Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 9 (1918)
Heft: 3

Artikel: Versuchstechnische Beiträge zur Auslaufmethode
Autor: Imhof, A.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1057185

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: 25.12.2024

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 das

Generalsekretariat
des Schweiz. Elektrotechnischen Vereins,
Neumühlequai 12, Zürich 1 - Telephon: Hottingen 37.08

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

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G.,
Hirschengraben 80/82 Zürich 1 Telephon Hottingen 36.40

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

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

Prière d'adresser toutes les communications concernant la matière du „Bulletin“ au

Secrétariat général
de l'Association Suisse des Electriciens
Neumühlequai 12, Zurich 1 - Telephon: Hottingen 37.08

Toutes les correspondances concernant les abonnements, l'expédition et les annonces, doivent être adressées à l'éditeur:

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei S. A.
Hirschengraben 80/82 Zurich 1 Téléphone Hottingen 36.40

Abonnementspreis
für Nichtmitglieder inklusive Jahresheft und Statistik:
Schweiz Fr. 15.—, Ausland Fr. 25.—.
Einzelne Nummern vom Verlage Fr. 1.50 plus Porto.

Prix de l'abonnement annuel (gratuit pour les membres de l'A. S. E.), y compris l'Annuaire et la Statistique, Fr. 15.— pour la Suisse, Fr. 25.— pour l'étranger.
L'éditeur fournit des numéros isolés à Fr. 1.50, port en plus.

IX. Jahrgang
IX^e Année

Bulletin No. 3

März
Mars
1918

Versuchstechnische Beiträge zur Auslaufmethode.

Von *Alfr. Imhof,* Zürich.

Einleitung.

Unter den verschiedenen Methoden zur Bestimmung von Wirkungsgraden, resp. Verlustleistungen der Maschinen, besitzt die Auslaufmethode einige besondere Vorzüge, die es rechtfertigen, ihrer Vervollkommnung alle Aufmerksamkeit zu schenken. Im folgenden handelt es sich in der Hauptsache um verbesserte experimentelle Methoden zur Aufnahme der Auslaufkurve, Methoden zur Bestimmung des Massenträgheitsmomentes und die Verlusttrennung. Ohne auf die allgemein bekannte Theorie der Auslaufmethode im einzelnen einzugehen, sei der Vollständigkeit halber daran erinnert, dass der Auslaufversuch auf folgendem dynamischen Vorgang beruht: Der in Rotation befindliche Maschinenteil besitzt eine kinetische Energie $W = \Theta \frac{\omega^2}{2}$ (bei Translation $m \frac{v^2}{2}$), welche zur Deckung der Verlustarbeit während des Auslaufes aufgebraucht wird.

Es bedeute für den rotierenden Maschinenteil:

Θ = Massenträgheitsmoment

ω = Winkelgeschwindigkeit $= \frac{\pi n}{30}$

n = Spezifische Tourenzahl (minütliche)

t = Zeit

$$\text{Es ist } W = \left(\frac{\pi}{30}\right)^2 \Theta \frac{n^2}{2}$$

Die Abnahme von W mit wachsender Zeit beträgt:

$$\frac{dW}{dt} = -\left(\frac{\pi}{30}\right)^2 \Theta n \frac{dn}{dt} = p_v \frac{\text{m kg}}{\text{Sec.}} \text{ oder } \frac{dW}{dt} = -9{,}81 \left(\frac{\pi}{30}\right)^2 \Theta n \frac{dn}{dt} = p_v \text{ Watt}$$

Das Produkt $9{,}81\left(\frac{\pi}{30}\right)^2 \cdot \Theta$ ist eine Maschinenkonstante.

Fassen wir eine bestimmte Tourenzahl ins Auge, so ist $\frac{d\,w}{d\,t}$ die Verlustleistung p_v bei dieser Tourenzahl. Messen wir p in Funktion von t, so bekommen wir die „Auslaufkurve". $\frac{d\,n}{d\,t}$ ist gleich dem Tangens des Neigungswinkels dieser Kurve gegen die positive Zeitaxe bei der Tourenzahl n. Diese Verzögerung ist proportional dem „Verlustmoment" [1]), z. B. bei blosser Reibung dem Reibungsmoment. Das Produkt $n\,\frac{d\,n}{d\,t}$ ist proportional der Verlustleistung bei der Tourenzahl n und gleich der Subnormalen der Kurve $n = f\,(t)$ bei diesem n. Die gerade Verbindungslinie zweier beliebiger Kurvenpunkte gibt durch den Tangens ihres Neigungswinkels gegen die Zeitaxe ein Mass für das mittlere Verlustmoment zwischen den Tourenzahlen, welche diesen Punkten entsprechen. Dies folgt aus dem Mittelwertsatz oder auch aus blosser Ueberlegung des dynamischen Vorganges. Wir kommen später oft darauf zurück.

Bei lang auslaufenden Maschinen sind die experimentellen Schwierigkeiten gewöhnlich nicht gross, wohl aber bei Maschinen mit sehr kleiner Auslaufzeit.

Aufnahme der Auslaufkurve.

1. Methode für Maschinen mit kleiner Auslaufzeit.

Zur Durchführung der im folgenden beschriebenen Methode genügt ein Experimentator, der mit Stoppuhr und Tourenzähler ausgerüstet ist. Das Verfahren ist anwendbar auch für die kleinsten Auslaufzeiten, dagegen unzweckmässig und wenig genau für Maschinen mit grosser Auslaufzeit.

Ein und dieselbe Maschine muss, wenn man sie oftmals nacheinander auslaufen lässt, immer dieselbe Auslaufkurve ergeben, solange sich die feinern Eigenschaften der Lager nicht ändern. Geht man von verschiedenen Anfangstourenzahlen n_0, n_1, n_2 (Fig. 1 a) aus, so ändert sich nur die Länge der Kurve, aber die von denselben Tourenzahlen begrenzten Kurventeile lassen sich zur Deckung bringen, indem man sie im Sinne der Pfeile in Fig. 1 a verschiebt.

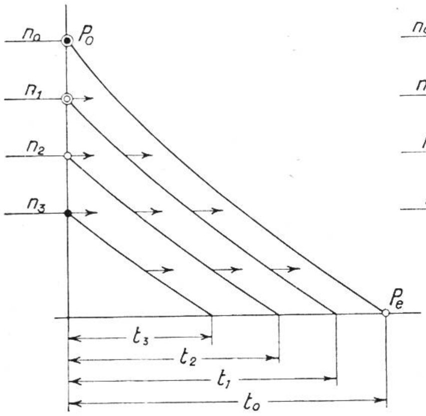

Fig. 1 a. Auslauf von verschiedenen Anfangstourenzahlen aus.

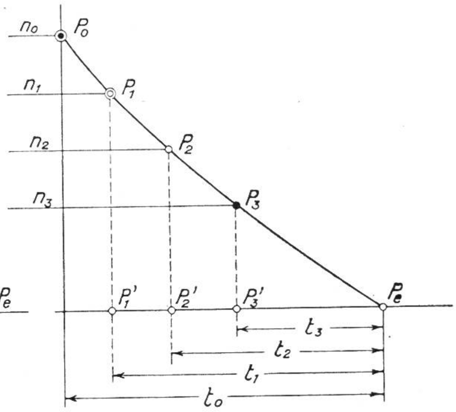

Fig. 1 b. Konstruktion der Auslaufkurve mit den gemessenen Anfangstourenzahlen und Auslaufzeiten.

Darauf gründet sich das Verfahren: Man lässt die Maschine mit einer konstanten Tourenzahl n_0 solange laufen, bis n_0 mit dem Umlaufzähler genau gemessen ist, schaltet dann *plötzlich* die Energiezufuhr ab (besonders leicht bei elektrischen Maschinen) und misst die Zeit vom Abschaltmoment bis zum Stillstand, d. h. die Gesamtauslaufzeit t_0 (Fig. 1, a und b). Dadurch besitzt man den Anfangspunkt P_0 und den Endpunkt P_e der Kurve. Dann wiederholt man den ganzen Vorgang, geht aber von der niedrigeren Tourenzahl p_1 aus, misst die Zeit t_1 bis zum Stillstand und trägt diese von P_e aus auf der Zeitaxe negativ ab (also in Fig. 1 b nach links), errichtet in P_1 die Ordinate n_1 Touren/Min. und

[1]) Es ist dies eine kurze Bezeichnung für das gegen den Drehsinn wirkende Drehmoment, welches die Verluste verursacht.

bekommt dadurch einen Punkt P_1 der Kurve. In dieser Weise fortfahrend, sind beliebig viele Punkte der Auslaufkurve erhältlich. Man kann natürlich auch in umgekehrter Reihenfolge vorgehen, indem man mit einer kleinsten Tourenzahl beginnt und mit einer grössten aufhört. Vor der Messung muss man die Maschine unbedingt ziemlich lange laufen lassen, damit die Lager in den stationären Betriebszustand kommen.

Man kann auch das Tachymeter direkt vor dem Versuch mit Hilfe des Umlaufzählers für einige Tourenzahlen eichen und dann den Versuch mit dem Tachymeter durchführen.

Fig. 2 ist eine mit der obigen Methode an einer Gleichstrommaschine mit nur 37 Sekunden Auslaufzeit aufgenommene Kurve, von der Normaltourenzahl n = 1500 ausgehend. Aber auch viel kleinere Auslaufzeiten bedingen noch kein Hindernis. Ich habe die Methode an einigen Maschinen geprüft und stets gute Resultate erhalten. Bei grossen Maschinen dauern jedoch die Messungen zu lange, und dadurch ändert sich manchmal der Zustand der Lager merklich, so dass die Genauigkeit leidet. Für diese Fälle kommen andere Methoden in Betracht.

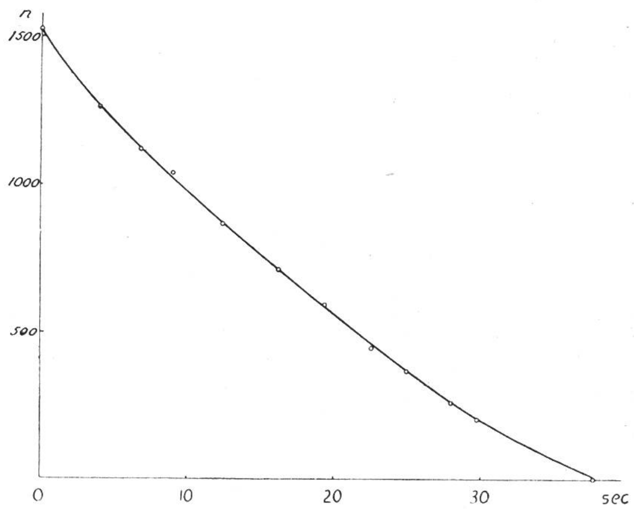

Fig. 2. Nach der beschriebenen Methode aufgenommene Auslaufkurve.

Das Verfahren würde sich auch zur Untersuchung von Getrieben eignen, deren Verluste so klein sind, dass die Reibung eines Zählers oder Tachometers niemals dagegen vernachlässigt werden darf. Während des Auslaufs hat der betreffende Maschinenteil eben kein Instrument mitzubewegen.

2. *Voltmetermethode für Maschinen mit mittleren und grossen Auslaufzeiten.*

Die meisten elektrischen Maschinen haben bekanntlich bei konstanter Erregung im Leerlauf eine der Tourenzahl proportionale Klemmenspannung. Ein an die Ankerklemmen geschlossener Spannungsmesser lässt deshalb die Tourenzahl in einem gewissen, leicht zu bestimmenden Masstab ablesen. Dies gilt auch für unerregte Maschinen, da das Remanenzfeld genügt, um eine gut messbare E. M. K. zu erzeugen. Die gewöhnliche Voltmeterablesung, synchron mit der Zeitablesung, wurde bisher oft angewandt. [1])

Eine Verbesserung dieser Voltmeterablesung ist wohl nur dadurch erreichbar, dass man die Synchronablesung erleichtern und genauer gestalten kann. Ich schlage im folgenden eine von mir praktisch mit bestem Erfolg geprüfte, etwas eigentümliche Ablesungsmethode vor, die nicht weniger leistet als ein registrierendes Voltmeter und für die ein einziger Experimentator genügt. Sie ist nicht nur zur Aufnahme der Auslaufkurve an elektrischen Maschinen geeignet, sondern allgemein zur Analyse von stetigen Bewegungsvorgängen.

Die Ablesungen der Stellungen eines stetig bewegten Zeigers lassen sich viel rascher machen, wenn man nicht eine Ziffer abzulesen braucht, sondern nur an der Stelle, wo sich der Zeiger im gegebenen Moment befindet, einen Bleistiftstrich markieren kann. Das synchrone Ablesen mit der Zeit, Ablesung auf das Zeichen einer zweiten Person hin, ist nie sehr genau. Man soll in geeigneter Weise auf den Ablesemoment vorbereitet werden. Dies geschieht in sehr vollkommener Weise durch ganz regelmässig sich folgende, scharf begrenzte, tönende Signale, von denen in rhytmischer Folge eines sich von den übrigen unterscheidet. Bei dem unterschiedlichen Ton wird die Markierung gemacht. Praktisch erreicht man den genannten Vorgang sehr einfach in folgender Weise. Um die Zeigerstellungen durch Punkte oder durch Striche zu markieren, schneidet man sich einen Papierstreifen, welcher in seiner Rundung der Voltmeterskala angepasst ist. Die Deckscheiben

[1]) Wurde von Dettmar eingeführt.

der Skalen liegen meist etwas vertieft, so dass man den Streifen nur hineinlegen kann. Andernfalls klebt man ihn an den beiden Enden lose an. Die radiale Breite des Streifens ist so bemessen, dass der Zeigerteil, der über dem Spiegel (zur Verhütung der Parallaxe) spielt, sichtbar bleibt. Für die Zeitsignale kann man sich da, wo der Lärm nicht zu gross ist, einer über das Ohr gebundenen, laut tickenden-Taschenuhr bedienen, oder, wo dieses Ticken nicht hörbar ist, benützt man an deren Stelle eine kleine Weckeruhr oder auch ein Metronom. Alle Uhren haben die Eigenschaft, in einem gewissen Rhytmus zu ticken, so dass z. B. nach je 2, 3 oder 4 Sekunden ein etwas anderer Laut wahrnehmbar ist als in den Zwischensekunden. Hat man die Maschine von der treibenden Energiequelle abgeschaltet, so verfolgt man mit der scharfen Bleistiftspitze den Zeiger und markiert seine Stellung auf dem Papierstreifen jedesmal bei Beginn eines neuen Rhythmus durch einen kleinen Strich. Fallen die Punkte sehr nahe zusammen, so kann man unschwer einen längern Rhythmus (z. B. den doppelten des ersten) benützen. Man bekommt dadurch einen durch Fig. 3 a veranschaulichten Streifen. Als Papier für den Streifen verwendet man mit Vorteil Pauspapier, damit man die Instrumentenskala durchpausen kann. Die Zeitdauer eines Rhythmus lässt sich leicht sehr genau feststellen. Man hat also auf dem fertigen Papierstreifen (Fig. 3 b) in skalarer Darstellung die durch das Instrument gezeigte Spannung in Funktion der Zeit. Diese Darstellung wird dann in das rechtwinklige Koordinatensystem übertragen. Es gelingt so mit geringer Mühe, überraschend gute Kurven zu registrieren mit einer sonst nur durch Registrierinstrumente erhältlichen Punktzahl. Ein von mir aufgenommenes Beispiel zeigt Fig. 4. In manchen Fällen wird man den Messbereich des Voltmeters während des Auslaufs ändern müssen. Da man die eine Hand völlig frei hat, macht dies keine Schwierigkeiten. Man bringt dann einfach auf dem Papierstreifen zwei konzentrische Kreisbogen an und zeichnet auf dem einen die Markierungen beim ersten, auf dem andern die beim zweiten Messbereich. Liegen sehr lange Auslaufzeiten vor, so wird die Punktzahl nur zu gross; man muss sich dann ein Zeitsignal beschaffen, das die Lautzeichen in genügend grossen Intervallen gibt. Man sieht daraus, dass sich die Methode am besten für mittlere Auslaufzeiten eignet, für sehr kleine deshalb nicht, weil sich dann der Instrumentenzeiger zu schnell bewegt, als dass man mit der Hand ohne Uebung genau folgen könnte. Auch muss die Maschine mindestens zwei parallel geschaltete Bürstenbesitzen, damit der Zeiger nicht infolge der Vibration zittert.

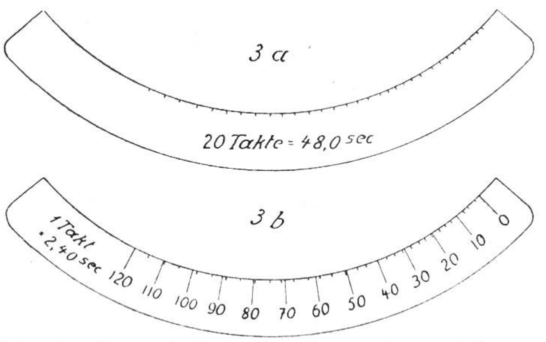

Fig. 3a. Skalenstreifen mit markierten Zeigerstellungen

Fig. 3b. Fertiger Skalenstreifen mit durchgepauster Instrumentenskala und markierten Zeigerstellungen.

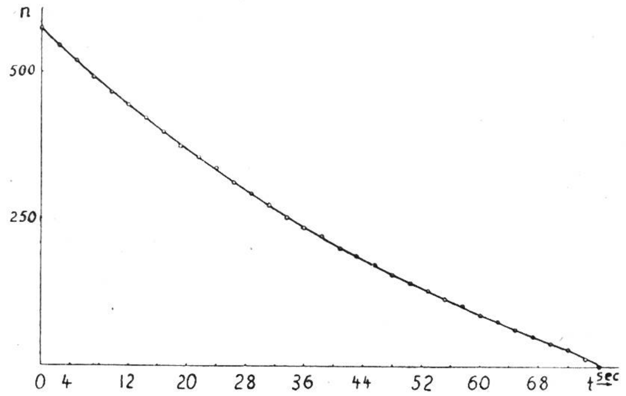

Fig. 4. Nach der Voltmetermethode aufgenommene Auslaufkurve.

Die Bestimmung des absoluten Masstabes.

Wie in der Einleitung dargelegt wurde, ist zur Bestimmung des absoluten Masstabes, mit dem durch die Subnormale der Auslaufkurve die Verlustleistung gemessen wird, die Kenntnis des Massenträgheitsmomentes Θ, resp. des Produktes $9{,}81 \cdot \left(\frac{\pi}{30}\right)^2 \cdot \Theta$ erforderlich. Gleichviel ist auch erreicht, wenn man das absolute Verlustmoment kennt, welches durch eine bestimmte Tangente des Neigungswinkels der Auslaufkurve gegen die Zeitaxe dargestellt wird. Hierfür gibt es verschiedene Methoden. Wohl zu den brauchbarsten gehört die Methode mit gebremstem Auslauf von Marcel Deprez.

1. Vereinfachung der Methode mit gebremstem Auslauf.

Zum guten Verständnis der Vereinfachung muss ich zuerst die Methode, wie sie bisher angewandt wurde, kurz ableiten. Man lässt die Maschine einmal auslaufen unter dem Einfluss der Reibung allein, ein zweites Mal unter Bremsung mit bekanntem Bremsmoment, so dass die Auslaufkurve steiler verläuft. Bei diesem zweiten Auslauf wird die der rotierenden Maschinenmasse innewohnende kinetische Energie durch die Summe von Reibungs- und Bremsmoment in Wärme umgesetzt.

Der Methode liegt folgende Rechnung zu Grunde:

Es bedeute:

p: Verlustleistung in Watt (Momentanwert).
M_b: Bremsmoment in m kg (bekannt).
S: Subnormale der Auslaufkurve bei der minütlichen Tourenzahl n.

$$\operatorname{tg} \alpha = -\frac{d\,n}{d\,t}$$

Index I beziehe sich auf Auslauf ohne Bremsung.
Index II „ „ „ „ mit „

Lassen wir nur unter dem Einfluss der Lager- und Luftreibung auslaufen, so ist die Verlustleistung bei n Touren pro Minute:

$$p_1 = 9{,}81 \cdot \left(\frac{\pi}{30}\right)^2 \cdot \Theta \cdot S_1 = C \cdot \Theta \cdot S_1$$

Lassen wir mit Bremsung auslaufen, so beträgt die Verlustleistung:

$$p_2 = C \cdot \Theta \cdot S_2 = p_1 + 9{,}81 \frac{\pi}{30} n\, M_b$$

$$C \cdot \Theta \cdot S_2 = C \cdot \Theta \cdot S_1 + \frac{30}{\pi} C\, n\, M_b$$

$$\Theta = \frac{30}{\pi} \frac{n\, M_b}{S_2 - S_1}$$

oder da $S = -n \dfrac{d\,n}{d\,t} = n \operatorname{tg} \alpha$

(1) $$\Theta = \frac{30}{\pi} \frac{M_b}{\operatorname{tg} \alpha_2 - \operatorname{tg} \alpha_1}$$

Die Verlustleistung infolge der Reibung (+ andere Verluste, wenn solche vorhanden) wird nun:

(2) $$p_1 = 9{,}81 \left(\frac{\pi}{30}\right) M_b\, n \frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2 - \operatorname{tg} \alpha_1}$$

Die Methode hat den Vorteil, auch für nicht elektrische Maschinen, sogar für solche beträchtlicher Leistung, anwendbar zu sein. Das Bremsmoment M_b ist ja nur ungefähr gleich dem Reibungsmoment.

Wie ich im folgenden zeigen werde, lässt sich diese Methode, was den experimentellen Teil anbetrifft, zugleich mit noch erhöhter Genauigkeit in wertvoller Weise vereinfachen. Es ist nämlich gar nicht nötig, die Auslaufkurven aufzunehmen, sondern die Messung der totalen Auslaufzeit und der Anfangstourenzahl genügt. Unter Zuhilfenahme des Mittelwertsatzes gelingt es dann sehr leicht, die absolute Grösse des Reibungsmomentes zu bestimmen.

Die Kurve $n_1 - t_A$ sei in Fig. 5 die Auslaufkurve ohne Bremsung. Nur unter dem Einfluss des Reibungsmomentes allein sinkt die Tourenzahl in der Zeit t_B vom Wert n_1 auf n_2 herunter. Wirken Reibungsmoment (oder allgemeiner das Verlustmoment) und Bremsmoment gleichzeitig, so sinkt die Tourenzahl in derselben Zeit von n_1 auf Null herunter.

Also bewirkt das Bremsmoment allein einen Tourenabfall von n_2 auf Null. Es verhalten sich die Tourensenkungen für ein und dieselbe Zeit wie die mittleren Momente während dieser Zeit:

$$\frac{\Delta n_V}{\Delta n_B} = \frac{M_{Vm}}{M_{Bm}}$$

M_{Vm} = Mittleres Verlustmoment, d. h. das mittlere, während der totalen Auslaufzeit t_A (bei Bremsung) wirkende Moment, welches die Verluste bedingt.

M_{Bm} = Mittleres Bremsmoment während der Zeit t_A, ist hier konstant und gegeben.

Dann gilt die Beziehung:

$$M_{Vm} = M_{Bm} \frac{\Delta n_V}{\Delta n_B} \tag{3}$$

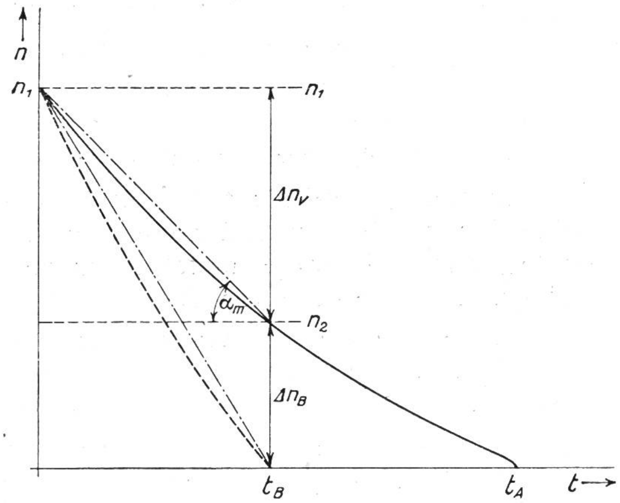

Fig. 5. Bestimmung des absoluten Masstabes mittelst eines gebremsten Auslaufs.

Wir setzen nun tg α_m (siehe Fig. 5) = K M_{Vm} und besitzen dadurch den Masstab, mit dem wir unsere sämtlichen Momente zu messen haben.

Diese einfache Gleichung gibt Aufschluss über die absolute Berechnung der Momente. Man hätte natürlich auch direkt die Formel für die absolute Berechnung der Leistung, resp. für die Berechnung von Θ suchen können.

Wir haben uns an die Bedeutung der Sehnen einer Auslaufkurve erinnert: Sie stellen also diejenigen Auslaufkurven dar, welche unter Wirkung eines konstanten mittleren gegendrehenden Momentes zustandekommen würden, damit derselbe Tourenabfall in derselben Zeit stattfände, wie dies durch die wirklichen Momente geschieht. Da wir noch oft mit diesen Geraden zu tun haben werden, nenne ich sie der Kürze wegen fortan *„Auslaufgeraden"* zwischen den Zeiten t_p und t_q, resp. den Tourenzahlen n_p und n_q.

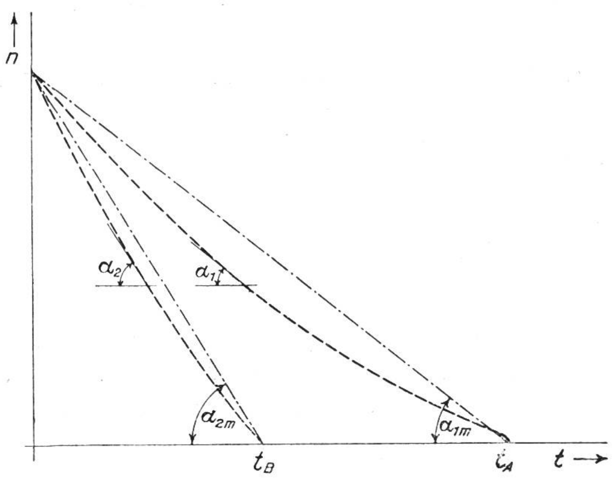

Fig. 6. Bestimmung des absoluten Masstabes mittelst eines gebremsten Auslaufs.

Die Tangenten der Winkel α, welche mit dem Index m versehen sind, sollen die Tangenten der Neigungswinkel der Auslaufgeraden gegen die negative Zeitaxe sein (Fig. 6). Dann können wir die Gleichungen (1) und (2) umschreiben, damit sie auf die Gesamtauslaufzeiten anwendbar sind:

$$\Theta = \frac{30 \times M_B}{\pi (\operatorname{tg} \alpha_{2m} - \operatorname{tg} \alpha_{1m})} \tag{4}$$

$$p_1 = 9{,}81 \left(\frac{\pi}{30}\right) M_B\, n \frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_{2m} - \operatorname{tg} \alpha_{1m}} = 0{,}1075\, \Theta \cdot S_1 \tag{5}$$

Vor der Gleichung (3) hat Gleichung (4) den Vorteil, dass überhaupt nur Gesamtauslaufzeiten zu messen sind, während man dort die Auslaufkurve ohne Bremsung benötigt. Die Genauigkeit ist mit Formel (4) resp. (5) deshalb eher grösser als mit Formel (3).

Wie man tg α misst, d. h. in welchem Masstab Ordinate und Abszisse zur Bildung des Tangens gemessen werden, ist gleichgültig, da der Tangens im Zähler und Nenner der Gleichung für p_1 vorkommt. Fassen wir Θ lediglich als eine Konstante auf, ohne nach dem Masstab zu fragen, in welchem sie gemessen ist, so ist auch in Gleichung (1), resp. (4), der Masstab für den Tangens belanglos, doch muss er gleich jenem sein, der zur Messung der Subnormalen S benützt wird (Gleichung 5). Weil $S = n \frac{dn}{dt} = n \operatorname{tg} \alpha$ ergibt sich der Masstab für S auf folgende Weise:

Für n sei : 1 cm = a Tour/Min.

„ $\frac{dn}{dt} = \operatorname{tg} \alpha$: 1 cm = b (derselbe Masstab wie bei der Bestimmung von Θ)

„ S : 1 cm = a × b.

2. *Anwendung desselben Prinzips auf elektrische Maschinen.*

Speziell an elektrischen Maschinen kann man eine im Prinzip gleiche Methode anwenden, ohne einer besondern Bremse zu bedürfen. Wir lassen die Maschine ihre eigene Bremse sein. Ich werde im folgenden zeigen, dass man hierdurch zu einer sehr genauen und einfachen Methode zur Bestimmung der Masstabkonstanten gelangt.

Im vorhergehenden Abschnitt handelte es sich immer um ein während des ganzen Auslaufs konstantes Bremsmoment. Die Konstanz dieses Drehmomentes ist jedoch nicht wesentlich, es muss nur in jedem Augenblick bekannt sein. Erregen wir die zu untersuchende Maschine und schliessen wir den auslaufenden Anker über einen Widerstand R, so fliesst durch die Ankerdrähte ein Strom, dessen bremsende Wirkung genau berechenbar ist.

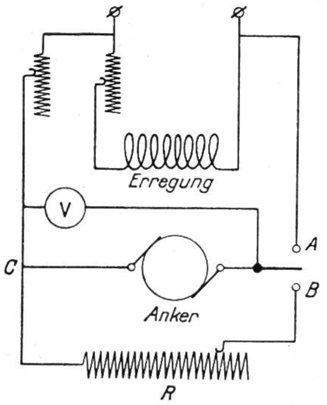

Fig. 7. Schaltung für die elektrische Bestimmung des absoluten Masstabes.

Wir schalten nach Fig. 7. Die Maschine ist mit konstantem Strom erregt. In der Stellung A des Umschalters läuft sie mit einer gewissen Tourenzahl n_{max}. Wir lesen die Klemmenspannung $e_{K\,max}$ am Voltmeter V ab und messen die Tourenzahl. Dann schalten wir um auf Stellung B. Der Anker läuft nun aus, und zwar schneller als wenn $R = \infty$, da er durch R belastet ist. Die elektrische Belastung bemessen wir so, dass die Auslaufzeit ungefähr halb so gross wird wie beim Auslauf mit völlig offenem Ankerkreis und derselben Maschinenerregung. Es handelt sich also nur um eine äusserst geringe Belastung.

Das durch den Ankerstrom i erzeugte Drehmoment, also das Bremsmoment, beträgt in mkg:

$$M_B = \frac{1}{9{,}81\,\omega}\, e_K\, i = \frac{30}{9{,}81\,\pi\, n}\, \frac{e_K^2}{R}$$

$$e_K = K \cdot n$$

(6) $$M_B = \frac{30\,K}{9{,}81\,\pi\, R}\, e_K$$

Diese Formeln geben das Bremsmoment bei einer bestimmten Tourenzahl, resp. Spannung an. *Es ist der Spannung oder Tourenzahl direkt proportional.* Wir gewinnen viel an Genauigkeit, wenn wir das mittlere Moment über den ganzen Auslauf berechnen. Wegen dem linearen Verlauf von M_B beträgt dieses:

$$M_{Bm} = \frac{1}{2}\,(M_{Bmax} + M_{Bmin})$$

$$M_{Bmin} = 0 \text{ (bei Stillstand)}$$

(7) $$M_{Bm} = \frac{15\,K}{9{,}81\,\pi\, R}\, e_{Kmax} = 0{,}4867\, \frac{K}{R}\, e_{Kmax}$$

$$K = \frac{e_{Kmax}}{n_{max}}$$

Wir messen also nur e_{Kmax}, n_{max}, R und die ganze Auslaufzeit t_A bei der elektrischen Bremsung.

Die Verlustleistung bei irgend einer Tourenzahl finden wir nun mit Formel 5, indem wir dort für M_B nach Formel 7 den Wert M_{Bm} einsetzen.

R wird am besten durch eine überschlagsmässige Rechnung ungefähr so bestimmt, dass im Mittel während des Auslaufs ein Strom fliesst, der etwa gleich dem Leerlaufstrom bei normalem Lauf ist, maximal also etwa gleich dem doppelten Leerlaufstrom. Man kann dann den Widerstand durch den Versuch noch genauer so einstellen, dass der Auslauf ungefähr halb solange dauert, wie bei offenem Anker.

Der Vorteil dieser Methode gegenüber anderen elektrischen Methoden besteht darin, dass M_B nach Gleichung 7 berechenbar, das *mittlere* Bremsmoment über den *ganzen Auslauf* darstellt und man keine mit der Zeit sich ändernde Grössen zu messen hat. Für sehr kleine Maschinen wird man allerdings die Methode nicht mehr anwenden dürfen, wenn die Messungen genau sein sollen; denn die Voraussetzung, dass die Spannung dem Strom proportional ist, wird dann kaum mehr ganz richtig sein. Im übrigen sind keine nennenswerten Vernachlässigungen gemacht: Der ohmsche Spannungsabfall ist im Mittel während des Auslaufs derselbe wie vor dem Auslauf, und die an sich schon geringe Ankerrückwirkung ist im Mittel sehr angenähert dieselbe.

Eine messtechnische Vereinfachung in der Bestimmung der Eisenverluste und deren Trennung.

Die Auslaufmethode erhält einen besondern Wert durch die elegante Weise der Eisenverlustmessung und Trennuug, die sie ermöglicht. Man ging stets so vor, dass man die Auslaufkurve bei einigen verschiedenen Erregungen aufnahm und dadurch die Eisenverluste bestimmte in Funktion der Tourenzahl mit der Erregerstromstärke als Parameter, und daraus in Funktion der Erregung mit der Tourenzahl als Parameter. Man könnte sich die Arbeit beträchtlich erleichtern und verkürzen, wenn man ohne diese verschiedenen Kurvenaufnahmen auskäme. Bei kleinen Maschinen gibt erst die anfangs beschriebene Methode eine Möglichkeit zur Bestimmung dieser Kurven, aber wenn man deren mehrere aufnehmen muss, ist nicht wenig Zeit erforderlich und man muss dann unter Umständen wegen geringen Aenderungen der Lagerbeschaffenheit die „Reibungskurve“ (siehe vorn) nachprüfen. Auch ist es ziemlich schwer, bei ganz kleinen Maschinen Eisenverlustkurven vom richtigen Charakter zu erhalten

Ich war aus diesen Gründen bestrebt, auch hier mit den Gesamtauslaufzeiten zu operieren durch eine Umkehrung der bekannten Verlusttrennungsmethode. Die Rechnung zeigt zwar bald, dass man damit allein nicht auskommt; erforderlich ist noch die Messung einer Partialauslaufzeit. Um es ohne Kurvenaufnahme machen zu können, ist man natürlich genötigt, über das Gesetz der Auslaufkurve eine Voraussetzung zu machen. Da unser Endziel nicht in diesen Kurven, sondern in den Eisenverlustkurven liegt, können wir unter Umgehung der Auslaufkurve die Verlustkurve selbst zu konstruieren suchen. Ueber diese können wir nun leicht eine Voraussetzung machen, denn wir kennen die Gesetze der Abhängigkeit von Eisenverlusten und Frequenz. Insofern stimmen die bekannten Gesetze über die Grösse der Eisenverluste überein, dass die Hysteresisverluste proportional der Frequenz sind und die Wirbelstromverluste proportional dem Quadrat der Frequenz. Sehr exakte Untersuchungen haben bekanntlich auch hierin Abweichungen gezeigt, aber diese sind sehr klein und in dem praktisch gewöhnlich vorkommenden Intervall der Frequenzen durchaus zu vernachlässigen, da deren Grösse unter den durch die Messgenauigkeit bedingten Fehlergrössen liegt.

Bei konstanter Induktion gilt, weil $n = \text{Konstante} \times f$ ist:

$$p_{Fe} = n\,A + n^2\,B$$

$$= 9{,}81\ M_{Fe}\,\omega = x\ M_{Fe}\,n$$

$$M_{Fe} = \frac{p_{Fe}}{x\,n}$$

$$M_{Fe} = A_1 + n\,B_1 \tag{8}$$

Die beiden unbekannten Konstanten A und B ermitteln wir, indem wir die *Gesamtauslaufzeit und eine partielle Auslaufzeit* messen. Die Gesamtauslaufzeit lässt sich mit der Stoppuhr sehr genau feststellen. Aber auch die Zeit, die verstreicht, bis die Tourenzahl auf einen gewissen Wert gesunken ist, können wir mit guter Genauigkeit messen. Wir kontrollieren, resp. eichen das Tachymeter vorerst mit Hilfe des Umlaufzählers für die betreffende Tourenzahl. Sobald diese beim Auslauf erreicht ist, drücken wir auf die Stoppuhr. Man arbeitet hierbei zweckmässigerweise mit zwei Uhren. Anstatt die genannten Zeiten können wir auch zwei partielle Auslaufzeiten messen, die eine bei Beginn des Auslaufes, die andere gegen den Schluss hin; das Resultat wird dadurch genauer.

Besitzen wir die Momentenlinien, so folgen daraus die Verlustkurven in bekannter Weise durch Multiplikation mit den Tourenzahlen. Die sehr einfache Konstruktion soll an Hand der Fig. 8, welche ein Beispiel darstellt, beschrieben werden:

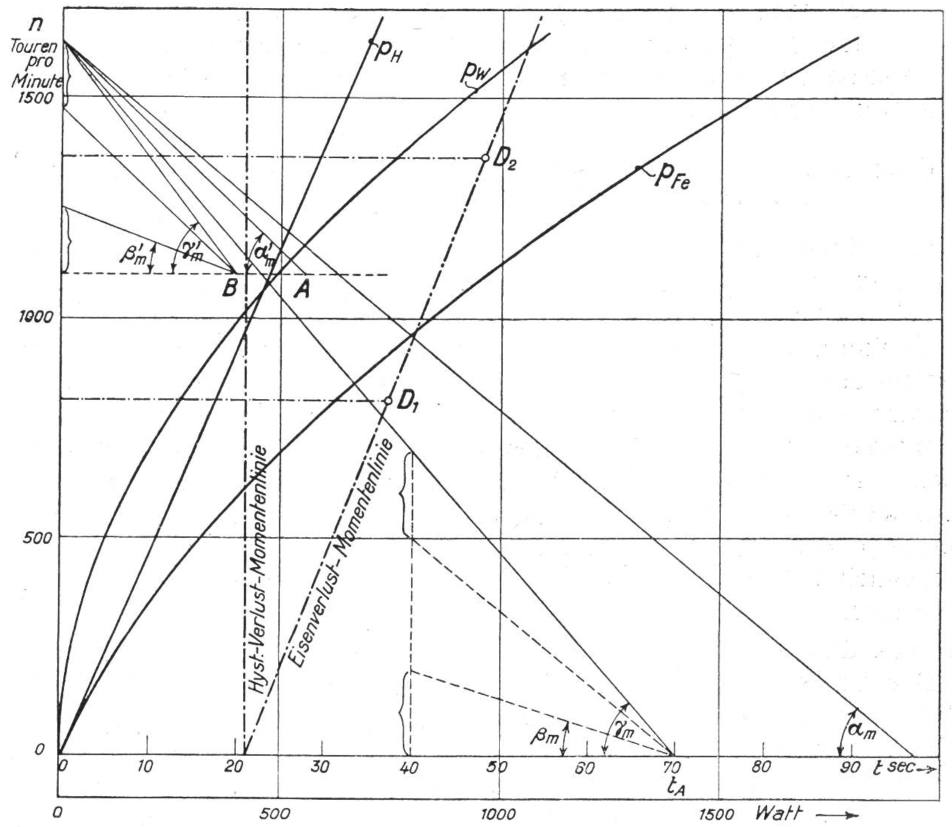

Fig. 8. Bestimmung der Eisenverluste.

Die Auslaufgerade für Reibung allein und für ganzen Auslauf schliesse mit der Zeitaxe den Winkel α_m ein, die für Reibung und Eisenverluste allein den Winkel β_m.

Dann ist
$$\operatorname{tg} \alpha_m + \operatorname{tg} \beta_m = \operatorname{tg} \gamma_m$$

γ_m finden wir, indem wir die Gesamtauslaufzeit t_A bei Erregung messen und t_A mit N verbinden.

$$\operatorname{tg} \beta_m = \operatorname{tg} \gamma_m - \operatorname{tg} \alpha_m$$

Diese Subtraktion führen wir auf unserem Blatt graphisch durch.

Mit $\operatorname{tg}\beta_m$ kennen wir das mittlere Eisenverlustmoment M_{Fem} (Methoden, um den Masstab zu bestimmen, in welchem der Tangens als Moment zu messen ist, haben wir vorn kennen gelernt). Wir finden in unserem Beispiel 0,0744 mkg. Dieses Moment ist bei der mittleren Tourenzahl $\frac{1}{2} n_{max}$ normal zu der n-Axe in einem beliebig zu wählenden Masstab aufzutragen, in unserem Beispiel bei 815 Touren/min. Dadurch bekommen wir Punkt D_1 der Eisenverlust-Momentengeraden.

Da aber zur Bestimmung einer Geraden zwei Punkte erforderlich sind, gehen wir in genau gleicher Weise vor mit Benützung der Partialauslaufzeit, in unserem Beispiel von n = 1630 bis 1100. Die entsprechenden Grössen wie oben bei der Totalauslaufzeit versehen wir zur Verdeutlichung der Analogie einfach mit einem Strich als Index.

$$\operatorname{tg} \beta'_m = \operatorname{tg} \gamma'_m - \operatorname{tg} \alpha'_m$$

(Der Abstand von der n-Axe bis A ist die partielle Auslaufzeit bis n = 1100 bei unerregter Maschine, der Abstand von der n-Axe bis B die bei erregter Maschine. Diese Zeiten sind sehr sorgfältig zu messen).

Wir finden in unserem Beispiel, dass

$$M'_{Fem} = \text{prop. } \operatorname{tg} \beta'_m = 0{,}960 \text{ mkg}$$

Dieses Moment tragen wir im gleichen Masstab wie M_{Fem} ab bei der Tourenzahl in der Mitte zwischen n = 1630 und 1100, also bei n = 1365. Dadurch bekommen wir Punkt D_2. Die Eisenverlust-Momentenlinie ist nun bestimmt. Wo diese Gerade $(D_1 D_2)$ die Zeitaxe schneidet, ziehen wir eine Parallele zur n-Axe. Dies ist die Hysteresisverlust-Momentlinie. Die Momente sind also getrennt in Hysteresis- und Wirbelstromverlust-Momente. Um die Verlustkurven $p_H = f_1(n)$ und $p_W = f_2(n)$ zu finden, haben wir weiter nichts mehr zu tun, als diese Momente mit einer Konstanten und der jeweiligen Tourenzahl zu multiplizieren. Diese Konstante bestimmt nur den Masstab, wir wählen sie natürlich so, dass wir denselben Masstab haben wie bei der Reibungsverlustkurve. Da die P_H Linie eine Gerade durch 0 ist, brauchen wir die Multiplikation nur für ein einziges Hysteresis-Verlustmoment vorzunehmen.

Hat man die ganze Konstruktion einmal durchdacht und für eine Erregung angewandt, so ist sie für die übrigen Erregungen sehr leicht und schnell gemacht. An grossen Maschinen wird man die Konstruktion seltener anwenden, da man dort die Auslaufkurve genau aufnehmen kann.

Zusammenfassung.

1. Es wird eine Methode angegeben, um Auslaufkurven bei beliebig kurzer Auslaufzeit mit Uhr und Umlaufzähler genau aufnehmen zu können. a Punkte einer Kurve werden erhalten, indem man von (a—1) verschiedenen Tourenzahlen auslaufen lässt. Nur ein Experimentator ist erforderlich.

2. Ein Verfahren zur Aufnahme der Auslaufkurven mittelst Voltmeter wird beschrieben, das in einer Markierung der Zeigerstellungen nach einem Tonrhytmus (z. B. einer Wecker- oder Taschenuhr) besteht und das Punkte in sehr geringen Zeitabständen aufzunehmen gestattet. Ein Beobachter genügt.

3. Die bekannte Methode zur Bestimmung des Massenträgheitsmomentes des auslaufenden Maschinenteiles (bezw. des absoluten Masstabes für die Verlustleistung), welche einen Auslauf unter schwacher Bremsung zuhilfe zieht, wird dadurch vereinfacht, dass nur die ganzen Auslaufzeiten gemessen werden müssen. Dies gelingt bei Berücksichtigung der Tatsache, dass der Neigungswinkel einer Kurvensehne (gegen eine feste Axe) gleich ist dem Mittel aus sämtlichen Neigungswinkeln des Kurventeiles über dieser Sehne.

4. Es wird eine einfache und genaue elektrische Methode zur Bestimmung des Massenträgheitsmomentes entwickelt. Man lässt die Maschine auslaufen, indem der Anker über einen grossen Widerstand geschlossen wird. Das durch den Ankerstrom erzeugte Bremsmoment lässt sich in einfacher Weise ermitteln.

5. Ein graphisches Verfahren wird angegeben zur Konstruktion der Eisenverlustkurven bei Kenntnis von Gesamtauslaufzeit und einer partiellen Auslaufzeit. Die Anwendung ist insbesondere für kleinere Maschinen gedacht.

PS. Herrn Prof. Dr. *K. Kuhlmann* spreche ich an dieser Stelle meinen besten Dank aus für die Ueberlassung der zu den Versuchen gebrauchten Maschinen und Apparate und Herrn cand. sc. tech. *A. Winiger* für seine mehrmalige Mithilfe bei den Versuchen. In zuvorkommendster Weise hat auch Herr Dipl.-Ing. *K. Keller* zum schnellen Gelingen der Versuche beigetragen.