

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 16 (1925)
Heft: 5

Artikel: Experimentelle Untersuchung über den plötzlichen Kurzschluss von Wechselstromgeneratoren
Autor: Rikli, H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059226>

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: 06.06.2025

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

SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

Erscheint monatlich,
im Januar dazu die Beilage „Jahresheft“.

Alle den Inhalt des „Bulletin“ betreffenden Zuschriften
sind zu richten an das

Generalsekretariat
des Schweiz. Elektrotechnischen Vereins
Seefeldstrasse 301, Zürich 8 — Telefon: Limmat 96.60*,
welches die Redaktion besorgt.

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

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G.
Stauffacherquai 36/38 Zürich 4 Telefon: Selnau 38.68*

Abonnementspreis (für Mitglieder des S. E. V. gratis)
für Nichtmitglieder inklusive Jahresheft:
Schweiz Fr. 20.—, Ausland Fr. 25.—
Einzelne Nummern vom Verlage Fr. 2.— plus Porto.

Ce bulletin paraît mensuellement. — „L'Annuaire“ est
distribué comme supplément dans le courant de janvier.

Prière d'adresser toutes les communications concernant
la **matière** du „Bulletin“ à:

Secrétariat général
de l'Association Suisse des Electriciens
Seefeldstrasse 301, Zurich 8 — Telefon: Limmat 96.60*
qui s'occupe de la rédaction.

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

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei S. A.
Stauffacherquai 36/38 Zurich 4 Telefon: Selnau 38.68*

Prix de l'abonnement annuel (gratuit pour les membres de
l'A. S. E.), y compris l'Annuaire Fr. 20.—
pour la Suisse, Fr. 25.— pour l'étranger.
L'éditeur fournit des numéros isolés à Fr. 2.—, port en plus.

XVI. Jahrgang
XVI^e Année

Bulletin No. 5

Mai 1925
Mai

Experimentelle Untersuchung über den plötzlichen Kurzschluss von Wechselstromgeneratoren¹⁾.

Von Oberingenieur H. Rikli, Zürich.

*Der Autor untersucht experimentell die brem-
sende Wirkung von einphasigen und dreiphasigen
Kurzschlüssen auf die rotierende Masse eines Tur-
bogenerators von 2500 kW Leistung bei 3000
Umdrehungen pro Minute. Die Bremsleistung in
Funktion der Zeit ist grossen Schwankungen, von
der Periodenzahl des Generators bei dreiphasigem
Kurzschluss, von doppelter Periodenzahl bei ein-
phasigem Kurzschluss, unterworfen. Die höchste
Bremsleistung tritt bei einphasigem Kurzschluss
auf und erreicht momentan ungefähr 25 000 kW.*

*L'auteur détermine à l'aide d'expériences,
l'effet de freinage produit sur les masses en
mouvement d'un turboalternateur de 2500 kW
3000 tours par un court-circuit, établi brusque-
ment sur une ou sur les trois phases.*

*La puissance de freinage varie dans de gran-
des proportions en fonction du temps, avec la
fréquence de l'alternateur lorsque le court-circuit
est triphasé et avec une fréquence double lorsque
le court-circuit est monophasé. Elle peut attein-
dre pour l'alternateur en question, en court-cir-
cuit monophasé, jusqu'à 25 000 kW environ.*

Die transienten Stromverhältnisse bei plötzlichem Kurzschluss von synchronen Wechselstromgeneratoren sind durch zahlreiche theoretische Abhandlungen über diesen Gegenstand und durch mannigfache oszillographische Untersuchungen allgemein bekannt. Ziemlich erschöpfend ist das ganze Problem von J. Biermanns in „Magnetische Ausgleichsvorgänge in elektrischen Maschinen“, Berlin 1919, behandelt worden, worin auch zahlreiche Oszillogramme von derartigen Versuchen wiedergegeben und besprochen sind. Auch die mechanische Wirkung plötzlicher Kurzschlüsse auf die Wicklungsköpfe sind schon lange eingehend studiert worden und haben zu zahlreichen mehr oder weniger erfolgreichen Abstützkonstruktionen geführt, welche namentlich für schnelllaufende Generatoren, insbesondere Turbogeneratoren, zu einem äusserst wichtigen Bestandteil der Maschine geworden sind.

Die bremssende Wirkung eines plötzlichen Kurzschlusses auf die rotierende Masse von Generator und Antriebsmaschine ist hingegen noch wenig in der Literatur

¹⁾ Diese Arbeit ist bei der Redaktion am 22. Dezember 1924 eingegangen.

besprochen worden und namentlich sind kaum zusammenhängende Versuche über diese Erscheinung veröffentlicht worden²⁾. Es war also von Interesse, diese Erscheinung experimentell genau zu untersuchen. Als Versuchsobjekt diente ein 2poliger Turbogenerator der Maschinenfabrik Oerlikon (M. F. O.) von ca. 2500 kVA bei 50 Perioden pro Sekunde und 6000 Volt.

Da die Verhältnisse beim plötzlichen Kurzschluss verschieden sind, je nach dem Schaltmoment desselben, so war es mir vor allen Dingen darum zu tun, eine Einrichtung zu schaffen, die es erlaubte, den Schaltmoment beliebig zu wählen und mit Sicherheit immer wieder genau gleich einzustellen. Das Prinzip dieser Einrichtung

war folgendes: Der Kurzschluss erfolgte durch einen Oelschalter, der durch Gewicht betätigt wurde, und zwar war das Gewicht sehr gross, so dass dieses Moment die Reibungsmomente des Schaltmechanismus um ein Vielfaches überstieg. Dadurch konnte man für alle Fälle mit genau gleicher Schliesszeit für den Schalter rechnen.

Der Mechanismus der Auslösevorrichtung ist in Fig. 1 schematisch dargestellt. Von der Welle des Generators aus wird durch ein Schneckengetriebe mit der Uebersetzung 26 : 1 ein Hebelarm in relativ langsame Drehung gebracht; am einen Ende desselben befindet sich eine Kulis, in welcher ein verstellbarer Nocken angebracht ist, dieser schlägt in der tiefsten Stellung des Armes gegen einen An-

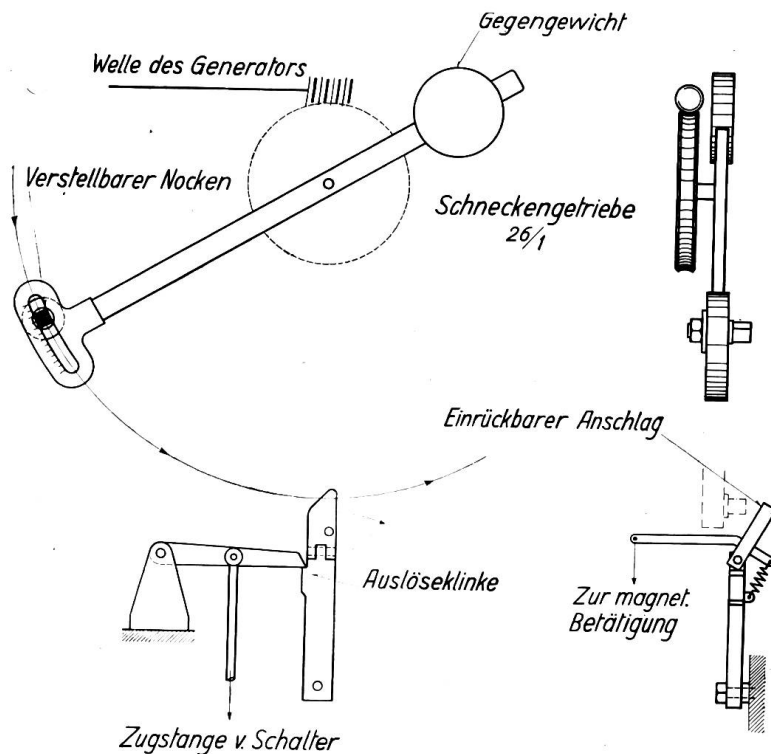


Fig. 1.

schlag, der aber für gewöhnlich durch Federkraft aus der Bahn des Nockens ausgerückt ist und nur zur Vornahme des Kurzschlusses in diese eingerückt wird. Eine Verschiebung des Nockens in der Kulis um 80 mm entspricht gerade einer vollen Periode und es kann durch entsprechende Einstellung des Nockens jeder beliebige Zeitmoment innert einer Periode für die Einleitung des plötzlichen Kurzschlusses gewählt werden. Der Kurzschluss selbst findet um die Schliesszeit des Schalters später statt. Da aber diese konstant (= 0,18 sec) ist, so findet der Kurzschluss bei gegebener Nockenstellung auch immer im gleichen Zeitmoment der einen Periode statt. Voraussetzung dazu ist, dass die Kurzschlüsse immer bei genau der gleichen Periodenzahl aufgenommen werden. Bei 50 Perioden des Generators (3000 T) findet der Kurzschluss gerade 9,0 Perioden nach Anschlag des Nockens statt, bei 25 Perioden (1500 T) aber nach 4,5 Perioden. Also müsste in diesem Falle der Nocken um $\frac{1}{2}$ Periode, d. h. um 40 mm in der Kulis verschoben werden, um wieder den gleichen Schaltmoment zu erhalten wie bei 50 Perioden.

Die Bestimmung der Bremsleistung eines plötzlichen Kurzschlusses konnte kaum anders als nach der Auslaufmethode bestimmt werden, wobei es aber darauf ankam,

²⁾ Erst nach Einreichung des Manuskriptes habe ich vom Artikel des Herrn Dr. R. Rüdenberg: „Kurzschlußströme beim Betrieb grosser Kraftwerke“, erschienen in der Zeitschrift „Elektrotechnik und Maschinenbau“, Wien 1925, Heft No. 5 und 6, Kenntnis erhalten. Dr. Rüdenberg scheint ähnliche Versuche gemacht zu haben, wie sie in vorliegender Arbeit beschrieben werden.

den Drehzahlabfall von Beginn des Kurzschlusses an für jeden Moment möglichst genau zu kennen. Ich wählte daher die oszillographische Methode zur Aufzeichnung dieses Vorgangs. Nach Behebung mancher Schwierigkeiten gelang es auch, einwandfreie Oszillogramme über den Drehzahlverlauf bei plötzlichem Kurzschluss zu erhalten. An Stelle der Erregermaschine wurde eine kleine Tachometerdynamo mit der Welle des Turbogenerators festgekuppelt; diese wurde von einer Akkumulatorenbatterie aus mit konstanter Stromstärke erregt, die Spannung dieser Dynamo war also direkt proportional der jeweiligen Tourenzahl und konnte zur oszillographischen Aufnahme derselben nach vorheriger Eichung benützt werden. Da es aber darauf ankam, den Drehzahlabfall in den paar ersten Perioden nach Kurzschluss möglichst genau aufzuzeichnen, also einen grossen Masstab für diesen Bereich der Drehzahl-

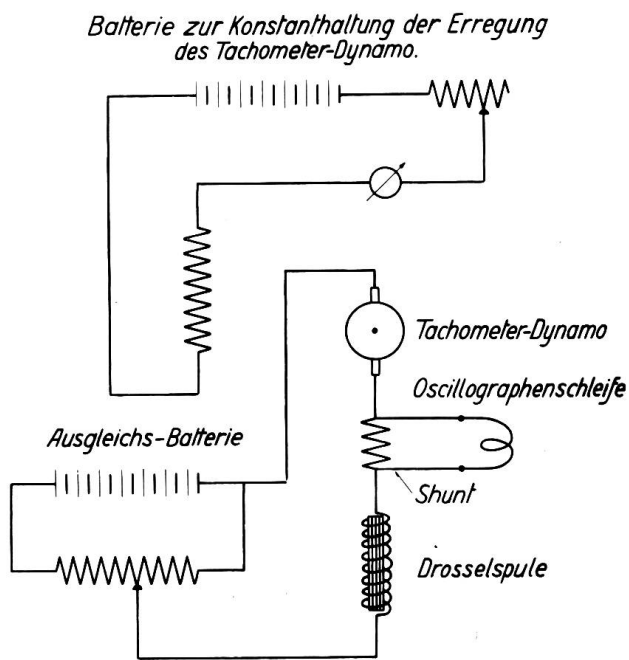


Fig. 2.

veränderung zu erhalten, wurde der Ausgleichstrom zwischen Tachometerdynamo und einer zweiten Akkumulatorenbatterie nach dem Schema Fig. 2 dazu benutzt. Durch Einstellen des Regulierwiderstandes zwischen Tachometerdynamo und Batterie konnte der Empfindlichkeitsgrad beliebig gewählt werden.

Es waren aber zuerst noch verschiedene Schwierigkeiten zu überwinden, bevor eine einwandfreie Kurve für den Drehzahlabfall erhalten wurde. Als Tachometerdynamo wurde zuerst die Erregermaschine verwendet, welche durch eine elastische Lederkupplung vom Turbogenerator aus angetrieben wurde. Die Drehzahlkurven zeigten schon bei konstanter Tourenzahl regelmässige periodische Schwankungen innert jeder Umdrehung. Der Grund wurde in einer nicht ganz zentrischen Lage von Generator- und Erregerwelle

gefunden, wodurch die Geschwindigkeit des angetriebenen Erregerankers bei konstanter Generatortourenzahl bei jeder Umdrehung sich in kleinen Grenzen änderte. Obschon die excentrische Lage nur ca. $\frac{2}{10}$ mm betrug, ergaben diese Geschwindigkeitsänderungen bei der sehr empfindlichen Schaltung der Tachometerdynamo doch einige Millimeter hohe Wellen im Oszillogramm. Durch starre Kupplung der Erregerwelle mit der Generatorwelle wurde dieser Uebelstand beseitigt. Es traten auch dann aber noch mit jeder Umdrehung periodische Schwankungen auf. Diese waren aber meist kleiner und unregelmässig, und wurden schliesslich als vom Kontaktwiderstand zwischen Kollektor und Kohlenbürste der Tachometerdynamo herrührend erkannt. Es zeigte sich, dass kleine Aenderungen im Uebergangswiderstand am Kollektor von erheblichem Einfluss auf den Ausgleichstrom zwischen beiden war. Diese Störungen konnten in der obigen empfindlichen Schaltung der Tachometerdynamo nicht mit Sicherheit ganz beseitigt, sie konnten aber durch geeignete Wahl der Kollektorbürste und durch peinliche Reinhaltung des letzteren in zulässigen Grenzen gehalten werden.

Es wurde auch versucht, die kleinen hochfrequenten Schwankungen der Drehzahllinie, die von den Lamellen des Kollektors herrührten, durch separate Belastung der Tachometerdynamo mit einer Selbstinduktion zu beseitigen. Man lief aber dabei Gefahr, dadurch auch die raschen Veränderungen der Drehzahlabfalllinie verzögernd zu beeinflussen, weshalb von dieser Korrektur abgesehen wurde, besonders da diese Schwingungen sehr regelmässig und von relativ kleiner Amplitude waren.

Um immerhin die grössten Spitzen abzdämpfen, wurde eine Selbstinduktion in dem von höchstens $\frac{1}{10}$ A durchflossenen Ausgleichsstromkreis der Tachometerdynamo in Serie mit dem Shunt für das Oszillogramm eingebaut wie dies Fig. 2 zeigt.

Bei der Aufnahme der ersten Oszillogramme trat dann eine neue Schwierigkeit auf. Die Kupplung zwischen Generator und Erregermaschine war wohl äusserlich starr, aber infolge der relativ langen und dünnen Welle der letzteren war diese Kupplung bezogen auf Torsion doch eine etwas elastische, und Anker mit Kollektor der Erregermaschine konnten Eigenschwingungen ausführen, welche eben durch die rasche Tourenzahländerung bei Kurzschluss erregt wurden, und das erhaltene Oszillogramm war dann eine Ueberlagerung dieser Eigenschwingungen über der eigentlichen Drehzahlabfalllinie. Eine Nachrechnung der elastischen Verhältnisse der Erregerwelle ergab sehr wohl die Möglichkeit einer wesentlichen Torsion derselben bei plötzlichen Drehzahländerungen, die von der Kupplung aus übertragen wurden. Um diesen Fehler mit Sicherheit zu vermeiden, wurde schliesslich der Anker einer kleinen Dynamo direkt auf das Wellenende des Generators aufgesetzt.

Der Unterschied dieser verschiedenen Kupplung zwischen Generatorwelle und Tachometerdynamo wird durch die Oszillogramme Fig. 3 und 4 illustriert. Beide

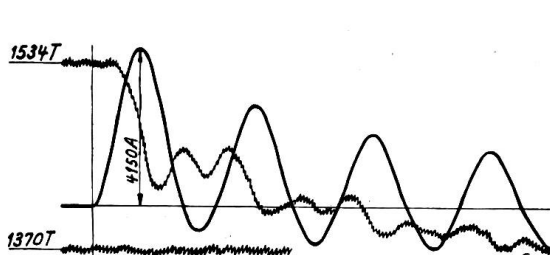


Fig. 3.

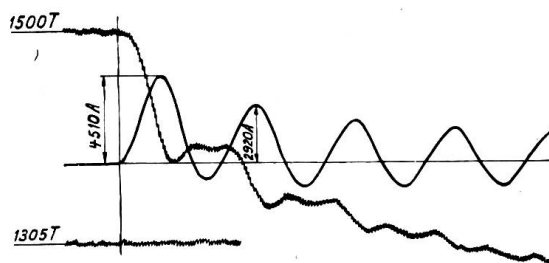


Fig. 4.

sind im gleichen Schaltmoment und bei gleicher Tourenzahl aufgenommen. Die Drehzahlabfalllinie in Fig. 3 mit torsionselastischer Kupplung zwischen Generator und Tachometerdynamo zeigt deutlich die Uberschwingungen, welche diese infolge ihrer elastischen Welle ausführte, während die Drehzahlabfalllinie in Fig. 4 bedeutend schwächer ausgeprägte Pendelungen aufweist und den richtigen Drehzahlverlauf des Generators wiedergibt.

Die Auslaufmethode zur Bestimmung der bei plötzlichem Kurzschluss auftretenden Bremskräfte wurde wie folgt durchgeführt:

Der Turbogenerator wurde leer und auf die gewünschte Spannung erregt angetrieben durch einen Gleichstrommotor, dessen Tourenzahl durch feinstufige Regulierung im Hauptstrom- und Nebenschluss sehr genau konstant gehalten werden konnte. Sobald die genaue Tourenzahl erreicht war, wurde der Anschlag am Auslösemechanismus durch magnetische Betätigung eingerückt; durch einen Hilfskontakt am Schaltergestänge wurde kurz vor Schalterschluss der Oszillograph eingeschaltet und der Motor durch Relais abgeschaltet. Vom Moment des Kurzschlusses an wirkten also keine anderen Kräfte auf den Rotor als die aus dem Kurzschluss resultierenden Bremskräfte und ein kleiner unbedeutender Betrag von Reibungs- und Ventilationswiderständen herrührend.

Aus der Drehzahlabfalllinie und dem Periodenmasstab war die sekundliche Drehzahländerung leicht zu bestimmen, das polare Trägheitsmoment des Generatorrotors samt Rotor des Antriebmotors und Tachometerdynamo war $J = 10,68$. Daraus konnte die Bremsleistung bestimmt werden. Sie ist:

$$P_b = 1,078 \cdot 10^{-4} \Delta u_{\text{sec}} u J \text{ in kW.}$$

Wie aus Oszillogramm Fig. 4 ersichtlich, ist die Drehzahllinie durchaus nicht einfacher Natur, sondern ist in hohem Masse von den momentanen Stromzuständen abhängig. Die Amplitudenwerte des plötzlichen Kurzschlussstromes klingen bis zum

stationären Wert nach einer Exponentialkurve ab, deren Verlauf bestimmt wird durch das Verhältnis der Selbstinduktion zu den Verlusten. Man könnte nun annehmen, dass

auch wenigstens die Kurve des mittleren Drehzahlabfalles durch die Verluste bestimmt würde. Das ist wenigstens nicht direkt der Fall. Als Vergleich dienen zwei oszillographische Aufnahmen, die unter möglichst gleichen Bedingungen gemacht wurden. Das eine Mal war die Maschine in ihrer ursprünglichen Bauart mit Rotorwicklungskappen aus Stahl ausgerüstet, das andere Mal hatte sie solche aus geschmiedeter Bronze und verbesserte Verbindung mit den als Dämpfer-

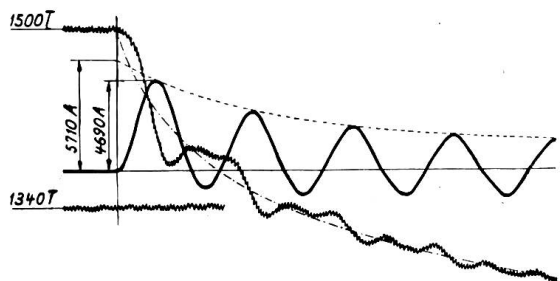


Fig. 5.

stäbe wirkenden Nutenschlusskeilen. Die Verluste im stationären einphasigen Kurzschluss über zwei Phasen betrugen 34 resp. 20 kW bei 200 A Statorstrom und bei 25 Perioden pro Sekunde. Die Streureaktanzen waren unter gleichen Verhältnissen 408 resp. 260 Volt. In den beiden Oszillogrammen Fig. 5 und 6 sind die entsprechenden Verhältnisse bei plötzlichem Kurzschluss wiedergegeben. Beide Oszillogramme geben den Kurzschluss im gleichen Zeitmoment und bei der gleichen Erregung an. Wir können daraus zuerst die beim plötzlichen Kurzschluss wirklich wirksamen Streureaktanzen bestimmen, und sehen, dass diese bedeutend kleiner sind als die nach gewöhnlicher Methode bei Stillstand ermittelten Werte. Indem wir die Amplitudenwerte des Kurzschlussstromes miteinander verbinden und diese Linie verlängern bis zum Schnittpunkt mit der Ordinate im Moment des Kurzschlusses, erhalten wir dort den noch ohne Dämpfung beeinflussten theoretischen Anfangsamplitudenwert $\bar{J}_{kpo}$ des plötzlichen Kurzschlussstromes. Aus diesem Wert bestimmt sich die wirksame Streureaktanz zu:

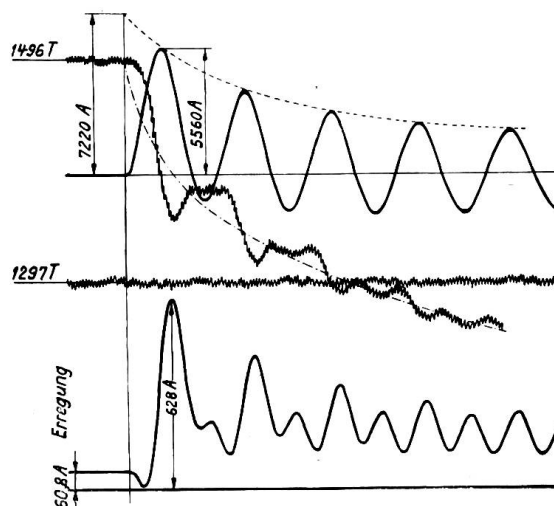


Fig. 6.

$$\varepsilon = \frac{2\sqrt{2} E J_n}{J_{kpo}}$$

Das ergibt für den Fall mit Stahlkappe = 263 Volt
und für den Fall mit Bronzekappe = 220 Volt.

Diese bedeutend kleinere wirksame Streureaktanz bei plötzlichem Kurzschluss rührt davon her, dass bei diesen gewaltigen Streuamperewindungen magnetische Teile des Streufeldes bereits gesättigt sind und sich zum Teil wie unmagnetisches Material verhalten. Bei Verwendung der Bronzekappen ist denn auch die Reduktion der Streureaktanz eine wesentlich kleinere als bei Verwendung von Stahlkappen. Es ist immerhin zwischen den beiden Fällen noch ein Unterschied von ca. 20 % in den Streureaktanzen und dementsprechend in umgekehrtem Verhältnis auch im ersten Momentanwert des plötzlichen Kurzschlusses zu konstatieren.

In den beiden Oszillogrammen sind als strichpunktierte Linien die ungefähren mittleren Drehzahländerungen eingetragen; aus der Neigung der Tangente im Anfangspunkt bestimmt sich die dort ideell auftretende Bremswirkung zu:

$$P_{b \text{ Stahl}} = 1,078 \cdot 10^{-4} \cdot 223 \cdot 25 \cdot 1500 \cdot 10,68 = 9700 \text{ kW und}$$

$$P_{b \text{ Bronze}} = 1,078 \cdot 10^{-4} \cdot 234,5 \cdot 24,9 \cdot 1496 \cdot 10,68 = 10130 \text{ kW.}$$

Obschon also die Verluste im stationären Kurzschluss bei Bronzekappen ganz bedeutend kleiner sind als bei Verwendung von Stahlkappen, so ist die mittlere Drehzahländerung und damit die mittlere Bremsleistung in beiden Fällen kaum verschieden; dies rührt davon her, dass durch die Anbringung der Bronzekappen der plötzliche Kurzschlussstrom wesentlich erhöht wurde.

Was uns aber bei einem plötzlichen Kurzschluss besonders interessiert, ist nicht der Verlauf der mittleren Drehzahlkurve, sondern der momentan mögliche Tourenabfall, weil sich aus diesem die maximalen Beanspruchungen ergeben.

Zwei typische Bilder über den Verlauf der Tourenabfalllinie bei einphasigem plötzlichen Kurzschluss über 2 Phasen ergeben die Oszillogramme Fig. 7 und 9. Fig. 7 zeigt einen plötzlichen Kurzschluss bei ca. 75 A

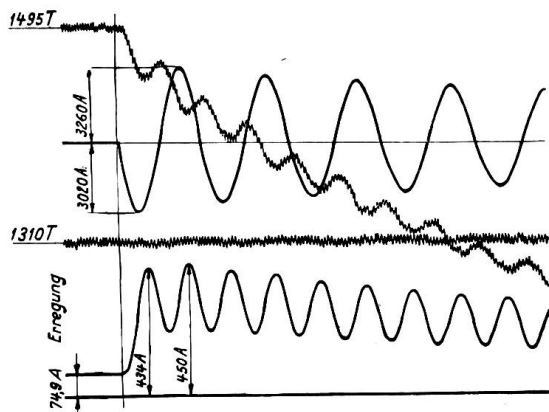


Fig. 7.

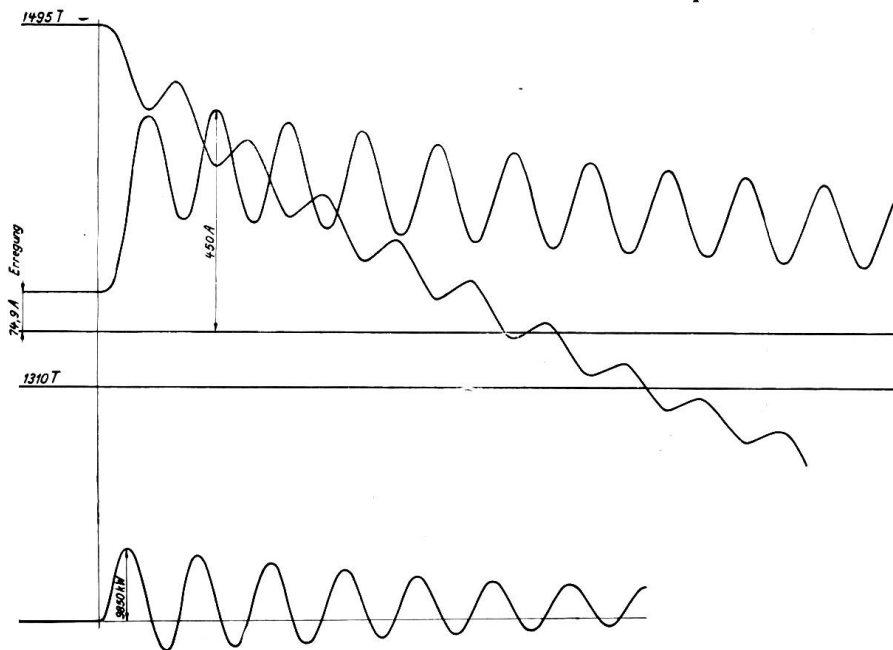


Fig. 8.

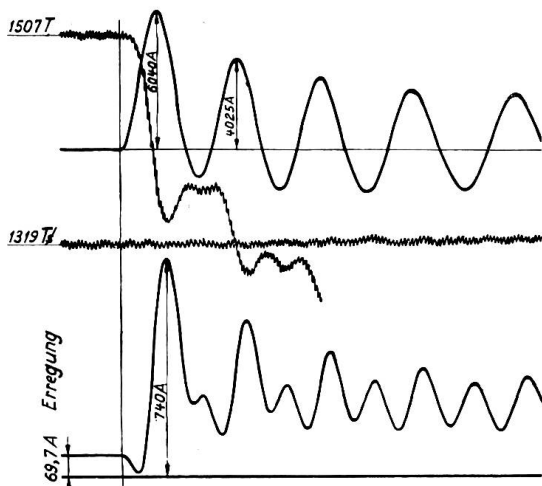


Fig. 9.

Erregung und 1500 Umdrehungen pro Minute im günstigsten Moment, nämlich dann, wenn die Spannungswelle gerade ihr Maximum erreicht hat. Der Verlauf des Kurzschlussstromes ist symmetrisch zur Nulllinie. Der Erregerstrom zeigt ebenfalls ein starkes Ansteigen auf den mehrfachen Wert und im überlagerten Wechselstrom die bekannte doppelte Frequenz. Genau phasengleich mit

diesem überlagerten Wechselstrom verläuft die Drehzahlkurve und zwar wird bei jedem Ansteigen des Erregerstromes dem Rotor Energie entzogen (aus seiner Schwungmasse) und dadurch seine Geschwindigkeit reduziert und bei jedem Fallen des Erregerstromes erhält der Rotor einen Teil dieser Energie wieder zurück und beschleunigt sich demzufolge wieder. Die Differenz beider Beträge ist in Wärme umgesetzt worden. So pendelt die Energie unter stetiger Abnahme mit doppelter Frequenz zwischen Stator und Rotor hin und her bis zum Stillstand des Rotors bei freiem Auslauf oder bis zur Erreichung des stationären Kurzschlusszustandes bei erzwungenem Antrieb.

In Fig. 8 ist dieser Energieverlauf für die ersten Perioden nach Kurzschluss aufgezeichnet; die erste Amplitude erreicht 9250 kW.

Wesentlich anders liegen die Verhältnisse, wenn der Schaltmoment mit Spannung $= 0$ zusammenfällt (Fig. 9). Dann treten jene für die Maschinen mitunter so gefährlichen einseitigen Kurzschlüsse auf. Statorstrom sowohl wie Erregerstrom erreichen unter sonst gleichen Verhältnissen annähernd den doppelten Maximalwert gegenüber einem Kurzschluss beim Spannungsmaximum, wodurch die inneren Kräfte, welche auf die Wicklungen wirken, etwa vervierfacht werden, aber auch die momentane Bremswirkung steigt ungefähr im gleichen Verhältnis an. Der Statorstrom erhält eine starke Gleichstromkomponente, welche zwar ziemlich rasch abklingt, aber das volle Auftreten des inversen Drehfeldes und damit des doppelt frequenten Erregerstromes hintanhält; erst nach Abklingen dieser Gleichstromkomponente und nach Symmetrieeintritt des Statorstromes in bezug auf die Nulllinie treten diese wieder klar zutage. Dies zeigt sich auch deutlich in der Drehzahlkurve, die auch hier wieder vollständig in Phase mit dem Erregerstrom steht und deren doppelte Frequenz auch erst allmählich mit derjenigen des Erregerstromes hervortritt. Der Tourenabfall ist hier mit 170 pro Minute in der ersten Halbperiode ein sehr grosser, die steilste Stelle dieses ersten Zweiges der Drehzahlkurve erreicht sogar den doppelten Betrag, und die momentan grösste Bremsleistung wird $= 1,078 \cdot 10^{-4} \cdot 680 \cdot 23,7 \cdot 1422 \cdot 10,68 = 26500 \text{ kW}$.

Dieselbe Leistung erhält man, wenn man den Amplitudenwert der Spannung vor dem Kurzschluss also $3100 \text{ Volt } \sqrt{2}$ mit der ersten Stromamplitude (6040 A) multipliziert. Diese Leistung entspricht also dem maximal möglichen Wert der Bremswirkung bei plötzlichem Kurzschluss. In Fig. 10 ist für den Fall des Oszillogrammes Fig. 9 der Verlauf dieser Bremsleistungskurve ebenfalls wiedergegeben. Man sieht daraus, welchen gewaltigen wechselnden Drehmomenten ein Rotorkörper bei plötzlichem Kurzschluss im ungünstigsten Falle ausgesetzt ist. Diese haben zwar auf den Rotorkörper, abgesehen von der Erregerwicklung, keinen nachteiligen Einfluss, jedoch ist zu beachten, dass ja stets auch die rotierenden Massen der antreibenden Maschine (in diesem Falle also der Dampfturbine) mit abgebremst werden müssen und dass sich dann die Bremsleistungen auf beide Rotoren entsprechend ihrem Trägheitsmoment verteilen; dann ist die Kupplung mit ihren Organen demjenigen Teil der wechselnden Bremskraft ausgesetzt, der entsprechend dem Trägheitsmoment auf den Rotor der Antriebsmaschine entfällt, dazu tritt aber noch die konstante Beanspruchung, die von der jeweiligen normalen Belastung herrührt.

Diese Kräfte können aber bei gewöhnlicher Dimensionierung der Kupplungen ohne Rücksicht auf diese besonderen Verhältnisse bei plötzlichem Kurzschluss sehr wohl zum Abscheren der Keile oder der Kupplungsbolzen führen. Ein solcher Fall

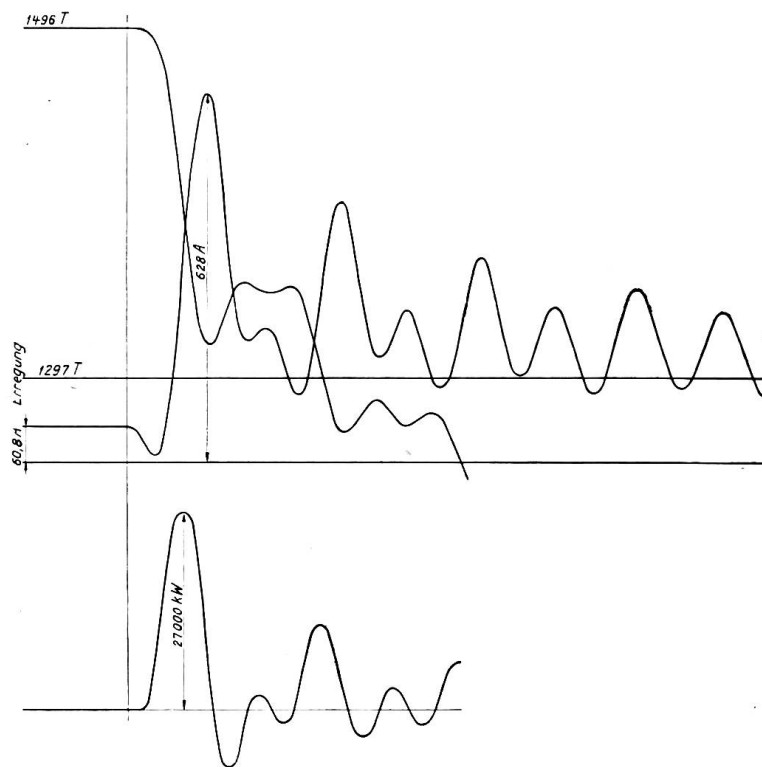


Fig. 10.

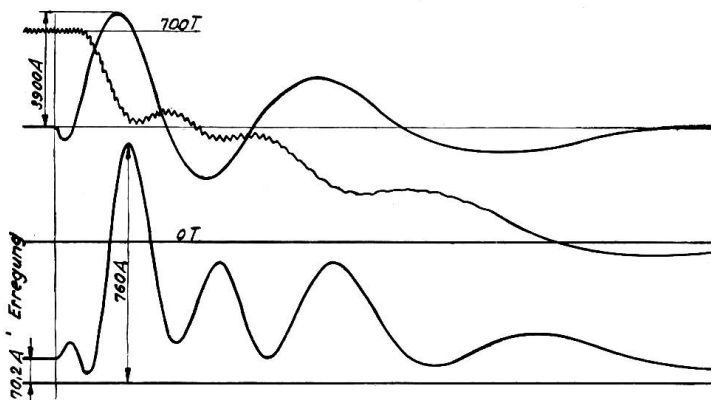


Fig. 11.

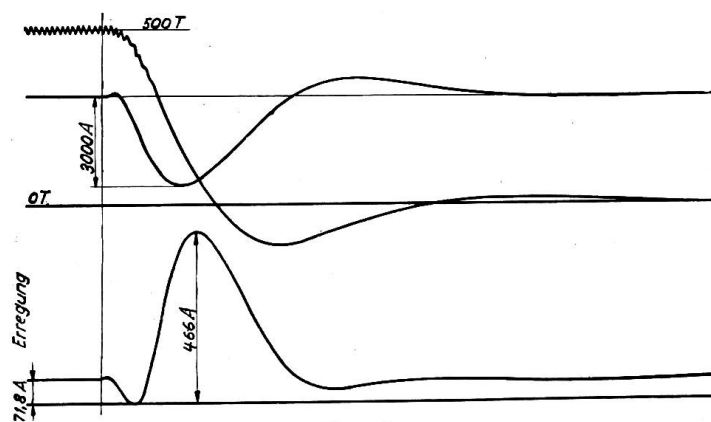


Fig. 12.

Stillstand kommt, sondern dass er Pendelungen ausführt, bevor er ganz zur Ruhe kommt. Besonders deutlich tritt dies beim Kurzschluss mit 500 Touren pro Minute Fig. 12 hervor, wo der Rotor schon nach einer Zehntelsekunde seine Drehrichtung

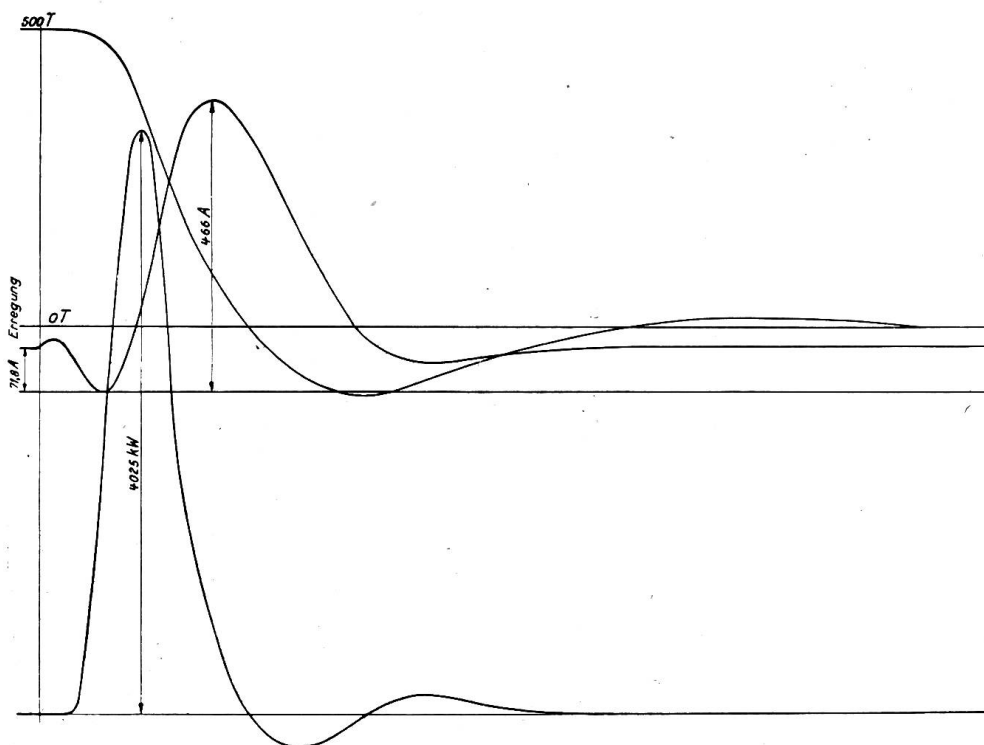


Fig. 13.

der sich schon vor Jahren an einem grossen 25periodigen Turbogenerator ereignete, ist mir bekannt. Da die bremsenden Momente nicht nur im Rotor allein zum Ausdruck kommen, sondern eine Wechselwirkung zwischen Rotor und Stator sind, so wird auch dieser durch sie beansprucht und zwar sind es in erster Linie die Schraubenbefestigungen eventuell Gehäusetrennungen und die Fusschrauben, welche diesen Momenten am meisten ausgesetzt sind.

Ein anschauliches Bild über den Verlauf der Drehzahländerung bis zum Stillstand geben die beiden Oszillogramme Fig. 11 und 12. Sie sind bei 700 resp. 500 anfänglichen Touren aufgenommen und die Spannung der Tachometerdynamo wurde direkt, ohne Ausgleichstromschaltung mit Batterie, zur Aufzeichnung der Tourenzahl benutzt. Man sieht aus diesen Oszillogrammen, dass der Rotor nicht einfach asymptotisch zum

Stillstand kommt, sondern dass er Pendelungen ausführt, bevor er ganz zur Ruhe kommt.

Besonders deutlich tritt dies beim Kurzschluss mit 500 Touren pro Minute Fig. 12 hervor, wo der Rotor schon nach einer Zehntelsekunde seine Drehrichtung wechselt, um in seinem ersten negativen Ausschlag noch eine erhebliche umgekehrte Geschwindigkeit entsprechend ca. 120 minutlichen Touren zu erhalten: Der merkwürdige Verlauf der Bremsleistung ist in Fig. 13 dargestellt.

Der bis dahin beobachtete unruhige Verlauf der Kurve der Drehzahlän-

derung mit seinen steilen Abfällen und Wiederbeschleunigungen kommt aber nur da voll zum Ausdruck, wo die Masse des Rotors den wechselnden mechanischen Kräften rasch genug folgen kann. Ist das Schwungmoment des Rotors grösser im Verhältnis zu den ihm aufgedrückten Richtkräften, so wird die Drehzahlkurve mehr und mehr einen Mittelwert annehmen, und der Rotor wird nicht mehr allen Impulsen zu folgen vermögen. Dies tritt ein, wenn wir die Kurve der Drehzahländerung bei immer höheren Tourenzahlen aufnehmen; die Oszillogramme (Fig. 14 und 15), welche die Verhältnisse bei ca. 3000 Umdrehungen für ziemlich symmetrischen und ganz einseitigen Kurzschluss wiedergeben, zeigen dies in anschaulicher Weise, besonders im Vergleich mit den Oszillogrammen Fig. 7 und 9 zu 1500 Touren. Die maximale Bremsleistung ergibt sich für den Kurzschluss nach Oszillogramm Fig. 14 zu 11 400 kW, diejenige bei Oszillogramm Fig. 15 zu 21 300 kW. Wenn auch die Erregungen in den Oszillogrammen Fig. 7 und 9 resp. Fig. 14 und 15 nicht ganz die gleichen waren, so geht doch aus dem Vergleich der Bremsleistungen

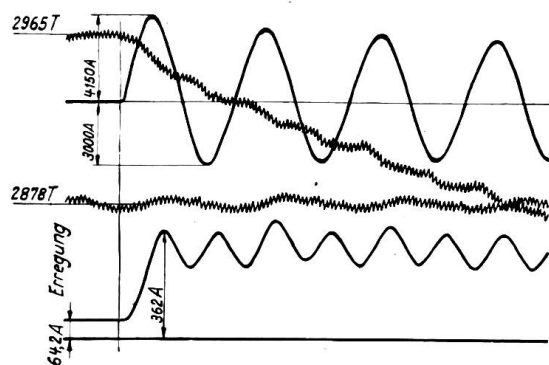


Fig. 14.

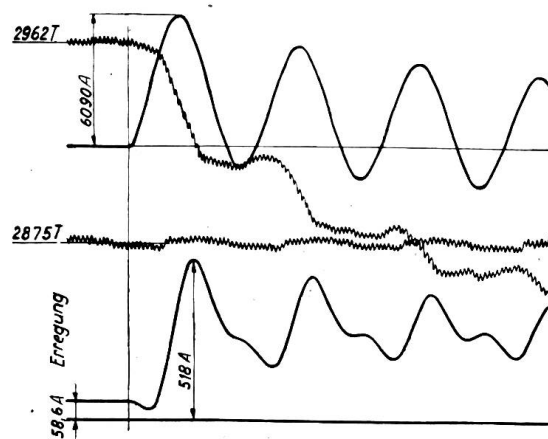


Fig. 15.

zur Evidenz hervor, dass dieselben bei 3000 Touren lange nicht proportional höher sein können unter sonst gleichen Verhältnissen als bei 1500 Touren, d. h. also dass die maximalen Bremsmomente bei höheren Tourenzahlen (grösseren Schwungmomenten) wesentlich kleiner ausfallen als bei niederen Tourenzahlen, bei welchen der Rotor den auf ihn einwirkenden wechselnden Kräften besser folgen kann. Dies kam auch bei einer Zusammenstellung der Versuchsergebnisse deutlich zum Ausdruck. Es wurde für die ungünstigsten Schaltmomente bei den verschiedenen Tourenzahlen der Quotient gebildet aus $\frac{\text{Max. Bremsleistung}}{E_{\text{max}} J_{kp \text{ max}}}$: derselbe

war nur bis zu 1500 Touren $\cong 1$, darüber hinaus fiel er ab, um bei 3000 Touren sogar unter 0,5 zu sinken. Der ungefähre Verlauf dieses Verhältnisses ist in Fig. 16 dargestellt, gilt aber selbstverständlich nur für den vorliegenden Fall. Immerhin deutet der Verlauf der ganzen Erscheinung darauf hin, dass besonders niederperiodige Turbogeneratoren bei plötzlichem Kurzschluss aussergewöhnlich grossen momentanen Bremskräften ausgesetzt sind, die eine besondere Rücksichtnahme beim Entwurf der Kuppelungen und der Gehäuseverschraubungen erheischen.

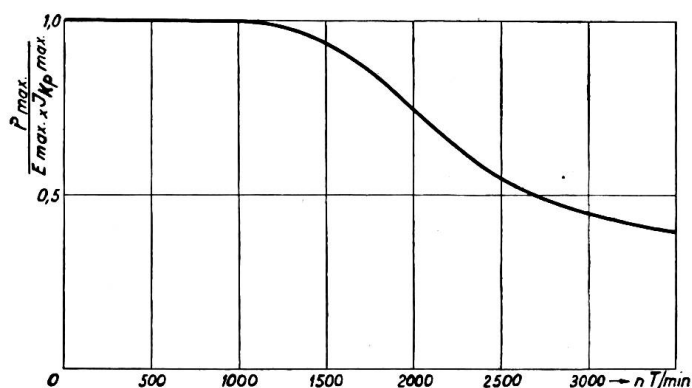


Fig. 16.

Der starke Anstieg des Erregerstromes, besonders bei einseitigem plötzlichem Kurzschluss könnte die Vermutung aufkommen lassen, dass auch die Spannung an den Enden der Rotorwicklung mindestens im gleichen Masse oder, da der Erregerstrom nun in einen Wechselstrom mit sehr raschen (doppelt frequenten) Aenderungen bei hoher Amplitude umgewandelt ist, in noch bedeutend gesteigerter Proportion ansteigen würde und hierin eine Gefahr für Durchschläge der Erregerwicklung liegen würde. Dem ist aber glücklicherweise nicht so. Man muss sich vergegenwärtigen, dass diese Umformung des Erregerstromes durch die Wirkung des plötzlichen Kurzschlusses im Rotor selbst induziert wird und daher die hiezu nötige Spannung nach aussen nicht zur Wirkung kommt. Nach aussen d. h. an den Enden der Erregerwicklung kommt nur diejenige Spannung zum Ausdruck, welche durch den erhöhten Erregerwechselstrom im Widerstand und in der event. Selbstinduktion des äusseren Erregerstromkreises erzeugt wird. Da die Selbstinduktion des zugehörigen Erregerankers aber stets sehr klein ist, ist die an den Enden der Erreger-

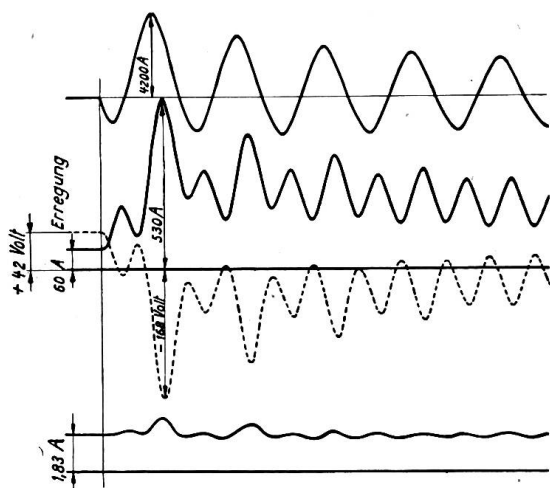


Fig. 17.

wicklung auftretende Spannung, trotz des raschen Anstieges des Erregerstromes z. T. bis über den 10fachen Wert, nicht sehr bedeutend und in keiner Weise gefährlich für die Isolation der Erregerwicklung. In Fig. 17 ist das Oszillogramm, welches den Verlauf dieser Spannung angibt, enthalten; das gleiche Oszillogramm gibt auch den Nebenschlussstrom des so beeinflussten Erregers wieder. Infolge der hohen Selbstinduktion dieses Stromkreises vermag jener Nebenschlussstrom nur sehr unvollkommen den raschen Spannungsänderungen zu folgen.

Aus diesen Gründen sind auch alle Kunstschaltungen am Erreger, welche den Zweck haben sollen, den plötzlichen Kurzschluss zu reduzieren, illusorisch, sie vermögen wohl vielleicht ein etwas rascheres Ab-

klingen der Kurzschlussströme zu bewirken, nie aber den ersten Stromstoss, der ja die grösste Gefahr in sich birgt, zu beeinflussen.

Von Interesse war es auch, den Einfluss des plötzlichen Kurzschlusses auf den Verlauf des magnetischen Feldes am Statorumfang kennen zu lernen. Oszillogramm

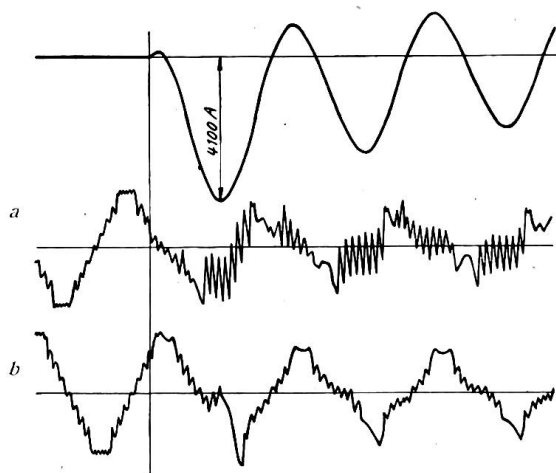


Fig. 18.

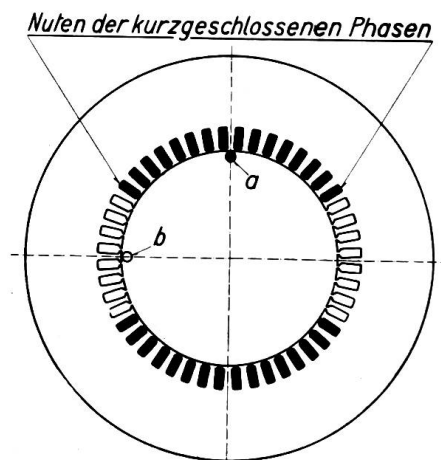


Fig. 19.

Fig. 18 gibt uns darüber Aufschluss. Darin ist unter dem Kurzschlussstrom die Kurve *a* das Feld senkrecht zur Achse der beiden kurzgeschlossenen Phasen (ent-

sprechend Fig. 19), und Kurve *b* das Feld in der Achse derselben. Besonders stark wird das Feld natürlich da verzerrt, wo auf dem Umfange die kurzgeschlossenen Statorstäbe liegen. Fig. 20 gibt die entsprechenden Feldformen bei stationärem Kurzschluss und ca. 200 A wieder. Wenn auch bei plötzlichem Kurzschluss die Form der Felder schon in den ersten Perioden nach dem Kurzschluss deutlich die Form derselben bei stationärem Kurzschluss erkennen lässt, so klingt die Grösse der Felder nur sehr langsam ab. Dies ist auch nicht anders zu erwarten, da ja nur durch das Bestehen des fast vollen Feldes nach Kurzschluss die enormen Bremsleistungen zu erklären sind, freilich sind diese Felder nun fast in reine Streufelder umgewandelt, da ja nach dem Kurzschluss nach aussen keine Spannung mehr vorhanden ist.

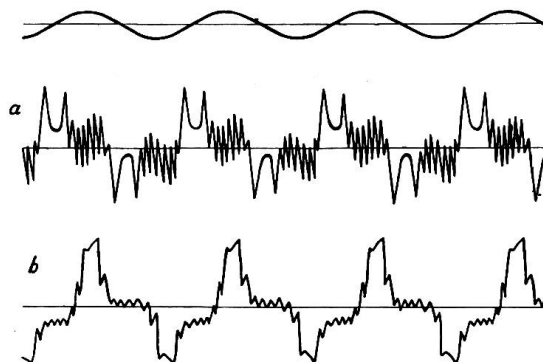


Fig. 20.

Die bisherigen Betrachtungen galten ausschliesslich dem einphasigen Kurzschluss, der ja auch bei Dreiphasengeneratoren die Regel ist. Ich möchte nun noch kurz den gleichzeitigen dreiphasigen Kurzschluss streifen. Da ist vor allem zu beachten, dass infolge Wegfalles des gegenläufigen Drehfeldes der Erregerstrom nicht mehr die doppelte Frequenz aufweist. Wie wir früher gesehen haben, schwankte die Drehzahländerung in Phase mit den Schwankungen des Erregerstromes, zeigte also bei einphasigem Kurzschluss ebenfalls doppelte Frequenz, es ist also nun bei dreiphasigem Kurzschluss zu erwarten, dass die Form der Drehzahlkurve diese doppelte Frequenz nun auch nicht mehr aufweisen wird. Ferner wird bei drei-

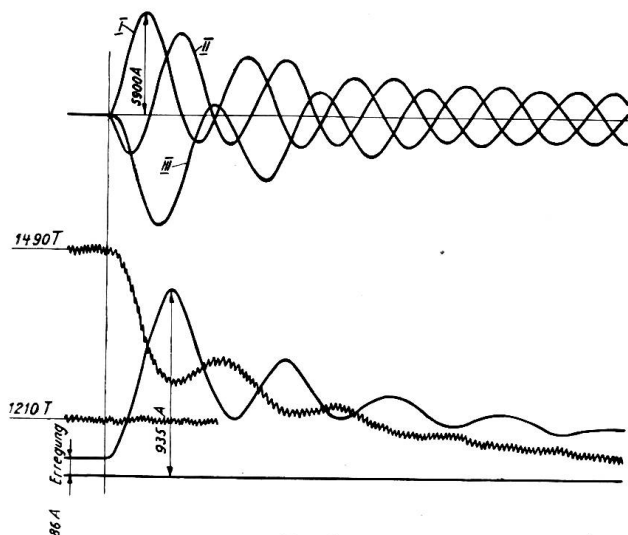


Fig. 21.

phasigem Kurzschluss der Unterschied für die verschiedenen Schaltmomente nicht mehr hervortreten, weil schon nach $\frac{1}{6}$ Periode sich genau die gleichen Schaltmomente wiederholen und in jeder Lage des Rotorfeldes gleichviele Statorwindungen mit demselben verkettet sind. Fig. 21 stellt das Oszillogramm eines solchen dreiphasigen Kurzschlusses dar. Oben sind die drei Ströme aufgezeichnet; wie bei stationärem Zustand ist auch hier natürlich die Bedingung erfüllt, dass in jedem Moment die Summe der drei Ströme gleich Null ist. Der Kurzschluss ist ziemlich genau im ungünstigsten Moment für Phase III eingetreten. Darunter sind Erregerstrom und die Kurve der Drehzahländerung eingetragen;

wie zu erwarten war, ist aus beiden die doppelte Frequenz verschwunden. Der Erregerstrom weist nur noch die Grundfrequenz auf, hervorgerufen durch das Gleichstromfeld in den Statorphasen (hauptsächlich von Phase I und III). Sobald dieses Feld verschwindet (am Ende des Oszillogramms), und der Kurzschluss mit Bezug auf die 3 Phasen ein symmetrischer wird, hören auch die Pulsationen des Erregerstromes nach und nach auf. In gleicher Weise wie bei einphasigem Kurzschluss verläuft die Linie der Drehzahländerung in Phase mit den Pulsationen des Erregerstromes und zwar wird auch wieder beim Ansteigen des Erregerstromes dem Rotor Energie (aus seiner Schwungmasse) entzogen, derselbe also gebremst und beim Sinken ein Teil dieser Energie wieder an den Rotor zurückgegeben, derselbe also beschleunigt. Diese

Pendelungen finden aber nur mit der einfachen Frequenz statt (wie ja auch diejenigen des Erregerstromes) und sind wie das der Statorwicklung anhaftende Gleichstromfeld rasch abgedämpft. Der Maximalwert der Bremsleistung ist wesentlich kleiner als bei einphasigem Kurzschluss unter gleicher Erregung. Immerhin sind auch hier die Leistungen noch ganz gewaltige im Verhältnis zur Leistung des Generatoren. Im vorliegenden Falle berechnet sich die maximale Bremsleistung zu 21 500 kW, bei einer maximalen Drehzahländerung von 290 in der ersten Halbperiode nach plötzlichem Kurzschluss.

Die bei stationärem Kurzschluss auftretenden Verluste haben mit den bei plötzlichem Kurzschluss beobachteten maximalen Bremsleistungen nichts zu tun, besonders nicht bei einseitigem Einphasenkurzschluss und bei Drehstromkurzschluss, wo durch das Auftreten eines Gleichstromfeldes im Stator ganz andere Verhältnisse geschaffen werden.

Den Hauptbetrag der Bremsleistung im ersten Moment nach plötzlichem Kurzschluss liefert in beiden Fällen eben dieses Gleichstromfeld im Stator, welches im Rotor einen Wechselstrom mit Grundfrequenz induziert. Darüber lagert sich bei einphasigem Kurzschluss noch ein Strom doppelter Frequenz, herrührend vom inversen Drehfeld des Stators. Das Pendeln der Energie zwischen Rotor und Stator folgt genau diesem Rotorwechselstrom. Da bei Einphasenkurzschluss diese Pendelungen doppelte Frequenz haben, so erfolgen hier die Drehzahländerungen viel rascher, wie dies aus Vergleich der Oszillogramme Fig. 9 und 21 zu erkennen ist. Daraus erklärt sich auch ohne weiteres die bedeutend höhere maximale Bremsleistung bei einseitigem Einphasenkurzschluss gegenüber Drehstromkurzschluss. Unter sonst gleichen Verhältnissen wird die maximale Bremsleistung in der ersten Halbperiode nach plötzlichem Kurzschluss bei einseitigem Einphasenkurzschluss ca. 50 % höher liegen als bei Drehstromkurzschluss.

Als weiterer Betrag für die Bremsleistung kommen noch hinzu die in Stator und Rotor auftretenden Verluste, welcher Betrag aber erst nach Abklingen der Unsymmetrien in der Tourenabfalllinie deutlich zum Ausdruck kommt.

Viel einfacher ist der Verlauf der ganzen Erscheinung bei symmetrischem Einphasenkurzschluss; hier fällt das Gleichstromglied im Stator gänzlich weg und die Drehzahländerung wird bestimmt einerseits durch das inverse Drehfeld des Stators, welches jenen im gleichen Takt, wie den Erregerstrom mit doppelter Frequenz pulsieren lässt, anderseits durch die Verluste. Für diesen Fall kann die *mittlere* Bremsleistung als abhängig betrachtet werden von den Kurzschlussverlusten, die

sich hier ohne grossen Fehler aus den Verlusten bei stationärem Kurzschluss ableiten lassen, unter Berücksichtigung der noch im Rotor induzierten Erregungsenergie.

Zur besseren Uebersicht über die Verhältnisse bei plötzlichem Kurzschluss namentlich betr. Erregung und Drehzahländerung sind im Folgenden noch 3 Oszillogramme wiedergegeben, welche bei gleicher Erregung einphasigen und dreiphasigen Kurzschluss darstellen, erstreckt über eine grössere Anzahl Perioden. Fig. 22 zeigt einen einphasigen Kurzschluss im ungünstigsten Moment, Fig. 23 einen solchen im günstigsten Moment. Ferner gibt Fig. 24 einen

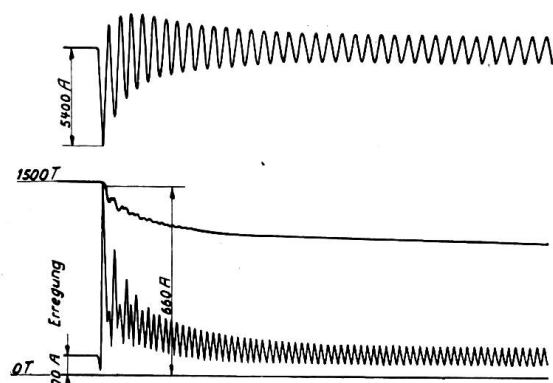


Fig. 22.

dreiphasigen plötzlichen Kurzschluss wieder. Der Unterschied in den Drehzahländerungen geht aus diesen Oszillogrammen besonders deutlich hervor.

Zum Schluss sei mir noch gestattet, Herrn Ing. A. Schnetzler, der die Versuche in der Maschinenfabrik Oerlikon nach meinen Anordnungen in vorbildlicher Weise

durchgeführt hat, meinen Dank abzustatten. Herr Schnetzer hat mit Geduld und Verständnis die vielen Schwierigkeiten bei den Versuchen überwunden und dadurch

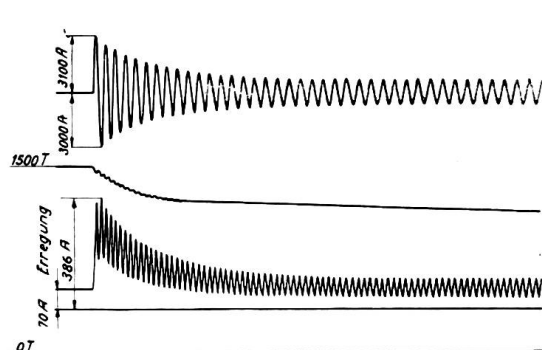


Fig. 23.

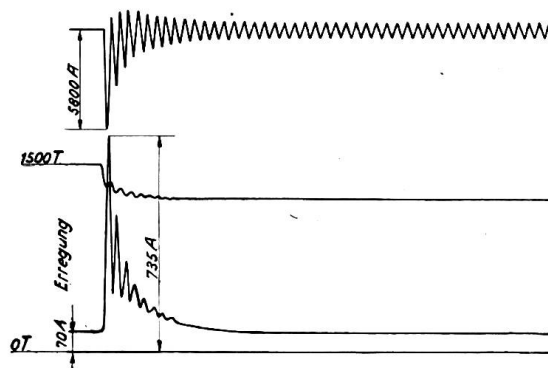


Fig. 24.

viel zum Gelingen der ganzen Untersuchung beigetragen; er hat auch die Auswertung der Oszillogramme und Versuchsergebnisse durchgeführt.

Wirtschaftliche Mitteilungen. — Communications de nature économique.

Auszug aus dem Bericht des Bundesrates an die Bundesversammlung über das Postulat Grimm betreffend die schweizerische Elektrizitätswirtschaft. (Vom 27. März 1925.)

„Das Postulat Grimm, datiert vom 26. Sept. 1923, hat folgenden Wortlaut:

Der Bundesrat wird eingeladen, zu prüfen und beförderlichst zu berichten:

1. ob die Praxis der Erteilung von Exportbewilligungen für elektrische Energie nicht in dem Sinne zu ändern sei, dass inskünftig Exportbewilligungen nur noch erteilt werden, wenn die betreffende Energiemenge vorher zum Exportpreis dem Inlandkonsum offeriert worden ist;

2. ob nicht der Energieaustausch im Inland durch das Sammelschienensystem von Bundeswegen zu ordnen sei.

Der Vorsteher des Departements des Innern hat am 4. Oktober 1923 das Postulat Grimm entgegengenommen. Der Nationalrat sprach sich, nach erfolgtem Antrag auf Ablehnung aus dem Schoosse des Rates, ebenfalls für Annahme des Postulates aus. Wir beehren uns Ihnen nachstehend unsern Bericht zu unterbreiten. Dabei erachten wir es als angezeigt, in diesem Zusammenhang auf das Problem der Wasser- und Elektrizitätswirtschaft im allgemeinen einzutreten. Zufolge der Ausdehnung unserer Untersuchungen und da wir glaubten, dass es zweckmässig sei, im Zusammenhang mit diesen Untersuchungen die dringlich gewordene Revision der Ausfuhrverordnung vorzunehmen, erklärt sich die Verzögerung in der Vorlage unseres Berichtes. Die Angelegenheit hat inzwischen keineswegs an Bedeutung verloren.

Die schweizerische Wasser- und Elektrizitätswirtschaft besteht aus drei grossen Gebieten, die eng ineinandergreifen, die jedoch für die Prüfung der verschiedenen Fragen zunächst zweckmässig auseinandergehalten werden. Es sind:

- A. Die Erzeugung elektrischer Energie (Ausbau der Wasserkräfte).
- B. Die Ausfuhr elektrischer Energie.
- C. Die Fortleitung und Abgabe der elektrischen Energie im Inland.

Obwohl vor den Forderungen der Inlandversorgung die Ausfuhr elektrischer Energie zurücktreten muss, stellen wir doch in unserem Bericht den Abschnitt über die Ausfuhr voran, um die Inlandversorgung als abschliessendes Ganzes behandeln zu können.

A. Die Erzeugung elektrischer Energie (Ausbau der Wasserkräfte).

I.

Gesetzliche Grundlagen; Wahrung der kaufmännischen Gesichtspunkte; Verteilung der Kompetenzen auf Bund und Kantone.

1. Der Regelung des Ausbaues der Wasserkräfte diene in erster Linie Art. 24^{bis} der Bundesverfassung (angenommen in der Volksabstimmung vom 25. Oktober 1908). Gestützt auf diesen Artikel, sowie auf Art. 23 der Bundesverfassung wurde das Bundesgesetz über die Nutzbarmachung der Wasserkräfte vom 22. Dezember 1916 (Wasserrechtsgesetz) erlassen. Das Wasserrechtsgesetz trat am 1. Januar 1918 in Kraft. Dadurch wurde das Wasserrecht auf eidgenössischem Boden so weit geregelt, als dies die konstitutionellen Verhältnisse unseres Landes als angezeigt erscheinen liessen. Dass die Anschauungen auf einem Gebiete, das für die allgemeinen Interessen so grosse Bedeutung hat, schon anlässlich der Beratungen