

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 60 (1969)  
**Heft:** 24

**Artikel:** Getreppte zweigängige Schleifenwicklungen und andere Massnahmen zur Steigerung der Ausnutzung von Gleichstrommaschinen  
**Autor:** Wark, K.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-916198>

### **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:** 16.01.2026

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

# BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV)  
und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

## Getreppte zweigängige Schleifenwicklungen und andere Massnahmen zur Steigerung der Ausnutzung von Gleichstrommaschinen

Von K. Wark, Bremen

188 - 190

621.313.2:621.3.045.22

In einer früheren Arbeit wurde bereits vom Verfasser über zweckmässige Treppenwicklungen und andere Massnahmen zur Steigerung der Ausnutzung von Gleichstrommaschinen mit eingängigen Schleifenwicklungen berichtet [1]<sup>1)</sup>. Diese Arbeit berücksichtigt besondere Probleme bei Gleichstrommaschinen mit zweigängigen Schleifenwicklungen, deren Beachtung neben einer zweckmässigen Treppenwicklung für einen einwandfreien Betrieb dieser Maschinen von grundsätzlicher Bedeutung ist.

### 1. Spannungsoberwellen zwischen benachbarten Lamellen bei zweigängigen Schleifenwicklungen

Bekanntlich ergibt sich aus der Essonschen Leistungsgleichung und aus der Gleichung für die Segmentspannung, dass die Grenzleistung von Gleichstrommaschinen mit Hilfe der zweigängigen Schleifenwicklung mit Ausgleichsverbinder 1. und 2. Art gesteigert werden kann, sofern die Segmentspannung das Kriterium darstellt.

Bestimmt die Stromwendespannung die Grenzleistung, dann ergibt sich ebenfalls aus der Essonschen Leistungsgleichung bei Einführung der Gleichung für die Reaktanzspannung, dass durch die zweigängige Schleifenwicklung eine Steigerung der Grenzleistung möglich ist, wenn eine Wicklung mit voller Anzahl Ausgleichsverbinder 3. Art gewählt wurde. Die Gesetze und Ableitungen sind aus der Literatur bekannt [2; 3; 4; 5], weshalb sie nicht wiederholt zu werden brauchen. Diese Möglichkeiten der Grenzleistungssteigerung werden durch das Auftreten von Spannungsoberwellen in der Lamellenspannung in Polmitte und Pollücke sowie durch Kommutierungsvorgänge, insbesondere bei Kontaktstörungen eingeschränkt, was weniger bekannt ist.

Um die Lamellenspannung einer Gleichstrommaschine zu bestimmen, muss man von einer Lamelle ausgehend einen bestimmten Wicklungsabschnitt oder Ausgleichsverbinder durchlaufen, um zur benachbarten Lamelle zu gelangen. Durch Addition der in den durchlaufenen Ankerleitern induzierten EMK erhält man die Lamellenspannung  $e_{L, 1-2}$ .

Bei der eingängigen Schleifenwicklung werden nur zwei Ankerleiter — also eine Spule — durchlaufen, um von einer

Lamelle zur benachbarten zu gelangen. Um bei der zweigängigen Schleifenwicklung mit ungeradem Ausgleichsverbinderschritt von der Lamelle 1 zur Nachbarlamelle zu kommen, muss man die Spulen 1, 3, 5 . . . durchlaufen, um die Lamelle  $k/p+2$  ( $k$  = Kollektorlamellenzahl,  $p$  = Polpaarzahl) zu erreichen, die mit der Lamelle 2 durch einen Ausgleichsleiter verbunden ist. Führt man nun die Addition der in den durchlaufenen Ankerleitern induzierten EMK durch, dann sieht man, dass die in den Ankerleitern erzeugten Spannungen zum Teil gegeneinander gerichtet sind, so dass zwischen Lamelle 1 und 2 letztlich nur die in einem Ankerleiter von der Grundwelle induzierte EMK ansteht. Die Nutoberwellen des Erregerfeldes induzieren jedoch ebenfalls in jedem Ankerleiter eine Oberwellenspannung, deren Summe bei einem Durchlauf von Lamelle 1 zur Lamelle 2 einen beachtlichen Wert annehmen kann, so dass mit stark ausgeprägten Oberwellen in der Lamellenspannung gerechnet werden muss.

Spannungsoberwellen in der Polmitte erhöhen die maximale Lamellenspannung und erhöhen die Rundfeuergefahr. Spannungsoberwellen in der Pollücke beeinträchtigen die Kommutierung.

Die Spannungsoberwellen sind bei voll kompensiertem Ankerfeld nur von der Form des Erregerfeldes und der Ankernutteilung abhängig. Besonders ausgeprägt sind sie bei zweigängigen Schleifenwicklungen mit ungeradem Ausgleichsverbinderschritt. Bei geradem Ausgleichsverbinderschritt sind die Oberwellen nur unbedeutend.

Durch entsprechende Formgebung des Erregerfeldes können Spannungsoberwellen in Polmitte und Pollücke vermieden werden. Bei einem Feldanstieg über zwei Nutteilungen treten kaum Oberwellen auf. Es ist schwierig, besonders im Hinblick auf gute Ausnutzung, einen Feldanstieg über zwei Nutteilungen zu verwirklichen, weshalb zweckmässig eine feine Nutteilung zu wählen ist. (Im Hinblick auf geringe Reaktanzspannung ist jedoch eine feine Nutteilung ungünstig.)

In vielen Fällen wird somit der Feldanstieg über weniger als zwei Nutteilungen gehen. Durch Wahl bestimmter Verhältnisse, Polbedeckung bzw. Pollückenbedeckung zur Nut-

<sup>1)</sup> Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

teilung, können Spannungsoberwellen jedoch ebenfalls vermieden oder klein gehalten werden.

Ist das Verhältnis Polbedeckung zur Nutteilung eine gerade Zahl, dann ist die Spannungsoberwelle in der Hauptpollücke gleich Null. Wenn das Verhältnis der Pollückenbedeckung zur Nutteilung eine ungerade Zahl ist, dann tritt in der Polmitte keine Spannungsoberwelle auf.

Da die unsymmetrische zweigängige Schleifenwicklung ein Verhältnis Polteilung zur Nutteilung = ganze Zahl + 0,5 erfordert, sind vollkommen ideale Verhältnisse nicht zu verwirklichen. Man strebt aber grundsätzlich Verhältnisse an, die nicht zu sehr von den vorgenannten Werten abweichen. Besonders im Hinblick auf die Überschlagsgefahr durch zu hohe Lamellenspannung ist unbedingt auf möglichst geringe Spannungsoberwellen in der Polmitte zu achten und eine Pollückenbedeckung zu wählen, die nicht zu sehr von einer ungeraden Zahl abweicht.

Die Oberwellenspannung in der Pollücke verursacht bei aufgesetzten Bürsten einen Oberwellenstrom. Dieser hängt linear von dem Quotienten Luftinduktion/Strombelag ab. Er wächst mit zunehmendem  $u$  ( $u$  = Anzahl der Spulenseiten nebeneinander pro Nut). Es ist daher richtig, besonders bei zweigängigen Schleifenwicklungen mit ungeradem Ausgleichsverbinderschritt, auf ein kleines  $u$  zu achten, also zweckmässig  $u = 3$  zu wählen.

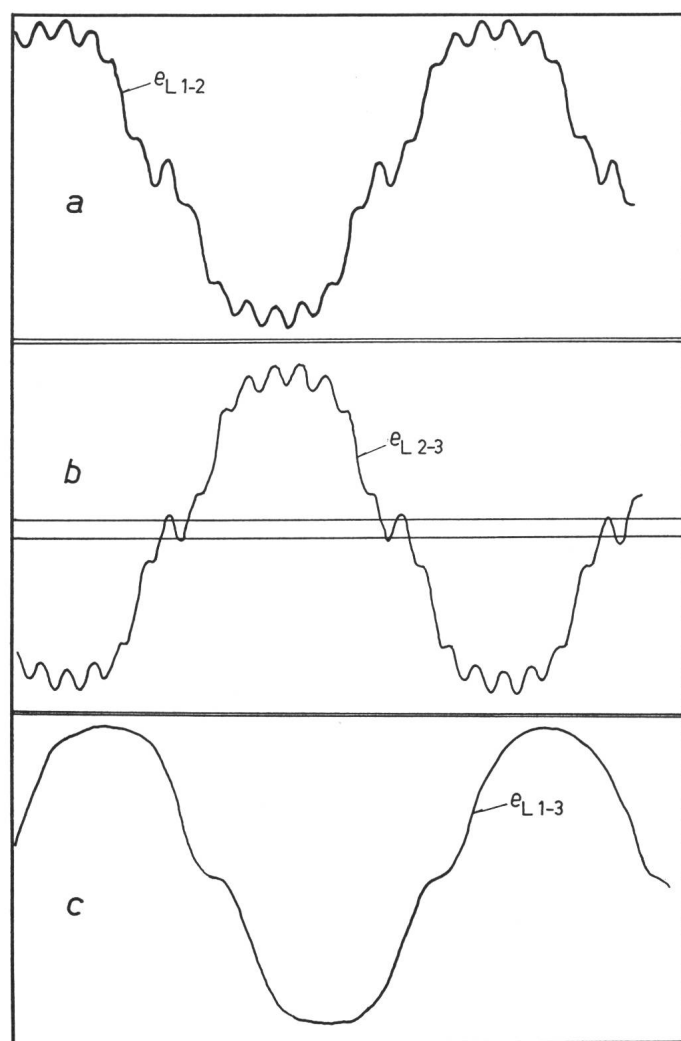


Fig. 1

Oszillogramme von Lamellenspannungen ohne aufgesetzte Bürsten

a Lamellenspannung  $e_{L\ 1-2}$ ; b Lamellenspannung  $e_{L\ 2-3}$ ; c Lamellenspannung  $e_{L\ 1-3}$

Die Oberwellen in der Lamellenspannung in Polmitte werden durch die bei aufgesetzten Bürsten fließenden Oberwellenströme beeinflusst. Hierdurch kann die Oberwelle in der Lamellenspannung in Polmitte sowohl erhöht als auch vermindert werden. Bei der Auslegung der Wicklung ist somit darauf zu achten, dass eine Schwächung der Spannungsoberwellen in der Polmitte erfolgt und keinesfalls eine Verstärkung. Erst bei Beachtung dieser Gesetze kann die mögliche Grenzleistungssteigerung durch Einführung der zweigängigen Schleifenwicklung mit ungeradem Ausgleichsverbinderschritt voll ausgeschöpft werden.

Fig. 1a zeigt die oszillographierte Lamellenspannung zwischen den Lamellen 1 und 2, Fig. 1b die Lamellenspannung zwischen den Lamellen 2 und 3 und Fig. 1c die Lamellenspannung zwischen den Lamellen 1 und 3 ohne auf den Kommutator aufgesetzte Bürsten. Es handelt sich hier um eine Maschine, bei der zur Unterdrückung von Nutoberwellen die vorstehend geschilderten Massnahmen weitgehend berücksichtigt wurden. Entsprechend klein fallen die Oberwellen aus.

In Fig. 2a und 2b werden die gleichen Oszillogramme gezeigt, jedoch mit aufgesetzten Bürsten. Da die Oberwellenspannung in der Pollücke bereits sehr klein gehalten wurde, erfolgt durch die aufgesetzten Bürsten nur eine geringe Dämpfung der Spannungsoberwellen in der Pollücke und auch nur eine geringe Verminderung der Spannungsoberwellen in der Polmitte durch den bei aufgesetzten Bürsten fließenden Oberwellenstrom. Der Einfluss ist jedoch noch gut zu erkennen.

## 2. Kontaktstörungen und Zebrastrifenbildung

Bei der eingängigen Schleifenwicklung behalten die Wicklungszweige, die durch Kontaktstörungen an einer Lamelle betroffen werden, zumindest über eine Lamelle Kontakt mit der Bürste, wobei natürlich Ausgleichsverbinder das Störniveau senken, indem sie die Fehlströme zu anderen gleichpoligen Bürsten ableiten. Bei der zweigängigen Schleifenwicklung wird jedoch bei Kontaktstörungen an einer Lamelle der Strom erst über viele Windungen oder Ausgleichsleiter geführt, bis er von der folgenden Lamelle oder von den anderen gleichpoligen Bürsten übernommen wird. Kontaktstörungen wirken sich demnach bei Maschinen mit der zweigängigen Schleifenwicklung erheblich schwerwiegender aus als bei Maschinen mit der eingängigen Schleifenwicklung, da die Verkopplung über viele Windungen die Abschaltspannung erheblich erhöht. Gerade bei diesen Wicklungen ist daher auf einen guten Kontakt zwischen Kohlebürste und Kommutator zu achten. Nicht immer hat sich die am besten kommutierende Kohle als zweckmässig erwiesen, sondern Kohlebürsten mit guten Kontakteigenschaften brachten die besten Betriebsergebnisse.

Tandemhalter mit einzeln geführten Druckfingern und Zwillingskohlen in den einzelnen Taschen sind ebenfalls ein gutes Mittel, ein Maximum an Kontaktpunkten zu erhalten, ebenfalls eine grosse Lamellenüberdeckung durch zweckmässig gestaffelte Kohlebürsten, wobei natürlich eine entsprechend grosse Stromwendezone in der Auslegung und Bemessung berücksichtigt werden muss.

Von grosser Bedeutung ist weiterhin die induktionsarme Verlegung der Ausgleichsverbinder, um die Fehlströme zu

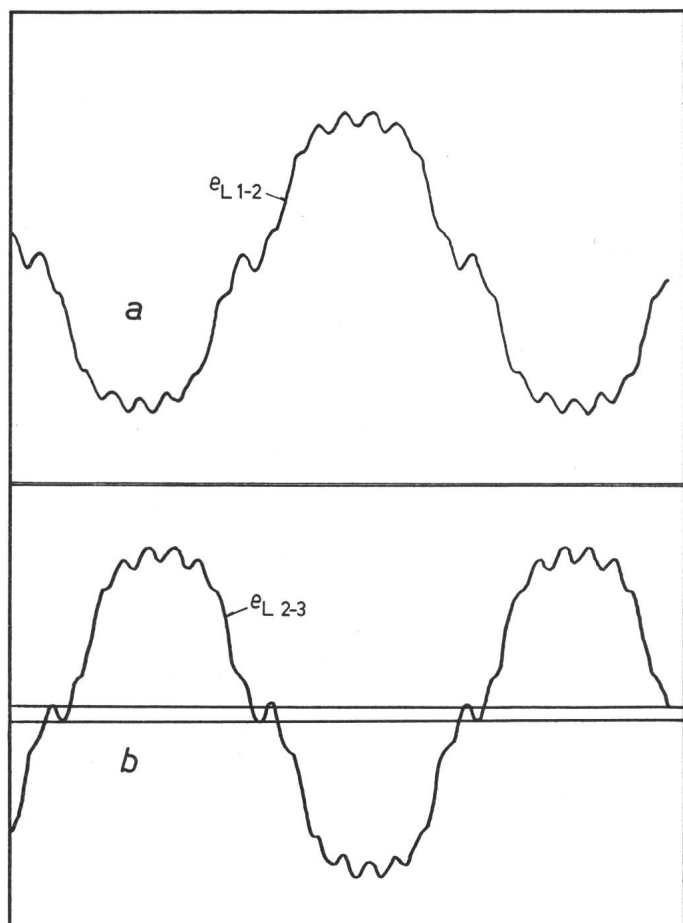


Fig. 2

Oszillogramme von Lamellenspannungen mit aufgesetzten Bürsten  
a Lamellenspannung  $e_{L 1-2}$ ; b Lamellenspannung  $e_{L 2-3}$

den ungestörten Bürstensätzen abzuleiten und ebenfalls auf die günstigste Treppung, um eine möglichst grosse induktive Dämpfung der Unterbrechungsinduktanz der jeweils in Kommutierung befindlichen Ankerstäbe durch gleichzeitig über die Bürsten kurzgeschlossenen Windungen zu erreichen.

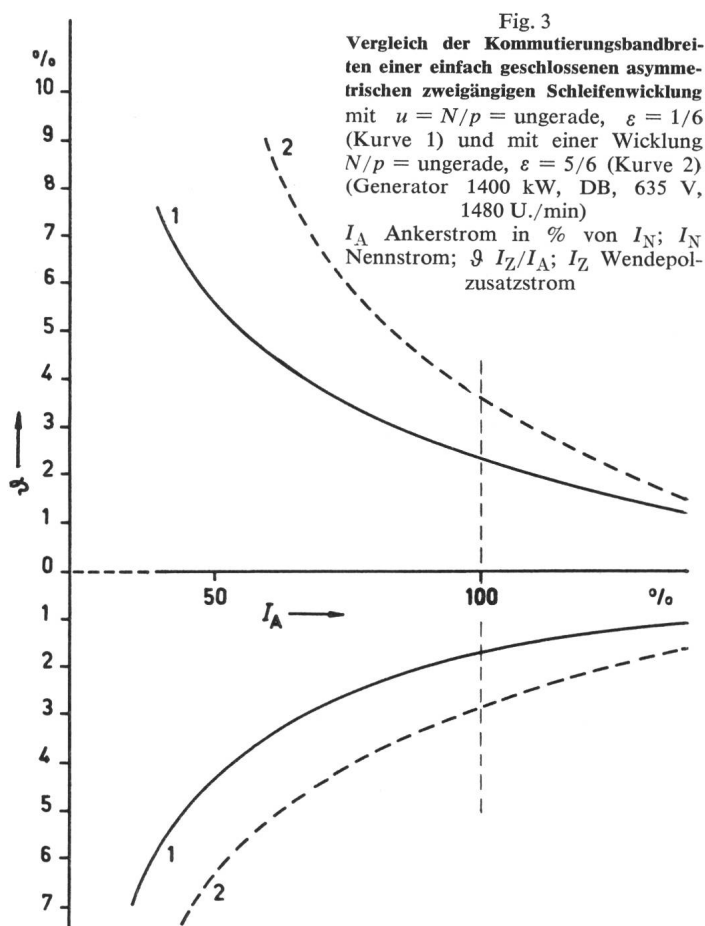
Fig. 3 zeigt die Kommutierungsbandbreiten einer Maschine, 1400 kW, 1480 U./min, mit unsymmetrischer einfach geschlossener Schleifenwicklung mit  $\varepsilon = 5/6$  und  $\varepsilon = 1/6$ . Ebenso wie bei Maschinen mit der eingängigen Schleifenwicklung zeigt sich auch hier, dass die Bandbreite der funkenfreien Stromwendung bei  $\varepsilon = 5/6$  erheblich günstiger liegt als bei  $\varepsilon = 1/6$ .

Die Auswirkungen einer mechanischen Störung zeigen sich zuerst durch Verfärbungen an der gestörten Lamelle. Ausgleichsverbinder mit möglichst geringer Impedanz senken das Störniveau, indem sie Fehlströme zu den ungestörten gleichpoligen Bürsten leiten. Hierdurch werden einige Lamellen eines Ganges stärker belastet als die übrigen. Bei entsprechender Höhe der Störung tritt eine Verfärbung dieser Lamellen auf. Diese «Teilzebrastreifenbildung», jeweils in Entfernung doppelter Polteilung, setzt sich auf benachbarte Lamellen des gleichen Ganges fort. Eine Betriebsstörung braucht aber damit noch nicht verbunden zu sein. Wird jedoch durch die Färbung der Reibungskoeffizient so verändert, dass Bürstenvibrationen auftreten, oder tritt ein Rauwerden der Lamellen auf (meistens an der ablaufenden Kante beginnend), dann muss mit schweren Betriebsstörungen gerechnet werden. Die Bürsten beginnen zu feuern. Hierdurch treten an den anodischen Bürsten in doppelter Lamel-

lenteilung Brandstreifen («Bürstenzebrastreifen») auf, und ebenfalls zeigt sich nunmehr am Kommutator eine umlaufende Zebrastreifenbildung. Ein weiterer Betrieb wird unmöglich, weil an allen anodischen Bürsten der Kontakt gestört wird und abwechselnd der eine und der andere Gang abschaltet. Ist die Störung so weit fortgeschritten, dann kann selbst im Leerlauf noch Bürstenfeuer auftreten, sofern Oberwellenströme durch Spannungsüberwellen in der Lamellenspannung vorhanden sind. Dies ist auch der Grund, weshalb früher manchmal vermutet wurde, dass die Spannungsüberwellen in der Lamellenspannung — also die Form des Haupterregerefeldes — die Ursache der Zebrastreifenbildung ist.

Durch die Anwendung der zweigängigen Schleifenwicklung mit Ausgleichsverbindern 3. Art (Pungaverbinder) kann die Neigung zur Zebrastreifenbildung erheblich vermindert werden. Die Fehlströme werden nicht nur von den Ausgleichsverbindern 1. Art zu den ungestörten Bürstensätzen abgeleitet, sondern auch über die Bürsten, Ankerstab, Pungaverbinder zur Nachbarlamelle. Die Fehlströme teilen sich entsprechend den Impedanzen auf die Ausgleichskreise auf, wodurch das Störniveau erheblich gesenkt wird. Gleichzeitig wird bekanntlich durch Ausgleichsverbinder 3. Art die Reaktanzspannung und damit die Restspannungen in den in Kommutierung befindlichen Spulen vermindert, so dass auch die Neigung zu Bürstenfeuer und Zebrastreifenbildung ebenfalls gemindert wird.

Sofern jedoch eine ungenügende Anzahl Pungaverbinder angeschlossen wird, z. B. weniger als an jeder 3. Lamelle, dann verursachen mechanische Störungen am Kommutator im gleichen Masse Zebrastreifen wie bei Wicklungen, die nur auf einer Ankerseite Ausgleichsverbinder besitzen. Es ist im-



mer zweckmässig, die volle Anzahl Pungaverbinder vorzusehen, zumindest ist jede zweite Lamelle anzuschliessen, zumal nie vorauszusehen ist, ob sich Kontaktstörungen über eine oder mehrere Lamellen erstrecken.

Damit die Ausgleichsverbinder 3. Art (Pungaverbinder) als Stromwendehilfe voll wirksam sind, müssen sie unter das Ankerblechpaket im feldfreien Raum bifilar durchgeführt werden. Zweckmässig führt man die Pungaverbinder gebündelt durch Messingrohre, deren Enden durch Kurzschlussringe verbunden sind.

Um eine gute bifilare Wirkung in der Durchführung unter dem Ankereisen zu erreichen, sind die jeweils um eine Polteilung auseinanderliegenden Pungaverbinder eng benachbart anzuordnen.

Die durch Kontaktstörungen sich in Pungaverbinder ausbildenden Ströme müssen als Summe Null ergeben, da sonst ein Ringfluss entsteht und hierdurch die Induktivität der Pungaverbinder gross würde. Wird diese Bedingung durch zu geringe Anzahl Pungaverbinder nicht erfüllt, dann geht die ausgleichende Wirkung bei mechanischen Störungen am Kommutator verloren [6].

Maschinenausführung früherer Jahre, denen dieser Mangel anhaftete, zeigten auch durchwegs Kommutierungsstörungen, sofern sie voll ausgefahren wurden. Es ist jedoch gerade in den letzten Jahren ein wesentlicher Fortschritt im Erkennen der Störungsursachen zu vermerken, so dass auch entsprechende Massnahmen ergriffen werden konnten zum Nutzen weiterer Grenzleistungssteigerungen oder zur weiteren Erhöhung der Betriebssicherheit.

### 3. Zusammenfassung

Die Grenzleistung von Gleichstrommaschinen kann durch die Anwendung von zweigängigen Schleifenwicklungen erhöht werden. Es wird gezeigt, dass durch Spannungsoberwellen in der Lamellenspannung in Polmitte und Polücke sowie durch Kommutierungsvorgänge, insbesondere bei Kontaktstörungen, Leistungssteigerungen nur eingeschränkt möglich sind. Über Massnahmen zur Verminderung der Auswirkung von Kontaktstörungen und Unterdrückung von Spannungsoberwellen in der Lamellenspannung — um mögliche Grenzleistungssteigerungen voll auszunutzen — wird berichtet. Besonders wird auf die Ausführung mit zweckmässigen Treppenwicklungen hingewiesen. Für die Anordnung der Treppenwicklungen gelten die gleichen Gesetze wie bei den Maschinen mit der eingängigen Schleifenwicklung.

#### Literatur

- [1] K. Wark: Zweckmässige Treppenwicklung und andere Massnahmen zur Steigerung der Ausnutzung von Gleichstrommaschinen. ETZ-A 90(1969)3, S. 64...68.
- [2] F. Punga: Zweifachparallelwicklung mit Äquipotentialverbindungen. E und M 29(1911)1, S. 6...8.
- [3] C. Trettin: Über die Grenzen grosser Gleichstrommaschinen. Siemens Z. 6(1926)11, S. 538...545.
- [4] R. Richter: Lehrbuch der Wicklungen elektrischer Maschinen. Karlsruhe, Braun, 1952.
- [5] H. Sequenz: Die Wicklungen elektrischer Maschinen. Bd. 2: Wenderwicklungen. Wien, Springer, 1952.
- [6] W. Kiefer: Theoretische und experimentelle Untersuchungen an Gleichstrommaschinen mit zweigängiger Schleifenwicklung. Dissertation, Technische Hochschule München, 1961.

#### Adresse des Autors:

K. Wark, Direktor, Loyd Dynamowerke GmbH, Hastedter Osterdeich, Bremen.

**Eine 60-kV-Hochspannungsanlage** aus England kann eine Leistung von 600 W abgeben. Sie ist gegen Netzspannungsschwankungen stabilisiert. Die Anlage wurde für Isotopenseparatoren entwickelt und dient ausserdem für die Speisung verschiedener Geräte der Kernforschung.

**Eine 6-GHz-Mikrowellenverbindung** in Brasilien hat 960 Nachrichtenkanäle und überbrückt eine Distanz von 1000 km zwischen den Städten Sao Paulo und Porto Alegre. Alle aktiven Elemente dieser Verbindung sind Festkörperbauteile. Weitere Verbindungen zwischen Sao Paulo und Rio de Janeiro, Belem und Brasilia und anderen Orten sind im Bau begriffen oder geplant.

**Ein internationales kernwissenschaftliches Dokumentations-system** wird von der IAEA (Internationale Atomenergie-Organisation) in Zusammenarbeit mit der Euratom geschaffen. Dies wurde bei der diesjährigen Generalkonferenz der IAEA in Wien bekanntgegeben. Weitere Themen dieser Konferenz bildeten der Einsatz der Kerntechnik für die Energiegewinnung, für die Landwirtschaft und die Industrie, für die Medizin und Meerwasserentsalzung.

**Eine Blitzröhre für Lasersysteme** wird in England für mittlere Belastungen in linearer Bauweise ausgeführt. Sie ist mit Xenon Krypton oder einem Gemisch von diesen beiden Gasen gefüllt. Lebensdauerversuche haben ergeben, dass die Röhre bei einer Eingangsenergie von 50 Joule/Blitz und bei einem Betrieb von 10 Blitzen/Sekunde mehr als  $10^6$  Blitze erzeugen kann.

**Die kanadischen Leistungsreaktoren** haben einen günstigen Brennstoffverbrauch. Sie werden mit natürlichem Uran betrieben, mit Schwerwasser als Moderator und Druckschwerwasser als Kühlmittel. Es werden auch Versuche mit siedendem schwerem oder normalem Wasser durchgeführt, wobei organische Stoffe als Kühlmittel verwendet werden.

**Ein Chiffriergerät** aus Grossbritannien für die Übertragung von Fernschreibsignalen kann automatisch von Klartext auf Chiffrierung umgeschaltet werden. Der Nachrichtenkopf und die Maschinenbefehle werden in Klartext übertragen. Für die geheime Übertragung eines Textes wird aber die Maschine automatisch auf Chiffrierung umgeschaltet.