Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 2 (1911)
Heft: 7

Artikel: Beiträge zur Wirkungsgradbestimmung von Gleichstrommaschinen
Autor: Guggenheim, S.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1057205

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: 05.12.2025

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

SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

Erscheint monatlich mit den Jahres-Beilagen **„Statistik der Starkstromanlagen der Schweiz"** sowie **„Jahresheft"** und wird unter Mitwirkung einer vom Vorstand des S. E. V. ernannten Redaktionskommission herausgegeben.

Alle den Inhalt des „Bulletin" betreffenden Zuschriften sind zu richten an die

Redaktion: Ing.-Consulent Dr. W. Kummer, Mythenstrasse 15, Zürich II (Telephon 5806)

Alle Zuschriften betreffend Abonnement, Expedition und Inserate sind zu richten an den

Verlag: Fachschriften-Verlag A.-G., Zürich Bahnhofstrasse 61, Zürich I (Telephon 6741)

Est publié sous la direction d'une Commission de Rédaction nommée par le Comité de l'A. S. E.

Ce bulletin parait mensuellement et comporte comme annexes annuelles la **„Statistique des installations électriques à fort courant de la Suisse"**, ainsi que l'**„Annuaire"**.

Toutes les communications concernant la matière du „Bulletin" sont à adresser à la

Rédaction: Ing.-Conseil Dr. W. Kummer Mythenstrasse 15, Zurich II (Téléphone 5806)

Toutes les correspondances concernant les abonnements, l'expédition et les insertions sont à adresser à

l'éditeur: Fachschriften-Verlag A.-G., Zurich Bahnhofstrasse 61, Zurich I (Téléphone 6741)

II. Jahrgang / IIe Année — Bulletin No. 7 — Juli / Juillet 1911

Beiträge zur Wirkungsgradbestimmung von Gleichstrommaschinen.

Von *Dr. S. Guggenheim,* Privatdozent, Zürich.

Der genauen experimentellen Bestimmung des Wirkungsgrades einer Dynamomaschine setzen sich in der Praxis im allgemeinen unüberwindliche Schwierigkeiten entgegen. Selbst im Laboratorium ist diese Messung ausserordentlich umständlich und absolut einwandfrei nur in den seltensten Fällen ausführbar. Die in verschiedenen Staaten bestehenden Normalien zur Prüfung elektrischer Maschinen lassen es daher zu, dass man als Wirkungsgrad den sogenannten „messbaren Wirkungsgrad" nimmt. Dieser ist immer um einige Prozente höher als der „tatsächliche Wirkungsgrad", da zu seiner Berechnung gewisse Verluste nicht berücksichtigt werden.

Nach einer, beispielsweise durch die „Normalien für Bewertung und Prüfung von elektrischen Maschinen und Transformatoren" des Verbandes Deutscher Elektrotekniker gestatteten Methode, wurde anlässlich der im Folgenden mitgeteilten Untersuchungen der „messbare Wirkungsgrad" einer Gleichstrommaschine ermittelt; weiter wurde es unternommen, den „tatsächlichen Wirkungsgrad" mit möglichst grosser Annäherung zu bestimmen, bezw. die Differenz der beiden zu konstatieren.

Der Wirkungsgrad einer elektrischen Maschine lässt sich bekanntlich nur dann absolut genau messen, wenn sowohl die eingeführte Leistung als auch die Nutzleistung direkt und elektrisch messbar sind. Dies ist aber nur bei Umformern möglich; im allgemeinen kann daher die eingeführte Leistung nur indirekt bestimmt werden, indem man die Verluste in der Maschine zur Nutzleistung addiert. Die oben angeführten Schwierigkeiten beruhen nun auf der Bestimmung dieser Verluste. Ein Teil derselben lässt sich auf einfache Art und Weise für die leerlaufende Maschine ermitteln, ist aber in diesem Falle kleiner als bei belasteter Maschine. Die bei einer gewissen Belastung auftretenden Verluste können mit Benützung der „Leerlaufsverluste" angegeben werden und sollen als „messbare Verluste" bezeichnet sein. Dieselben genügen nach den genannten „Normalien" zur Berechnung des „messbaren Wirkungsgrades". Die Bestimmung der Differenz der „messbaren Verluste" von den „tatsächlichen Totalverlusten", der sog. „zusätzlichen Verluste" [1]), bildet den Hauptgegenstand der vorliegenden Untersuchung.

[1]) Ueber die Bestimmung der zusätzlichen Verluste bestehen ältere Arbeiten von *A. Dettmar,* E. T. Z. 1898, S. 252 und *E. Arnold,* E. T. Z. 1903, S. 476.

Die verschiedenen, hier überhaupt näher zu betrachtenden Verluste zerfallen in mechanische Verluste (Lagerreibung, Bürsten- bezw. Kollektor-Reibung, Luftreibung), in sog. Eisenverluste (Hysteresisverluste im Anker, Wirbelstromverluste im Anker, Wirbelstromverluste in den Polschuhen), sowie in sog. Kupferverluste (Stromwärmeverluste im Ankerkupfer, Verluste im Erregerkreis, Uebergangsverluste unter den Bürsten, Wirbelstromverluste im Ankerkupfer und in den Kollektorlamellen, Stromwärmeverluste in den von den Bürsten kurzgeschlossenen Spulen).

Die mechanischen Verluste sind hauptsächlich abhängig von der Umdrehungszahl und der Temperatur der Maschine. Nach längerem Betrieb, wenn die Temperatur konstant geworden ist, dürfen sie bei Vollast und Leerlauf als gleich angesehen werden. Die Eisenverluste und Kupferverluste sind bei Leerlauf und Vollast verschieden.

Den Betrag der zusätzlichen Verluste, die sich also sowohl aus Eisenverlusten, als auch aus Kupferverlusten zusammensetzen, erhält man, wie bereits angedeutet, aus der Differenz der in die Maschine eingeführten Leistung und der um den Betrag der Leerlaufverluste und der berechneten Kupferverluste vermehrten Nutzleistung.

Zunächst sollen nun die konstruktiven Hauptdaten des *Untersuchungsobjektes,* eines vierpoligen Gleichstrom-Nebenschlussgenerators ohne Hülfspole der Maschinenfabrik Oerlikon, von 3,7 KW Nutzleistung bei 115 Volt und 1350 Umdrehungen in der Minute, mitgeteilt werden. Dieselben lauten:

Armatur:

Wicklungsart	Serie
Nutenzahl	35
Nutendimensionen	8,5 × 25 mm
Anzahl Seriedrähte in jeder Nut	18
Drahtdimensionen	2,2 bezw. 2,5 mm
Totale Drahtlänge	246 m
Kupfergewicht	8,8 kg

Magnetwicklung:

Schaltung der Spulen	Serie
Windungen/Spule	1700
Drahtdimensionen	1,0 bezw. 1,3 mm
Gesamte Drahtlänge	3000 m
Kupfergewicht	23 kg

Kollektor und Bürsten:

Lamellenzahl	105
Anzahl der Bürstenstifte	4
Kohlen pro Stift	2
Kohlendimensionen	(10 × 25) × 18.

Als *Untersuchungsmethode* diente die sog. Antriebsmethode mittels geeichten Hilfsmotors. Diese Methode, die im allgemeinen nur bei direkter Kupplung der zu untersuchenden Maschine und des Hilfsmotors gute Resultate gibt, konnte zwar im vorliegenden Fall nicht in dieser Antriebsanordnung verwendet werden, da ein Riemenantrieb benutzt werden musste. Indem jedoch anstelle eines Lederriemens ein weiches Hanfband gewählt wird, können auch mit dieser Antriebsmethode einwandfreie Ergebnisse erhalten werden, wie sich aus der langjährigen Praxis des elektrotechnischen Laboratoriums des eidgen. physikalischen Instituts in Zürich, in dem die Untersuchungen vorgenommen wurden, ergibt.

Bestimmung der Leerlaufsverluste.

Aus der Reihe der verschiedenen Leerlaufsverluste wurden mittels eines geeichten Hilfsmotors von 3,5 PS zunächst die *Verluste durch Reibung* ermittelt. Da, wie schon erwähnt, die direkte Kupplung von Untersuchungsobjekt und Hilfsmotor nicht möglich war, erfolgte der Antrieb mittels eines weichen Hanfbandes. Der durch die Uebertragung

mit diesem Band bedingte Effektverlust kann vernachlässigt werden, wie sich aus einem noch zu besprechenden separaten Versuch ergab.

Um die Verluste durch Lagerreibung, Luftreibung und Bürstenreibung getrennt zu ermitteln, wurde zunächst die leerlaufende und unerregte Dynamo während $3^1/_2$ Stunden angetrieben, bis sich die Verluste des Aggregates nicht mehr veränderten.[1]) Hierauf wurden die eigentlichen Messungen bei verschiedenen Umdrehungszahlen vorgenommen, da bekanntlich die Reibungsverluste von der Umdrehungszahl abhängig sind. Die eigentlichen Messversuche wurden dann ausgeführt, indem einmal der Hilfsmotor allein, ein zweites und drittes Mal der Hilfsmotor mit dem unerregten Untersuchungsobjekt zusammen im Leerlauf untersucht wurden, wobei das Untersuchungsobjekt das eine Mal mit normaler Bürstenreibung, das andere Mal mit abgehobenen Bürsten betrieben wurde. Indem in jedem Fall die dem Hilfsmotor zugeführte elektrische Leistung gemessen und sein Armatur-Effektverlust aus dem Ankerwiderstand berechnet wurde, ergaben sich einerseits die in Abbildung 1 dargestellten totalen Reibungsverluste des Untersuchungsobjektes und anderseits die um den Betrag der Bürstenreibung verminderten Reibungsverluste, die aus Abbildung 2 hervorgehen.

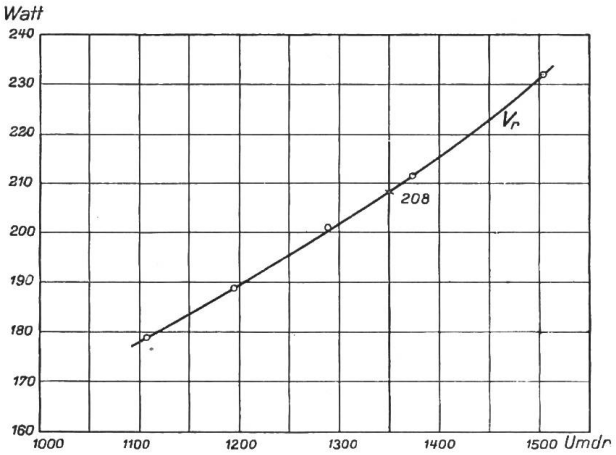

Abbildung 1. Totale Reibungsverluste V_r der Gleichstrommaschine.

Für die normale Umdrehungszahl der Gleichstrommaschine von 1350 U/min findet man aus Abbildung 1 den Wert von 208 Watt = 5,6 % der Normalleistung. Dieser Wert scheint etwas gross, findet aber in der stets zu hohen Temperatur des einen Lagers seine Begründung. Wie der Abbildung 2 zu entnehmen ist, entspricht dem Betrag von 208 Watt der totalen Reibungsverluste ein Anteil von 106 Watt für Lager- einschl. Luftreibung und von 102 Watt für Bürstenreibung.

Es bleibt noch übrig, die *Riemenverluste,* die wir vernachlässigt haben, zu diskutieren. Als Riemen wurde zunächst ein Hanfband von 4,5 cm Breite und 0,08 cm Dicke verwendet (Band No. 1). Der Energieverlust, den dieses Band bei der Uebertragung verursacht, rührt einerseits von der innern Steifigkeit des Materials und anderseits von der durch die Elastizität des Materials bedingten unvermeidlichen gleitenden Reibung zwischen Band und Rolle her. Der Effektverlust, der von dieser gleitenden Reibung herrührt, berechnet sich, in % der übertragenen Leistung ausgedrückt, aus dem Quotienten der Zugspannung des Bandes in kg/cm² und des Elastizitätsmoduls des Materials. Bei einer Umdrehungszahl des Generators von 1350 U/min war nach Abbildung 1 die vom Motor auf den Generator übertragene Leistung 208 Watt. Das entspricht bei 1350 U/min und einem Rollendurchmesser von 0,17 m einer Umfangskraft von 1,76 kg. Der Querschnitt des Bandes beträgt etwa 0,36 cm², womit sich eine Zugspannung 4,9 kg/cm² ergibt. Nach Bach[2]) kann der Elastizitätsmodul 12 000 kg/cm² gesetzt werden für Hanfmaterial[3]), woraus man einen Effektverlust von

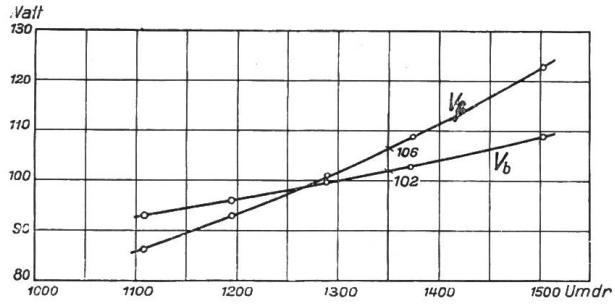

Abbildung 2. Verluste durch Bürstenreibung V_b und durch Lager- und Luftreibung V_f der Gleichstrommaschine.

[1]) Ein solcher Dauerversuch wurde übrigens vor der Ausführung jeder der Messungen vorgenommen.

[2]) Vgl. *C. Bach,* Z. d. V. d. I. 1887 und dessen Werk „Maschinenelemente".

[3]) Für Lederriemen beträgt der Elastizitätsmodul etwa 2000 kg/cm².

$$\frac{4{,}9}{12\,000} = 0{,}00041$$

oder 0,041 % der übertragenen Leistung bekommt. Dieser Verlust ist für den vorliegenden Fall ohne weiteres zu vernachlässigen.

Um dem Energieverlust, bedingt durch die Steifigkeit des Materials, näher zu treten, wurde der Versuch des Antriebs des Untersuchungsobjektes bei normaler Bürstenreibung auch noch mit einem viel schwächern Bande (Band No. 2) ausgeführt, das aus feiner Leinwand besteht und eine Breite von 2,3 cm, eine Dicke von nur 0,2 mm, somit also einen Querschnitt von 0,046 cm² hat. Verluste infolge Steifigkeit sind hier vollkommen ausgeschlossen, da das Band sozusagen absolut biegsam ist. Die Gleitverluste bestimmen sich nach dem vorigen, unter gleichen Voraussetzungen zu 0,38 %, dürfen also ebenfalls vernachlässigt werden, sodass dieses Band (No. 2) als völlig verlustlos angesehen werden kann. Abbildung 3, welche zwei Kurven I und II zur Darstellung bringt, aus deren Ordinaten-Differenz direkt die Bürsten-

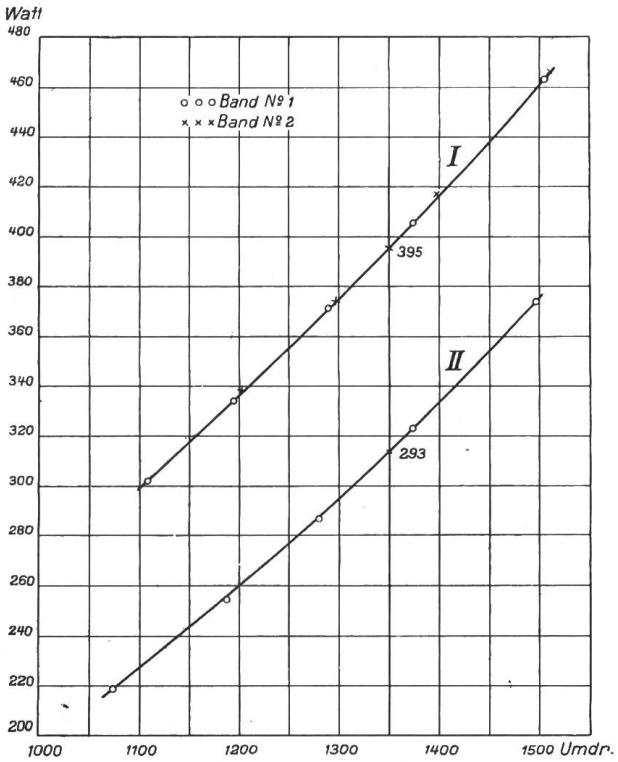

Abbildung 3. Messresultate zur Bestimmung der Bürstenreibung der Gleichstrommaschine, und zum Vergleich verschiedener Hanfbänder als Riemen.

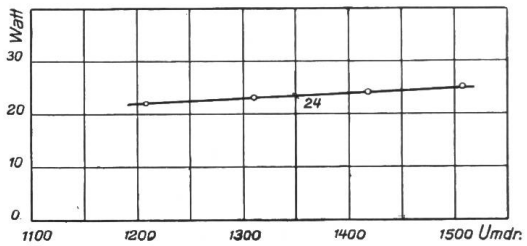

Abbildung 4. Effektverlust von Band No. 3 in Abhängigkeit von der Umdrehungszahl der Gleichstrommaschine.

reibung der Gleichstrommaschine für verschiedene Umdrehungszahlen derselben herausgelesen werden kann, gestattet auch zu konstatieren, dass auch die Steifigkeitsverluste von Band 1 vernachlässigbar sind; die mit Band No. 1 und 2 ausgeführten Versuche, denen die Kurve I in Abbildung 3 entspricht, decken sich vollständig.

Da bei den noch zu behandelnden Belastungsversuchen ein stärkeres Band verwendet werden musste, (Band No. 3), mit nicht vernachlässigbaren Verlusten, so sollen dieselben hier noch erörtert werden. Dieses Band weist 8 cm Breite und 1,5 cm Dicke, also 1,2 cm² Querschnitt auf, und wurden die durch dasselbe veranlassten Verluste durch analoge Vergleichsversuche mit den andern Bändern ermittelt; in Abbildung 4 sind die Effektverluste von Band No 3 veranschaulicht. Es ergibt sich nach dieser Abbildung bei 1350 U/min der Gleichstrommaschine ein Effektverlust dieses Bandes von 24 Watt. Da die übertragene Leistung wiederum nur 208 Watt beträgt, sind die Gleitverluste auch hier gleich Null zu setzen. Die 24 Watt sind teilweise Steifigkeitsverluste des stärkern Bandes, teilweise sind es zusätzliche Lagerreibungsverluste, da Band 3 gemäss seiner Verwendung für die Belastungsversuche mit grösserer Spannung aufgelegt werden musste, als Band 1 und 2. Diese 24 Watt wurden bei den folgenden Messungen als „Riemenverluste" eingesetzt. Streng genommen gelten sie aber nur für Leerlaufsversuche mit Band 3. Bei den Belastungsversuchen kommen noch die Gleitverluste hinzu. Diese berechnen sich bei der maximal vorkommenden übertragenen Leistung von etwa 4600 Watt bei 1350 U/min, einem Rollendurchmesser von 0,170 m und einem Elastizitätsmodul von 12 000 kg/cm² zu:

$$\frac{32{,}4}{12\,000} = 0{,}0027$$

oder 0,27 % der übertragenen Leistung.

Die Versuche von Bach über die Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Hanfbändern haben gezeigt, dass der Wert 12 000 kg/cm² auf jeden Fall eher zu tief als zu hoch angenommen ist, so dass der Gleitverlust von 0,27 % wirklich als Maximum gelten kann. Selbstverständlich ist dieser prozentuale Betrag, da er mit der Riemenspannung abnimmt, bei kleinern Belastungen entsprechend geringer. Durch die Vernachlässigung dieser Gleitverluste tritt allerdings eine kleine Ungenauigkeit in die Resultate der Belastungsversuche ein. Sie erreicht aber die Grössenordnung der unvermeidlichen Messfehler nicht, so dass die Uebertragung mittels solcher Hanfbänder als vorzügliches Mittel angesehen werden kann, um die meistens unausführbare direkte Kupplung bei derartigen Versuchen zu ersetzen.

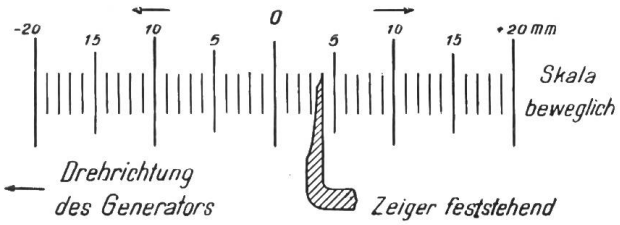

Abbildung 5. Skala für die Messung der Bürstenverschiebung.

Zu den *Eisenverlusten* übergehend, mag bemerkt werden, dass sie sich zusammensetzen aus den Hysteresisverlusten im Anker, den Wirbelstromverlusten im Anker und den Wirbelstromverlusten in den Polschuhen. Experimentell misst man die Summe dieser Verluste, indem man den Hilfsmotor die leerlaufende und fremderregte Gleichstrommaschine antreiben lässt. Bei Vornahme dieses Versuches mit der konstant gehaltenen Umdrehungszahl von 1350 U/min der Gleichstrommaschine ergab sich nun, dass die Eisenverluste mit der Bürstenstellung veränderlich sind. Es lag daher nahe, über diese Verhältnisse eine besondere, ausführliche Untersuchung anzustellen.

Auf der Bürstenbrücke wurde hierzu eine Skala mit Millimetereinteilung und am Lagerschild ein Zeiger angebracht, um die jeweilige Stellung der Bürstenbrücke markieren zu können. Dann wurden die Versuche sowohl bei verschiedenen Erregerströmen, als auch bei verschiedenen Bürstenstellungen ausgeführt. Da die Bürstenbrücke, auf der die Skala aufgeklebt wurde, einen Durchmesser von 150 mm, der Anker einen Aussendurchmesser von 200 mm aufweisen, so entsprach einer Verschiebung der Bürstenbrücke an der Skala um 1 mm einer Verschiebung des Ankerumfangs um $1 \times \frac{200}{150} = 1^1/_3$ mm oder einer Drehung der Brücke um 0,764°. Der Mittel-

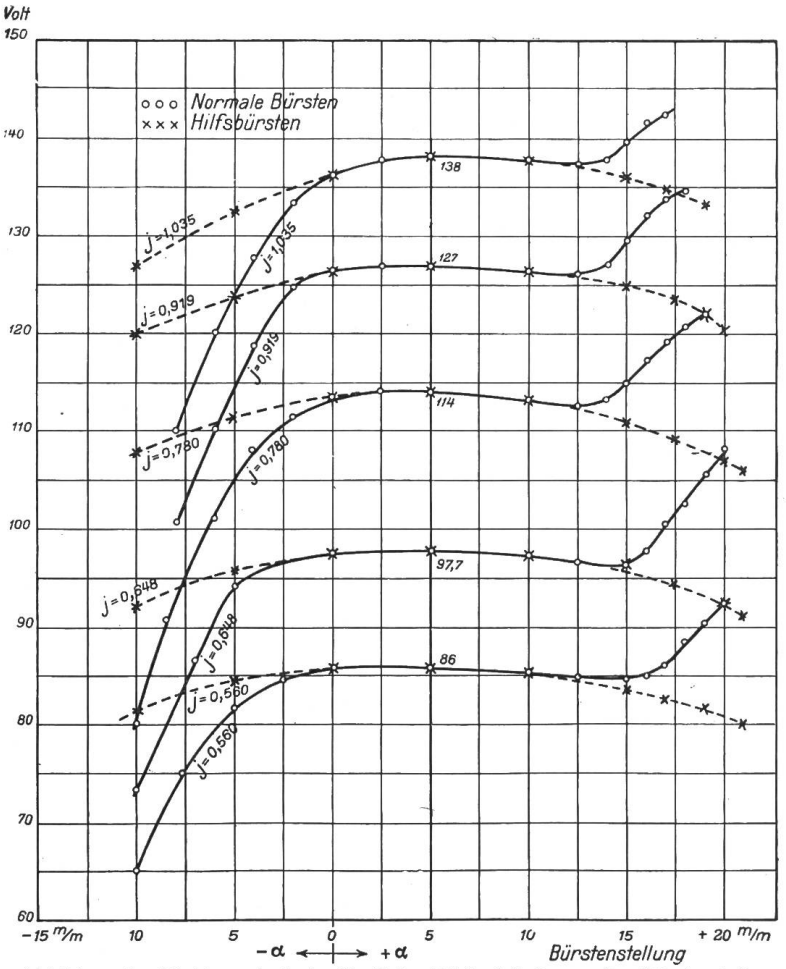

Abbildung 6. Elektromotorische Kraft in Abhängigkeit von der Bürstenstellung für verschiedene Erregerströme.

punkt der Skala wurde willkürlich als Nullpunkt gewählt, die Teilstriche links davon (entsprechend der Bürstenverschiebung entgegen dem Drehsinn des Generators) mit dem — Zeichen und die Teilstriche rechts vom Nullpunkt mit dem + Zeichen belegt, wie in Abbildung 5 veranschaulicht ist. Die Bürstenverschiebung wurde durch die Funkenbildung begrenzt, doch ist die für Vollbelastung normale Stellung darin noch enthalten.

Für eine Reihe von Bürstenstellungen sind nun sowohl Messungen der elektromotorischen Kraft, als auch Messungen der Armaturverluste vorgenommen worden, deren Ergebnisse in den Abbildungen 6 und 7 veranschaulicht sind. Aus denselben geht hervor, wie ausserordentlich veränderlich die Ankerverluste und die elektromotorische Kraft mit der Bürstenstellung sind und zwar bei *leerlaufender* Maschine.

Diese interessante Tatsache lässt sich nun durch die Kurzschlussströme, welche in den von den Bürsten kurzgeschlossenen Spulen induziert werden, theoretisch erklären. Im zweipoligen Schema (Abbildung 8) stehen die Bürsten in der neutralen Zone. Die kurzgeschlossenen Spulen bewegen sich also im Feld von der Stärke Null und es werden in ihnen keine elektromotorischen Kräfte induziert. Es kommen also keine Kurzschlussströme und somit auch keine Kurzschlussverluste zustande. Bekanntlich ist auch für diese Bürstenstellung die elektromotorische Kraft des Ankers ein Maximum. Verschiebt man nun die Bürsten aus der neutralen Zone heraus, dann werden die Verhältnisse ganz andere (Abbildungen 9*a* und 9*b*).

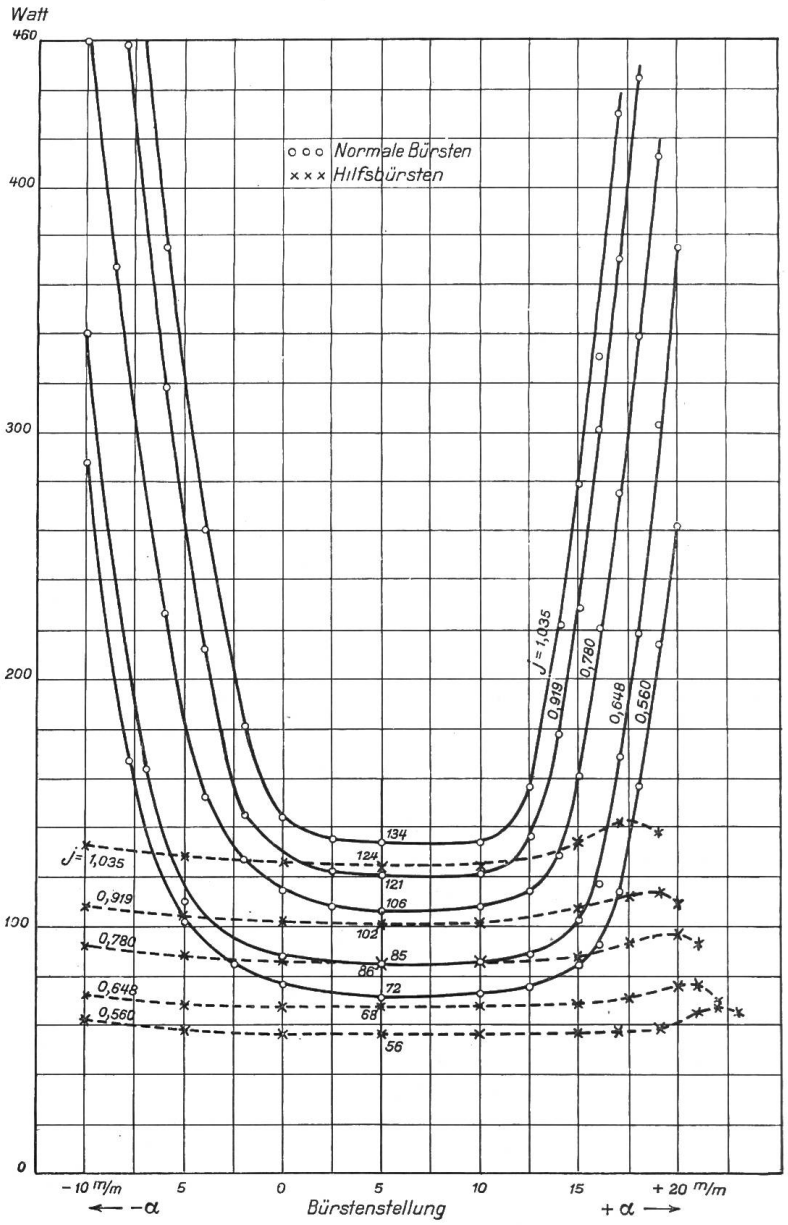

Abbildung 7. Ankerverluste in Abhängigkeit von der Bürstenstellung für verschiedene Erregerströme.

Abbildung 9*a* gibt die schematische Darstellung bei der Bürstenschiebung entgegen der Drehrichtung des Ankers [1]). Die kurzgeschlossenen Spulen bewegen sich jetzt in einem bestimmten Feld und es wird in ihnen ein Kurzschlusstrom fliessen, der das Feld Φ_1 erzeugt. Φ_1 setzt sich mit dem ursprünglich vorhandenen Feld Φ zum resultierenden Feld Φ_R zusammen, wie aus der Abbildung hervorgeht. Φ_R ist kleiner als Φ und die neutrale Zone ist etwas in der Drehrichtung des Ankers verschoben. Mit wachsender Bürstenverschiebung α wird der Kurzschlusstrom, also auch das „Kurzschlussfeld" Φ_1

[1]) Diese Darstellung darf unter der vereinfachenden Annahme angewendet werden, alle Felder seien homogen.

immer grösser. Je grösser aber Φ_1 wird, um so kleiner wird das resultierende Feld Φ_R und dieses ist ja in Wirklichkeit allein vorhanden.

Die elektromotorische Kraft der Gleichstrommaschine ist aber dem resultierenden Feld Φ_R direkt proportional; also muss mit zunehmender Bürstenverschiebung α entgegen der Drehrichtung des Ankers die elektromotorische Kraft abnehmen. Diese Ueberlegung wird durch Abbildung 6 tatsächlich bestätigt. Verschiebt man die Bürsten im Sinne der

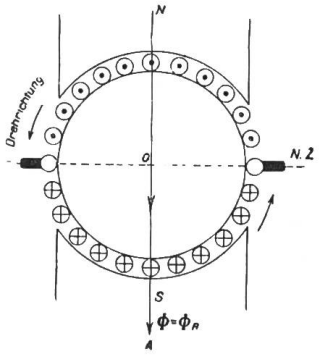

Abbildung 8. Zweipoliges Schema der Gleichstrommaschine.

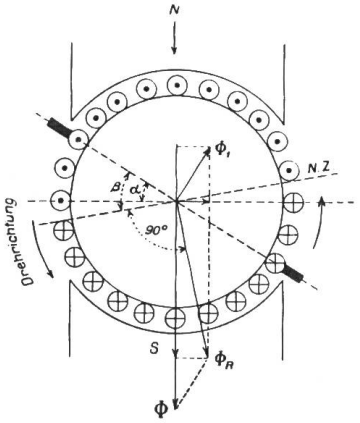

Abbildung 9a.

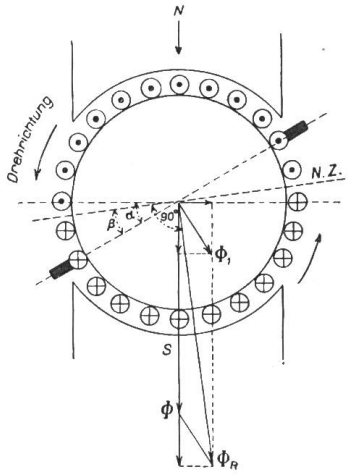

Abbildung 9b.

Abbildung 9. Resultierendes Ankerfeld Φ_R bei Bürstenrückschub (Abb. 9a) und Bürstenvorschub (Abb. 9b) aus der neutralen Zone.

Ankerdrehung Abbildung 9 *b*, dann tritt das entgegengesetzte ein. Φ_R wird jetzt grösser als Φ und die elektromotorische Kraft muss mit wachsender Bürstenverschiebung α im Sinne der Drehrichtung des Ankers zunehmen, was durch Abbildung 6 ebenfalls bestätigt wird. Ferner muss bei gleichgrossem Bürstenverschiebungswinkel α nach den *beiden* Seiten, die Abnahme der elektromotorischen Kraft im ersten Fall grösser sein wie die Zunahme von der elektromotorischen Kraft im zweiten (Abbildung 6). Das lässt sich durch folgende Ueberlegung beweisen: Mit der quantitativen Veränderung des resultierenden Feldes tritt auch eine Richtungsänderung desselben und somit eine Drehung der neutralen Zone auf.

Für die Grösse des „Kurzschlussfeldes" Φ_1 ist jedoch der Abstand der Bürsten von der neutralen Zone entsprechend dem Winkel β (Abbildung 9) massgebend. Die Abbildung 9 zeigt aber, dass für gleich grossen Winkel α im ersten Fall $\beta > \alpha$, im zweiten $\beta < \alpha$ ist. Es muss also auch Φ_1 und damit die Abnahme von Φ_R und der elektromotorischen Kraft im ersten Fall grösser sein, wie die Zunahme von Φ_R und der elektromotorischen Kraft im zweiten Fall.

Endlich kann auch die anfängliche Abnahme der elektromotorischen Kraft bei der Verschiebung im Sinne der Ankerdrehung (Abbildung 6) erklärt werden. Solange die Verschiebung β klein ist, z. B. $\beta < \beta_1$ (Abbildung 10), ist auch das Feld, in dem sich die kurzgeschlossenen Spulen bewegen, klein, und Φ_R kann in diesem Bereich der Bürstenverschiebung als konstant betrachtet werden. Auch fällt die neutrale Zone in diesem Falle mit der geometrischen neutralen Zone zusammen (Abbildung 9). Die elektromotorische Kraft ist aber ausser Φ_R auch noch proportional der in gleichem Sinne induzierten und in Serie geschalteten Drahtzahl am Ankerumfang. Bleibt die neutrale Zone unverändert, was für $\beta < \beta_1$ der Fall ist, so

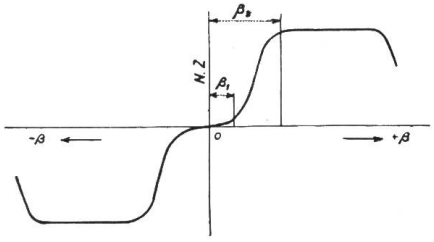

Abbildung 10. Hauptfeld Φ in Abhängigkeit vom Bürstenverstellungswinkel, bezw. Ankerumfang.

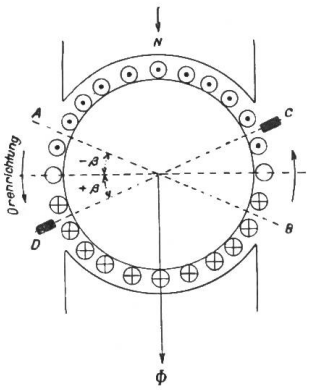

Abbildung 11. Abnahme der „wirksam" induzierten Drähte mit wachsender Bürstenverschiebung.

nehmen die „gleichsinnig" induzierten „Seriedrähte" pro Stromabteilung mit wachsendem Winkel β ab (Abbildung 11). Für die Bürstenstellung *DC* werden nur die Drähte *D* bis *B* bezw. *A* bis *C* *wirksam* induziert. Die elektromotorischen Kräfte in den Drähten *A* bis *D* bezw. *B* bis *C* heben sich gegenseitig auf. Es tritt also gemäss Abbildung 6 und 10 zuerst eine kleine Abnahme und erst dann eine Zunahme der elektromotorischen Kraft auf, wenn $\beta > \beta_1$ wird, weil dann mit dem rasch ansteigenden Hauptfeld Φ auch ein rasch anwachsendes „Kurzschlussfeld" auftritt. Ist $\beta = \beta_2$ geworden, dann wächst dieses Feld nicht mehr, da, wie Abbildung 10 zeigt, das induzierende Hauptfeld konstant geworden ist. Φ kann jetzt schon wieder abnehmen, denn Φ und Φ_1 sind von jetzt an zwar konstant, aber durch die Drehung von Φ_1 wird die Resultierende Φ_R wieder kleiner (Abbildung 9 *b*). Aus diesem Grunde und noch mehr, weil die „gleichsinnig" induzierte Drahtzahl mit wachsendem Winkel β immer kleiner wird, nimmt die elektromotorische Kraft von einem bestimmten Winkel β an wieder ab. Die Kurven in Abbildung 6 zeigen rechts in der Tat die Tendenz nach einem Kulminationspunkt. Infolge zu starker Funkenbildung konnte aber die Bürstenverschiebung nicht weiter getrieben werden [1]).

Mit diesen Ueberlegungen decken sich nun auch die gemessenen Verluste. Sobald $\beta > + \beta_1$ wird, treten starke Kurzschlussströme und damit auch Kurzschlussverluste durch Erwärmung der Kurzschlusstromkreise auf. Für dieselben Winkel α, für welche die elektromotorische Kraft stark zu steigen resp. zu fallen beginnt, muss die starke Zunahme der Ankerverluste beginnen. Ein Vergleich der Kurven (Abbildungen 6 und 7) zeigt sofort, dass dies wirklich der Fall ist.

Wir dürfen daher den Schluss ziehen, dass von den gemessenen Ankerverlusten der tiefste Punkt jeder Kurve der Abbildung 7 als Eisenverlust zu betrachten ist, während die Zunahmen rechts und links davon in Kurzschlussverlusten ihren Grund haben.

Diese Schlussfolgerung lässt sich beweisen, indem man die Kurzschlussströme möglichst unterdrückt. Zu diesem Zweck wurden die Ankerverlustmessungen wiederholt, mit gleichzeitiger Einführung einer starken Vergrösserung des Widerstandes der Kurzschlussstromkreise. Dieser Widerstand setzt sich zusammen aus dem Widerstand der kurzgeschlossenen Spule und dem Uebergangswiderstand von einem Kollektorsegment durch die kurzschliessende Bürste zum benachbarten.

Um die Kurzschlussverluste zu verkleinern, genügt es bei unserer vierpoligen Maschine schon, wenn man zwei aufeinanderfolgende Bürsten abhebt. Zwischen den beiden übrigen Bürsten herrscht dann trotzdem die normale Klemmenspannung. Anstatt vier haben wir aber nur noch zwei Kurzschlusskreise. Um jedoch den Unterschied möglichst hervortreten zu lassen, wurde der Widerstand dieser zwei bleibenden Kurzschlusskreise stark vergrössert. Die normalen Bürsten, welche genau zwei Kollektorsegmente bedecken und eine Auflagefläche von 500 m² besitzen, wurden durch kleine Hilfsbürsten, die ebenfalls zwei Segmente bedeckten, aber nur 10 mm² Fläche haben, ersetzt (Abbildung 12).

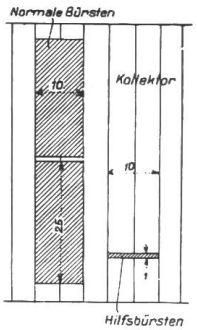

Abbildung 12. Dimensionen der normalen Bürsten und der Hilfsbürsten.

Die mit diesen Hilfsbürsten ausgeführten Messungen ergaben die Resultate, die in den Abbildungen 6 und 7 durch die gestrichelten Kurven ebenfalls dargestellt sind.

Betrachtet man erst die neuen Verlustkurven (Abbildung 7), so sieht man, dass die Zunahme der Verluste von der Bürstenverschiebung jetzt beinahe unabhängig ist, weil eben die Kurzschlussverluste nahezu unterdrückt sind. Infolgedessen ist auch die Abnahme der elektromotorischen Kraft (Abbildung 6) beim Bürstenrückschub kleiner wie vorher, eine Vergrösserung beim Bürstenvorschub tritt gar nicht mehr auf, sondern auch hier eine Abnahme der elektromotorischen Kraft entsprechend der Abnahme der „gleichsinnig" induzierten Drahtzahl. Ueber die neutrale Zone ist die elektromotorische Kraft bei der Messung mit den beiden Bürstenarten genau gleich gross für die analogen Erregerströme. Es ergab sich somit genau dasjenige Resultat, das durch unsere früheren Ueberlegungen zu erwarten war.

---

[1]) Die Funkenbildung beginnt bei $\alpha \backsim + 15^0$ (für normalen Erregerstrom).

Aus den Abbildungen 6 und 7 findet man die Mitte der neutralen Zone ungefähr bei der Bürstenstellung $\alpha = +5$ mm. Entnimmt man bei dieser Stellung aus den Kurven die Werte der elektromotorischen Kraft und der Eisenverluste, so kann man daraus, gemäss Abbildung 13 die Kurve der Eisenverluste in Abhängigkeit von der elektromotorischen Kraft konstruieren.

Die Differenz der beiden Kurven (Abbildung 13) lässt sich folgendermassen deuten: Die untersuchte Gleichstrommaschine besitzt eine ungerade Nutenzahl (35). Infolge der Unsymmetrie, welche bei vier Polen und Wellenwicklung daraus entsteht, kann der Fall nie eintreten, dass alle Drähte der kurzgeschlossenen Spulen zugleich im Feld von der Stärke Null liegen. Die beobachtete Differenz wäre also auch noch als Kurzschlussverlust zu betrachten und nur die untere Kurve stellt reine Eisenverluste dar.

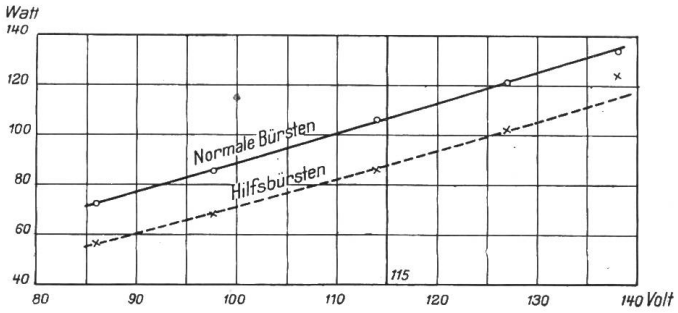

Abbildung 13. Ankerverluste und Eisenverluste in Abhängigkeit von der elektromotorischen Kraft, bestimmt aus den Verschiebungsversuchen. Bürstenstellung in der Mitte der neutralen Zone.

Bestimmt man demnach den Wirkungsgrad einer Gleichstrommaschine aus den Einzelverlusten, so hat man bei *allen* Methoden, die zur Ermittlung der Leerlaufs-Eisenverluste angewendet werden, darauf zu achten, dass die Bürsten in der Mitte der neutralen Zone stehen. Lässt man die Bürsten in der für die Belastung der Maschine funkenlosen Zone [1]), so erhält man die angeblichen Eisenverluste viel zu gross. Bei unserer Maschine treten die Fehler schon auf, wenn die Bürsten am Kollektorumfang nur um 5 mm aus der Mitte der neutralen Zone herausgerückt sind.

Im allgemeinen werden die Kurven nach Abbildung 13 nicht aus den Verschiebungsversuchen (Abbildung 6 und 7), sondern aus einem besondern Versuch, mit Stellung der Bürsten in der Mitte der neutralen Zone und variablem Erregerstrom, gewonnen. Dieser Versuch wurde daher auch hier noch durchgeführt und ergab die Resultate gemäss Abbildung 14.

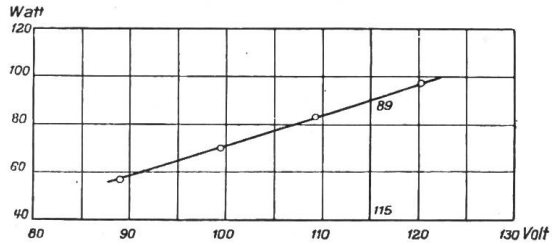

Abbildung 14. Ankerverlust bei Leerlauf in Abhängigkeit von der elektromotorischen Kraft für normale Bürsten in der Mitte der neutralen Zone.

Die in der Kurve der Abbildung 14 dargestellten Werte liegen noch um einige Watt tiefer, als diejenigen gemäss Abbildung 13. Wir haben bei der normalen elektromotorischen Kraft von 115 Volt und bei normaler Bürstenstellung einen Leerlauf-Ankerverlust von 89 Watt. Dieser Wert wurde bei allen spätern Messungen ziemlich genau wieder gefunden und daher auch der Wirkungsgradbestimmung zu Grunde gelegt.

Bestimmung des Wirkungsgrades.

Eine *Messung des Ankerwiderstandes und der Spannung zwischen Kollektor und Bürsten* gibt die erforderlichen Daten, um die Stromwärmeverluste in Armaturkupfer und zwischen Bürsten und Kollektor ermitteln zu können. Um zunächst den Widerstand der Armaturwicklung zu bestimmen, wurden an zwei Kollektor-Lamellen, die unter zwei aufeinanderfolgenden und abgehobenen Bürsten liegen (Segment 1 und 26 von total 105), und welche die Ankerwicklung (Wellenwicklung) bekanntlich in zwei gleiche Hälften teilen, Kupferdrähte angelötet. Durch diese Drähte wurde dann der Wicklung der für die Widerstandsmessung benötigte Strom zugeführt und der Widerstand aus der Stromstärke und der Spannungsdifferenz an den Einführungsstellen ermittelt. Der Widerstand ergab sich bei dieser Messung zu 0,213 Ohm bei 20° C. Man findet dann in bekannter Weise für

[1]) $\alpha = +20$ mm.

die bei Belastung vorkommenden höhern Temperaturen unter Zugrundelegung eines Temperaturkoeffizienten 0,0044 die entsprechenden Werte des Armaturwiderstandes, beispielsweise für 50° C. entsprechend 32 Ampère Belastung den Wert 0,241 Ohm.

Um die Spannung zwischen Kollektor und Bürsten zu bestimmen, wendet man die bekannte Methode an, durch zwei von einander isolierte Kohlen, welche nebeneinander auf einem und demselben Bürstenstift sitzen, einen Strom zu senden und den Spannungsabfall zwischen den beiden Einführungsstellen zu messen. Der Kollektor muss dabei mit der normalen Rotationsgeschwindigkeit betrieben werden. Aus einer grösseren Reihe von Messungen, die bei verschiedenen Stromstärken vorgenommen wurden, ergab sich für die Spannungsdifferenz zwischen Kollektor und Bürsten der mittlere Wert von 0,585 Volt. Indem man nun mit Hülfe von Einzelwerten dieser Spannungsdifferenz den für die betreffende Maschine tatsächlich in Betracht fallenden, aber mit der Stromstärke veränderlichen „Uebergangswiderstand" zwischen Kollektor und Bürsten berechnet, kann dann durch die Summierung dieses Uebergangswiderstandes und des früher ermittelten Widerstandes der Armaturwicklung der totale Ankerwiderstand berechnet werden. Das Resultat dieser Berechnung ist in Abb. 15 veranschaulicht, wobei noch hervorgehoben werden muss, dass für den Widerstand der Armaturwicklung nicht etwa der einer bestimmten Ankertemperatur entsprechende konstante Wert benutzt wurde, sondern unterschiedliche Werte, wie sie sich für die einzelnen Armaturströme aus den ihnen entsprechenden Temperaturen bei einem Dauerlauf ergeben.

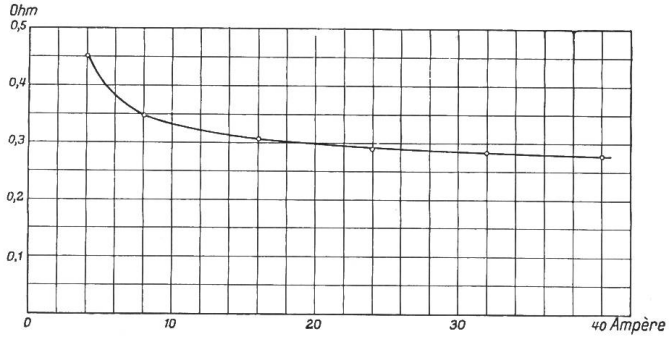

Abbildung 15. Totaler Ankerwiderstand in Abhängigkeit vom Armaturstrom.

Die *zusätzlichen Verluste* bestehen bei belasteter Maschine in der Hauptsache aus Kurzschlussverlusten, Wirbelstromverlusten im Ankerkupfer und den Kollektorlamellen, sowie aus erhöhten Eisenverlusten. Die letztern sind bekanntlich bedingt durch die bei Belastung erhöhte maximale Induktion im Anker, welche dem Einfluss der Ankerreaktion zuzuschreiben ist. Die Messung der zusätzlichen Verluste erfolgte wiederum durch Antrieb mit einem Hilfsmotor (15 PS), dessen Einzelverluste vorerst bestimmt werden mussten. Die Reibungsverluste dieses Motors wurden analog wie bei der Gleichstrommaschine gewonnen. Die Leerlaufs-Ankerverluste wurden erhalten, indem man von dem in den leerlaufenden, fremderregten Motor eingeführten Effekt die Reibungsverluste sowie die geringen Stromwärmeverluste im Anker subtrahierte. Bei dieser Messung ist es wichtig, dass der Versuch mit verschiedenen Klemmenspannungen bezw. gegenelektromotorischen Kräften bei konstanter Tourenzahl ausgeführt wird, weil auch bei den Belastungsversuchen die gegenelektromotorische Kraft variabel ist. Die zusätzlichen Verluste des 15 PS-Motors, für die bei den spätern Messungen vorkommenden Ankerströme desselben, wurden durch Belastung des Motors mit einer elektromagnetischen Bremse ermittelt, indem man vom totalen eingeführten Effekt den abgebremsten Effekt, sowie die jetzt bekannten Einzelverluste des Motors, abzog. Indem nun bei Vornahme von Belastungsversuchen der durch den Hilfsmotor angetriebenen und zu untersuchenden Gleichstrommaschine jeweilen sowohl der in den Motor eingeführte, als auch der, der Gleichstrommaschine entnommene elektrische Effekt gemessen und die vorher bestimmten übrigen Verluste berücksichtigt wurden, ergaben sich dann ohne weiteres die zusätzlichen Verluste der Gleichstrommaschine, die in Abbildung 16 in Abhängigkeit von der Stromstärke der Gleichstrommaschine dargestellt sind.

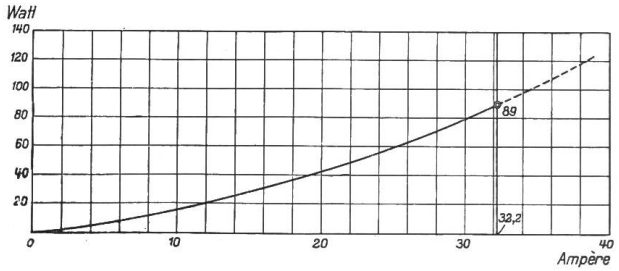

Abbildung 16. Zusätzliche Verluste der Gleichstrommaschine in Abhängigkeit von der Nutzstromstärke.

Da nun die Bestimmung der sog. „messbaren" sowie auch der zusätzlichen Verluste durchgeführt ist, bietet sich der Aufstellung der Kurven des „messbaren" Wirkungsgrades η' und des „tatsächlichen" Wirkungsgrades η keine weitere Schwierigkeit. In Abbildung 17 sind diese Kurven veranschaulicht, und kann denselben entnommen werden, dass bei Vollast (3700 Watt) die beiden Wirkungsgrade eine Differenz von 1,9 % aufweisen. Gemäss der Abbildung 16 betragen für diese Belastung die zusätzlichen Verluste 89 Watt, bezw. 2,4 % der Normalleistung.

Man kann die zusätzlichen Verluste in Prozenten der abgegebenen elektrischen Leistung der Gleichstrommaschine in Abhängigkeit von derselben darstellen und erhält gemäss der Abbildung 18 dann das bemerkenswerte Resultat, dass dieser Zusammenhang ein linearer ist. Es nimmt dieser prozentuelle Betrag bis auf die Hälfte ab, wenn man mit der Belastung bis auf sehr kleine Werte zurückgeht.

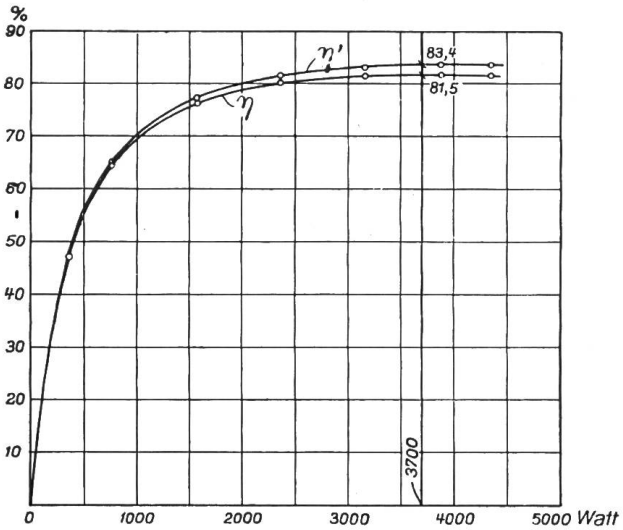

Abbildung 17. Kurven des messbaren Wirkungsgrades η' und des tatsächlichen Wirkungsgrades η in Abhängigkeit von der Nutzleistung.

Für die Leerlaufs-Ankerverluste, gemessen mit den normalen Bürsten, fanden wir 88 Watt. Man bekommt also in unserem Falle die zusätzlichen Verluste bei Vollbelastung (89 Watt), nahezu gleich den Leerlaufs-Ankerverlusten. Dieses Resultat kann zusammen mit den vorigen eventuell für Wirkungsgradbestimmungen ähnlicher Dynamomaschinen folgendermassen angewendet werden:

Man bestimmt die Leerlaufs-Ankerverluste nach irgend einer Methode und setzt sie annnäherungsweise gleich den zusätzlichen Verlusten bei Vollbelastung. Sind dieselben dann beispielsweise a Prozent der Vollbelastung, so trägt man auf der Ordinaten-Axe vom Nullpunkt aus eine Strecke von der Länge $\frac{a}{2}$ ab. Die Endpunkte der Ordinaten a (bei Vollbelastung), und $\frac{a}{2}$ (auf der Ordinaten-Axe) verbindet man durch eine Gerade, aus der man jetzt die prozentualen Zusatzverluste für jede beliebige Belastung mit grosser Annäherung entnehmen kann (Abbildung 18).

Zum Schlusse sollen die zusätzlichen Verluste noch nach der bekannten und sehr einfachen *Kurzschlussmethode* ermittelt werden, um zu konstatieren, mit welcher Berechtigung man die vorherige, genaue aber umständlichere Methode durch die letztere ersetzen darf. Bei der Kurzschlussuntersuchung wird der Anker vom normalen Strom durchflossen, sodass auch in diesem Falle zusätzliche Verluste sowohl im Kupfer, als auch im Eisen entstehen. Während aber beim normal arbeitenden Generator der stromdurchflossene Anker sich in einem starken Magnetfeld bewegt, dreht er sich beim Kurzschlussbetrieb nur in einem sehr schwachen Feld. Die Verhältnisse beim Kurzschluss können daher diejenigen bei normalem Gang nur annähernd ersetzen. Bei der praktischen Ausführung der Kurzschlussmethode erregt man nun die vom Hilfsmotor angetriebene Gleichstrommaschine von aussen am besten durch eine Akkumulatorenbatterie und bildet den Kurzschluss der Bürstenstifte mittels eines zwischen dicke Kabelstücke eingesetzten Präzisions-Ampèremeters. Die Bürsten werden dabei genau in die Mitte der neutralen Zone eingestellt. Die Gleichstrommaschine entnimmt dann dem antreibenden Hilfsmotor einen Effekt, der auf die Deckung von Reibungsverlusten,

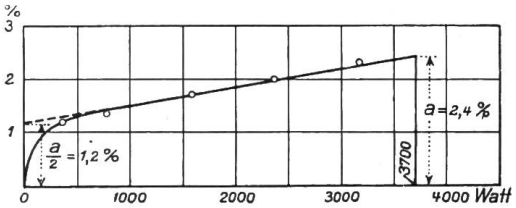

Abbildung 18. Zusätzliche, in Prozenten der abgegebenen Leistung ausgedrückte Verluste der Gleichstrommaschine in Abhängigkeit von der abgegebenen Leistung.

Armatur-Stromwärmeverlusten, zusätzlichen Verlusten und Eisenverlusten verwendet wird. Um letztere zu erhalten, hebt man den Kurzschluss auf und erregt den Generator mit den gleich starken Erregerströmen, wie bei den Kurzschlussversuchen; der gemessene Effekt enthält dann ausser den Reibungsverlusten auch noch die geringen Eisenverluste, die durch das kleine Feld im Anker erzeugt werden und durch die Differenzbildung ohne weiteres isoliert werden können.

In Abbildung 19 sind nun die zusätzlichen Verluste in Abhängigkeit vom Ankerstrom dargestellt, und zwar sowohl die Resultate aus der Kurzschlussmethode als auch diejenigen aus der früheren Untersuchung Der Grössenordnung nach stimmen die Resultate der beiden Methoden zwar überein; es kann aber auch leicht eingesehen werden, warum die Zusatzverluste aus der Kurzschlussmethode in der Gegend des normalen Ankerstroms zu gross ausfallen müssen, indem man sich vergegenwärtigt, dass die Zusatzverluste teils in erhöhten Kupferverlusten, teils in erhöhten Eisenverlusten ihren Grund haben. Die zusätzlichen Kupferverluste können bei unserer Maschine nur sehr klein sein, da die Querschnitte der Ankerleiter klein sind (3,8 mm²). Beim Kurzschlussversuch werden die an sich schon geringen zusätzlichen Kupferverluste aber noch kleiner wie bei normaler Belastung, weil das Ankerfeld, speziell die Induktion in den Zähnen viel geringer ist, wie bei normalem Betrieb. Anders steht es mit den zusätzlichen Eisenverlusten. Fliesst z. B. im Anker der normale Strom, so repräsentiert er in Verbindung mit den Ankerleitern eine ganz bestimmte magnetisierende Kraft. Die Intensität des magnetischen Feldes, die dadurch erzeugt wird, hängt aber stark ab von der schon vorher im Anker vorhandenen Kraftlinienzahl. Bei normaler Belastung ist nun das vom Erregerstrom herrührende Feld und speziell die Zahninduktion sehr stark; die Ankerampèrewindungen vermögen den Maximalwert dieses Feldes nur wenig zu vergrössern. Beim Kurzschlussversuch dagegen ist das von der Erregung herrührende Feld sehr gering und die *gleichen* Ampèrewindungen von vorhin können jetzt ein viel stärkeres Zusatzfeld erzeugen. Daher sind die zusätzlichen Eisenverluste beim kurzgeschlossenen Anker grösser als beim normalen Betrieb.

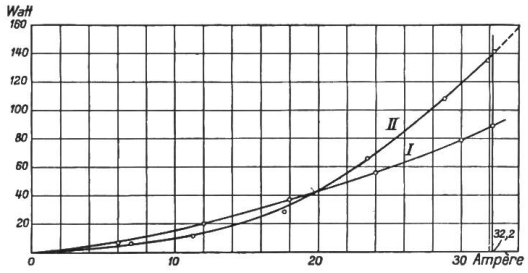

Abbildung 19. Zusätzliche Verluste aus dem Belastungsversuch (I) und aus dem Kurzschlussversuch (II) in Abhängigkeit von der Nutzstromstärke.

Vergleicht man den Totalbetrag der zusätzlichen Verluste, wie er sich aus den beiden Messmethoden ergibt (vergl. Abb. 19), so geht daraus hervor, dass man bis in die Nähe der Vollbelastung die Belastungsmethode (Kurve I) mit grosser Annäherung durch die Kurzschlussmethode (Kurve II) ersetzen darf. Erst bei Vollaststrom fallen die mit der Kurzschlussmethode gewonnenen zusätzlichen Verluste etwa 50 % grösser aus als diejenigen, welche man aus der andern Messung erhält. Am Wirkungsgrad macht sich das aber nur sehr wenig bemerkbar. Setzt man nämlich an Stelle der früher für den Wirkungsgrad benutzten zusätzlichen Verluste die aus der Kurzschlussmethode ermittelten zusätzlichen Verluste ein, so ergibt sich, dass erst eine merkliche Differenz im Wirkungsgrad erscheint, wenn die Belastung der Gleichstrommaschine mehr als $^3/_4$ der normalen beträgt. Bei Vollbelastung (3700 Watt) wird dann der Wirkungsgrad mit Berücksichtigung der zusätzlichen Verluste aus dem Kurzschlussversuch 1 % kleiner als η. Man wird also in den meisten Fällen die zusätzlichen Verluste nach der Kurzschlussmethode ermitteln dürfen; nur wenn man den Wirkungsgrad mit grosser Genauigkeit haben will, führt die erste Methode allein zum Ziel.

Bei grossen Generatoren ist die Kurzschlussmethode allerdings die allein mögliche, denn die Methode eines Hilfsmotors für den Antrieb bei voller Belastung ist bei grossen Maschinen mit so viel erschwerenden Umständen verbunden, dass sie im Allgemeinen wohl kaum angewendet werden kann.