Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 30 (1939)

Heft: 6

Artikel: Ueber die Selbstregelung von Widerstandsöfen für hohe Temperaturen (Startit-Oefen)

Autor: Engel, A. von

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1060814

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: 14.12.2025

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

Das Verhalten des Schalters während der Lastschaltung wurde praktisch folgendermassen untersucht:

1. Messung der Spannungen, Belastungsströme und Wirkleistungen mit Präzisionsinstrumenten in allen drei Phasen an den Klemmen des Prüfobjektes kurz vor der Abschaltung.
2. Oszillographische Aufnahme des Abschaltvorganges, d. h. des zeitlichen Verlaufes des Belastungsstromes und der Spannung zwischen den Trennkontakten.
3. Photographische Aufnahme des Lichtbogen-Lichteffektes mit einer normalen Photokamera.

Die Versuch und Messresultate sind in Fig. 3 bis 10 zusammengestellt.

Die oszillographischen Aufnahmen zeigen als wesentliches Ergebnis:

a) Das Löschen des Lichtbogens erfolgt bei Abschaltleistungen bis 3000 kW stets innerhalb einer halben Periode (0,01 s). Dabei betrug die maximal erreichte Lichtbogenlänge ca. 7 mm.

b) Bei Abschaltleistungen von ca. 4000 kW erstreckt sich der Lichtbogen im betrachteten Fall über $1^1/_2$ Perioden (0,03 s), entsprechend einer maximalen Lichtbogenlänge von ca. 20 mm.

Die Abschaltlichtbogen weisen auch bei der grössten untersuchten Stromlast von 400 A bei 6000 V keine Tendenz zum Abirren auf. Die Schmelzspuren der Lichtbogen-Ansatzstellen zeigten keine abnormale Form und Ausdehnung.

Ueber die Selbstregelung von Widerstandsöfen für hohe Temperaturen (Stratit-Oefen).

Von *A. von Engel*, Berlin.

621.365.4.036 9

Es wird gezeigt, dass bei Verwendung von Stoffen mit positivem Temperaturkoeffizienten des elektrischen Widerstandes für Heizleiter eine Selbstregelung der Ofentemperatur in einem gewissen Umfange erfolgt, verglichen mit einem Stoff konstanten Widerstandes. Die prozentualen Temperaturschwankungen sind aber nur dann geringer als die Netzspannungsschwankungen, wenn die induktiven Spannungsabfälle im Ofenkreis ein bestimmtes Mass unterschreiten. Aehnliche günstige Verhältnisse ergeben sich bei wechselnder thermischer Belastung des Ofens. Von der Neigung der Widerstandstemperatur-Linie ist die Selbstregeleigenschaft praktisch wenig abhängig.

Die Selbstregelung wird als Ersatz für eine Grobregelung in vielen Fällen einen besonderen Temperaturregler überflüssig machen. Aber auch dann, wenn ein Temperaturfeinregler nötig wird, sind weniger umfangreiche Regelschaltungen hier erforderlich, da die ohne Regler auftretenden Temperaturschwankungen bereits kleiner sind.

L'auteur montre que, lorsqu'on utilise des matières à coefficient de température positif de la résistivité électrique pour les conducteurs de chauffe, il se produit, dans une certaine mesure, une autorégulation de la température du four, par rapport aux matières à résistivité constante. Les variations relatives de la température ne sont cependant inférieures aux variations de la tension du réseau que si les chutes de tension inductives dans le circuit du four restent inférieures à une certaine valeur. Une situation favorable analogue se reproduit lorsque c'est la charge thermique du four qui est variable. La propriété d'auto-régulation est pratiquement indépendante de l'inclinaison de la courbe de résistivité en fonction de la température.

Dans bien des cas de réglage grossier l'auto-régulation peut remplacer un thermostat spécial. Mais même lorsqu'un réglage fin par thermostat est nécessaire, l'auto-régulation diminue le nombre et l'importance des écarts à compenser, car les variations de température qui se produiraient sans thermostat sont plus faibles en elles-mêmes.

1. Entwicklung von Hochtemperaturöfen und ihre Temperaturschwankungen.

In jüngster Zeit wurde die Entwicklung elektrischer Widerstandsöfen vorzugsweise nach vier Richtungen hin vorwärtsgetrieben: angestrebt wurde einmal eine Steigerung der Ofentemperatur oder — was damit eng verknüpft ist — eine Erhöhung der Lebensdauer der Heizelemente bei hoher Temperatur, weiterhin der Fortfall von Umwandlungen im Heizelement (Alterung) sowie von chemischen Wechselwirkungen zwischen Glühgut und Heizelement und endlich die Unempfindlichkeit der Heizkörper gegenüber Einwirkungen gewisser, bisher gemiedener und gefürchteter Gase und Dämpfe wie Sauerstoff, Schwefel, Ammoniak usw.

Die neuen Heizelemente, welche diesen Forderungen gewachsen sind, bestehen im wesentlichen aus Molybdänstäben, die in Röhren aus Aluminium-Silikat-Keramiken mit grossem Abstrahlungsvermögen vakuumdicht eingeschlossen sind. Sie heissen «Stratit»-Heizelemente. Die wassergekühlten Stabenden sind so ausgeführt, dass trotz der erheblichen thermischen Ausdehnungen merkliche Wärmespannungen in der Keramik nicht auftreten.

Mit solchen Elementen wurden eine Reihe von einphasigen Einkammer-Oefen für etwa 5 kW Nennleistung versehen. Sie wurden zum Teil dauernd, zum Teil aussetzend, einige tausend Stunden betrieben und dabei sorgfältig vermessen. Die Ofenraumtemperatur betrug hierbei 1500...1600° C (Farbtemperatur); die Muffel war in den meisten Fällen luftgefüllt. Auch die Versuche, die an anderen Stellen [1]) mit verschiedenen Gasen und Dämpfen ausgeführt wurden, bewiesen die Widerstandsfähigkeit der Stratit-Heizelemente.

Bei der Erprobung des neuen Heizsystems trat u. a. die Frage der Temperaturregelung in einer von der üblichen etwas abweichenden Form auf. Es zeigte sich nämlich, dass unter gewissen Bedingungen im stationären Betrieb Schwankungen der Netzspannung relativ geringe Aenderungen der Ofentemperatur auslösten. Qualitativ lässt sich diese Erscheinung so verstehen, dass eine Erhöhung der Netzspannung bei (angenommen) festem Widerstand durch das gleichzeitige Ansteigen des Widerstandes infolge des positiven Temperatur-Koeffizienten des Molybdäns eine Verrringerung der ursprünglich vergrösserten Leistung erfolgt. Man ist also berechtigt, in einem gewissen Umfange hier von einer Selbstregelung der Temperatur zu sprechen. Prinzipiell verbleibt natürlich bei Aenderungen der Ofenspannung eine Temperaturänderung, deren Grösse für verschiedene einfache Schaltungen in der folgenden Arbeit bestimmt werden soll. Weiterhin soll untersucht werden, wie sich eine Aenderung

[1]) W. Trinks, Industrial Heating Bd. 5 (1938), S. 74.

der thermischen Belastung solcher Oefen auf ihre Temperatur auswirkt. Eine Betrachtung der Regelverfahren zur Verminderung der restlichen Temperaturabweichungen, über die zahlreiche andere Untersuchungen vorliegen [2]), soll hier unterbleiben.

2. Temperatur-Aenderungen durch Spannungsschwankungen des Netzes bei Heizelementen mit positivem Temperatur-Koeffizienten des elektrischen Widerstandes.

Den folgenden Ueberlegungen liegt die Annahme zugrunde, dass sich die Temperatur des Heizleitermetalles, das von einer keramischen Hülle umgeben ist, nur um einige Prozente von der Ofentemperatur unterscheidet. Die gesuchten Temperaturschwankungen des Ofenraumes sind dann von den berechneten Aenderungen der Heizleitertemperatur nur sehr wenig verschieden.

a) Starre Ofenspannung.

Die Heizelemente des Ofens sollen gemäss Fig. 1 über einen Transformator mit vernachlässigbar kleiner Streuung unter Fortfall von Zuleitungswiderständen usw. an ein Wechselstromnetz angeschlossen sein.

Das Leistungs-Temperatur-Diagramm (Fig. 1) gibt dann sofort über die Grösse der Temperaturschwankungen Aufschluss. Als «Ofenkennlinie»

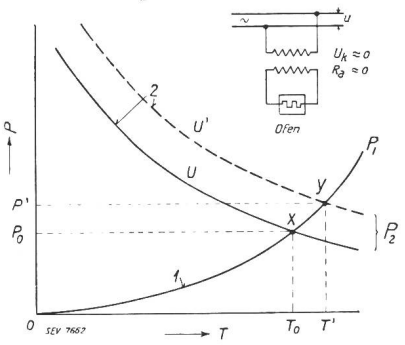


Fig. 1. Abhängigkeit der aufgenommenen Heizleistung (P) von der absoluten Ofentemperatur (T). Verschiebung des Arbeitspunktes von X nach Y bei einer Spannungserhöhung von U auf U'. *1* Ofenkennlinie. *2* Heizleiterkennlinien

sei dabei die Abhängigkeit der jeweils vom Ofen angeforderten Heizleistung $P_1 = f_1(T)$ bezeichnet, die seinen Innenraum bei definierten Abkühlungsbedingungen stationär auf einer gewünschten Temperatur T hält, die «Heizleiterkennlinie» sei die Abhängigkeit der Leistungsaufnahme $P_2 = f_2(T)$ eines temperaturabhängigen Widerstandes bei vorgegebener Temperatur T, wenn die Spannung am Widerstand bestimmte Werte U, U', U'' ... hat. Temperaturgleichgewicht ist erreicht, wenn $P_1 = P_2$ ist, dargestellt durch den Schnittpunkt X der Kennlinien. Die entsprechende Gleichgewichtstemperatur ist T_0. Links vom Schnittpunkt X ist $P_2 > P_1$ und dabei heizt sich der Ofen wegen des Ueberschusses zugeführter Leistung auf; rechts von X liegen die umgekehrten Verhältnisse vor.

Eine Schwankung der Netzspannung drückt sich in einer Verschiebung der Heizleiterkennlinie aus. In Fig. 1 ist gestrichelt eine Heizleiterkennlinie für eine höhere Spannung U' eingetragen. Der Arbeitspunkt des Ofens verschiebt sich dann nach Y, die Leistungsaufnahme steigt auf P', die Temperatur auf T'. Gesucht ist die Abhängigkeit der relativen Temperaturänderung $(T'-T)/T = \Delta T/T$ von der relativen Spannungsänderung $(U'-U)/U = \Delta U/U$, wobei zwecks Verallgemeinerung der Index 0 überall fortgelassen wurde.

Aus eigenen Messungen sowie aus Literaturangaben geht hervor, dass die Ofenkennlinie insbesondere kleiner Einkammeröfen ohne Schutzgas sehr angenähert dargestellt werden kann durch eine Proportional-Beziehung zwischen der Leistung und dem Quadrat der absoluten Temperatur:

$$P_1 \sim T^2 \qquad (1)$$

Anderseits ist die Heizleiterkennlinie unter den eingangs genannten Einschränkungen bei gegebener Ofenspannung U und bei Existenz eines linearen Zusammenhanges zwischen dem spezifischen Widerstand ϱ des Heizleitermaterials und der absoluten Temperatur gemäss:

$$\varrho = b \cdot T \qquad (2)$$

durch die Beziehung darstellbar:

$$P_2 \sim \frac{U^2}{T} \qquad (3)$$

Fig. 2 zeigt die aus Messungen ermittelte Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstandes für einige wichtige Heizleitermetalle. Eine Temperatursteigerung von 20° auf 1500° C verursacht im Mittel bei diesen Stoffen eine Widerstandserhöhung auf das Achtfache.

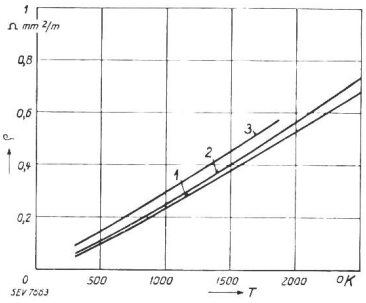


Fig. 2. Temperaturabhängigkeit (T) des spezifischen Widerstandes (ϱ) von: *1* Molybdän, *2* Wolfram, *3* Wolfram-Molybdän (1 : 1 legiert).

Wird nach dem Auftreten von Spannungsänderungen das Temperaturgleichgewicht abgewartet, so ist $P_1 = P_2$ und aus (1) und (3) folgt die Proportionalität:

$$T \sim U^{2/3} \qquad (4)$$

oder, wenn man die relativen Temperaturänderungen bzw. Spannungsänderungen einführt:

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{2}{3}\,\frac{\Delta U}{U} \qquad (5)$$

In Fig. 3 ist diese einfache Abhängigkeit der Temperaturschwankung in % der Grundtemperatur von der Spannungsschwankung in % der Nennspannung für den Fall starrer Kupplung zwischen Ofen- und Netzspannung eingetragen. Man entnimmt daraus beispielsweise, dass 5 % Spannungsänderung die Temperaturänderung in stationärem Zustand rund 3,3 % beträgt; bei 1600° C (1870° K) sind dies etwa 60°.

[2]) L. Beuken, Elektrowärme Bd. 6 (1936), S. 333, dort Lit.

In der Praxis sind die Temperaturschwankungen natürlich bedeutend kleiner. Man muss nämlich berücksichtigen, dass die grösseren Spannungsschwankungen meistens nur eine gegen die Wärmezeitkonstante des Ofens kurze Zeit dauern. Diese schnellen Spannungsschwankungen können sich aber wegen der Wärmeträgheit des Ofens in der Temperatur nur wenig bemerkbar machen. Die sehr langsamen kleinen Spannungsschwankungen

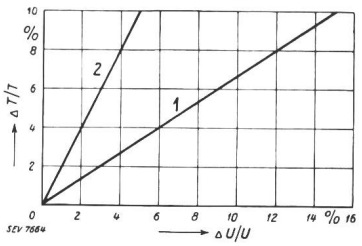


Fig. 3.
Prozentuale Temperaturänderung ($\Delta T/T$) in Abhängigkeit von der Netzspannungsschwankung ($\Delta U/U$) für die beiden Grenzfälle: gegebene Spanung (1) und gegebener Strom (2).

lassen sich aber durch zusätzliche äussere Regelorgane in relativ einfacher Weise ausgleichen. Ein Zahlenbeispiel soll diese Behauptung erläutern. Beträgt beispielsweise die Wärmezeitkonstante des Ofens 20 min (bei Arbeitstemperatur) und die dauernde Spannungserhöhung 5 %, so weicht die Temperatur vom Sollwert nach 1, 2, 5, 10, 20 min um 0,17, 0,33, 0,73, 1,3 2,1 % ab. Vorausgesetzt ist dabei, dass der zeitliche Verlauf der Ofentemperatur einer einfachen Exponentialfunktion gehorcht, was in aller Strenge durchaus nicht immer der Fall sein muss.

Bisher war angenommen worden, dass der spezifische Widerstand ϱ des Heizleitermetalles der absoluten Temperatur T proportional ist. Bisweilen erhält man durch folgende Beziehung eine bessere Uebereinstimmung zwischen dem gemessenen und dem angenommenen Temperaturgang

$$\varrho = a + b'T \qquad (6)$$

Die Berücksichtigung des temperaturunabhängigen Teiles der Gl. (6) gibt, abgesehen von einer nur unwesentlichen Erhöhung der relativen Temperaturschwankung, auch einen anderen, verwickelteren funktionellen Zusammenhang.

Bemerkenswert ist aber, dass unter Annahme von Gl. (2) die Grösse b, d. i. der Temperaturkoeffizient[3]) von ϱ, in das Ergebnis Gl. (5) gar nicht eingeht; das besagt, dass die prozentuale Temperaturänderung für eine gegebene Spannungsänderung durch die Wahl eines anderen Heizleiter-Materials nicht beeinflusst wird solange die Bedingung $\varrho \sim T$ erfüllt ist. Diese Aussage lässt sich verstehen unter Berücksichtigung, dass für die Selbstreglung letzten Endes nicht die Aenderung von ϱ mit T, sondern von R mit T massgeblich ist. Da aber $dR/dT = bl/q$ die Länge l und den Querschnitt q des Heizleiters als gleichberechtigte Grössen enthält, der Absolutwert von $R = T \cdot dR/dT$ bei grossem und bei kleinem b aber der nämliche sein muss, so muss nach unseren Annahmen eine Vergrösserung von b durch eine Verkleinerung von l/q ausgeglichen werden, so dass dR/dT trotz Erhöhung von $d\varrho/dT$ konstant bleibt.

[3]) b unterscheidet sich von dem üblichen Temperaturkoeffizienten α des spezifischen Widerstandes wegen $\varrho = \varrho_0 \cdot (1 + \alpha t)$ gegenüber $\varrho = bT$.

b) Starrer Ofenstrom.

Es lässt sich noch leicht ein anderer Grenzfall hinsichtlich der Empfindlichkeit der Ofentemperatur gegen Spannungsschwankungen untersuchen. Abweichend von der Schaltung nach Fig. 1 sei die Annahme gemacht, dass vor dem Ofen eine sehr grosse verlustfreie Induktivität liege, die den Strom durch den Ofen begrenzt. Hier wird also zum Unterschied gegenüber dem unter *a)* behandelten Fall die Stromstärke (nicht die Ofenspannung) bei allen Ofenbelastungen die gegebene Grösse sein. Diese von der Wirklichkeit meistens weiter entfernte Annahme lässt sich auch so ausdrücken, dass die Klemmenspannung des Ofens klein gegen den Spannungsabfall an der Vorschaltdrosselspule sei. Aendert sich hier die Netzspannung, so hat diese eine proportionale Stromänderung zur Folge ($U \sim I$). Neben der Ofenkennlinie Gl. (1) gilt jetzt für die Heizleiterkennlinie wegen $P_2 = I^2 \cdot R$ und $R \sim T$

$$P_2 \sim I^2 \cdot T \sim U^2 \cdot T \qquad (7)$$

Aus (1) und (7) folgt nun

$$T \sim U^2 \qquad (8)$$

oder wieder unter Einführung der relativen Spannungs- und Temperaturwerte

$$\frac{\Delta T}{T} = 2\,\frac{\Delta U}{U} \qquad (9)$$

Während bei gegebener Ofenspannung Netzspannungsänderungen geringere prozentuale Temperaturänderungen ergaben, wird jetzt bei gegebenem Ofenstrom die Temperaturänderung das Doppelte der Netzspannungsänderung. Vorwiderstände, Drosselspulen und Transformatorstreuungen verringern also nicht nur den Wirkungsgrad und vergrössern nicht allein die Phasenverschiebung, sondern sie führen auch zu einer stärkeren Beeinflussung der Ofentemperatur. In Fig. 3 ist die Beziehung (9) ebenfalls eingetragen; man entnimmt, dass jetzt eine Spannungsänderung von 5 % eine Temperaturänderung von 10 % verursacht.

c) Ofenkreis mit Vorschaltinduktivität (Streuung).

Ueber das Uebergangsgebiet zwischen den unter *a)* und *b)* behandelten Grenzfällen lässt sich ohne weitere Rechnung nur aussagen, dass die Temperatur gegenüber der Netzspannung mit einer höheren Potenz als $^2/_3$ und einer kleineren als 2 proportional läuft. Da aber praktisch eine Streuung infolge des vorhandenen Transformators, der, insbesonders hochstromseitigen, Zuleitungen, der Regel- und Anlass-Drosselspulen usw. nie zu vermeiden ist, der Schwankungsbereich des Exponenten von U zudem ziemlich bedeutend ist, dürfte eine genauere mathematische Fassung hier zweckmässig sein. Gesucht ist also die Beziehung zwischen T und U bei verschiedener Grösse der Induktivität im Ofenkreis.

Der Ofen sei über eine verlustlose Induktivität L an das Netz angeschlossen, in L sei die Transformatorstreuung mit enthalten. Der Einfluss des Magnetisierungsstromes des Transformators wird wie bisher vernachlässigt. Ist U die Netzspannung, U_R die (ohmsche) Ofenspannung, $I \cdot \omega L$ der induktive Spannungsabfall an L, R der Nennwiderstand des Ofens, also der Ofenwiderstand bei Nenntemperatur, so lautet das Spannungsgleichgewicht:

$$U^2 = U_R^2 \left[1 + \left(\frac{\omega L}{R} \right)^2 \right] \qquad (10)$$

Die Heizleiterkennlinie ist hier gegeben durch:

$$P_2 \sim \frac{U_R^2}{T} \qquad (11)$$

Es ist nun nötig, die Ofenspannung U_R durch die ihr eigentümliche Temperaturfunktion und die Netzspannung auszudrücken. Die Vereinigung der Gleichungen (10) und (11) mit (1) ergibt:

$$\frac{U^2}{1 + \left(\frac{\omega L}{R} \right)^2} \sim T^3 \qquad (12)$$

Nun ist der Widerstand R selbst eine Funktion der Temperatur, daher wird zur weiteren Ergänzung eingeführt:

$$R = c \cdot T \qquad (13)$$

wo c den auf die Temperatur 1 bezogenen Ofenwiderstand darstellt. Man erhält dann:

$$U^2 \sim T^3 \left[1 + \left(\frac{\omega L}{c} \right)^2 \frac{1}{T^2} \right] \qquad (14)$$

und schliesslich

$$\frac{\Delta T}{T} = 2 \frac{\Delta U}{U} \left[\frac{1 + \left(\frac{\omega L}{R} \right)^2}{3 + \left(\frac{\omega L}{R} \right)^2} \right] \qquad (15)$$

Zunächst sieht man sofort, dass für verschwindend kleine Induktivität L die Grösse $\left(\frac{\omega L}{R} \right)^2 << 1$ und dass der Klammerausdruck rechts gleich $1/3$ wird, so dass (15) in (5) übergeht, während für sehr grosses L, also $(\omega L/R)^2 >> 1$ Gl. (15) mit (9) identisch wird. Die Beziehung (15) ist in Fig. 4 für verschiedene Werte von $\omega L/R$ als Parameter zwischen 0,1 und 5 aufgetragen; bei einer Netzspannungsänderung $\Delta U/U = 5\,\%$ und einer relativen Drosselspulengrösse von $\omega L/R = 70\,\%$ tritt eine Temperaturänderung $\Delta T/T = 4{,}3\,\%$ auf, während sich ohne Induktivität die Temperatur nur um rund 3,3 % änderte. Bei grösseren Netzspannungsschwankungen und grösseren induktiven Spannungsabfällen durch Regeldrosselspulen usw. werden, wie Fig. 4 zeigt, die Unterschiede noch weit grösser. Fig. 4 lässt weiterhin erkennen, dass eine Herabsetzung der Grösse $\omega L/R$ unter 0,1 praktisch keine Verbesserung mehr mit sich bringt und dass für $\omega L/R > 5$ kein zahlenmässiger Unterschied gegenüber dem in Abschnitt *b)* behandelten Fall besteht.

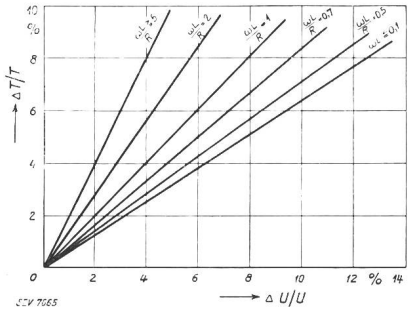


Fig. 4. Prozentuale Temperaturänderung ($\Delta T/T$) als Funktion der Netzspannungsschwankung ($\Delta U/U$) für verschiedene Werte des auf den Betriebswiderstand (R) des Ofens bezogenen induktiven Widerstandes (ωL).

3. Temperaturänderungen infolge Spannungsschwankungen bei Heizelementen mit nichtpositivem Temperaturkoeffizienten des elektrischen Widerstandes.

Die Verwendung von Heizleiterwerkstoffen mit negativem oder verschwindend kleinem Temperaturkoeffizienten des elektrischen Widerstandes muss, wie man aus Fig. 2 sofort ablesen kann, notwendigerweise auch andere Beziehungen zwischen der Temperaturänderung und der Netzspannungsänderung ergeben. In Analogie zu den in Teil 2 *a)* und *b)* angestellten Ueberlegungen erhält man die folgenden Ergebnisse:

Für einen temperaturunabhängigen Widerstand folgt wegen $P_1 \sim T^2$ und $P^2 \sim U^2$:

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta U}{U} \qquad (16)$$

gültig sowohl für starre Ofenspannung als auch für starren Ofenstrom.

Für einen Widerstand mit fallender Charakteristik entsprechen $\varrho \sim \frac{1}{T}$ folgt wegen $P_1 \sim T^2$ bei starrer Ofenspannung $P_2 \sim U^2 \cdot T$ und

$$\Delta T/T = 2\, \Delta U/U \qquad (17)$$

oder bei gegebenem Strom mit $P_2 \sim U^2/T$:

$$\Delta T/T = {}^2/_3\, \Delta U/U \qquad (18)$$

Man erkennt daraus, dass bei derartigen Oefen eine ungünstigere Temperaturabhängigkeit erscheint, abgesehen vom letzten Fall (18), der jedoch wegen der hohen Drosselspulenspannung praktisch wohl ausscheiden dürfte.

4. Temperaturänderungen infolge Schwankungen der thermischen Belastung.

Die thermische Belastung des Ofens wird im wesentlichen durch die Menge und die Temperatur des Glühgutes, durch die beim Glühen zu irgendwelchen Reaktionen verbrauchte Wärmeenergie usw. bestimmt. Ein Teil der thermischen Belastung, der sinngemäss zu den Verlusten zu zählen wäre, ist die zusätzliche Strahlungsleistung, die durch Oeffnen der den Ofen verschliessenden Türe auftritt.

Durch Austreten der Strahlung aus dem Ofeninnern in den umgebenden Raum kühlt sich der Ofen ab. Der Temperatursenkung wird hier wieder

dadurch Einhalt geboten, dass diese selbst eine Steigerung der elektrischen Heizleistung bedingt. Es stellt sich daher ein neues Temperaturgleichgewicht bei einem geringeren Temperaturwert als vorher ein.

In Fig. 5 sind die Verhältnisse dargestellt. Wieder ist im Leistungs-Temperaturdiagramm die Ofenkennlinie und die Heizleiterkennlinie eingetragen. Die Ofentemperatur ist gemäss dem Schnittpunkte X der Kennlinie gleich T_0, die Nennleistung gleich P_0. Es wurde angenommen, dass die durch Oeffnen

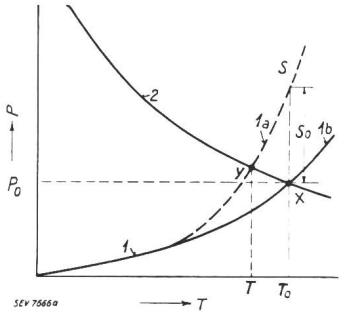


Fig. 5.
Abhängigkeit der aufgenommenen Heizleistung (P) von der absoluten Ofentemperatur (T).
Verschiebung des Arbeitspunktes (von X nach Y) bei zusätzlicher Strahlungskühlung S_0.
1 Ofenkennlinie, *a* bei geöffneter, *b* bei geschlossener Türe. *2* Heizleiterkennlinie.

der Ofentür austretende Strahlung einer Leistung entspricht, deren Grösse proportional der vierten Potenz der absoluten Temperatur ist. Dann stellt die gestrichelt eingezeichnete Kurve die nach Oeffnen der Tür gültige Ofenkennlinie (Leistung des geschlossenen Ofens P_1 + Strahlungsleistung S) dar. Die Summenkennlinie schneidet die Heizleiterkennlinie im Punkte Y, dem neuen Arbeitspunkt. Die Gleichgewichtstemperatur ist also nach Oeffnen der Ofentür von T_0 nach T abgesunken. Es wird nun die Beziehung zwischen $(T_0 - T)/T_0 = \left(\frac{\Delta T}{T}\right)_{T=T_0}$ also der relativen Temperaturänderung und der relativen thermischen Belastung S_0/P_0 gesucht.

Ist P_0 die Nennleistung bei der Solltemperatur T_0, P die der Temperatur T jeweils zugehörige Heizleiterleistung, $\Delta T/T$ die relative, oben definierte Temperaturänderung, wird ferner starre Ofenspannung und konstante Netzspannung vorausgesetzt, dann lautet die Gleichung der Heizleiterkennlinie mit $U^2/bT_0 = P_0$:

$$P_2 \sim \frac{U^2}{b \cdot T} = \frac{U^2}{b \cdot T_0 (T/T_0)} = \frac{P_0}{1 - (\Delta T/T)} \quad (19)$$

alles nur gültig für kleine Temperaturänderungen ΔT. Die Kennlinie des geschlossenen Ofens ist gemäss (1):

$$P_1 = A \cdot T^2 \quad (20)$$

die Zusatz-Ofenkennlinie infolge Strahlung:

$$S = B \cdot T^4 \quad (21)$$

wo A und B Konstanten sind. Die Summenkennlinie des Ofens lautet also:

$$P'_1 = P_1 + S = A\,T^2 + B\,T^4 \quad (22)$$

Führt man ähnliche Zwischenrechnungen wie in Gleichung (19) durch, so findet man durch Einführen der relativen Temperaturänderung:

$$P'_1 = P_0 (1 - \Delta T/T)^2 + S_0 (1 - \Delta T/T)^4 \quad (23)$$

wo P_0 und S_0 die Ofenleistung bzw. die Strahlungsleistung bei Solltemperatur T_0 sind. Die Konstanten A und B sind nun fortgefallen. Durch Gleichsetzen von (23) und (19) ergibt sich:

$$P_0 (1 - \Delta T/T)^2 + S_0 (1 - \Delta T/T)^4 = \frac{P_0}{1 - \Delta T/T} \quad (24)$$

oder

$$\frac{S_0}{P_0} = \frac{1}{(1 - \Delta T/T)^5} - \frac{1}{(1 - \Delta T/T)^2} \quad (25)$$

Die Temperaturabweichung $\Delta T/T$ ist danach um so höher, je grösser das Verhältnis Strahlungsleistung S_0 zu Nennleistung P_0 ist. Jedoch zeigt Fig. 6, die diese Beziehung (25) darstellt, dass bei kleinen Strahlungsleistungen die Temperaturabweichung schneller ansteigt als bei grossen. Beispielsweise ist bei einer Strahlungsleistung (bezogen auf die Solltemperatur) von 100 % der Ofenleistung ein etwa 16prozentiger Temperaturabfall zu erwarten, der sich allerdings erst nach geraumer Zeit (2- bis 3fache Wärmezeitkonstante) einstellt.

Eine Berücksichtigung der genaueren Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstandes oder eine Veränderung der Grösse des Temperaturkoeffizienten durch Materialänderung gibt keine wesentlichen Zahlenunterschiede, wie rechnerisch geprüft wurde.

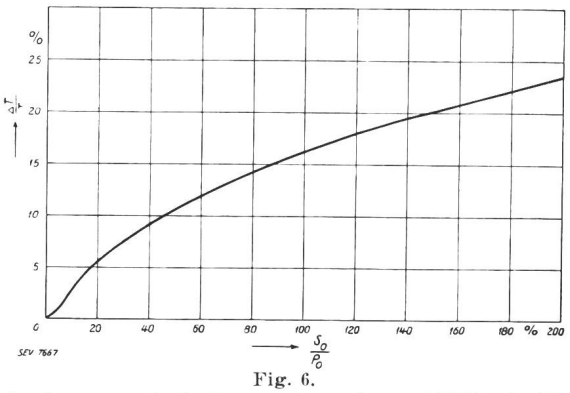
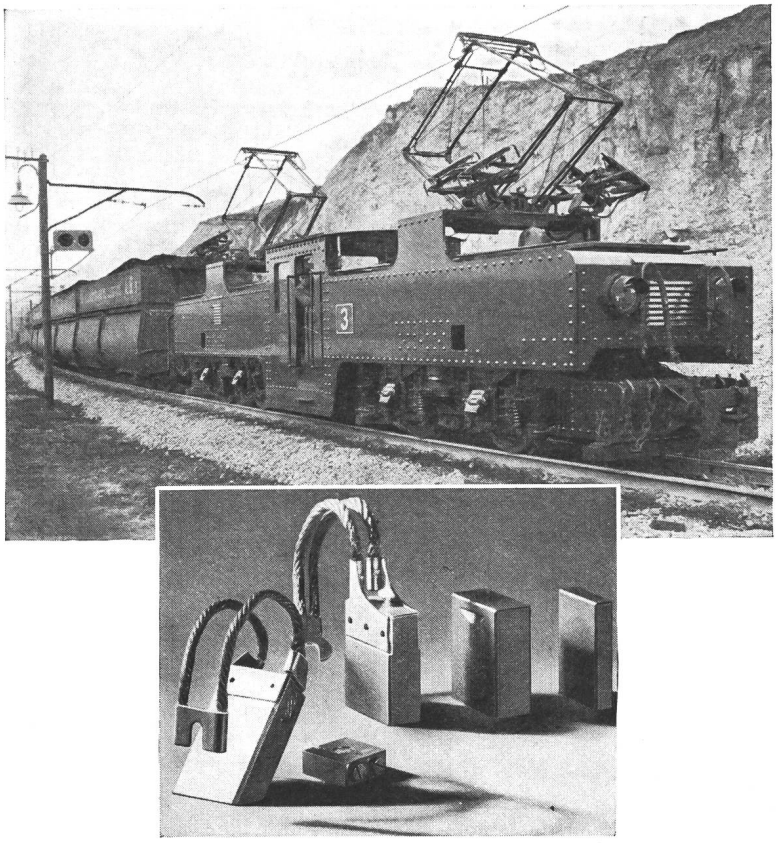


Fig. 6.
Stationäre prozentuale Temperatursenkung ($\Delta T/T$) als Funktion der zusätzlichen, relativen Strahlungsleistung (S_0), bezogen auf die Ofen-Nennleistung (P_0) bei der Solltemperatur (T_0) für starre Ofenspannung.
$S_0 = A \cdot \sigma \cdot T^4$ in Watt.
A schwarz strahlende Fläche in cm².
$\sigma = 5{,}77 \cdot 10^{-12}$ W/cm² · Grad⁴.
T abs. Temperatur in ° K.

Aus Fig. 5 lässt sich übrigens leicht entnehmen, in welcher Weise sich die Empfindlichkeit der Ofentemperatur gegen Schwankungen der thermischen Belastung bei Verwendung eines Widerstandsmaterials verschwindend kleiner oder negativer Temperaturkoeffizienten verändert. Es zeigt sich dabei, dass derartige Stoffe in dieser Hinsicht ebenfalls ungünstigere Verhältnisse ergeben.



SIEMENS

Kohle-Bürsten
Kohle-Kontakte
Kohle-
Schleifstücke

SIEMENS-ELEKTRIZITÄTSERZEUGNISSE AG., ABT. SIEMENS-SCHUCKERTWERKE
LÖWENSTRASSE 35 · ZÜRICH · TELEPHON 53600

SUHNER & Co. · HERISAU
DRAHT-, KABEL- UND GUMMIWERKE

Telephon 51.831

Abt. Drahtfabrik:

Isolierte
Leitungsdrähte / Seile und Schnüre
nach Normalien des SEV
Gummi-isolierte Hochspannungskabel
nach VSM-Normalien
Gummibleikabel und Telephon-Bleikabel / Dynamo-Seiden- und Emaildrähte / Sonneriedrähte / Telephondrähte
nach OTD-Vorschriften
Blanke Kupferseile / Kabelschutzeisen

Abt. Gummiwerk:

PRESS-FORMSTÜCKE
aller Art,
aus Isoliermaterial
Ebonit / Stabilit und Suconit (Kunstharz)
mit oder ohne eingepresste Metallteile, nach Zeichnung oder Muster, für
Stark- und Schwachstromtechnik
sowie für den Apparatebau
Ueber 4000 verschiedene Formen

Hartgummi
in Platten, Stäben und Rohre

181

Schwachstromapparate
aller Art
Transformatoren, Gleichrichter
Stanz-, Zieh- und Presswerkzeuge

GFELLER

liefert zu äusserst günstigen Preisen

Gfeller A.-G., Apparatefabrik, Flamatt
Telephon 9 31 52 gegründet 1896

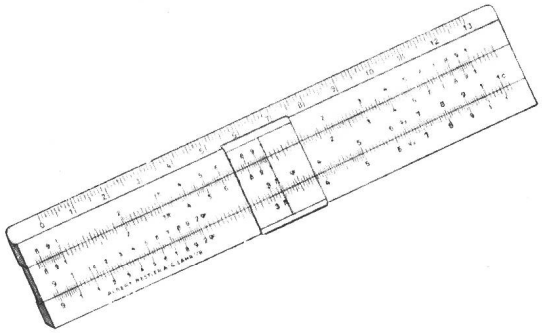
ASEOL

DIESELMOTORENÖL

Wie schmiert man Grossdieselmotoren? -- Unser technisches Bulletin No. 31 gibt Ihnen hierüber Auskunft!

ADOLF SCHMIDS ERBEN AG. BERN

Nestlers
„ELECTRO"-
Rechenschieber von höchster Präzision



5 diverse Modelle No. 36, 36a, 37, 11 ZE und 21. 60 jährige Erfahrung. Prospekte und Beschreibungen gratis. Bezugsquellen: Alle grösseren Optiker- und Papeteriegeschäfte.

Maßstabfabrik Schaffhausen AG.
Generalvertretung

H. Bussard, Zürich 2
Ing. S. I. A.
Ingenieurbureau
und Elektrounternehmung
für

Projektierung und Erstellung
von Uebertragungsleitungen

Luft-, Erd- und Unterwasser-
Kabelanlagen

Ortsnetzen, Transformatoren-
und Verteilstationen

Elektroschweissarbeiten
für Bahnoberbau

244

Aktiengesellschaft R. & E. Huber
Schweizerische Kabel-, Draht- und Gummiwerke • Telephon 975.301
PFÄFFIKON-Zürich

liefert

Flexible Motorenkabel Type ASG

mit äusserem nahtlosem, widerstandsfähigem Gummimantel, für landwirtschaftliche Motoren, Turmkranen, Baustellen, industrielle Betriebe.

219