

**Zeitschrift:** Bulletin de l'Association suisse des électriciens  
**Herausgeber:** Association suisse des électriciens  
**Band:** 34 (1943)  
**Heft:** 5

**Artikel:** Verluste von Maschinengrösse bei kurzzeitigen und aussetzenden Betrieben  
**Autor:** Schuisky, W.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1057706>

### **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>**

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

Tabelle II.

Stoff und Oberflächenbeschaffenheit	Temperatur der Messung °C	C kcal/m <sup>2</sup> · h · (°K) <sup>4</sup>
Aluminium		
poliert . . . . .	20	0,25
roh . . . . .	20	0,35
Kupfer		
hochglanzpoliert . .	20	0,2
matt . . . . .	20	1,1
rau, mit Oxydschicht	20	3,8
Messing		
poliert . . . . .	20	0,25
rohe Walzfläche . .	20	0,34
frisch geschmiegelt .	20	1,02
Nickel		
poliert . . . . .	20	0,3
Eisen		
rohes Gusseisen . .		
oxydiert . . . . .	40	4,6
Schmiedeseisen 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 Oefen 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, Oel) 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 rührt daher, dass eine elektrische Maschine kein homogener Körper ist. Schon in grober Betrachtung sind 3 verschiedene Teile, Wicklung, Eisen und Kühlluft zu unterscheiden, welche

ausserdem sich noch gegenseitig beeinflussen. Auch die inneren Temperaturen dieser 3 Teile sind ungleichmässig und es bestehen deshalb innerhalb jeden Teiles innere Temperaturgefälle. Eine genaue Berücksichtigung aller Umstände würde jedoch zu weit führen; man muss einige Einschränkungen machen, um zu praktisch brauchbaren Rechnungen zu gelangen. Eine Auffassung der elektrischen Maschine als Zusammensetzung von 3 homogenen Körpern, ohne innere Temperaturgefälle, dürfte der Wirklichkeit nahe kommen; sie liefert auch praktisch brauchbare Formeln. Eine derartige Bestimmung der Erwärmungskurve wurde bereits behandelt<sup>1)</sup> und wir können die Ergebnisse dieser Berechnung für unsere weitere Untersuchung verwenden. Darnach wird die Erwärmungskurve der hauptsächlich interessierenden Wicklung durch zwei Exponentialkurven wiedergegeben:

$$\vartheta = \Theta_1 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}\right) + \Theta_2 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_2}}\right) \quad (1)$$

Die Konstanten  $\Theta_1$  und  $\Theta_2$  haben die Bedeutung einer Uebertemperatur und können, allerdings nur unter gewissen Voraussetzungen, als Endtemperaturen der Wicklung gegenüber Eisen ( $\Theta_1$ ) und Eisen gegenüber Luft ( $\Theta_2$ ) aufgefasst werden. Auch die Zeitkonstanten  $T_1$  und  $T_2$  sind gewissermassen ähnlich den Zeitkonstanten der Wicklung und des Eisens. Da jedoch dieser Vergleich aller 4 Grössen nicht immer zutreffend ist und nur als Orientierungsvergleich zu betrachten ist, soll die Bestimmung dieser Grössen dem Versuch überlassen werden. Die ausgeführten Messungen an kleinen und mittleren Maschinen in geschützter Bauart haben gezeigt, dass die Uebertemperaturen  $\Theta_1 \approx (0,2 \dots 0,35) \Theta$  und  $\Theta_2 \approx (0,8 \dots 0,65) \Theta$  sind, wo  $\Theta = \Theta_1 + \Theta_2$  die Endtemperatur der Wicklung ist. Die Zeitkonstanten betragen  $T_1 \approx 6 \dots 10$  min und  $T_2 \approx 20 \dots 40$  min.

Zur Berechnung der Verluste im kurzzeitigen Betrieb kann die Erwärmungsgleichung (1) noch weiter vereinfacht werden. Da die Zeitkonstante  $T_1$  klein, in den meisten Fällen wesentlich kleiner ist als die Betriebsdauer, kann die Temperatur der Wicklung am Ende der Betriebsdauer mit genügender Genauigkeit zu

$$\vartheta \approx \Theta_1 + \Theta_2 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_2}}\right) \quad (2)$$

angenommen werden. Wir betrachten weiter den Fall, in dem der Motor für kurzzeitigen Betrieb derart ausgelegt ist, dass seine Verluste sowohl in der Wicklung als auch im Eisen das  $p$ -fache ihrer Nennwerte beim Dauerbetrieb betragen. Man erreicht dies durch gleichzeitige Erhöhung sowohl der elektrischen als auch der magnetischen Beanspruchung der Maschine. Wegen der Erhöhung der Verluste steigen beide Uebertemperaturen  $\Theta_1$  und  $\Theta_2$  auf das  $p$ -fache ihres normalen Wertes, so dass die Erwärmung am Ende der Betriebsdauer

$$\vartheta = p \Theta_1 + p \Theta_2 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_2}}\right) \text{ wird.} \quad (3)$$

Da diese Erwärmung die Uebertemperatur  $\Theta$  des Dauerbetriebes nach verbreiteter Ansicht nicht überschreiten darf, kann man  $\vartheta = \Theta$  setzen, woraus sich die zulässige Steigerung der Verluste  $p$  zu

$$p = \frac{1}{1 - \frac{\Theta_2}{\Theta} e^{-\frac{t}{T_2}}} \quad (4)$$

ergibt. Eine Erhöhung der Kupfer- und Eisenverluste um das  $p$ -fache bedeutet eine Steigerung der elektrischen und mechanischen Beanspruchungen um das  $\sqrt{p}$ -fache. Die zulässige Erhöhung der Leistungsabgabe der zu untersuchenden Maschine wird damit das  $p$ -fache.

Von Interesse ist noch der Fall, bei dem eine Erhöhung der magnetischen Beanspruchung (Induktion) nicht möglich ist und bei kurzzeitigem Betrieb nur eine Vergrösserung der Kupferverluste zugelassen werden kann. Zur Lösung dieser Aufgabe muss man noch weitere Vereinfachungen machen, welche allerdings nur in begrenztem Masse berechtigt sind und damit die Genauigkeit der Rechnung verkleinern. Wir nehmen nämlich an, dass durch Ueberlastung nur die Uebertemperatur  $\Theta_1$  (in gewisser Annäherung die Wicklungserwärmung) erhöht wird, während die Uebertemperatur  $\Theta_2$  (Eisenerwärmung) unveränderlich bleibt. Die Uebertemperatur der Wicklung am Ende der Betriebsdauer wird dann:

$$\vartheta = \Theta = p \Theta_1 + \Theta_2 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_2}}\right) \quad (5)$$

und die zulässige Verluststeigerung:

$$p = 1 + \frac{\Theta_2}{\Theta} e^{-\frac{t}{T_2}} \quad (6)$$

Da hier nur eine Vergrösserung der Kupferverluste vorausgesetzt war, beträgt die Erhöhung der Leistungsabgabe der Maschine nur das  $\sqrt{p}$ -fache.

Die eben betrachteten Fälle der kurzzeitigen Belastung, nämlich: ohne Veränderung der magnetischen Beanspruchung und mit deren Steigerung um das  $\sqrt{p}$ -fache, stellen zwei extreme Fälle dar, zwischen welchen die meisten wirklich vorkommenden Fälle liegen. Die geschlossenen Maschinen erlauben meistens eine wesentliche Steigerung der magnetischen Induktion, ohne die zulässige Sättigung zu überschreiten. Für diese Maschinen gebraucht man am besten die Gl. 4 und beachtet, dass die Leistungssteigerung das  $p$ -fache beträgt. Bei offenen und geschützten Maschinen ist dagegen meistens nur geringere Erhöhung der Induktion zulässig. Diese Maschinen gehören damit mehr zu dem zweiten Fall und ihre Leistungssteigerung beträgt nur das  $\sqrt{p}$ -fache.

Zur Veranschaulichung der Rechnung soll noch ein Zahlenbeispiel angegeben werden. Für einen Motor, dessen Zeitkonstante  $T_2 = 30$  min und dessen Uebertemperatur  $\Theta_1 = 0,3 \Theta$  und  $\Theta_2 = 0,7 \Theta$  sind, soll die Verlustgrösse  $p$ , also auch die Leistungssteigerung bestimmt werden. Mit diesen Zah-

<sup>1)</sup> H. Jehle, ETZ 1930, S. 1116.

len erhält man nach Gl. 4 für  $t = 30$  min  $p = 1,35$  und den Faktor der Leistungssteigerung ebenfalls zu 1,35. Gl. 6 ergibt  $p = 1,86$  und die Leistungssteigerung  $\sqrt{p} = 1,37$ . Der Unterschied in der Leistungssteigerung ist für diesen Fall nicht gross, was aber nur ein Zufall ist, denn für eine andere Zeitkonstante, z. B. diejenige von geschlossenen Motoren ( $T \approx 90$  min) erhält man entsprechend Gl. 4 eine 2,0-fache und nach Gl. 6 eine 1,63-fache Leistungssteigerung. Diese Zahlen sollen noch mit denen verglichen werden, welche man auf Grund der Rechnung mit einfacher Erwärmungskurve erhält. Man gebraucht dazu Gl. 4; setzt aber  $\Theta_2 = \Theta$  und  $T = T_2$ . Alsdann erhält man für 30 min Betrieb und  $T = 30$  min  $p = 1,58$ , für dieselbe Betriebsdauer, jedoch  $T_2 = 90$  min  $p = 3,5$ . Die beiden letzten Zahlen sind wesentlich höher als die entsprechenden Zahlen nach der genaueren Rechnung. Das bis jetzt gebräuchliche Rechnungsverfahren mit einfacher Erwärmungskurve liefert also übertrieben grössere Werte der zulässigen Leistungssteigerung.

Es sollen diese Rechnungsverfahren noch bei weiteren Beispielen angewendet werden. Zuerst bestimmen wir den Verlustfaktor  $p$  für den Fall, wenn der Motor keine genügende Zeit zur Abkühlung hat, so, dass seine Wiedereinschaltung bei der Wicklungserwärmung  $\vartheta_a$  erfolgen muss. Diese Anfangserwärmung soll sowohl die Wicklung als auch das Eisen haben, eine Annahme, welche wohl zutreffend ist, weil die Abkühlungspause meistens gross genug ist, um den Temperaturunterschied zwischen Eisen und Wicklung auszugleichen. Wir betrachten zuerst den Fall, bei dem sowohl die Kupfer- als auch die Eisenverluste gleichzeitig erhöht werden können. Die Erwärmungsgleichung lautet

$$\Theta - \vartheta_a = p\Theta_1 + p\Theta_2 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_2}}\right) \quad (7)$$

woraus 
$$p = \frac{1 - \frac{\vartheta_a}{\Theta}}{1 - \frac{\Theta_2}{\Theta} e^{-\frac{t}{T_2}}} \quad (8)$$

Für den zweiten Fall, wenn der Motor keine Erhöhung der Induktion zulässt und er in derselben Ausführung wie für den Dauerbetrieb gebraucht wird, ist die Erwärmungsgleichung:

$$\Theta - \vartheta_a = p\Theta_1 + \Theta_2 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_2}}\right) \quad (9)$$

woraus 
$$p = 1 + \frac{\Theta_2}{\Theta_1} e^{-\frac{t}{T_2}} - \frac{\vartheta_a}{\Theta_1} \quad (10)$$

Anschliessend hieran kann noch ein Beispiel gelöst werden. Für eine höhere Umgebungstemperatur wird ein normaler Motor genommen und es fragt sich nun, wie lang dieser Motor mit seiner Nennleistung (Dauerleistung) belastet werden kann, ohne Ueberschreitung der zulässigen Uebertempera-

tur. Die Antwort gibt Gl. 10, wenn man dort  $p = 1$  setzt. Es ergibt sich nämlich diese Arbeitsdauer zu

$$t = T_2 \ln \frac{\Theta_2}{\vartheta_a} \quad (11)$$

Bei einer um 20° C höheren Umgebungstemperatur und  $\Theta_2 = 0,7 \Theta = 42^\circ$  C kann der Motor damit nur 22 min seine Nennleistung (Dauerleistung) entwickeln.

Als weiteres Beispiel nehmen wir die aussetzende Belastung. Hier müssen auch einige Vereinfachungen getroffen werden, um die Rechnung nicht allzu umständlich zu machen. Da die Spieldauer nach REM 10 min nicht überschreiten darf, um den Betrieb als aussetzenden Betrieb zu bezeichnen, wird das zweite Glied in Erwärmungsgleichung (1) mit seiner verhältnismässig grossen Zeitkonstanten  $T_2$  weniger Temperaturschwankungen unterworfen. Es liegt deshalb der Wirklichkeit sehr nahe, dieses Glied als zeitlich unveränderlich anzunehmen. Die Erwärmungs- und Abkühlungsgleichung kann dann folgendermassen geschrieben werden:

$$\vartheta \approx \Theta_1 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}\right) + \Theta_{2m} \quad (12a)$$

$$\vartheta \approx (\vartheta_{max} - \Theta_{2m}) e^{-\frac{t}{T_1}} + \Theta_{2m} \quad (12b)$$

wo  $\Theta_{2m}$  den Mittelwert des zweiten Gliedes der Gl. (1) darstellt.  $\vartheta_1$  soll nun die höchste und  $\vartheta_2$  die niedrigste Temperatur der Wicklung während der aussetzenden Belastung sein. Die Uebertemperatur der Wicklung gegenüber Eisen beim Beginn der Betriebspause wird dann  $\vartheta_2 - \Theta_{2m}$ . Ebenso erhält man den Teil der Wicklungstemperatur, welcher während der Ruhepause zur Abkühlung kommt  $\vartheta_1 - \Theta_{2m}$ . Mit diesen Bezeichnungen kann man folgende Ausdrücke für die Grenzerwärmungen schreiben:

$$\vartheta_1 = \Theta_1 - (\Theta_1 - \vartheta_2 + \Theta_{2m}) e^{-\frac{a}{T_{1a}}} + \Theta_{2m} \quad (13)$$

$$\vartheta_2 = (\vartheta_1 - \Theta_{2m}) e^{-\frac{b}{T_{1b}}} + \Theta_{2m} \quad (14)$$

wo  $a$  die Dauer der Arbeits- und  $b$  die der Ruhepause sind. Weiter sind  $T_{1a}$  die Zeitkonstante des ersten Gliedes während der Betriebspause und  $T_{1b}$  dasselbe während der Ruhepause. Bekanntlich ist wegen des Wegfalles der Lüftung beim Stillstand immer  $T_{1b} > T_{1a}$ . Nach Lösung der beiden Gleichungen 13 und 14 erhält man die höchste Temperatur während des aussetzenden Betriebes zu

$$\vartheta_1 = \Theta_{2m} + \Theta_1 \frac{e^{\frac{a}{T_{1a}}} - 1}{e^{\frac{a}{T_{1a}}} - e^{-\frac{b}{T_{1b}}}} \quad (15)$$

Um diese Formel für praktische Berechnungen zu verwenden, müssen wiederum zwei Fälle unterschieden werden: 1. beim Motor wird gleichzeitig eine Erhöhung der elektrischen und der magnetischen Beanspruchung möglich und 2. es wird nur

eine Erhöhung der elektrischen Beanspruchung möglich.

Es wurde bereits bei Betrachtung der kurzzeitigen Belastung gezeigt, dass beide Fälle die Grenzen der Wirklichkeit darstellen. Im ersten Falle steigen alle Uebertemperaturen infolge der  $p$ -fachen Vergrößerung der Verluste ebenfalls um das  $p$ -fache. Der Motor wird damit beim Dauerbetrieb mit erhöhter Leistung folgende Uebertemperaturen zeigen:

$$\Theta' = \Theta'_1 + \Theta'_2 = p \Theta_1 + p \Theta_2 = p \Theta \quad (16)$$

Die mittlere Temperatur  $\Theta_{2med}$  beim aussetzenden Betrieb und derselben Leistung wie im Dauerbetrieb wird  $\Theta_{2med} = \varepsilon p \alpha \Theta_2$ , wenn  $\varepsilon$  die relative Einschaltdauer und

$$\alpha = \frac{1}{\varepsilon + (1 - \varepsilon) \frac{T_{2a}}{T_{2b}}}$$

die Erhöhung der Erwärmung infolge Wegfallen der Kühlung beim Stillstehen der Maschine ist. Die Zeitkonstanten  $T_{2b}$  und  $T_{1a}$  sind die Abkühlungs- und Erwärmungskonstante des Eisens. Setzt man alle diese Werte in die Gl. 15 und beachtet, dass  $\vartheta_1 = \Theta$  sein muss, so erhält man die Grösse  $p$ , also die zulässige Erhöhung der Verluste im aussetzenden Betrieb zu:

$$p = \frac{\frac{a}{e^{\frac{a}{T_{1a}}} - 1} - \frac{b}{e^{\frac{b}{T_{1b}}} - 1}}{\frac{\Theta_1}{\Theta} \left( \frac{a}{e^{\frac{a}{T_{1a}}} - 1} \right) + \frac{\alpha \varepsilon \Theta_2}{\Theta} \left( \frac{a}{e^{\frac{a}{T_{1a}}} - 1} - \frac{b}{e^{\frac{b}{T_{1b}}} - 1} \right)} \quad (17)$$

Hier sind alle Grössen bekannt.  $a$ ,  $b$  und  $\varepsilon$  sind gegeben;  $T_{1a}$ ,  $T_{1b}$ ,  $T_{2b}/T_{2a}$  sowie  $\Theta_1/\Theta$  und  $\Theta_2/\Theta$  sind für eine gegebene Maschine dem Versuch zu entnehmen. Wenn man noch die Grösse

$$p_0 = \frac{\frac{a}{e^{\frac{a}{T_{1a}}} - 1} - \frac{b}{e^{\frac{b}{T_{1b}}} - 1}}{\frac{a}{e^{\frac{a}{T_{1a}}} - 1} - 1} \quad (18)$$

einführt, welche eine Bedeutung der Verlustzahl bei aussetzender Belastung und Erwärmung der Maschine nach einfacher Exponentialkurve mit der Zeitkonstanten  $T_{1a}$  und  $T_{1b}$  hat, so erhält man die Verlustzahl bei Erwärmung nach doppelter Exponentialkurve zu

$$p = \frac{p_0}{\frac{\Theta_1}{\Theta} + \frac{\alpha \varepsilon \Theta_2}{\Theta} p_0} \quad (19)$$

Bei Behandlung des zweiten Falles müssen wiederum Vereinfachungen gemacht werden, wie es bei Behandlung des kurzzeitigen Betriebes getan war, nämlich es soll angenommen werden, dass bei  $p$ -facher Vergrößerung der Kupferverluste nur die Uebertemperatur  $\Theta_1$  um das  $p$ -fache gesteigert wird, während die Uebertemperatur  $\Theta_2$  unverändert bleibt. Es ist also:

$$\Theta' = \Theta'_1 + \Theta_2 = p \Theta_1 + \Theta_2 \quad (20)$$

$$\Theta_{2med} = \varepsilon \alpha \Theta_2 \quad (21)$$

Mit diesen Werten erhält man dann die Verlustzahl  $p$  nach Gl. 15 zu

$$p = \frac{(\Theta - \varepsilon \alpha \Theta_2) \left( e^{\frac{a}{T_{1a}}} - e^{-\frac{b}{T_{1b}}} \right)}{\Theta_1 \left( e^{\frac{a}{T_{1a}}} - 1 \right)} = \frac{\Theta - \varepsilon \alpha \Theta_2}{\Theta_1} p_0 \quad (22)$$

Zum besseren Verständnis seien die hier gewonnenen Ergebnisse an einem Zahlenbeispiel erläutert. Es soll die Verlustzahl  $p$  sowie die zulässige Leistungssteigerung für  $\varepsilon = 25\%$ , also  $a = 2,5$  und  $b = 7,5$  min, bestimmt werden. Zuerst sei die Rechnung nach dem üblichen Verfahren mit einfacher Erwärmungskurve durchgeführt. Dazu gebrauchen wir Gl. 18 und nehmen für die dort vorkommenden Zeitkonstanten folgende Werte:  $T_a = 25$  und  $T_b = 75$  min. Diese Werte entsprechen etwa kleineren geschützten Maschinen. Wir haben hier bei Zeitkonstanten mit Absicht den Index 1 weggelassen, weil für die einfache Erwärmungskurve nur eine Zeitkonstante gültig ist, deren Grösse etwa gleich der grösseren Zeitkonstante in Gl. 1 ist. Mit diesen Werten ergibt sich die Verlustzahl  $p = 1,99$ . Ueber die zulässige Leistungssteigerung liegen bis jetzt für dieses Rechnungsverfahren eigentlich noch keine eindeutigen Angaben vor. Sie soll etwa zwischen den Werten  $p$  und  $\sqrt{p}$  liegen.

Es soll nun dasselbe Beispiel nach unseren Formeln berechnet werden. Dazu nehmen wir  $T_{1a} = 8$  min,  $T_{1b} = 20$  min,  $T_{2a}/T_{2b} = 3$  und  $\Theta_1 = 0,3 \Theta$ . Für den Fall gleichzeitiger Erhöhung beider Beanspruchungen erhalten wir dann die Verlustzahl  $p$  nach Gl. 17 zu  $p = 1,96$  und für die zulässige Leistungssteigerung der Maschine ergibt sich ebenfalls das 1,96-fache. Wird von einer Beanspruchung Gebrauch gemacht, so erhält man nach Gl. 22 die Verlustzahl  $p = 4,0$  und die Leistungssteigerung  $\sqrt{p} = 2,0$ -fach. Wenn auch die hier berechnete Leistungssteigerung in der Praxis nicht immer ausführbar sein wird, wegen der Begrenzung durch Kommutierung und Ueberlastbarkeit, so zeigt sie doch deutlich, dass man bei aussetzendem Betrieb mit weitgehender Leistungssteigerung gegenüber dem Dauerbetrieb rechnen kann.

Als letztes Beispiel der Anwendung unseres Rechnungsverfahrens sei der Fall einer beliebig wechselnden Belastung betrachtet. Man rechnet hier gewöhnlich mit dem quadratischen Mittelwert der abgegebenen Leistung, der nach folgender Formel bestimmt wird.

$$P_{med} = \sqrt{\frac{\sum R^2 t}{\sum t} \frac{T_t}{T_a}} \quad (23)$$

sei die Leistung während der Arbeitszeit, welche für diesen Zeitabschnitt als unveränderlich angenommen wird, und  $T_t/T_a$  sei das Verhältnis der Zeitkonstanten im betrachteten Zeitabschnitt,  $T_b$

zu der während des normalen Betriebes  $T_a$ . Dieses Verhältnis berücksichtigt die Aenderung der Kühlung des Motors, die beispielsweise bei Stillstand oder langsamem Laufe des Motors stattfindet. Die Rechnung mit dem quadratischen Mittelwert enthält immer die Voraussetzung, dass die Spieldauer wirklich kurz ist und dass die Temperatur der Maschine während dieser Spieldauer nur unwesentlichen Schwankungen unterworfen wird. Wir wollen nun unter denselben Voraussetzungen unser Rechnungsverfahren anwenden. Es wird also mit dem Mittelwert sowohl der Kupfer- als auch der Eisenübertemperatur gerechnet. Um die Rechnung nicht allzu umständlich zu machen, sei der einfache Fall angenommen, dass der Motor im Betrieb nur mit einer Drehzahl läuft. Von dem Fall der möglichen Drehzahlregelung wollen wir Abstand nehmen, obwohl dieser Fall sich ebenfalls nach dem betrachteten Verfahren berechnen lässt. Wir nehmen einen Motor, welcher bei seiner Nennlast folgende Ubertemperaturen zeigt: im Kupfer  $\Theta_1$  und im Eisen  $\Theta_2$ . Die mittlere Kupferübertemperatur während der wechselnden Belastung wird

$$\Theta_1 \frac{\Sigma \left( \frac{P}{P_{med}} \right)^2 t}{\Sigma t} \alpha \quad (24)$$

Die Grösse  $\alpha$  berücksichtigt die Verschlechterung der Wärmeabgabe und beträgt

$$\alpha = \frac{1}{\varepsilon + (1 - \varepsilon) \frac{T_a}{T_b}} \quad (25)$$

wenn  $\varepsilon$  die relative Einschaltdauer und  $T_b/T_a$  das Verhältnis der Erwärmungs- und Abkühlungszeitkonstanten ist. Die mittlere Eisenübertemperatur ist

$$\Theta_2 \varepsilon \alpha \quad (26)$$

Ohne grosse Fehler kann für die Grösse  $\alpha$  derselbe Wert wie für die Wicklung angenommen werden. Die gesamte Ubertemperatur während der wechselnden Belastung wird dann, wenn wir mit  $\Sigma t = T$  die Spieldauer bezeichnen

$$\Theta = \alpha \left( \Theta_1 \frac{\Sigma \left( \frac{P}{P_{med}} \right)^2 t}{T} + \varepsilon \Theta_2 \right) \quad (27)$$

Daraus erhält man die mittlere Leistung zu

$$P_{med} = \sqrt{\frac{\Sigma P^2 t}{T}} \sqrt{\frac{\alpha \frac{\Theta_1}{\Theta}}{1 - \varepsilon \alpha \frac{\Theta_2}{\Theta}}} \quad (28)$$

Da in der Rechnung vorkommenden Ubertemperaturen und Zeitkonstanten für die benachbarten Maschinengrössen sich nicht wesentlich ändern, ist eine Vorausbestimmung der Maschinengrösse nicht erforderlich. Die mittlere Leistung ist gewissermassen von der magnetischen Beanspruchung (Induktion) der Maschine abhängig. Wird diese Beanspruchung erhöht, so nimmt die Ubertemperatur  $\Theta_1$  ab,  $\Theta_2$  dagegen zu. Die günstigste Beanspruchung, nämlich die, welche kleinste Maschinengrösse ergibt, lässt sich durch Probieren finden. Wir wollen jetzt unser Rechnungsverfahren bei einem einfachen Beispiel anwenden. Ein Motor möge während der Hälfte der Spieldauer mit 10 kW belastet sein, während der anderen Hälfte steht er still:  $P = 10$  kW und  $\varepsilon = 0,5$ . Weiter ist  $T_b/T_a = 3$ , womit nach der Gl. 25  $\alpha = 1,5$ . Mit diesen Werten erhält man dann nach Gl. 28  $P_m = 6,89$  kW. Die einfache Rechnung nach Gl. 23 ergibt uns  $P_{med} = 8,65$  kW, also einen grösseren Wert.

Das hier beschriebene Rechnungsverfahren stellt keine Ansprüche auf vollständige Genauigkeit. Den grössten Fehler bringt die Auffassung der Ubertemperaturen  $\Theta_1$  und  $\Theta_2$  als Kupfer- und Eisenübertemperatur mit sich. Dies kann man besonders bei wechselnder Belastung merken. Um diesen Fehler herabzusetzen, wird es vielleicht zweckmässig, für  $\Theta_1$  und  $\Theta_2$  andere Werte zu nehmen als die, welche die Erwärmungskurve angibt.

### Zusammenfassung

Wird die Erwärmungskurve einer Maschine als Zusammensetzung zweier Exponentialkurven aufgefasst, so können die Verluste bei kurzzeitiger und aussetzender Belastung mit verhältnismässig einfachen Formeln berechnet werden. Das neue Rechnungsverfahren liefert Werte, welche unter Umständen von den bis jetzt üblichen Rechnungsverfahren stark abweichen.

## Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

### Fahrbare Transformatorenstation für Landwirtschaft und Bauplätze

(Nach G. Nabholz, «Neues von Sprecher Schuh» 1942, Nr. 3)

Seit Jahren wurden in landwirtschaftlichen Grossbetrieben mechanische Pflüge und Dreschmaschinen mit Benzin als Triebstoff verwendet. Der Brennstoffmangel, der eine Umstellung solcher Antriebe von Benzin auf Elektrizität nötig machte, führte zum Bau einer fahrbaren Transformatorenstation. Das Bedürfnis nach fahrbaren Stationen zeigt sich in der Landwirtschaft besonders bei der Bebauung grosser Gebiete. Die Frist, die im Sommer 1942 für Entwurf, Herstellung und Inbetriebsetzung der ersten fahrbaren Transfor-

matorenstation gegeben und auch eingehalten wurde, betrug 2 Monate. Die Rekordleistung war unumgänglich, weil vor dem Herbst noch grosse Brachlandstrecken gepflügt und bepflanzt werden mussten.

Die Anwendung der fahrbaren Transformatorenstation bleibt aber keineswegs auf das Gebiet der Landwirtschaft beschränkt. Oft wird Elektrizität auf Baustellen benötigt, die ausserhalb des Bereiches bestehender Transformatorenstationen liegen. Mit der fahrbaren Station können solche Elektrizitätsverbraucher direkt an Hochspannungsleitungen angeschlossen werden.

Die fahrbare Transformatorenstation wird als zweirädriges Fahrzeug (Fig. 1) zum Anhängen an einen Traktor oder Last-