) | abgeg. Wärme (Watt/cm) |
|-----------------------------------|--|--|---------------------------|
| 20 | 0,000256 | 0,000256 | — |
| 100 | 0,000310 | 0,000283 | 0,24 |
| 200 | 0,000368 | 0,000310 | 0,55 |
| 300 | 0,000425 | 0,000340 | 0,95 |
| 400 | 0,000480 | 0,000368 | 1,35 |
| 500 | 0,000535 | 0,000395 | 1,86 |
| 600 | 0,000585 | 0,000420 | 2,45 |

Durch Vergleich dieser Werte mit denen für die Strahlung (Tabelle I) ergibt sich, dass bei Temperaturen bis zu ca. 600°C die Verluste durch Strahlung neben denen durch Leitung und Konvektion vernachlässigt werden können. Für die Wärmeleitzahl λ der Luft kann im Bereich von Temperaturen zwischen 20°C und 800°C näherungsweise gesetzt werden:

$$\lambda = \lambda_{20} \left(1 + 0,24 \frac{T - T_0}{100} \right) \quad (22)$$

wo λ_{20} die Wärmeleitfähigkeit bei Zimmertemperatur ist (20°C). Man kann bei einer anderen Umgebungstemperatur T_0 auch von einem anderen λ_0 ausgehen.

Allgemein gilt folgende Gleichung:

Zugef. Wärme = Wärme z. Tempe- + drch. Leitg. u. Konv. + drch. Str. raturerhöhung abgeg. Wärme abg. Wärme

$$I^2 R dt = c G dT + dP_{LK} + P_{Str} dt \quad (23)$$

c spez. Wärme (für Konstantan = 400 Ws/kg $^{\circ}\text{C}$),
G Gewicht (kg)

$$dP_{LK} = \frac{2\pi l}{\ln \frac{b}{d}} dt \int_{T_0}^T \lambda dT = \frac{2\pi l}{\ln \frac{b}{d}} dt (T - T_0) \lambda_{med} = \\ = \frac{2\pi l}{\ln \frac{b}{d}} dt \lambda_0 (T - T_0) \left(1 + 0,24 \frac{T + T_0 - 546}{200} \right) \quad (24)$$

Die hier angegebene Bestimmung des Mittelwertes von λ ist zulässig, da λ eine lineare Funktion von T ist.

Für ebene Platten oder Drähte mit grossem Durchmesser gilt entsprechend:

$$dP_{LK} = \frac{O}{B} \lambda_0 dt (T - T_0) \left[1 + \frac{0,24}{200} (T + T_0 - 546) \right] \quad (25)$$

Hierbei ist O die Oberfläche des Körpers.
 P_{Str} errechnet sich nach Formel 1.

Die Differentialgleichung 23 hat unter Berücksichtigung von 24 für einen Draht folgendes Lösungsintegral:

$$t = \int_{\tau_0}^{\tau} \frac{c G d \tau}{I^2 R - \frac{2 \pi l}{\ln \frac{b}{d}} \lambda_0 \left(1 + 0,24 \frac{\tau + \tau_0}{200}\right) (\tau - \tau_0)} \quad (26)$$

τ Temperatur in °C.

Wählt man die Umgebungstemperatur zum Nullpunkt, $\tau_0 = 0$, dann erhält man:

$$t = \frac{c G}{2 \pi l \lambda_0} \int_{\tau_0}^{\tau} \frac{d \tau}{\frac{I^2 R \ln b/d}{\ln b/d} - \tau - 0,0012 \tau^2} \quad (27)$$

Bezeichnet man nun mit:

$$N = - \frac{\lambda_0^2 \pi l M}{c G \ln \frac{b}{d}} \quad (28)$$

$$M = \sqrt{\frac{I^2 R}{2 \pi l \lambda_0} \frac{0,0012 \ln b/d}{\ln b/d} + \frac{1}{4}} \quad (29)$$

dann ergibt sich, wenn man sich den Nenner des Integrals 27 von der Form $a + 2ax + cx^2$ denkt, da $ac - b^2$ immer kleiner als 0 ist (b^2 ist stets positiv, a ebenfalls, c dagegen stets negativ),

$$t = \frac{1}{N} \operatorname{Arctg} \frac{-0,5 - 0,0012 \tau}{M} + C \quad (30)$$

$$-0,5 - M \operatorname{Arctg} N (t - C) = 0,0012 \tau \quad (31)$$

für $\tau = 0$ gilt $t = 0$, daher

$$C = \frac{1}{N} \operatorname{Arctg} \frac{1}{2M} = \frac{P}{N} \quad (32)$$

$$Nt - P = \operatorname{Arctg} \frac{-0,5 - 0,0012 \tau}{M} \quad (33)$$

$$\tau = 833 [-0,5 - M \operatorname{Arctg} (Nt - P)] \quad (34)$$

Für $\tau = \infty$ erhält man:

$$\tau_{max} = -416,5 + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{I^2 R}{\lambda_0 2 \pi l} \frac{0,0012 \ln b/d}{\ln b/d}} 833 \quad (35)$$

In ähnlicher Weise errechnet sich die Maximaltemperatur und der Temperaturverlauf einer ebenen Platte, man muss nur in M und N an Stelle $\ln b/d$ die Grösse B/O einsetzen,

$$\frac{2 \pi l}{2 \pi l}$$

$$\tau_{max} = -416,5 + 833 \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{0,0012 I^2 R B}{\lambda_0 O}} \quad (36)$$

An Stelle der Formeln 35 und 36 kann auch mit den Durchschnittsleitfähigkeiten gerechnet werden, und man erhält für die Platte:

$$\frac{I^2 R B}{O \lambda_{med}} = \tau_{max} \quad (37)$$

Diese Formel stimmt mit der bekannten Formel überein, die sich aus der Annahme einer von der

Temperatur unabhängigen konstanten Wärmeabgabeziffer a ergibt. Die physikalische Bedeutung der Grösse λ_{med}/B ist aber hier eine ganz andere als die von a . Sie ergibt sich hier aus rein geometrischen Bedingungen und gilt daher nicht für Drähte. Die Grösse λ_{med}/B ist auch von der Temperatur abhängig. Sie ist eine gute physikalische Erklärung der früher so viel verwandten und schlecht erklärten Wärmeabgabeziffer. In freier Luft gilt:

Tabelle V.

| Uebertemperatur: a (W/m ² °C) . . | 35° C | 60° C | 80° C | 130° C | 180° C |
|---|-------|-------|-------|--------|--------|
| | 15 | 15,5 | 16 | 16,7 | 17,6 |

Die Grenzschichtdicke beträgt nach Versuchen des Verfassers in einem Kasten aus gelochtem Blech, mit Löchern von $0,8 \times 0,8$ cm und Blechzwischenräumen von 0,4 cm und den Gesamtmasse von $8,2 \times 8,2 \times 34,2$ cm³ bei 1 mm Blechstärke, oben und unten mit Schiefer abgedeckt, 0,30 cm. In einem ebensolchen und in gleicher Weise abgedeckten Kasten aus Vollblech von 1 mm Blechstärke war sie 0,6 cm.

Wenn der Durchmesser einer Spirale gegenüber dem Drahtdurchmesser gross ist, oder die Steigung C/n viel grösser als b , so spielt die spiralförmige Aufhängung keine Rolle. Bei einer Wicklung mit geringer Steigung liegen die Filme eines Drahtes zweier Windungen ganz oder teilweise ineinander; die Temperatur steigt dann. Man muss bei einer solchen Anordnung eine Durchschnittsfilmischichtdicke empirisch ermitteln. Dieser kommt allerdings mehr die Bedeutung eines rechnerischen Hilfsmittels zu aber nicht die der wirklich vorhandenen Grenzschicht eines frei aufgehängten Drahtes oder eines solchen mit grosser Steigung.

Die Filmschichtdicke B beträgt bei einem normalen Anlasser in gelochtem Blech etwa 0,2 bis 0,25 cm und in einem solchen aus Vollblech etwa 0,4 bis 0,5 cm.

Auch die Formel 35 lässt sich entsprechend vereinfachen, wenn man mit den Durchschnittsleitfähigkeiten rechnet.

$$\tau_{max} = \frac{I^2 R \ln b/d}{2 \pi l \lambda_{mittel}} \quad (38)$$

Für das Verhältnis der Stromstärken, die in Drähten von verschiedenen Durchmessern die gleiche Endtemperatur hervorbringen, ergibt sich:

$$\frac{I_1^2}{I_2^2} = \frac{d_1^2 \ln b_2/d_2}{d_2^2 \ln b_1/d_1} \quad (39)$$

Versuchsergebnisse, die teilweise der Verfasser und teilweise die Firma Schmöle Metallwerke, Berlin, erzielt haben, zeigen folgendes Bild:

Tabelle VI.

| d | 1 | 2 | 3 | 0,5 | 1,8 | 2,5 | mm Durchmesser |
|---|-----|------|------|-----|------|------|------------------------|
| I | 4,0 | 10,5 | 19,0 | 1,6 | | | A bei 80° C Uebertemp. |
| I | | | | | 15,0 | | A " 150° C " |
| I | | | | | | 15,0 | A " 235° C " |
| I | 5,7 | 14,5 | 26,5 | 2,3 | | | A " 180° C " |
| I | 7,5 | 19,0 | 33,0 | 3,0 | | | A " 280° C " |

Aus der Rechnung ergibt sich:

Tabelle VII.

| d | 1 | 2 | 3 | 0,5 | 1,8 | 2,5 | mm Durchmesser |
|---|-----|------|------|-----|-----|------|------------------------|
| I | 4,2 | 10,3 | 17,7 | 1,8 | | 12,8 | A bei 80° C Uebertemp. |
| I | | | | | | 14 | A " 150° C " |
| I | | | | | | | A " 235° C " |
| I | 6,5 | 15,8 | 27,4 | 2,8 | | | A " 180° C " |
| I | 8,5 | 20,4 | 36,5 | 3,6 | | | A " 280° C " |

Entsprechende Tabellen (III) lassen sich auch für andere Kühlungsarten als in freier Luft aufstellen:

Für $B = 0,25$ cm:

Tabelle VIII

| d | 0,5 | 1 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 mm |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|--------|
| b | 2,8 | 3,7 | 4,5 | 5,2 | 5,9 | 6,4 mm |

Angenähert gilt demnach im Bereich zwischen $d = 0,5$ und $d = 3$ mm:

$$b = 2,1 + 1,4 d \quad (40)$$

und für $B = 0,45$ cm:

Tabelle IX

| d | 0,5 | 1 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 mm |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|--------|
| b | 4,2 | 5,3 | 6,2 | 7,0 | 7,9 | 8,6 mm |

Angenähert gilt daher im Bereich zwischen 0,5 und 3 mm Durchmesser:

$$b = 3,4 + 1,7 d \quad (41)$$

c) Vollständige Behandlung des Erwärmungsproblems eines homogenen Drahtes und einer ebenen Platte

Das Integral der Gleichung 23 unter Berücksichtigung von P_{Str} lautet:

$$t = \int_{T_0}^T \frac{c G d T}{I^2 R - \frac{2 l \pi}{\ln b/d} \lambda_0 [1 + 0,0012 (T + T_0 - 546) (T - T_0)] + e C_s \frac{A}{100^4} (T_0^4 - T^4)} \quad (42)$$

Die exakte Auflösung dieses Integrals durch Partialbruchzerlegung ist zu umständlich. Zweckmäßig wird die Lösung graphisch durchgeführt. Man führt folgende Größen ein:

$$U = I^2 R + 2 \frac{l \pi}{\ln b/d} \lambda_0 (T_0 + 0,0012 T_0^2 + 0,65 T_0) + e C_s A \frac{T_0^4}{10^8} \quad (43)$$

$$V = - \frac{2 \pi l}{\ln b/d} \lambda_0 0,35 \quad (44)$$

$$W = - 0,0012 \frac{2 \pi l}{\ln b/d} \lambda_0 \quad (45)$$

$$X = - e C_s A \cdot 10^{-8} \quad (46)$$

und man erhält:

$$t = c G \int_{T_0}^T \frac{dT}{U + VT + WT^2 + XT^4} = c G \int_{T_0}^T \frac{dT}{\varphi(T)} \quad (47)$$

Durch Annahme verschiedener Werte von T wird eine Kurve $\varphi(T)$ gewonnen. Für den Wert $\varphi(T) = 0$, das heißt $U = VT + WT^2 + XT^4$ ist die zugeführte = der abgeführten Wärme. Dieser Wert gibt die Maximaltemperatur, bei der der Beharrungszustand herrscht, an. Soll die ganze Erwärmungskurve bestimmt werden, so bilde man nun zwischen den Grenzen des Integrals 47 die Funktion $1/\varphi(T)$, integriere diese Kurve und multipliziere das Integral mit cG (Fig. 3).

Ein Beispiel soll dies erläutern:

Für die im Abschnitt «Strahlung» beschriebene Locke ergeben sich für einen Strom von 32 A:

$$U = 267 \text{ W}, V = -0,132 \text{ W}/\text{K}, W = -0,046 \text{ W}/\text{K}^2, X = -4,5 \cdot 10^{-11} \text{ W}/\text{K}^4.$$

Tabelle X

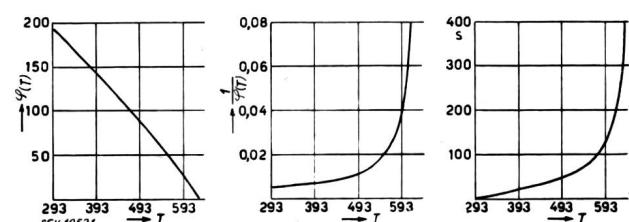
| T | VT | WT ² | XT ⁴ | $\varphi(T)$ | $\frac{10}{\varphi(T)}$ | Sekunden |
|-----|------|-----------------|-----------------|---------------------------|-------------------------|----------|
| 293 | 39 | 39,5 | 0,5 | 188 | 0,05 | - |
| 343 | 45 | 53 | 0,5 | 168 | 0,06 | 9,3 |
| 393 | 52 | 71 | 1,0 | 143 | 0,07 | 19,3 |
| 443 | 58 | 90 | 1,5 | 117 | 0,08 | 31 |
| 493 | 65 | 111 | 2,5 | 90 | 0,11 | 45,5 |
| 543 | 72 | 157 | 3,5 | 54 | 0,19 | 68,5 |
| 593 | 78 | 160 | 5,5 | 24 | 0,41 | 115 |
| 630 | 81,5 | 174 | 6,5 | 1 | 10 | 175 |
| 643 | 82 | 188 | 7,0 | -10 über Höchsttemperatur | | |

Die Höchsttemperatur liegt bei 631° K.

Zum Vergleich sei das Versuchsergebnis des Verfassers herangezogen:

| Sekunden: | 30 | 45 | 60 | 75 | 90 | 120 | 150 | 180 | 210 | 240 | 270 |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Ueb'temp.: | 112 | 162 | 211 | 242 | 277 | 303 | 329 | 335 | 347 | 353 | 353 |

Die Übereinstimmung zwischen der errechneten und gemessenen Kurve ist sehr gut.



Beispiel der rechnerischen Ermittlung der Erwärmungskurve

d) Abkühlung und intermittierender Betrieb

In der Gleichung 23 ist $I^2 R = 0$ zu setzen. Unter Vernachlässigung der Strahlung ergibt sich dann:

$$t = \frac{cG}{2\pi l \lambda_0} \int_{\tau_{max}}^0 \frac{d\tau}{(1 + 0,0012 \tau) \tau} \quad (48)$$

$$t = \frac{cG \ln b/d}{2\pi l \lambda_0} \frac{1}{2} \operatorname{Ar} \operatorname{Tg}(1 + \tau) + C \quad (49)$$

Da für $t = 0$ $\tau = \tau_{max}$ wird:

$$t = \frac{cG \ln b/d}{2\pi l \lambda_0} \frac{1}{2} [\operatorname{Ar} \operatorname{Tg}(1 + \tau) - \operatorname{Ar} \operatorname{Tg}(1 + \tau_{max})]$$

Unter Berücksichtigung der Strahlung gilt auch hier die Formel 42, jedoch ist zu beachten, dass $I^2R = 0$ und für $t = 0$ $\tau = \tau_{max}$. Für $T = T_0$ wird $\varphi(T) = 0$ und damit das Integral 42 = ∞. Die Konstruktion der Abkühlungskurve erfolgt in gleicher Weise wie die Konstruktion der Erwärmungskurve.

Die Bestimmung der Erwärmung bei intermittierendem Betrieb erfolgt in folgender Weise am einfachsten:

Man fertigt eine Schablone der Erwärmungskurve für die Stromstärke, mit der der Draht oder die Platte erwärmt wird, an. Dann zeichnet man die Erwärmungskurve für die erste Einschaltzeit t_1 bis zur Temperatur τ_1 , sodann berechnet man die Abkühlungskurve bis zu t_2 und erhält τ_2 . Man verschiebt dann die Erwärmungsschablone längs der t -Achse, bis sie das Abkühlungskurvenstück in dem Punkt $t_2 \tau_2$ schneidet und geht längs der Erwärmungskurve bis zum Punkt $t_3 \tau_3$; das Verfahren wird fortgesetzt, bis Beharrungszustand eintritt.

Berichtigung

10 Jahre Doppelwendellampen für allgemeine Beleuchtungszwecke

Von W. Geiss, Eindhoven

Bulletin SEV 1943, Nr. 11, S. 316

Auf Seite 317, Spalte rechts, sind die untersten 8 Zeilen und die Fussnote ¹²⁾ und auf Seite 318, Spalte links, die obersten 4 Zeilen zu streichen.

Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

Erhöhung der Energieproduktion der Werke der Société romande d'électricité

[Nach P. Payot, Bull. techn. Suisse rom., Bd. 69 (1943), Nr. 9] 621.311(494)

Die Société romande d'électricité (SRE) hat in den letzten Jahren Massnahmen getroffen, um die Energieproduktion zu erhöhen. Die ausgeführten Arbeiten gestatten, rund 1,7 Mill. kWh im Winter und 4,5 Mill. kWh im Sommer, d. h. total rund 6 Mill. kWh im Jahr, mehr zu erzeugen.

Wir erwähnen die Änderung der Wasserfassung im Lac Tanay, dessen Inhalt 2 Mill. m³ beträgt, entsprechend einer Energieproduktion von rund 3,5 Mill. kWh. Der Stollen, der die Wasserfassung mit der Zuleitung zum Wasserschloss verbindet, wurde im Jahre 1934 durch einen neuen, tieferliegenden Stollen ersetzt. Dadurch kann der Spiegel des Stausees um 4 m tiefer abgesenkt werden, entsprechend rund 400 000 kWh zusätzlicher Winterenergie. Die Höhendifferenz zwischen dem höchsten und dem tiefsten Stand des Seespiegels beträgt jetzt 22 m.

Im Kraftwerk Vouvy, welches das Wasser des Lac Tanay mit 920 m Gefälle ausnützt, wurden in den Jahren 1940 und 1941 zwei Turbinen, die 1905 und 1907 montiert worden waren, ersetzt. Die Verbesserung des Wirkungsgrades, die der Ersatz der alten Turbinen durch Peltonräder brachte, gestattete bei gleicher Wassermenge eine Leistungserhöhung von 1500 auf 1850 kW. Die Generatoren waren früher überdimensioniert, so dass sie die erhöhte Leistung der neuen Turbinen aufnehmen können.

Das Kraftwerk Farettes oberhalb Aigle wird durch die Grande-Eau gespiesen, welche bei Pont de la Tine gestaut wird. Die ausgenutzte Wassermenge betrug bis zum Jahre 1941 nur 2 m³/s bei einem Gefälle von 350 m. Zuleitungsstollen und Druckleitung hätten allerdings fast auf der ganzen Länge eine grösste Wassermenge von 2,5 m³/s gestattet.

Zwei Engpässe der Wasserzuleitung wurden 1941 beseitigt. Aus der Erhöhung der Wassermenge auf 2,5 m³/s resultiert eine Leistungserhöhung um rund 1000 kW. Die Wasserführung der Grande-Eau beträgt jährlich während etwa 6 Monaten mehr als 2,5 m³/s. Da die hydraulischen Anlagen von 2,0 m³/s auf 2,5 m³/s erweitert wurden, beträgt der Gewinn rund 4 Mill. kWh im Jahr. Im Winter wird der Grande-Eau Wasser aus dem Lac d'Arnon zugeleitet.

Der Lac d'Arnon liegt auf dem Gebiet der Gemeinde Gsteig im Kanton Bern und gehört der SRE. Sein Wasser fliesst normalerweise (im Sommer) in die Saane. Im Winter dagegen wird es durch einen 4,5 km langen Stollen der

Grande-Eau zugeleitet und dort bei 600 m Gefälle ausgenutzt: 250 m Gefälle hat das Kraftwerk Pont de la Tine und 350 m Gefälle werden im Kraftwerk Farettes ausgenutzt.

Die Wasserfassung liegt 1508 m über Meer. Der natürliche Abfluss dieses Sees ist der Tscherzisbach, der den Seespiegel normalerweise auf 1532,6 m hält. Der Seespiegel kann also bis zur Wasserfassung auf 1508 m um 24,6 m gesenkt werden. Die ausgeführten Arbeiten erlaubten, den Seespiegel bis auf 1534 m zu heben, wodurch der nützliche Seeinhalt von 6 auf 6,6 Mill. m³ und die entsprechende Energiemenge von 7,2 auf 8 Mill. kWh stieg. Gz.

Trockenkonservierung von Obst und Gemüse

664.8.047

Dem Bericht der Kommission für Trockenkonservierung des Eidg. Kriegernährungsamtes über das Jahr 1942 entnehmen wir folgende Angaben:

«Der technische Ausschuss hat es als notwendig erachtet, eine Anzahl Dörrapparate im praktischen Betrieb einer Leistungsprüfung zu unterziehen. Es sind in den Kantonen Aargau, Bern, Luzern, St. Gallen und Zürich 14 elektrisch und 2 mit Holz geheizte Dörröfen mit 5...30 m² Hurdenfläche geprüft worden, wobei in den meisten Fällen sowohl ein Bohnen-, als auch ein Birnenversuch durchgeführt wurde. Die Versuchsergebnisse, insbesondere die Zahlen über die Menge des pro m² Hurdenfläche verdampften Wassers und der benötigten kWh pro kg verdampften Wassers, haben beträchtliche Unterschiede zwischen den einzelnen Fabrikaten ergeben.

Bei den Kleinapparaten bis zu 5 m² Hurdenfläche hat es sich gezeigt, dass sie im allgemeinen schlecht isoliert sind. Auch wird der Regulierung der Abluft zu wenig Beachtung geschenkt. Es ist zu wünschen, dass bei Neukonstruktionen dem Energieverbrauch dieser Apparate vermehrte Aufmerksamkeit gewidmet wird.»

Eine Umfrage bei den kantonalen Beratungsstellen für Trockenkonservierung ergab, dass die Energiepreise für Dörrbetriebe 3...9 Rp./kWh betragen.

In Tabelle I sind die Dörrapparate und -anlagen mit Hurdenflächen über 5 m² zusammengestellt. Ende 1942 betrug ihre Gesamtzahl 962 Stück oder 52 % mehr als am Ende des Vorjahres. Fast die Hälfte der Apparate, nämlich 474 Stück, sind in den Kantonen Zürich (150), Bern (103), St. Gallen (105) und Aargau (116) aufgestellt. Der Kanton Zürich steht mit 116 Dörrapparaten von 5...30 m² Hurdenfläche weit