Die Bedeutung der Last-Zusatzverluste von Asynchronmotoren und ihre Bestimmung

Autor(en): **Keve, Th.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins : gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)**

Band (Jahr): **64 (1973)**

Heft 6

PDF erstellt am: **30.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-915524

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Die Bedeutung der Last-Zusatzverluste von Asynchronmotoren und ihre Bestimmung

Von *Th. Keve*

621.313.333 : 621.3.017.21

Nach einer Betrachtung der Ursachen der Last-Zusatzverluste werden die bekanntesten Meßschaltungen für ihre Bestimmung erläutert. Es zeigt sich, dass keins der Verfahren unmittelbar die Zusatzverluste misst, weshalb sie nur mit grossem Vorbehalt zu benutzen sind. Eine Betrachtung der Wirkungsgrade handelsüblicher Motoren zeigt, dass die Zusatzverluste für den Betreiber, zumindest im Normmotorenbereich, von untergeordneter Bedeutung sind. Der Motorhersteller muss sie jedoch wegen der zusätzlichen Erwärmung beachten. Bei Motoren mit Oberflächenkühlung und mit Röhrenkühlung tragen die Zusatzverluste wesentlich zur Erwärmung der Ständerwicklung bei. Auf Grund dieser Erkenntnis wird für diese Motortypen ein Verfahren angegeben, das aus je drei Erwärmungsmessungen bei Leerlauf und Last die Zusatzverluste unter Betriebsbedingungen mit befriedigender Genauigkeit ermittelt. Das Verfahren wird an Hand der Messungen an einem Normmotor und an einem Hochspannungsmotor erläutert.

Après une considération des causes des pertes supplémentaires dues à la charge, les montages de mesure de ces pertes les plus connus sont expliqués. Aucun d'eux ne mesurant directement ces pertes supplémentaires, ils ne peuvent être utilisés que sous grande réserve. Compte tenu des rendements des moteurs ordinaires, on constate que les pertes supplémentaires n'ont qu'une importance secondaire, du moins pour des moteurs normalisés. Le constructeur des moteurs doit toutefois en tenir compte, à cause de l'échauffement supplémentaire. Dans le cas de moteurs à refroidissement extérieur ou par tubes, les pertes supplémentaires contribuent grandement à l'échauffement de l'enroulement statorique. En se basant sur cette constatation, on indique pour ces types de moteurs un procédé qui permet de déterminer ces pertes avec une précision satisfaisante dans des conditions de service, d'après trois mesures de l'échauffement, à vide et en charge. Ce procédé est expliqué d'après des mesures à un moteur normalisé et à un moteur à haute tension.

1. Ursachen der Last-Zusatzverluste

Die Kenntnis der Verluste von elektrischen Maschinen ist in zweierlei Hinsicht von Bedeutung: Für den Betreiber wegen den verursachten Energiekosten und für den Hersteller wegen der zu wählenden Maschinengrösse. Der Wirkungsgrad von Asynchronmotoren wird nach dem Einzelverlustverfahren errechnet. Man bestimmt die Reibungs- und Eisenverluste einschliesslich der Leerlauf-Zusatzverluste aus der Leerlaufmessung. Die Stromwärmeverluste der Ständer- und Läuferwicklungen errechnet man auf Grund des Lastversuches mit den Widerständen und mit dem Schlupf der betriebswarmen Maschine. Ausser diesen Verlusten treten noch Last-Zusatzverluste auf. Eine direkte Messung dieser Verluste ist nicht möglich, weshalb in den VDE-Regeln ein Zuschlag von 0,5% der abgegebenen Leistung für die Last-Zusatzverluste vorgeschrieben ist. In den letzten Jahren sind wiederholt Vorschläge für die Messung von Last-Zusatzverlusten gemacht worden. Bevor man diese Möglichkeiten erläutert, ist es zweckmässig, die Ursachen der Zusatzverluste zu betrachten.

Die Ursachen der Last-Zusatzverluste sind:

a) Pulsationsverluste durch den Hauptfluss. Der magnetische Widerstand hängt von der Länge des Luftspaltes und von der Sättigung im Eisen ab. Er hat ein Minimum, wenn ein Ständer- und ein Läuferzahn gegenüberstehen und ein Maximum, wenn z. B. einem Ständerzahn eine Läufernut gegenübersteht. Entsprechend schwankt der Fluß bei Drehung des Läufers in den Zähnen und in den Jochen. Dies verursacht zusätzliche Verluste im Eisen; sie werden beim Leerlaufversuch mitgemessen. Ihre Grösse kann sich jedoch bei Belastung durch Überlagerung der Streuflüsse und durch Änderung der Eisensättigung verändern.

b) Pulsationsverluste durch Luftspaltstreufluss. Bei Belastung erzeugen die gegengerichteten Ständer- und Läufernutdurchflutungen Streuflüsse, die sich im wesentlichen über den Luftspalt schliessen. Durch die gegenseitige Stellung der Ständer- und Läuferzähne zueinander pulsiert der Streufluss in den Zähnen und Jochen und verursacht ebenfalls zusätzliche Eisenverluste.

c) Oberflächenverluste. Die pulsierenden Streuflüsse der Nutdurchflutungen induzieren in der Ständerbohrung und auf der Läuferoberfläche Wirbelströme. Die Eindringtiefe der Streuflüsse ist sehr gering und beträgt, bedingt durch ihre grosse Frequenz, nur wenige zehntel Millimeter. Ist nun durch Gratbildung die Isolation an der Oberfläche überbrückt, so können sich in dieser dünnen Schicht die Wirbelströme voll ausbilden und entsprechend Verluste verursachen.

d) Oberwellenverluste im Läuferkäfig. Die Oberfelder der Ständerwicklung induzieren im Läuferkäfig Oberwellenströme höherer Frequenz, die grosse Verluste im Läuferkäfig, besonders, wenn man die Widerstandserhöhung infolge Stromverdrängung im Läuferstab berücksichtigt, verursachen können. Es sind insbesondere die Nutungsoberfelder der Ständerwicklung von Bedeutung.

e) Oberwellenverluste durch Eisenströme. Um die Wirkung der Nutungsoberfelder der Ständerwicklung auf den Läufer zu unterdrücken, werden die Ständer- oder Läufernuten geschränkt. Bei isoliertem Läuferkäfig könnte diese Massnahme guten Erfolg bringen. Bei unisolierten Käfigen fliessen jedoch – bedingt durch den Potentialunterschied entlang eines Läuferstabes – Ströme von Stab zu Stab durch das Läufereisen. Diese Eisenströme können sehr grosse Verluste insbesondere in dem Widerstand zwischen Stab und Eisen verursachen. Auch hier sind besonders die Oberwellenströme der Nutharmonischen bedeutend.

f) Zusatzverluste im Stirnraum. Die Streuflüsse des Wickelkopfes können in den massiven Eisenteilen des Stirnraumes Wirbelstromverluste verursachen.

g) Zusatzverluste durch Stromverdrängung in der Ständerwicklung.

Die einzelnen Arten der Last-Zusatzverluste sind von unterschiedlicher Bedeutung. Die Zusatzverluste im Stirnraum (Pos. f), ebenso wie durch die Stromverdrängung in der Ständerwicklung (Pos. g) können nur bei grossen Maschinen mit grosser Nutdurchflutung und Leiterhöhe (etwa über 5 MW) merkbare Verluste verursachen. Die Oberflächenverluste (Pos. c) sind im allgemeinen nicht vernachlässigbar. Ihre Grösse hängt stark von der Bearbeitung der Ständer- und Läuferoberflächen ab. Die Annahme, dass die Last-Zusatzverluste in erster Linie durch Oberflächenverluste verursacht werden [4; 6][1]), hat sich jedoch nicht bestätigt. Ebenso ist die dominierende Bedeutung der Pulsationsverluste durch den Luftspaltstreufluss (Pos. b) [10] umstritten. Es ist sehr wahrscheinlich, dass der grösste Anteil der Last-Zusatzverluste durch Oberwellenverluste im Läuferkäfig (Pos. d) und durch Eisenströme (Pos. e) hervorgerufen werden [3; 7; 11].

2. Berechnung und Messung der Last-Zusatzverluste

Eine einigermassen zuverlässige Berechnung der verschiedenartigen Last-Zusatzverluste ist bis heute nicht möglich [15]. Die besonderen Schwierigkeiten liegen in der komplizier-

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

ten Überlagerung der Wirkungen der verschiedenen Einflüsse. Eine einfache Superposition ist, wegen der starken Abhängigkeit der Eisenpermeabilität von Grösse der magnetischen Induktion, nicht anwendbar. Die Eisensättigung beeinflusst die effektiven Nutschlitzbreiten, die Verdrängung der Streuflüsse aus den Zähnen in den Luftspalt, die Eindringtiefe der Oberfelder u.a.m. Auch der Querwiderstand zwischen Käfig und Blechpaket ist praktisch nicht zu berechnen, denn seine Grösse ändert sich je nach Bearbeitung und Erwärmung.

Bei Einhalten bestimmter Regeln soll es möglich sein, die Last-Zusatzverluste unter 1% der aufgenommenen Leistung zu halten [15].

Nicht nur die Vorausberechnung, auch die Messung der Last-Zusatzverluste ist schwierig. Es sollen die bekanntesten Verfahren erläutert werden:

a) Direkte Wirkungsgradbestimmung. Sie ist die bekannteste Methode. Die Zusatzverluste erhält man aus der Differenz der aufgenommenen und abgegebenen Leistung nach Abzug aller bekannten Verluste.

b) Reverse rotation test (Gegendrehfeldmethode). Das Verfahren wurde in den USA entwickelt und auch in die Normen als Empfehlung aufgenommen [2]. Die Zusatzverluste bestimmt man aus zwei Versuchen. Zuerst ermittelt man die vom Ständer zugeführten Zusatzverluste mit ausgebautem Läufer beim Nennstrom und Netzfrequenz mit verminderter Spannung. Aus einem zweiten Versuch, wobei man die Maschine mit synchroner Drehzahl antreibt und mit einem Gegendrehfeld bei Netzfrequenz und Nennstrom mit verminderter Spannung speist, erhält man die vom Läufer gedeckten Zusatzverluste. Dabei nimmt man an, dass die Stromwärmeverluste des Läufers genau zu Hälfte vom Ständer und vom Läufer zugeführt werden. Die gesamten Zusatzverluste erhält man als die Summe der vom Ständer und vom Läufer zugeführten Zusatzverlusten.

c) Gleichfeldmethode. Dieses Verfahren wurde schon von *Richter* [1] beschrieben. Auch hier ermittelt man zuerst die vom Ständer zugeführten Zusatzverluste wie vorher beschrieben. Aus einem zweiten Versuch, wobei man die Maschine mit synchroner Drehzahl antreibt und die Ständerwicklung mit einem dem Nennstrom entsprechenden Gleichstrom speist, erhält man die vom Läufer gedeckten Zusatzverluste. Die Stromwärmeverluste des Läufers entnimmt man aus einem Kurzschlussversuch. Die Summe der vom Ständer und vom Läufer zugeführten Zusatzverluste ergibt die gesamten Last-Zusatzverluste.

d) Methode der verringerten Spannung. Diese Methode wurde von *Mandi* [8] angegeben. Der Motor wird unter Last mit verminderter Spannung und mit Nennstrom betrieben. Die Spannung wird soweit gesenkt, bis der Schlupf etwa 10% beträgt. Die Zusatzverluste erhält man aus der aufgenommenen Leistung nach Abzug der abgegebenen Leistung und aller bekannten Verluste.

e) eh-Sternschaltung. Die Schaltung wurde von *Jordan* [12 entwickelt. Der Motor benötigt keine Belastungsmaschine. Er wird dreiphasig im Leerlauf bei verminderter Spannung hochgefahren, dann wird ein Strang vom Netz abgeschaltet und über einen Widerstand einem der beiden anderen Stränge parallel geschaltet. Dabei tritt ein starkes inverses Drehfeld auf, welches den Motor belastet. Die Zusatzverluste, die die Summe der Zusatzverluste der mitlaufenden und gegenlaufenden Drehfelder sind, erhält man aus der Differenz der Luftspaltleistungen des mitlaufenden und des gegenlaufenden Drehfeldes nach Abzug der Reibungsverluste. Die Luftspaltleistungen ermittelt man aus den symmetrischen Komponenten der Spannungen und Ströme, die man graphisch oder rechnerisch bestimmt. Die Zusatzverluste bei Nennstrom erhält man durch eine quadratische Umrechnung der Ströme des mitlaufenden und des gegenlaufenden Systems.

Die Methode nach Pos. a erfordert eine sehr genau geeichte Pendelmaschine und eine genaue Drehzahlmessung. Bei sorgfältiger Messung kann der direkt gemessene Wirkungsgrad auf etwa ± 1% genau bestimmt werden [17]. Der Zweck der übrigen Verfahren (Pos. b bis e) ist, die Genauigkeit zu erhöhen. Man erkennt jedoch, dass bei keinem der Verfahren die Zusatzverluste unter Nennbetriebsbedingungen ermittelt werden. Sie sind also nur unter grossem Vorbehalt zu benutzen. *Jordan* und *Taegen* [14] bezweifeln die Brauchbarkeit des reverse rotation test, da ein grosser Anteil der Zusatzverluste bei der Umrechnung auf den Nennbetrieb wegen Nichtberücksichtigen der Eisensättigung ganz falsch ermittelt wird. Die gleiche Beurteilung dürfte auch für die Gleichfeldmethode gelten. Auch *Mandi* [8] bezweifelt die Richtigkeit dieser Messung. Er führt die Unsicherheit auf die mehr oder weniger willkürlich vorgenommene gleichmässige Aufteilung der Läuferstromwärmeverluste zurück. Die Fragwürdigkeit seines Verfahrens mit verminderter Spannung (Pos. d) beruht einmal auf der starken Abhängigkeit der Zusatzverluste von der Sättigung, zum anderen auf der Tatsache, dass eine Wirkungsgradbestimmung auch bei stark herabgesetzter Leistung ungenau ist. Für die eh-Sternschaltung gilt ebenfalls, dass die Eisensättigung nicht berücksichtigt wird, ausserdem ist die Gleichsetzung der Zusatzverluste des inversen mit dem des mitlaufenden Drehfeldes fragwürdig. Auch ist die Ungenauigkeit in der Differenzbildung von zwei grossen Beträgen bei der Luftspaltleistung der Drehfelder zu beachten. Vom messtechnischen Aufwand her ist dieses Verfahren am einfachsten durchzuführen. Die Auswertung der Messergebnisse ist jedoch zeitraubend.

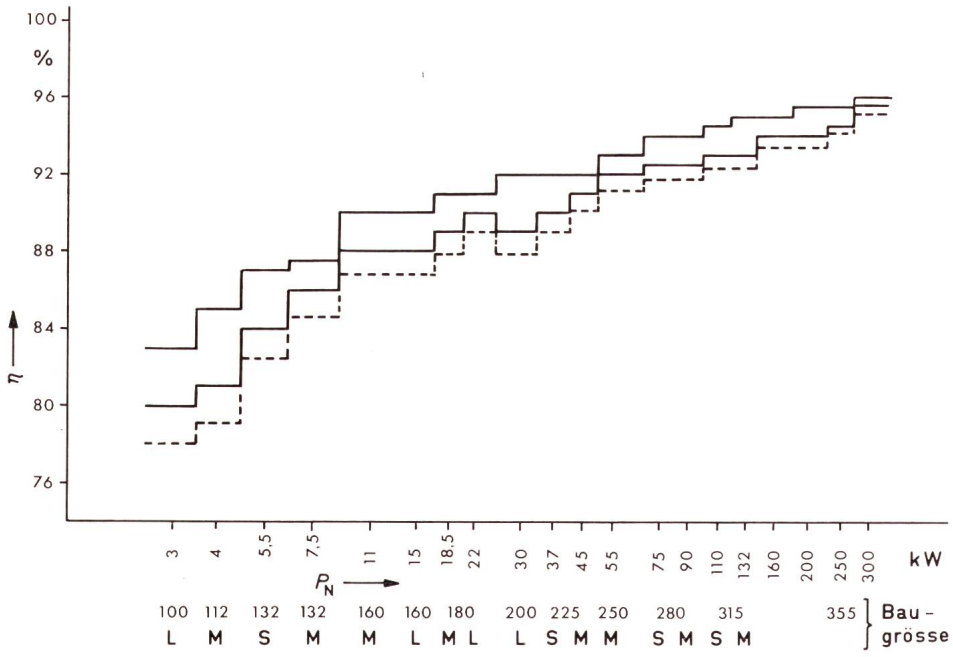


Fig. 1
Wirkungsgrade der 4poligen Norm-Kurzschlussläufermotoren der Schutzart P 33
Gestrichelt eingezeichnet die untere Toleranzgrenze
P_N Nennleistung
η Wirkungsgrad

3. Bedeutung der Last-Zusatzverluste

Nachdem es feststeht, dass eine direkte Bestimmung der Last-Zusatzverluste weder rechnerisch noch messtechnisch mit annehmbarer Genauigkeit möglich ist, soll die praktische Bedeutung dieser Verluste untersucht werden.

Stellt man die Frage nach der Bedeutung der Zusatzverluste von seiten des Betreibers, so muss man eine Aussage über die Bedeutung des Wirkungsgra-

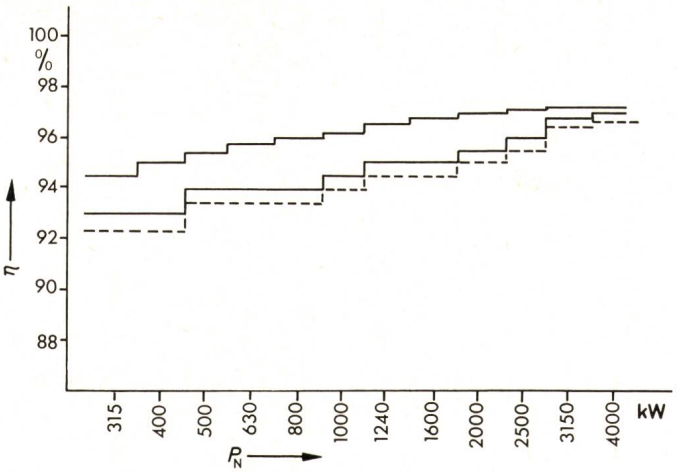


Fig. 2
Wirkungsgrade der 4poligen durchzugbelüfteten Kurzschlussläufermotoren für Hochspannung von 6 kV
Bezeichnungen siehe Fig. 1

des machen. Der Wirkungsgrad bestimmt die Betriebskosten der Maschine. Fig. 1 zeigt die Wirkungsgrade der vierpoligen Drehstrom-Kurzschlussläufermotoren der Schutzart P33 (IP44) im Normmotorenbereich von Baugrösse 100 bis 355. Die Bandbreite der Wirkungsgrade liegt bei anderen Polzahlen ähnlich. Es wurden die Listenangaben von fünf Motorenherstellern ausgewertet. Da es sich um namhafte Unternehmen handelt, kann man annehmen, dass die vorhandenen Schwankungen des Wirkungsgrades dem Stand der Technik entsprechen. Der Schwankungsbereich beträgt bei kleineren Typen 4% und bei grösseren 2%. Diese Erkenntnis bestätigt die Erfahrung, dass beim Kauf eines Normmotors dem Wirkungsgrad kaum mehr Aufmerksamkeit geschenkt wird als die Feststellung, dass er im Rahmen des Handelsüblichen liegt. Ansonsten entscheidet der Preis und vielleicht noch das Drehmomentverhalten.

Nachdem man sich in den letzten Jahren eingehend mit den Last-Zusatzverlusten befasst hat, ist anzunehmen, dass die Entwurfsrichtlinien [15] für ihre Kleinhaltung weitgehend eingehalten werden. Unter dieser Voraussetzung ist es wahrscheinlich, dass die Last-Zusatzverluste der Serienmotoren nicht mehr als etwa 1...2% betragen. In der Literatur sind gemessene Werte von 1...5% veröffentlicht. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass diese Werte teilweise an Motoren mit extrem ungünstiger Auslegung gemessen wurden und dass die Messverfahren – wie erläutert – nur mit grossem Vorbehalt akzeptabel sind. Die allgemein wahrscheinlichen 1...2% Last-Zusatzverluste bedeuten eine mögliche Wirkungsgradverschlechterung von 0,5...1,5%, da bei Errechnen des Wirkungsgrades nur 0,5% Zusatzverluste berücksichtigt sind. Dieser Betrag liegt durchaus im Rahmen der handelsüblichen Wirkungsgradschwankungen, so dass es verständlich erscheint, wenn das Interesse sowohl der Motorenhersteller als auch der Kunden an einer genauen Bestimmung der Last-Zusatzverluste im Normmotorenbereich nur gering ist. Dies gilt um so mehr, da die VDE-mässig zulässige Toleranz für den Wirkungsgrad bei kleinen Motoren etwa 2% und bei grossen etwa 0,5% beträgt.

Fig. 2 zeigt die Wirkungsgrade von grösseren vierpoligen Hochspannungsmotoren in Schutzart P22 mit Innenkühlung sowie in Schutzart P33 mit eingebautem Wasserkühler der vorher charakterisierten Hersteller. Im Leistungsbereich von 400...2500 kW ist ein Schwankungsbereich von 1,5...1% feststellbar. Da diese grösseren Motoren einzeln gefertigt werden, ist mit grosser Wahrscheinlichkeit anzunehmen, dass die notwendigen Massnahmen für Kleinhaltung der Last-Zusatzverluste angewendet werden. In diesem Leistungsbereich messen die Betreiber teilweise dem Wirkungsgrad grosse Bedeutung bei. Auch wenn man von diesen Sonderfällen absieht, kann man feststellen, dass eine Wirkungsgradverschlechterung infolge von Last-Zusatzverlusten von 1,5% die handelsübliche Grenze überschreiten kann. Auch ist die VDE-mässig zulässige Toleranz bei diesen Wirkungsgraden kleiner und beträgt nur 0,6...0,3%. In Fällen, wo eine genaue Wirkungsgradbestimmung für den Betreiber von grosser Wichtigkeit ist, könnte man die Anwendung der kalorimetrischen Messung erwägen.

Bei der kalorimetrischen Verlustmessung [16] werden die Verluste aus der Differenz der Wärmeinhalte des zu- und abströmenden Kühlmittels bestimmt. Insbesondere bei der Flüssigkeitskalorimetrie, bei Maschinen mit geschlossenem Kühlkreislauf und Rückkühlung des Kühlmittels durch Wasser, ist eine ausreichende Genauigkeit vorhanden. Die Ansprüche an die Messtechnik und an den Aufwand sind vertretbar. Zu den kalorimetrisch gemessenen Verlusten sind natürlich noch die Nebenverluste hinzuzurechnen. Es sind die Verluste, die nicht durch das Kühlmittel, sondern durch direkte Wärmeabstrahlung, Wärmeleitung abgeführt werden. Diese Art der Verlustmessung hat sich für Turbogeneratoren, also bei Maschinen über etwa 100 MW bewährt. Ihre Anwendung bei grossen Asynchronmotoren steht noch aus.

Der Hersteller muss bestrebt sein, die Last-Zusatzverluste klein zu halten, damit er seine Maschine hoch ausnützen kann. Jede Maschine muss eine bestimmte Grenzerwärmung einhalten. Steht die Maschinenkonstruktion fest, so wird die Erwärmung durch die Verluste bestimmt. Sind die Verluste zu gross, so wird die zulässige Erwärmung überschritten. Um sie zu begrenzen, müssen durch grösseren Materialaufwand – Eisen oder Kupfer – die Verluste gemindert werden. Bei den meist verwendeten Kurzschlussläufermotoren ist allgemein die Ständerwicklung die kritische Stelle. Es ist nunmehr zu untersuchen, wie die Last-Zusatzverluste die Erwärmung der Ständerwicklung beeinflussen.

Bei Vorausberechnung der Erwärmung elektrischer Maschinen hat sich die Methode der Wärmequellennetze [5] gut bewährt. Hierbei stellt man sich die diversen in einem Maschinenteil entstehenden Verluste an bestimmten Stellen konzentriert und mit Wärmewiderständen verbunden vor. Die Wärmewiderstände stellen die Verbindung zum Kühlmedium, zu der Aussenluft her. Für einfache Übersichtsbetrachtungen genügt es, folgende Verlustquellen anzuwenden: Eisenverluste (V_E, 1), Stromwärmeverluste im Ständer (V_{Cu1}, 2), Zusatzverluste (V_z, 3) und Stromwärmeverluste im Läufer (V_{Cu2}, 4). Da der grösste Teil der Last-Zusatzverluste im Läufer entsteht, ist es zweckmässig, die Last-Zusatzverluste V_z an der Läuferoberfläche konzentriert anzunehmen. In Fig. 3, I sind die Querschnitte von Kurzschlussläufermotoren dargestellt mit den Wärmequellen 1 bis 4; Fig. 3, II zeigt die Wärmeersatzschaltbilder.

Bezüglich der Wärmeabfuhr verhalten sich oberflächengekühlte und innengekühlte (durchzugbelüftete) Maschinen grundsätzlich verschieden. Fig. 3a zeigt die Verhältnisse bei einer innengekühlten und 3b bei einer oberflächengekühlten Maschine. Bei der oberflächengekühlten Maschine werden die

Verluste fast ausschliesslich von der Ständeroberfläche über die Rippen an die Umgebungsluft abgeführt. Der überwiegende Teil der Verluste fliesst über den Wärmeweg *A*, d. h. über das Ständerpaket, während nur ein geringer Teil über den Wärmeweg *B*, nämlich über die Innenluft an das Gehäuse geführt wird. Da die Last-Zusatzverluste im Maschineninneren entstehen, fliessen sie überwiegend durch das Ständerpaket und erzeugen ein zusätzliches Wärmegefälle, so dass die Erwärmung der Ständerwicklung entsprechend ansteigt.

Bei der innengekühlten Maschine sind entsprechend dem Kühlluftstrom mehrere Wärmewege vorhanden. Der grösste Teil der Ständer-Stromwärmeverluste fliesst über den Weg A durch das Wicklungskupfer an die Wickelköpfe und von da an die Innenluft. Ein geringer Teil dieser Verluste, aber der grösste Teil der Eisenverluste fliessen über die Ventilationsschlitze (Weg B) und die Aussen- und Innenfläche (Luftspalt) des Ständerpaketes an die Kühlluft ab (Weg C bzw. D). Die Stromwärmeverluste des Läufers, ebenso wie ein Teil der Last-Zusatzverluste fliessen durch die Stäbe in die Kurzschlussringe und von dort an die Kühlluft (Weg E). Ein Teil fliesst über den Luftspalt (Weg D) und durch die Ventilationskanäle (Weg F) ab. Infolge des intensiven Luftdurchflusses durch den Luftspalt steht der Ständer mit dem Läufer nur geringfügig in Verbindung. Der Wärmewiderstand zwischen den beiden Teilen ist sehr gross gegenüber den anderen Widerständen. Man kann daher ohne grossen Fehler die Belüftung des Ständers als vom Läufer unabhängig annehmen. Infolgedessen beeinflussen die Zusatzverluste die Erwärmung der Ständerwicklung nicht. Nur über die Erwärmung der Kühlluft tritt eine geringfügige indirekte Beeinflussung auf.

Erwärmungsmässig sind daher die Zusatzverluste nur bei oberflächengekühlten Maschinen von Bedeutung. Eine Zwischenstellung nehmen Maschinen mit Röhrenkühlung ein. Die erwärmte Innenluft 1 gibt die Verluste an die Röhre 2 ab. Von da gelangen sie an die Aussenluft 3 (Fig. 4). Bei diesen Maschinen beträgt der Temperatursprung zwischen Innenluft und Aussenluft etwa 30...40 K und damit rund 40...50 % der zulässigen Erwärmung. Wegen ihres Einflusses auf dieses Temperaturgefälle erhöhen Zusatzverluste die Ständererwärmung.

4. Bestimmen der Last-Zusatzverluste aus Erwärmungsmessungen

Da es ohnehin nötig ist, die Einhaltung der Erwärmungsregeln durch eine Erwärmungsmessung im Versuchsfeld nachzuweisen, liegt es nahe, die Last-Zusatzverluste über diese Messungen zu bestimmen. Eine Methode, die Last-Zusatzverluste durch Erwärmungsmessungen zu bestimmen, ist schon in [13] angedeutet. In der Zwischenzeit wurde das Verfahren verbessert. Es soll nunmehr über Messergebnisse berichtet werden. Zuvor aber eine Erläuterung des Verfahrens.

Bei elektrischen Maschinen werden praktisch alle Verluste in Wärme umgewandelt. Sucht man eine Stelle der Maschine, deren Erwärmung von allen Verlusten beeinflusst wird, so kann man aus der Erwärmungszunahme auf die Verluste schliessen. Solch eine Stelle ist bei oberflächengekühlten Maschinen das Gehäuse. Fig. 5a zeigt eine oberflächengekühlte Maschine mit Meßstellen für die Gehäusetemperaturen. Am Anfang und am Ende werden gleichmässig am Umfang verteilt je 4 Thermoelemente in Löcher eingestemmt (1...4). Bei Maschinen mit Röhrenkühlung misst man zweckmässiger die Innenlufttemperatur kurz vor den Maschinenenden zwischen den Rohren (Fig. 5b). Auch hier baut man je 4 Meßstellen ein. In unmittel-

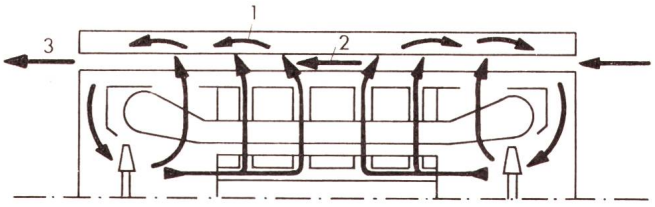


Fig. 4
Belüftungsprinzip und Wärmeströmung in einem Motor mit Röhrenkühlung
Bezeichnungen siehe im Text

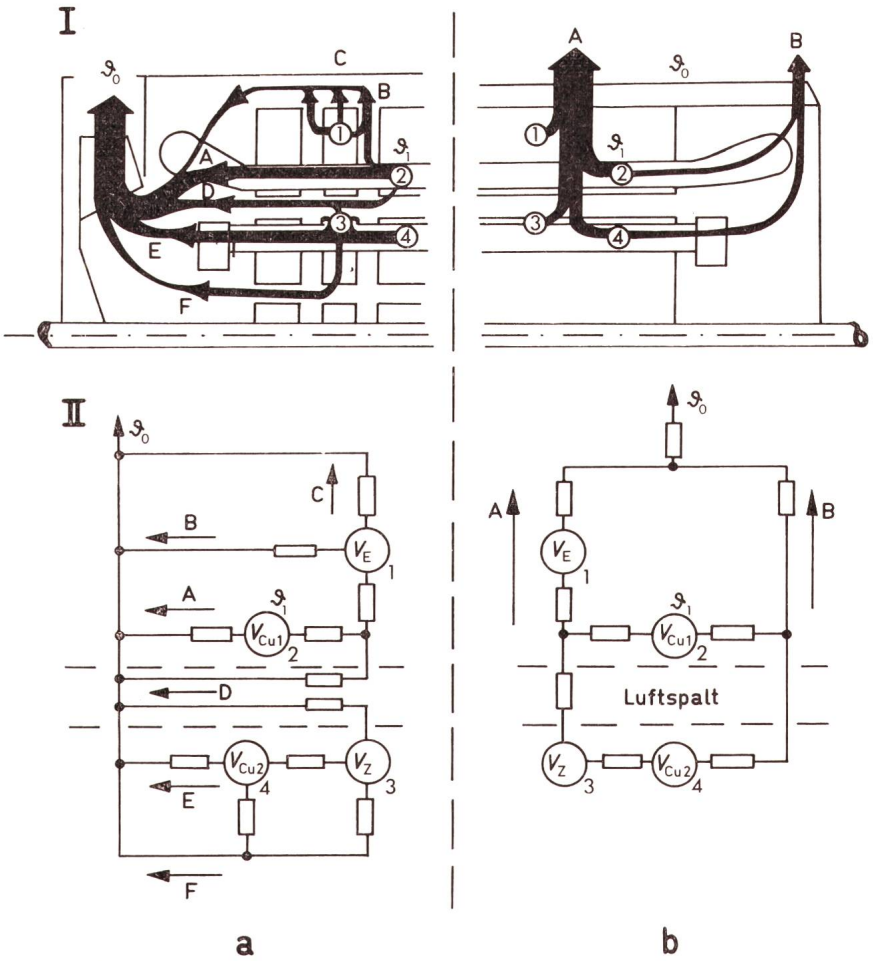
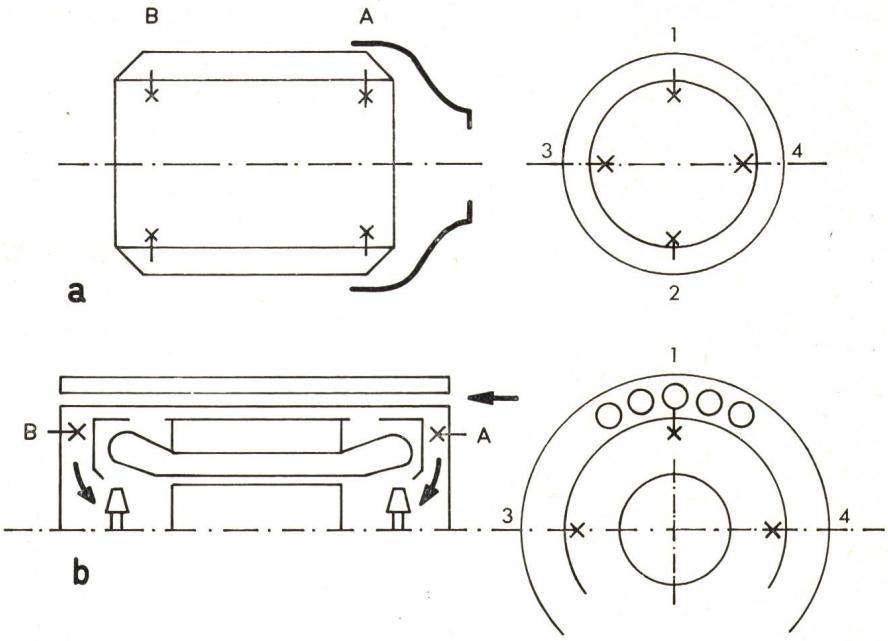


Fig. 3
Wärmeströmung (I) und Wärmeersatzschaltbild (II) eines Kurzschlussläufers
a durchzugbelüftet
b oberflächengekühlt

ϑ_0	Temperatur der Aussenluft
1, 2, 3, 4	Wärmequellen
A, B, C, D, E, F	Wärmewege
V_E, V_{Cu}, V_Z	Verluste
ϑ_1	Temperatur der Ständerwicklung

Fig. 5
Einbaustelle von Thermoelementen

a zur Messung der Gehäusetemperaturen eines oberflächengekühlten Motors
b zur Messung der Innenlufttemperatur eines röhrengekühlten Motors



barer Nähe der Maschine wird die Raumtemperatur gemessen. Durch drei Leerlaufmessungen bei etwa 80, 100 und 120% der Nennspannung (Messwerte 1...3 der Tabelle I) lässt sich der Zusammenhang zwischen der Gehäuseerwärmung ϑ_G (Mittelwert aller Meßstellen) und den Verlusten bestimmen, da alle Leerlaufverluste messbar sind (Fig. 6). Die Verbindung der Messpunkte miteinander muss eine Gerade ergeben. Sie geht allgemein nicht durch den Nullpunkt, wenn man nur die sog. heizenden Verluste V_H berücksichtigt. Die Gerade schneidet die Abszisse links vom Nullpunkt. Unter heizenden Verlusten versteht man die Summe der Stromwärme- und Eisenverluste:

$$V_H = V_{Cu1} + V_{Cu2} + V_E$$

Bei Leerlauf sind die Schlupfverluste praktisch gleich Null. Der Verlustanteil, der links vom Nullpunkt liegt, ist der Verlust infolge innerer Reibung V_{Ri}, der nur ein geringer Teil der gesamten Reibungsverluste ist. Macht man anschliessend drei Lastversuche mit etwa 80, 100 und 120% des Nennstromes, so stellt man fest, dass die Messwerte (4...6 in Tab. II) oberhalb der Geraden *a* liegen. Sie müssten von Messpunkt 2 ausgehend auf einer Geraden *b* liegen. Bestimmt man die Verlustdifferenz zwischen den Messwerten 4...6 und der Geraden *a*, so muss sie jeweils die Last-Zusatzverluste darstellen.

Um die Last-Zusatzverluste bei Nennstrom V_{zN} zu erhalten, trägt man die Zusatzverluste über dem Quadrat des Ständerstromes (Fig. 7) auf. Zieht man eine Gerade durch den Nullpunkt mit grösster Annäherung an die Messpunkte, so kann man mit ziemlich grosser Sicherheit die Last-Zusatzverluste im Nennbetrieb bestimmen. Dieser Konstruktion liegt die allgemein anerkannte Annahme zugrunde, dass die Last-Zusatzverluste quadratisch mit dem Strom wachsen.

An einigen Beispielen soll die Brauchbarkeit der Methode aufgezeigt werden. Es werden die Messergebnisse an einem Normmotor Baugrösse 112 M, 4 kW, 380 V, 8,3 A, 2890 min^{-1}, P 33, und an einem Hochspannungsmotor 460 kW, 6000 V, 52,2 A, 2964 min^{-1}, P 33, mit Röhrenkühlung[2]) angegeben. Der Normmotor ist oberflächengekühlt und es wurden drei Läuferausführungen untersucht. Bei einer Ständernutenzahl von $Z_1 = 24$ standen Läufer mit den Nutenzahlen $Z_2 = 16$, 20 und 28 zur Verfügung. In Tabelle I sind die Messergebnisse der Leerlaufmessungen mit Läufer $Z_2 = 16$ zusammengestellt. Es sind angegeben die Gehäuseübertemperaturen ϑ_G, die Raumtemperaturen RT, der Ständerstrom I_1, ferner die heizenden Verluste V_H, die gesamten Reibungsverluste V_R und die inneren Reibungsverluste V_{Ri} (diese gemessen ohne Aussenlüfter). Die Messungen wurden bei 300, 380 und 430 V durchgeführt.

[2]) Die Motoren waren von der Schorch GmbH. zur Verfügung gestellt. Die Messungen an dem Hochspannungsmotor wurden im Prüffeld der gleichen Firma durchgeführt.

Tabelle II zeigt die Ergebnisse der Lastmessungen mit verschiedenen Läufern. Ausser den bereits erläuterten Werten sind noch aufgeführt die aus den folgenden Diagrammen entnommenen Beträge der Last-Zusatzverluste V_z und die Zusatzverluste bei Nennstrom V_{zN}. Die Fig. 6 und 7 zeigen die zeichnerische Auswertung mit dem 16nutigen Läufer. In Fig. 6 ist die Gehäuseerwärmung ϑ_G über die heizenden Verluste V_H eingezeichnet. Man erkennt, dass die Messpunkte 1...3 mit guter Näherung an einer Geraden *a* liegen und dass diese Gerade die Abszisse bei 35 W, entsprechend V_{Ri} schneidet. Die Messpunkte 4...6 der Lastmessungen liegen eindeutig über der Leerlaufgeraden *a*. Ihre Abstände zu der Geraden ergeben die Last-Zusatzverluste V_z. Messungen mit den anderen Läufern ergaben ähnliche Ergebnisse. Die Leerlaufgeraden schneiden die Abszisse bei den inneren Reibungsverlusten und haben die gleiche Neigung, da für alle Läufer der gleiche Ständer verwendet wurde.

In Fig. 7 sind die ermittelten Zusatzverluste über dem Quadrat des Ständerstromes aufgetragen. Die gezeichnete Gerade durch den Nullpunkt ergibt für die Nennlast den in der Tabelle II angegebenen Zusatzverlust V_{zN}. Die Tabelle enthält auch die Zusatzverluste der anderen Läufer. Die Zusatzverluste liegen bei 1,5...3,1% der abgegebenen Leistung. Wie zu erwarten war, sind die Zusatzverluste beim Läufer mit $Z_2 = 16$ am grössten, da das Nutenzahlverhältnis $Z_2/Z_1 = 0{,}666$ hier ex-

Leerlaufmessungen eines 2poligen Normmotors von 4 kW

Tabelle I

Mess-Nr.		1	2	3
Meßspannung	V	300	380	430
ϑ_G	K	5,3	7,9	11,6
RT	K	20,8	20,8	21,2
I_1	A	2,22	3,22	4,42
V_H	W	160	265	386
V_R	W	117	117	117
V_{Ri}	W	35	35	35

Lastmessungen des Normmotors gemäss Tabelle I

Tabelle II

Z_2		16			20			28		
Mess-Nr.		4	5	6	4	5	6	4	5	6
Strom	I_1/I_N	0,8	1,0	1,2	0,8	1,0	1,2	0,8	1,0	1,2
ϑ_G	K	16,2	21,7	25,5	13,7	17,8	21	14,8	20	24
RT	K	20	20,5	20,5	20,5	21	20,3	22	23	23,5
I_1	A	6,6	8,3	9,04	6,6	8,32	9,1	6,54	8,32	9,1
V_H	W	458	639	746	425	585	675	469	653	753
V_z	W	90	110	150	45	50	70	57	62	107
V_{zN}	W	123 = 3,1%			59 = 1,5%			81 = 2,0%		
V_{Ri}	W	35			22			16		
V_R	W	117			108			98		

trem klein ist. Bei $Z_2 = 28$ sind die Verluste etwas geringer, da das Nutenzahlverhältnis $Z_2/Z_1 = 1{,}17$ betrug. Der kleinste Wert wurde bei $Z_2 = 20$ mit $Z_2/Z_1 = 0{,}833$ festgestellt. Diese Ergebnisse entsprechen den Angaben in [15].

Tabelle III zeigt die Messergebnisse der Hochspannungsmaschine. Die Auswertung ist aus Fig. 8a und b ersichtlich. Bei Nennstrom ergibt die Näherungsgerade den Wert von 6000 W entsprechend 1,3% der abgegebenen Leistung. Das Nutenzahlverhältnis betrug 0,75. Die Leerlaufmessungen zeigen hier eine grössere Streuung. Die Gerade schneidet bei etwa 1,8 kW die Abszisse, welcher Wert etwa ⅓ der Reibungsverluste ist und etwa den inneren Reibungsverlusten entsprechen dürfte (sie wurden bei dieser Maschine nicht gemessen).

Für Vergleichszwecke wurden die Zusatzverluste der Maschinen auch nach der eh-Sternschaltung bestimmt. Beim Normmotor wurden je drei Versuche mit verschiedenen Hilfswiderständen R_{eh} bei verminderter Spannung von 220 V durchgeführt. In Tabelle IV sind die Messergebnisse zusammengestellt. Es sind aufgeführt der Strom I_m des mitlaufenden und I_g des gegenlaufenden Drehfeldes, der daraus berechnete Gesamtstrom I_1, die so ermittelten Zusatzverluste V_z. Die Werte von V_{zN} erhielt man aus Näherungsgeraden der Messpunkte $V_z = f(I_1^2)$ zu I_N.

Bei der Hochspannungsmaschine wurde nur bei einem Hilfswiderstand von 11 Ω gemessen, und zwar bei verminderter Spannung von 2000 V. Die Messwerte zeigt Tabelle V.

Man kann feststellen, dass mit der eh-Sternschaltung wesentlich höhere Zusatzverluste ermittelt wurden. Diese höheren

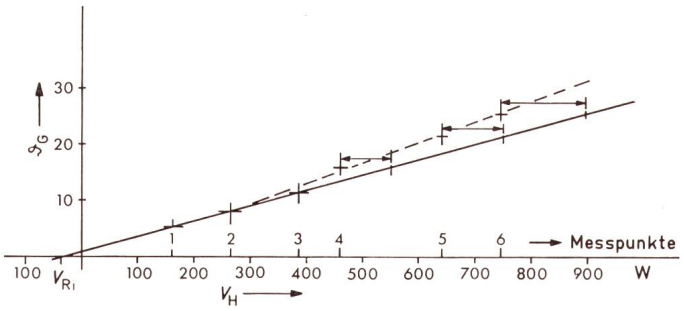


Fig. 6

Diagramm $\vartheta_a = f(V_H)$ zur Auswertung der Messergebnisse des Normmotors mit 16 Läufernuten

Bezeichnungen siehe im Text

Leerlauf- und Lastmessungen eines 2poligen Hochspannungsmotors von 460 kW, 6 kV mit Röhrenkühlung

Tabelle III

Versuch		Leerlauf			Last bei U_N		
Mess-Nr.		1	2	3	4	5	6
Meßspannung	V	5 140	6 036	6 666	5 970	5 950	5 980
ϑ_{Li}	K	11,3	14,6	26,4	36,8	49,6	54,1
RT	K	25,9	24,8	27,6	23,4	22,9	26,7
I_1	A	7,7	11,75	16,9	42	52,1	57
V_H	W	3 480	6 600	11 400	13 480	18 510	21 880
V_z	W				4 700	6 500	5 600
V_{zN}	W				6000 = 1,3%		
V_R	W	6 500	6 500	6 500			

Messungen mit eh-Sternschaltung des Normmotors

Tabelle IV

Z_2		16			20			28		
R_{eh}	Ω	20	15	10	20	15	10	20	15	10
I_m	A	3,38	4,15	4,6	2,48	2,98	3,6	2,87	3,39	3,98
I_g	A	7,1	7,45	8,0	7,6	8,22	8,53	7,6	8,1	8,45
I_1	A	7,85	8,55	9,2	7,95	8,75	9,27	8,14	8,75	9,35
V_z	W	169	187	193	105	160	150	157	180	162
V_{zN}	W	168			135			148		

Verluste müssten entsprechend grössere Erwärmungen zur Folge haben, die aber mit Sicherheit nicht gemessen wurden. Vergleicht man die Ströme der mitlaufenden und der gegenlaufenden Drehfelder, so stellt man fest, dass beim Normmotor der Strom des gegenlaufenden Drehfeldes bei weitem überwiegt, so dass bei der quadratischen Umrechnung dieser praktisch den Gesamtstrom bestimmt. Mittels der eh-Sternschaltung misst man also hauptsächlich die Zusatzverluste des gegenlaufenden Drehfeldes, das eine der Ursachen der Abweichung sein könnte.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass aus Erwärmungsmessungen bei Leerlauf und Last die Zusatzverluste sich mit genügend grosser Genauigkeit ermitteln lassen. Der messtechnische Aufwand erscheint auf den ersten Blick gross. Führt man die Leerlauf- und Lastversuche unmittelbar hintereinander durch, so ist der Versuchsablauf nur eine Zeit- und Platzfrage. Der Prüffeldtechniker kann zwischen den Erwärmungsmessungen auch andere Aufgaben verrichten.

Die Genauigkeit der Messung hängt weitgehend von der Genauigkeit der Temperaturmessungen ab. Die Anzeigen der Thermoelemente sind zufriedenstellend genau. Für die Messung der Raumtemperatur soll ein Ausdehnungsthermometer

Messung mit eh-Sternschaltung des Hochspannungsmotors

Tabelle V

I_m	A	51,5
I_g	A	15
I_1	A	53,6
V_z	W	7600
V_{zN}	W	7160

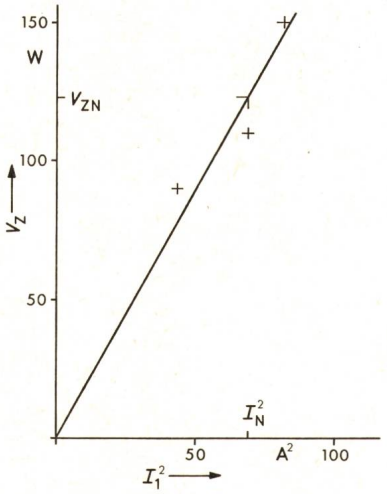


Fig. 7

Diagramm $V_z = f(I_1^2)$ zur Auswertung der Messergebnisse des Normmotors

Bezeichnungen siehe im Text

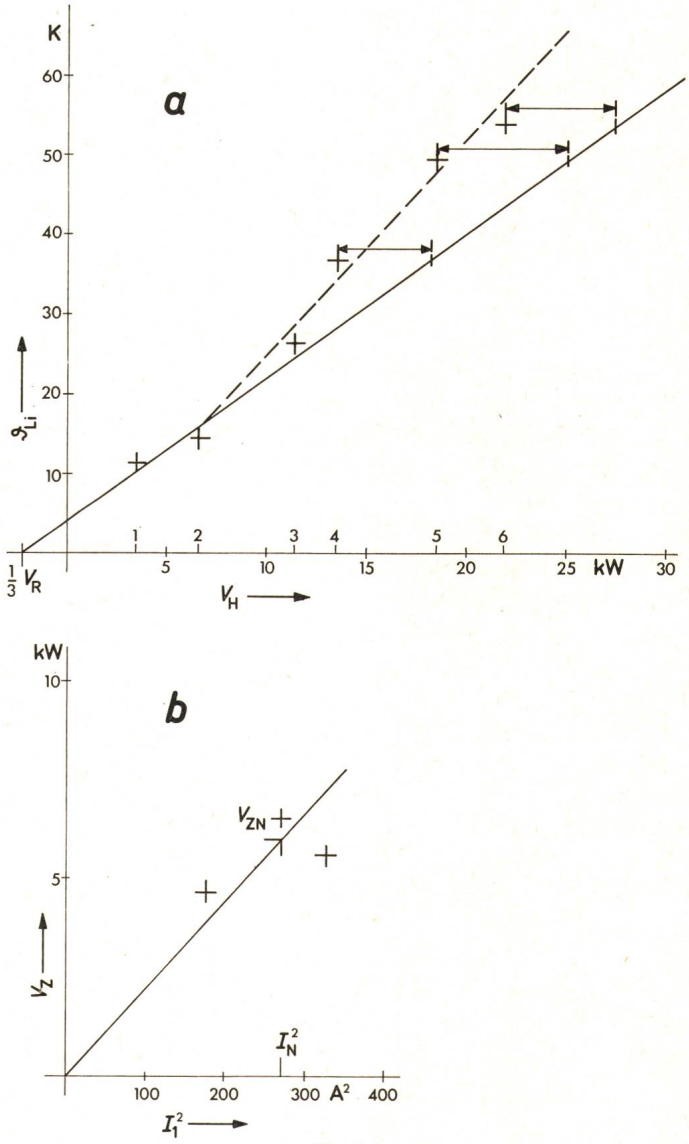


Fig. 8

Diagramme zur Auswertung der Messergebnisse des Hochspannungsmotors

a $\vartheta_{Li} = f(V_H)$

b $V_z = f(I_1^2)$

mit Zehntelgradeinteilung verwendet werden. Besonders bei den Leerlaufmessungen sind die Differenzen von kleinen Temperaturen zu bilden, was die Genauigkeit stark beeinflusst. Durch drei Messpunkte und unter Beachtung der inneren Reibungsverluste ist jedoch eine Gerade mit genügend grosser Genauigkeit zu ziehen. Der Vorteil der Methode ist, dass sie aus Messungen besteht, die mit grosser Routine in jedem Prüffeld durchgeführt werden.

Literatur

[1] *R. Richter:* Elektrische Maschinen. 4. Band: Die Induktionsmaschinen. Berlin, Julius Springer Verlag, 1936.

[2] Test Code for polyphase induction motors and generators. ASA C 50.20-1954.

[3] *A. Odok:* Zusatzverluste und Zusatzmomente in Kurzschlussankermotoren mit unisolierten Stäben. Dissertation Nr. 2437 der ETH Zürich, 1955.

[4] *H. Peesel:* Über das Verhalten eines Asynchronmotors bei verschiedenen Läufern aus massivem Stahl. Dissertation der Technischen Hochschule Carolo-Wilhelmina, Braunschweig, 1958.

[5] *J. Hak:* Wärmequellen-Netze elektrischer Maschinen. E und M 76(1959)11, S. 236...243.

[6] *H. Jordan* und *F. Taegen:* Drehmomentkurven und Zusatzverluste von Drehstrom-Asynchronmotoren. ETZ-A 81(1960)23, S. 816...820.

[7] *H. Jordan* und *F. Taegen:* Über den Einfluss der Isolation des Läuferkäfigs auf die Drehmomente von Drehstrom-Asynchronmotoren. AEG Mitt. 52(1962)1/2, S. 42...43.

[8] *A. Mandi:* Ein Vorschlag zur Bestimmung des Wirkungsgrades und der Erwärmung von Induktionsmotoren. E und M 79(1962)15/16, S. 399...405.

[9] *H. Jordan* und *F. Taegen:* Zur Messung der Zusatzverluste von Asynchronmaschinen. ETZ-A 86(1965)6, S. 167...171.

[10] *H. Jordan* und *F. Taegen:* Zur Berechnung der Zahnpulsationsverluste von Asynchronmaschinen. ETZ-A 86(1965)25, S. 805...809.

[11] *Th. Keve:* Beitrag zur Klärung der Drehmomentsättel bei asynchronen Kurzschlussläufermotoren. ETZ-A 87(1966)7, S. 221...227.

[12] *H. Jordan, E. Richter* und *G. Röder:* Ein einfaches Verfahren zur Messung der Zusatzverluste in Asynchronmaschinen. ETZ-A 88(1967)23, S. 577...583.

[13] *Th. Keve:* Anwendung des Digitalrechners und Methoden zur Bestimmung der Parameter für die Erwärmungsrechnung der Asynchronmotoren mit Oberflächenkühlung. Conti Elektro-Berichte 13(1967)1, S. 42...49.

[14] *H. Jordan* und *F. Taegen:* Experimentelle Untersuchungen der lastabhängigen Zusatzverluste von Käfigläufermotoren im reverse rotation test. E und M 85(1968)1, S. 11...17.

[15] *K. Oberretl:* 13 Regeln für minimale Zusatzverluste in Induktionsmotoren. Bull. Oerlikon -(1969)389/390, S. 1...11.

[16] *A.-W. Kron:* Kalorimetrische Verluste bei elektrischen Maschinen. ETZ-A 91(1970)11, S. 593...598 + 92(1971)9, S. 562.

[17] *W. Nürnberg:* Die Prüfung elektrischer Maschinen. Berlin/Heidelberg/New York, Springer Verlag, 1965.

Adresse des Autors:

Dr.-Ing. *Thomas Keve,* Dozent an der Fachhochschule Köln, Amselstr. 16, D-407 Rheydt.

HEINRICH WAGNER

1866–1920

Der Name Heinrich Wagners ist heute nur noch wenigen geläufig und seine Verdienste zumeist vergessen.

Als Sohn eines aus Gelterkinden stammenden Fabrikdirektors kam er am 19. Oktober 1866 in Lörrach zur Welt. Nach dem Besuch des Gymnasiums Lörrach, der Oberrealschule Basel und der Absolvierung einer einjährigen Werkstättenpraxis in Zürich trat er in die mechanisch-technische Abteilung des Eidg. Polytechnikums ein. Diese Schule verließ er 1888 mit dem Diplom.

Die damals interessant werdende Elektrizität zog auch Wagner an und so sah man ihn zuerst bei der Zürcher Telephongesellschaft, die sich auch mit Starkstromproblemen zu befassen begann, bei Alioth in Basel, sowie bei der Turbinenfabrik Bell & Co. in Kriens. Während einer etwas länger dauernden Auslandtätigkeit im Werk Cannstatt der Maschinenfabrik Esslingen, wo Elektromaterial fabriziert wurde, lernte er auch seine Lebensgefährtin kennen.

Als Professor *Wyssling* nach der Erstellung des Lettenwerkes von der Leitung des Elektrizitätswerkes der Stadt Zürich (EKZ) zurücktrat, um sich dem Bau des Sihlwerkes zu widmen, schlug er Heinrich Wagner als seinen Nachfolger vor, den er am Polytechnikum und in der Telephongesellschaft kennen gelernt hatte. Wagner trat sein Amt 1894 an. Das EWZ bediente zu jener Zeit 550 Abonnenten, denen es 250000 kWh bei einer verfügbaren Leistung von 600 kW lieferte. Die einsetzende Entwicklung machte bald die Erschliessung neuer Energiequellen nötig. Waren bis dahin kleinere und mittlere Kraftwerke vorwiegend in der Nähe der Absatzgebiete entstanden, hatte man mit dem Löntschwerk erstmals eine abgelegenere Wasserkraft dienstbar gemacht. Wagner wagte es, die grosse Stadt Zürich aus dem 135 km entfernten Albulawerk über eine 50-kV-Doppelleitung zu versorgen. Um das dieser Lösung innewohnende Risiko zu verkleinern, schuf er in der Stadt ein Einphasennetz mit Momentanreserve, bei der Umformer aus grossen Akkumulatorenbatterien gespiesen werden konnten. Das System bewährte sich und blieb bis in die fünfziger Jahre erhalten. 1920 konnte dann das von Wagner projektierte und gebaute Heidseekraftwerk in Betrieb genommen werden.

Wagner machte sich auch verdient als Promotor und Mitbegründer des Starkstrominspektorates, als Vorstandsmitglied und Präsident des SEV. Er verfocht auch als einer der Ersten den Gedanken der «eidgenössischen Sammelschiene».

Die Tätigkeit Wagners erschöpfte sich jedoch nicht im Fachlich-Technischen. Er diente seinem Land als Soldat, während des 1. Weltkrieges als Artilleriechef der Südfront. Eine Riesenlast bedeutete die Übernahme des Postens des Chefs der industriellen Kriegswirtschaft, in welcher Eigenschaft er mit einem Stab von 500 Personen die Versorgung des Landes mit Strom, Kohle, Gas sowie allen nötigen Rohstoffen sicherzustellen hatte. Die Beschäftigung mit Versicherungsfragen der Elektrizitätswerke führte ihn schliesslich in den Verwaltungsrat der Unfall-Versicherungsgesellschaft Helvetia.

Mit beispielloser Energie und hohem Pflichtbewusstsein setzte sich Wagner trotz angeschlagener Gesundheit für all diese Aufgaben ein, bis er am 21. April 1920, nur 54jährig, seinem Herzleiden erlag.

H. Wüger