

**Zeitschrift:** Bulletin de l'Association suisse des électriciens  
**Herausgeber:** Association suisse des électriciens  
**Band:** 4 (1913)  
**Heft:** 7

**Artikel:** Über regulierbare Drehstrommotoren  
**Autor:** Knöpfli, O.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1056793>

### **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:** 18.01.2025

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

# SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

# BULLETIN

## ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

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

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

Generalsekretariat

des Schweiz. Elektrotechnischen Vereins,  
Neumühlequai 12, Zürich 1 - Telefon 9571

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

Verlag: Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei  
A.-G., Zürich

Bahnhofstrasse 61, Zürich I (Telephon 6741)

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

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

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

Secrétariat général

de l'Association Suisse des Electriciens,  
Neumühlequai 12, Zurich 1 - Téléphone 9571

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

l'éditeur: Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei  
S.-A., Zurich

Bahnhofstrasse 61, Zurich I (Téléphone 6741)

IV. Jahrgang  
IV<sup>e</sup> Année

Bulletin No. 7

Juli  
Juillet 1913

### Ueber regulierbare Drehstrommotoren.

Von O. Knöpfli, Ingenieur der Maschinenfabrik Oerlikon.

Noch vor wenigen Jahren hatte man, wenn eine mit verschiedenen Tourenzahlen umlaufende Arbeitsmaschine mit einem Drehstrommotor angetrieben werden sollte, nur die Wahl zwischen zwei auf dem Markt erhältlichen Motortypen. Der eine dieser Motortypen ist der gewöhnliche Asynchron-Drehstrommotor mit Regelung der Tourenzahl durch Schlupf-widerstände, der andere der polumschaltbare Asynchronmotor, Heute ist man in der Lage neben den beiden genannten Motortypen auch die Verwendung eines Drehstromkommutator-motors mit Reihen- oder Nebenschlusscharakteristik in Erwägung zu ziehen, denn diese beiden Motoren sind, wie bekannt, in ihrer Tourenzahl ebenfalls regulierbar.

Die folgenden Ausführungen haben nun den Zweck die vier regulierbaren Drehstrom-motoren mit einander zu vergleichen und zu untersuchen, welche besonderen Vorteile sich für den Antrieb von Arbeitsmaschinen bei Verwendung von Kommutatormotoren ergeben. Ferner, ob diese vier Motoren den Bedürfnissen der Praxis nun allseitig entsprechen.

Es mögen vorerst kurz die charakteristischen Eigenschaften der genannten Motoren hauptsächlich bezüglich Tourenregelung, Leistungsfaktor und Nutzeffekt unter der Voraus-setzung, dass die Netzspannung und Periodenzahl konstant bleiben soll und abgesehen von Kaskadenschaltungen, besprochen werden.

#### Der Asynchronmotor.

Eine Aenderung der Umlaufzahl ist bei dem mit Phasenanker versehenen Asynchron-motor nur durch Vergrößerung der Schlüpfung möglich. Durch eine weitgehende Unter-teilung des Schlupf-widerstandes kann man vom Stillstand bis in die Nähe der Synchronen-Geschwindigkeit eine beinahe kontinuierliche Tourenregelung erreichen. Da eine Vergrösse-rung der Schlüpfung eine Erhöhung der Rotorverluste bedeutet, so wird der Wirkungsgrad eines durch Schlupf-widerstände geregelten Asynchronmotors um so geringer, je mehr die gewünschte Tourenzahl von der Synchronen-Geschwindigkeit abweicht. Mit andern Worten: Der Wirkungsgrad sinkt ungefähr im Verhältnis der gewünschten Tourenzahl zur synchronen

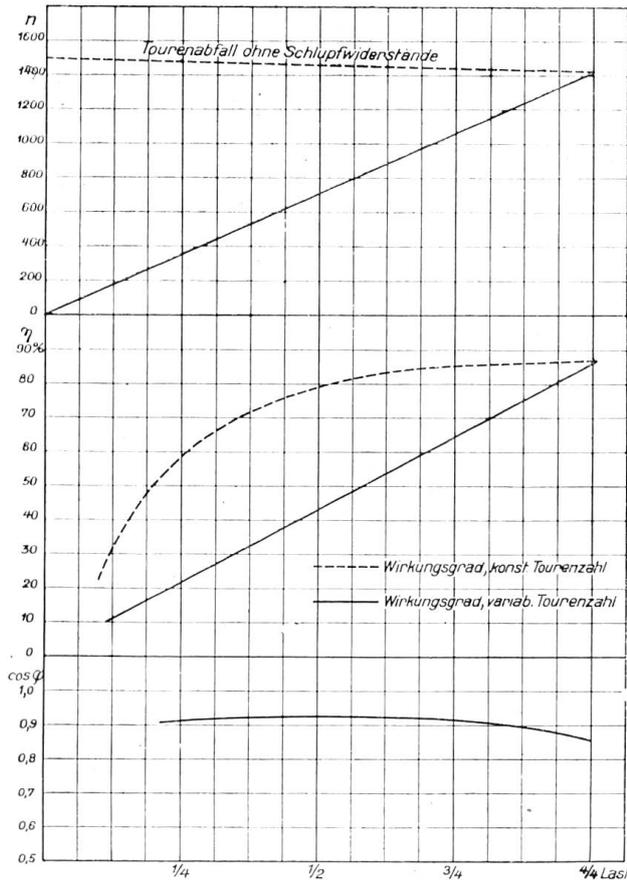


Fig. 1. Drehstrom-Asynchronmotor mit Schlupfregelung.

keitsstufen beliebig gross gewählt werden kann ist dieselbe beim polumschaltbaren Motor oder Stufenmotor beschränkt. Gebräuchlich sind 2, 4, 5 oder 6 Tourenstufen.

Die Tourencharakteristik ist auf den verschiedenen Tourenstufen die eines Nebenschlussmotors und beträgt der Tourenabfall zwischen Leerlauf und voller Belastung nur wenige Prozent. Der Wirkungsgrad und Leistungsfaktor dieser Motoren ist auf allen Tourenstufen befriedigend, jedenfalls sind dieselben nicht wesentlich verschieden von den entsprechenden Werten eines Asynchronmotors mit nur einer Polzahl, selbstverständlich bezogen auf die gleiche Polzahl und gleiche Leistung. (Siehe Fig. 2). Die Regelung der Tourenzahl erfolgt sprungweise und wie die Benennung der Motoren besagt durch Verändern der Polzahl mittelst eines als Polumschalter bezeichneten Kontaktapparates. Bei zwei Tourenstufen erhält der Motor eine, bei vier Tourenstufen zwei Statorwicklungen. Sind fünf oder sechs Tourenstufen verlangt so kann dafür eine dritte Wicklung in Anwendung kommen, oder aber es können auch die für die ersten vier Polzahlen verwendeten beiden Wicklungen nach einer der Maschinenfabrik Oerlikon patentierten Methode so umgeschaltet werden, dass mit je einer Wicklung drei verschiedene im Verhältnis 4 : 6 : 8 oder 6 : 8 : 12 zu ein-

so dass derselbe bei der halben Synchron-Geschwindigkeit unter Berücksichtigung der übrigen Verluste höchstens noch ca. 45 % betragen kann. (Siehe Fig. 1). Ein derart geregelter Motor hat ferner bekanntlich die Eigenschaft, dass bei einmal eingestelltem Schlupfwiderstand die Tourenzahl mit dem Drehmomente veränderlich ist. Eine Erhöhung der Belastung hat einen weiteren Abfall der Tourenzahl zur Folge, eine Entlastung eine Steigerung der Umdrehungszahl, die im Leerlauf unbekümmert des in den Rotorstromkreis geschalteten Widerstandes bis annähernd auf die Synchrone ansteigt. Der zur Erhöhung des Rotorwiderstandes verwendete Regulierwiderstand ist so reichlich zu dimensionieren, dass er die in ihm in Wärme umgesetzte Energie, die bei 50 % Schlüpfung also bereits ungefähr die halbe Motorleistung ist, an die Umgebung abgeben kann. In betriebstechnischer Hinsicht ist der Motor selbst vorzüglich, indem derselbe mangels der Abnutzung unterworfenere Teile nur geringer oder keiner Wartung bedarf.

**Der polumschaltbare Motor.**

Während beim vorstehend beschriebenen Motor die Anzahl der Geschwindig-

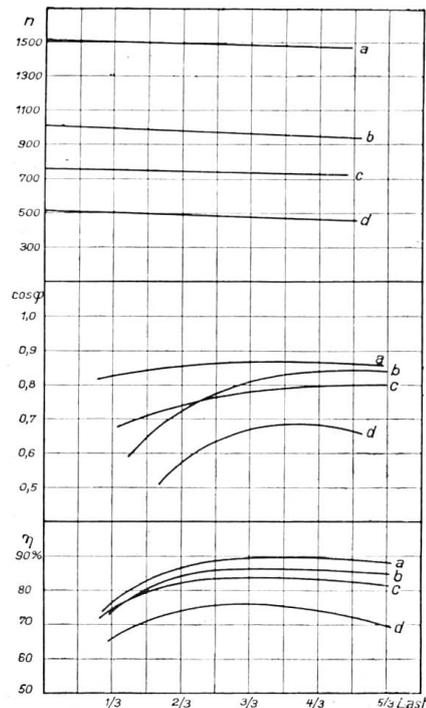


Fig. 2. Stufenmotor für 4 Polzahlen. a 4polig b 6polig c 8polig d 12polig

ander stehende Polzahlen zu erreichen sind.)\* Gewöhnlich erhalten diese Motoren einen Kurzschlussanker dessen Ueberlegenheit gegenüber andern Motorankern in betriebstechnischer Hinsicht allgemein bekannt ist. Es liegt aber theoretisch auch nichts im Wege die Rotoren der Stufenmotoren mit Phasenwicklung auszurüsten, wodurch eine zusätzliche Regelung der Tourenzahl durch Schlupf Widerstände möglich ist. Da dabei die Rotorwicklung auch umschaltbar sein oder der Rotor mehrere Wicklungen erhalten soll und dafür eine mehr oder weniger grosse Zahl Schleifringe notwendig werden, geht die bei dem gewöhnlichen Stufenmotor in die Augen springende Einfachheit des Rotors verloren und wir wollen deshalb für die nachfolgenden Erörterungen eine zusätzliche Regelung der Tourenzahl durch Schlupf Widerstände beim Stufenmotor ausser Acht lassen.

Diesen beiden in ihrer Tourenzahl regulierbaren Drehstrommotoren, deren Rotoren kollektorlos sind und wovon der eine auf den verschiedenen Geschwindigkeitsstufen Serien-, der andere Nebenschlusscharakteristik hat, stehen der Reihen- und der Nebenschluss-Drehstrommotor, deren Rotor ein Gleichstromanker — also mit Kommutator — ist, gegenüber.

### Der Reihenschlusskommutatormotor.

Bei dem Reihenschlusskommutator ist die Stator- und Rotorwicklung in Reihe geschaltet. Da aus konstruktiven Gründen die Rotorspannung bei Motoren für kleine und mittlere Leistungen nur verhältnismässig klein gewählt (bei 50 Perioden zwischen 50 und 100 Volt), die Stator- und Rotorwicklung aber nur dann direkt in Serie geschaltet werden kann, wenn Stator und Rotor für dieselbe Spannung gewickelt sind, die Netzspannung aber meist auch höher als die erreichbare Rotorspannung ist, ist zwischen Stator- und Rotorwicklung ein Serientransformator zu schalten, dessen Uebersetzungsverhältniss dem Verhältnis der Windungszahlen des Stators und Rotors anzupassen ist. Die Grösse dieses Serientransformators richtet sich nach dem Tourenregelungsbereich und es ist derselbe um so grösser, je grösser die Abweichung der niedrigsten oder höchsten Tourenzahl von der durch Pol- und Periodenzahl bestimmten synchronen Geschwindigkeit ist. Der Stator wird dabei für die Netzspannung gewickelt. An Stelle des Serientransformators kann mittelst Leistungstransformators auch die Netzspannung auf die Rotorspannung transformiert werden wodurch bei grossem Tourenregelungsbereich des Kommutatormotors derselbe eventuell etwas kleiner ausfallen könnte als ein mit dem Stator und Rotor in Reihe geschalteter Transformator. Die Regelung der Tourenzahl erfolgt durch Bürstenverschiebung und zwar ist ohne Anwendung besonderer Stabilisierungsmethoden eine kontinuierliche Regelung der Tourenzahl von Synchronismus abwärts bei konstantem Drehmoment bis auf ca.  $\frac{1}{3}$  der synchronen Tourenzahl und unter Umständen noch tiefer erreichbar.

Der Drehstromreihenschlussmotor hat die Eigenschaft, von einer bestimmten maximalen Bürstenverschiebung an unstabil zu werden, d. h. schiebt man die Bürsten über diese Stellung zur Erreichung noch niedrigerer Tourenzahlen hinaus, so bleibt der Motor unvermittelt stehen. Nun sind eine ganze Anzahl Methoden bekannt geworden, um für diesen Motortyp auch bei ganz geringen Geschwindigkeiten und für kleine Drehmomente stabilen Gang zu erreichen. Eines dieser Mittel besteht darin, für die niederen Geschwindigkeiten das Uebersetzungsverhältniss des Serientransformators oder die Netzspannung zu verkleinern, oder der Bürstensatz wird in zwei Teile unterteilt, deren einer feststeht während der andere zum Zwecke die Tourenzahl zu regulieren, verschiebbar ist.\*\*\*) Es genügt aber auch, das Drehfeld, das normalerweise in demselben Sinne umlaufen soll wie der Motor, bei geringen Tourenzahlen oder kleinen Drehmomenten entgegen der Drehrichtung des Motors umlaufen zu lassen, um einen stabilen Gang des Motors bis zum Stillstand zu erhalten. Die Fig. 3 und 4 zeigen die Tourenzahlkurven, den Verlauf des Wirkungsgrades und Leistungsfaktors bei drei verschiedenen Drehmomenten bei Betrieb eines zehnpferdigen Serienmotors mit einfachem Bürstensatz, mit mit und der Drehrichtung des Motors entgegen umlaufenden Drehfelde.

\*) Näheres hierüber siehe O. Knöpfli E. K. & B. 1909, Heft 4 und 5.

\*\*) Siehe M. Schenkel E. T. Z. 1912, Heft 19, 20 und 21.

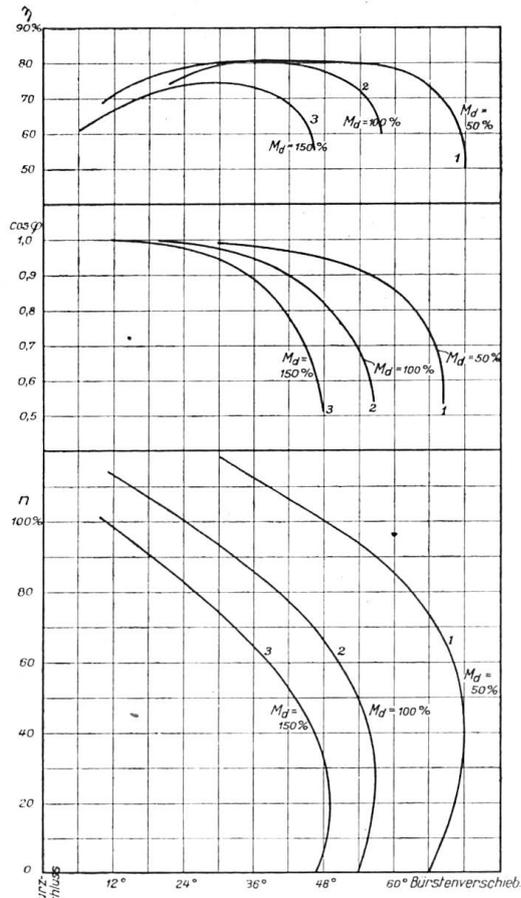


Fig. 3. Drehstromserie-Kommutatormotor. Drehfeld mit der Drehrichtung umlaufend.

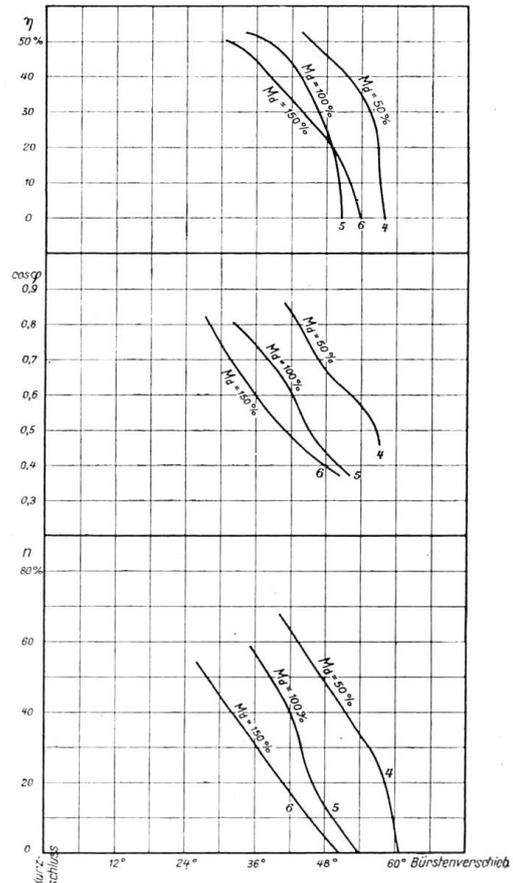


Fig. 4. Drehstromserie-Kommutatormotor. Drehfeld entgegen der Drehrichtung umlaufend.

Jedenfalls ist es also möglich bei Drehstromkommutatorserienmotoren die Tourenzahlen mittelst Bürstenverschiebung vom Stillstand aus kontinuierlich und verlustlos zu regeln und zwar sind die Bürsten für zunehmende Tourenzahl aus der Nulllage entgegengesetzt der Drehrichtung des Motors zu verschieben. In einfachster Weise lässt sich auch eine elektrische Nutzbremung dieser Motoren dadurch erreichen, dass die Bürsten von der Leerstellung aus im Sinne der Drehrichtung verschoben werden, wobei gleichzeitig zur Verhütung der Eigenerrregung Ohm'sche Widerstände in jede Phase einzuschalten sind.

Der Motor hat, wie bereits erwähnt, Seriencharakteristik, d. h. bei festgehaltenen Bürsten ist die Tourenzahl mit dem Drehmoment veränderlich und die Tourenzahl die der Motor bei gänzlicher Entlastung annimmt liegt sehr hoch, jedenfalls über der synchronen Geschwindigkeit. (Siehe Fig. 5.) Nun kann durch entsprechende Sättigung des Zwischentransformators die Leerlauf-tourenzahl herabgedrückt werden. Es sind auch andere Mittel bekannt, um ein Durchbrennen des Serienkommutatormotors zu verhindern. So wendet z. B. die Maschinenfabrik Oerlikon bei ihren Drehstromserienmotoren das in Figur 6 dargestellte Schaltungsschema an. Als Netzschalter wird ein Nullspannungsautomat verwendet. Der Stromkreis über die Nullspannungsauslösespule ist bei normalen Tourenzahlen über einen mit der Motorwelle gekuppelten Fliehkraftschalter geschlossen. Bei Ueberschreitung einer bestimmten maximalen Geschwindigkeit öffnet sich der Fliehkraftschalter und der Netzschalter wird dadurch automatisch ausgeschaltet d. h. der Motor stromlos. Zweckmässig versieht man den Netzschalter auch mit einer Maximalstromauslöse-Vorrichtung, um den Motor gleichzeitig auch vor Stromüberlastung zu schützen.

### Der Nebenschlusskommutatormotor.

Der Drehstromkommutatormotor mit Nebenschlusscharakteristik wird allgemein nicht durch Bürstenverschiebung geregelt, sondern indem man mittelst Stufentransformator die

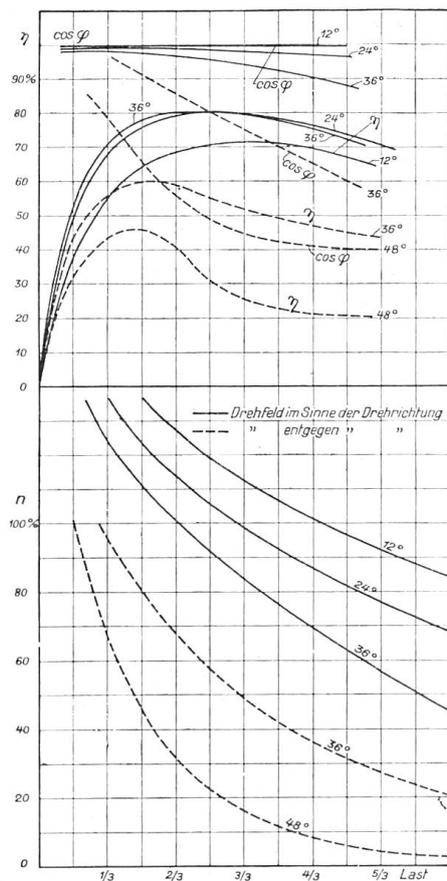


Fig. 5. Drehstrom-Serie-Kommutatormotor. Die den Kurven beige-schriebenen Zahlen geben die Bürstenverschiebung an.

am Rotor wirksame Spannung verändert. Die Statorwicklung kommt an die Netzspannung zu liegen. Der Stufentransformator lässt sich auch umgehen wenn man

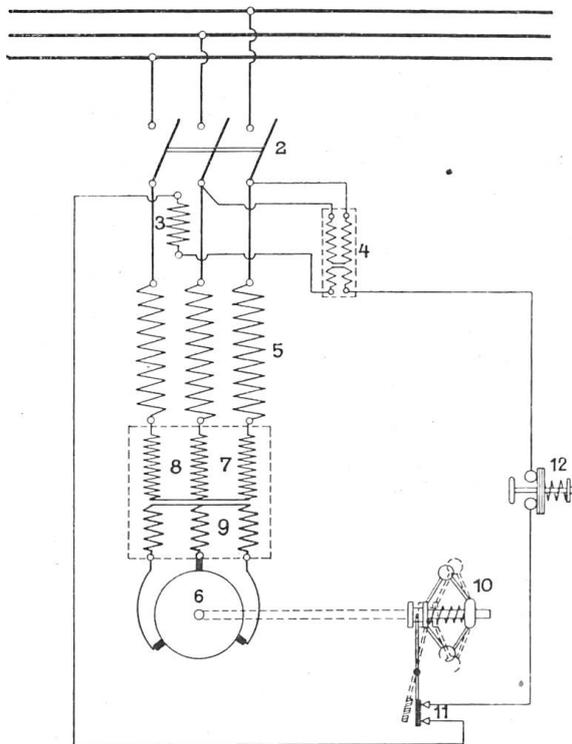


Fig. 6. Schaltungsschema für Drehstrom-Serie-Kommutatormotor.

- 1. Netzleitung.
- 2. Nullspannungsautomat
- 3. Auslösespule.
- 4. Transformator.
- 5. Statorwicklung.
- 6. Rotor.
- 7. Serientransformator.
- 8. Primärvorrichtung.
- 9. Sekundärvorrichtung.
- 10. } Fliehkraftschalter.
- 11. }
- 12. Druckknopfschalter.

die Statorwicklung mit Anzapfungen versieht, d. h. also gewissermassen den Transformator in den Stator verlegt, eine Massnahme die sich wohl nur bei Motoren kleinerer und mittlerer Leistung und bei geringen Netzspannungen anwenden lässt. Zur Regelung der Tourenzahl bedarf es in beiden Fällen eines Stufenschalters ähnlich des bei Stufenmotoren verwendeten Polumschalters. Dabei geschieht der Uebergang von einer Tourenstufe auf die andere wie bei jenem auch sprungweise und die Anzahl der Geschwindigkeitsstufen ist gegeben durch die Anzahl Anzapfungen am Stufentransformator oder an der Statorwicklung.\*)

Auf den verschiedenen Stufen haben die Motoren Nebenschlusscharakteristik und der Tourenabfall zwischen Leerlauf und voller Belastung ist verhältnismässig gering, allerdings nur bei den übersynchron und den nicht weit untersynchron liegenden Geschwindigkeitsstufen. Je grösser die Abweichung einer Tourenstufe von Synchronismus abwärts ist, um so grösser ist der Tourenabfall zwischen Leerlauf und Belastung und es beträgt derselbe bei einer Tourenstufe die in der Nähe der halb synchronen Geschwindigkeit liegt bereits ca. 15 bis 20 %. Aus diesem Grunde ist bei diesen Motoren, wenn auf allen Geschwindigkeitsstufen der reine Nebenschlusscharakter beibehalten werden soll, eine Regelung der Tourenzahl nur im Verhältnis von etwa 1 : 3 möglich. Die mit Figur 7 gegebenen Schaulinien, die einer Broschüre der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin entnommen sind,\*\*) zeigen das Verhalten eines Drehstromkommutatormotors mit Nebenschlusscharakteristik.

Wenn wir nun noch über das Verhalten der beiden Kommutatormotoren in betriebs-technischer Hinsicht etwas erzählen wollen, so ist besonders darauf aufmerksam zu machen,

\*) Näheres über diese Motoren siehe Dr. Friedr. Eichberg E. T. Z. 1910, Heft 30 und 31.

\*\*\*) Drehstrom-Reguliermotoren für Werkzeugmaschinen, Februar 1912.

dass der Kommutator sich im Betriebe sehr gut hält. Es ist des öfteren beobachtet worden dass der Kommutator bei Drehstrom und überhaupt bei Wechselstrom, auch wenn die Ma-

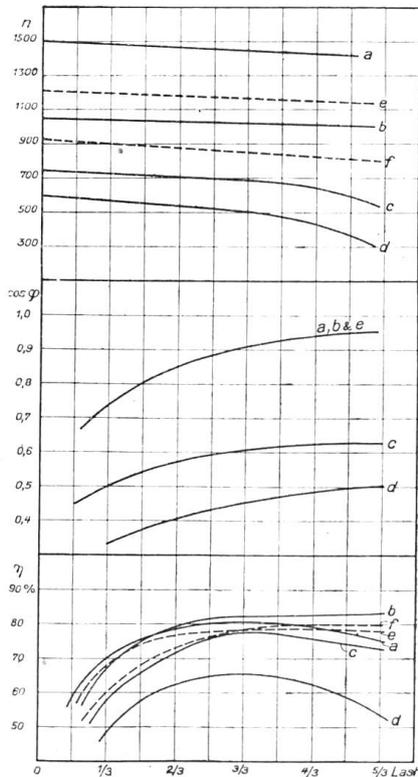


Fig. 7. Drehstrom-Nebenschlusskommutatormotor.

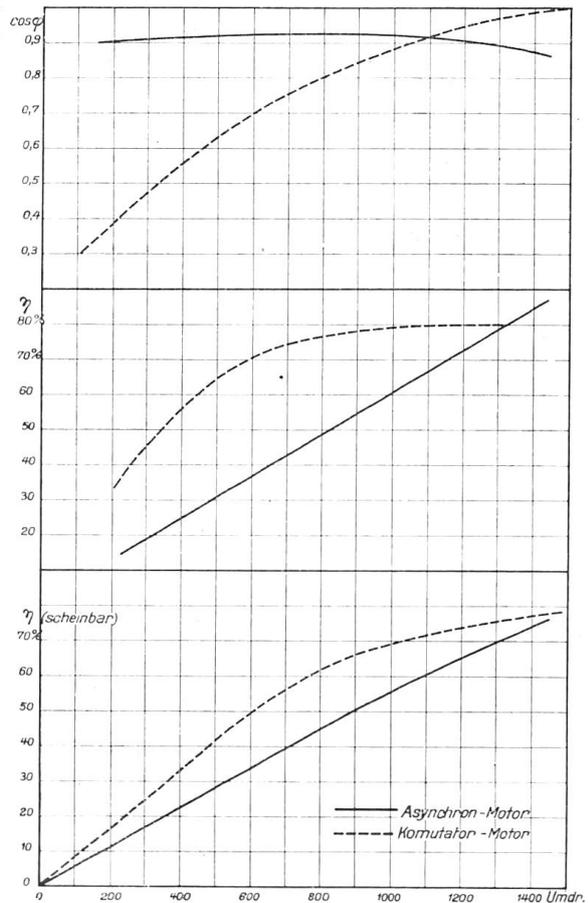


Fig. 8. Vergleich eines durch Schlupf Widerstand geregelten Asynchronmotors mit einem Drehstrom-Serie-Kommutatormotor.

schine nicht ganz funkenfrei läuft, beinahe gar nicht angegriffen wird im Gegensatz zu dem Kommutator einer Gleichstrommaschine. Es ist dies offenbar eine Folge davon dass bei Wechselstrom die elektrolytische Wirkung des Lichtbogens wegfällt.

Da, wie bereits erwähnt, die Rotorspannung bei Drehstrom-Kommutatormotoren sehr gering ist, in den meisten Fällen also unter 100 Volt, so ist dadurch eine Bedienung des Kommutators und der Bürsten während des Betriebes leicht möglich. Bei der Dreibürsten-Schaltung ergeben sich pro Polpaar vier Bürstenstiften. Da die Rotorspannung klein ist, wird die Rotorstromstärke verhältnismässig gross und mithin auch die Anzahl der Bürsten pro Stift, wodurch sich im Betrieb ein ziemlich grosser Verschleiss an Bürstenkohlen ergibt. Bei funkenlosem Gang der Maschine und bei Verwendung von besonders harten Kohlen kann aber auch die Kohlenabnutzung auf ein Minimum gebracht werden.

### Vergleich der vier Drehstrommotoren miteinander.

An regulierbaren Drehstrommotoren sind also vorhanden zwei Motoren mit Serien- und zwei Motoren mit Nebenschlusscharakteristik und es sollen nun je die Motoren gleicher Charakteristik miteinander verglichen werden. Zuerst die beiden Serienmotoren.

Die Figur 8 gibt die Kurven über den Leistungsfaktor, den scheinbaren und wirklichen Nutzeffekt eines durch Schlupf Widerstände geregelten Asynchronmotors und eines durch Bürstenverschiebung gesteuerten Drehstromkommutatormotors, in Abhängigkeit von der Tourenzahl bei konstantem Drehmoment und zwar beziehen sich die ausgezogenen Schaulinien auf einen 25 P. S.-Asynchron-, die punktierten Linien auf einen 25 P. S.-Kommutatormotor. Beide Maschinen sind vierpolig und deren maximale Tourenzahl entspricht ungefähr der synchronen Geschwindigkeit. Die Angaben betreffend Nutzeffekt verstehen sich

bei dem Kommutatormotor inklusive Serientransformator. Aus der genannten Abbildung ist ohne weiteres ersichtlich, dass der Drehstromkommutatorserienmotor infolge seines höheren Wirkungsgrades dem Asynchronmotor überlegen ist. Er ist ihm eben dann besonders überlegen wenn eine stetige Tourenregelung von 0 bis 100 % verlangt wird und der Motor dauernd mit verschiedenen Geschwindigkeiten arbeiten soll. Handelt es sich aber nur darum z. B. eine Arbeitsmaschine aussergewöhnlich langsam in Gang zu setzen die dann dauernd nur mit einer Geschwindigkeit und zwar der maximalen, umlaufen soll, so ist die Verwendung eines durch Schlupf Widerstände ge-

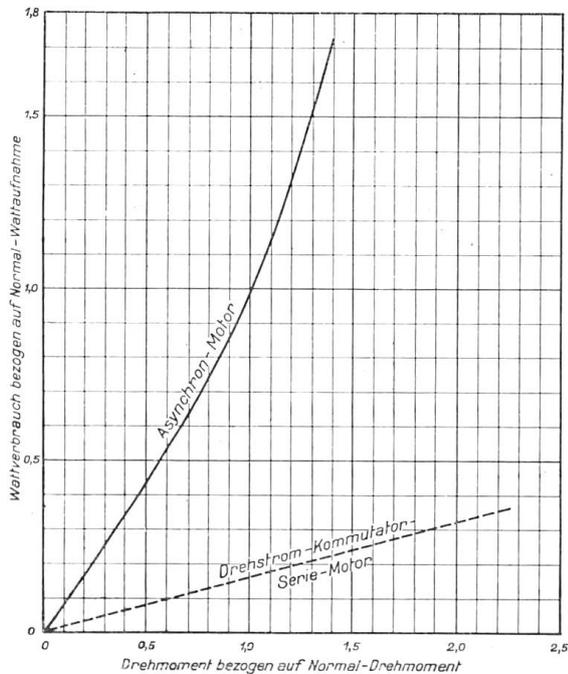


Fig. 9. Wattverbrauch eines Asynchron- und eines Drehstrom-Kommutatormotors im Anlauf.

der Figur 9 zeigen den Wattverbrauch im Anlauf eines Asynchron- (ausgezogene Linien) und eines Drehstrom-Kommutator-Motors (punktirierte Linien) in Abhängigkeit vom Drehmoment.

Bis jetzt haben wir nur den Fall im Auge gehabt, wo es sich um eine Regelung der Tourenzahl von 0 bis 100 % und zwar nur für die besonders ausgedehnte Anlaufperiode oder dauernd im Betriebe handelt. Nun gibt es aber eine Menge von Arbeitsmaschinen bei denen eine Tourenzahländerung nicht im Verhältnis 1 : 100 sondern nur im Verhältnis 1 : 2 oder 1 : 3 verlangt wird. Auch bei diesen kleinen Regelungsbereichen ist dem Kommutatormotor dann der Vorzug zu geben wenn auf allen Geschwindigkeiten dauernd gearbeitet werden soll. Erfordert die Arbeitsmaschine nur eine vorübergehende, also kurzzeitige Veränderung der Tourenzahl und zwar immer von der Normaltourszahl abwärts, so kann man ohne einen besonders unökonomischen Betrieb zu erhalten zu deren Antrieb einen Asynchronmotor verwenden. Es ist ohne weiteres klar dass die Anwendung eines Asynchronmotors um so eher am Platze ist, je geringer die nur zeitweise benötigte Tourenzahl von der Normaltourszahl (ungefähr die Synchrongeschwindigkeit) abweicht und je kleiner die Zeit ist, während welcher die Arbeitsmaschine mit dieser kleineren Geschwindigkeit betrieben werden soll. In allen jenen Fällen wo die Tourenzahl der Arbeitsmaschine dauernd oder zeitweise über die Normaltourszahl zu steigern ist kann natürlich nur die Verwendung eines Kommutatormotors in Frage kommen, indem derselbe auch bei einer von Synchronismus nach oben oder unten abweichenden Tourenzahl mit gutem Wirkungsgrad arbeitet.

Weniger von Bedeutung als der durchschnittliche Wirkungsgrad ist der durchschnittliche Leistungsfaktor bei welchem ein Motor arbeitet. Aus den Kurven über den Leistungs-

regelten Asynchronmotors am Platze, da derselbe, wie aus den Kurven der Figur 8 auch ersichtlich ist, bei Betrieb mit ungefähr synchroner Geschwindigkeit einen um 5—10 % höheren Nutzeffekt hat als der Kommutatormotor. Dabei ist allerdings vorauszusetzen dass der Motor nicht sehr oft angelassen werden muss indem sonst die in den Schlupf Widerständen während den vielen Anlaufperioden verzehrten Energiemengen den Vorteil eines etwas höheren Nutzeffektes bei normaler Tourenzahl wieder aufheben. Erfordert eine Arbeitsmaschine ein häufiges Anlassen, so ist dem Kommutatormotor infolge des höheren Wirkungsgrades desselben während der Anlaufperiode der Vorzug zu geben und zwar um so mehr, je grösser das im Momente des Anlassens von der Arbeitsmaschine geforderte Drehmoment ist. Denn der Asynchronmotor verlangt als Anfahrleistung die dem geforderten Drehmoment entsprechende volle Betriebsleistung, während der Kollektormotor im Anfahren nur den Effekt zur Deckung der Eisen- und Kupferverluste verlangt. Die Schaulinien

faktor  $\cos \varphi$  in Figur 8 ist ersichtlich, dass in dieser Beziehung der Asynchronmotor dem Kollektormotor überlegen ist. Diese Ueberlegenheit wäre insofern von Bedeutung wenn dadurch der Stromverbrauch aus dem Netz geringer würde. Die Stromentnahme aus dem Netz ist aber nicht nur vom Leistungsfaktor sondern eben vom scheinbaren Nutzeffekt abhängig und wie die untersten Schaulinien der Figur zeigen, ist in dieser Hinsicht der Kommutatormotor dem Asynchronmotor auf allen Geschwindigkeitsstufen überlegen.

Welchem Motor nun aber der Vorzug zu geben ist das ist nicht allein durch den Wirkungsgrad und Leistungsfaktor bestimmt, sondern es sind auch die durch die Verwendung eines bestimmten Motors bedingten Hilfsapparate, die Anschaffungskosten des Motors und Zubehör, die betriebstechnische Brauchbarkeit von Motor und Hilfsapparaten und endlich die allgemeinen Betriebskosten in Erwägung zu ziehen. Bei der Beschreibung der charakteristischen Eigenschaften der verschiedenen Motoren haben wir die für die Tourenregelung notwendigen Hilfsapparate bereits erwähnt. Beim Asynchronmotor ist es also ein Schlupf Widerstand der um so grösser wird, je grösser der Tourenregelungsbereich ist und dessen Unterteilung um so feiner sein muss, je geringer die Tourenzahländerungen von Stufe zu Stufe sein sollen. Für den einfachen und billigen Motor benötigt man also einen verhältnismässig komplizierten und teuern Apparat und wenn der Motor selbst im Betriebe ob seiner Einfachheit nur geringer oder beinahe keiner Wartung bedarf so ist eine solche doch für den Schlüpfungsregler notwendig, wie auch der letztere infolge Abbrechens von Kontakten, Verbrauch von Kühlwasser etc., Veranlassung zu weiteren Betriebskosten geben wird.

Zur Tourenregelung des Kommutatormotors sind keine zusätzlichen Apparate notwendig. Der mit dem Stator und Rotor in Reihe geschaltete Transformator bedarf keiner Wartung, es hat derselbe auch keine der Abnutzung unterworfenen Teile. Dagegen erfordert hier der Motor infolge seines Kommutators einer Wartung, die aber jedenfalls gering ist, indem, wie bereits erwähnt, die Kollektoren von Wechselstrommaschinen sich besonders gut halten und es heute auch keine besondere Kunst mehr ist Drehstromkommutatormotoren zu bauen die funkenfrei arbeiten. Der Abnutzung sind vor allem die Kohlenbürsten unterworfen und eben dann auch der Kollektor, so dass also die Kohlen von Zeit zu Zeit zu ersetzen sind und der Kollektor, so derselbe unrund oder uneben geworden sein sollte, abzuschleifen ist. Die Betriebskosten die durch diesen Verschleiss entstehen sind aber jedenfalls geringfügig und mir erscheinen die beiden Motoren mit ihren Hilfsapparaten zusammen betrachtet in betriebstechnischer Hinsicht ungefähr gleichwertig.

Bezüglich des Anschaffungspreises ist anzugeben dass ein Drehstrom-Kommutatorserienmotor für eine 100 % Tourenregelung heute ungefähr doppelt so hoch zu stehen kommt als ein Asynchronmotor inkl. Schlupf Widerstand für ebenfalls 100 % Tourenregulierung und für Dauerbetrieb auf allen Geschwindigkeitsstufen. Gerade durch diesen Preisunterschied ist die Verwendung von Asynchronmotoren, auch dann wenn die Kosten der Energie zu berücksichtigen sind, besonders für kleine Regelungsbetriebe — denn da ist die Differenz im Preise zwischen Kommutator- und Asynchronmotor infolge des billigeren Schlupfreglers noch grösser — trotz des schlechteren durchschnittlichen Nutzeffektes nicht von vorneherein auszuschliessen. In Betrieben wo die Stromkosten überhaupt keine oder nur eine untergeordnete Rolle spielen kann natürlich auch für grössere Regulierungsbereiche der Asynchronmotor Verwendung finden.

Sehen wir vorläufig davon ab dass die beiden eben miteinander verglichenen Motoren Seriecharakteristik haben und deshalb für viele Antriebe ungeeignet sein können, so ergibt sich aus Vorstehendem, dass der teurere Drehstromserie-Kommutatormotor dem billigeren Asynchronmotor dann vorzuziehen ist, wenn der Tourenregelungsbereich gross oder die Geschwindigkeit um einen Mittelwert dauernd oder vorübergehend verändert oder im Anlauf ein Vielfaches des Normaldrehmomentes verlangt wird, oder der Motor sehr häufig angelassen werden muss und mit Rücksicht auf die Stromkosten vor allem auf einen guten durchschnittlichen Wirkungsgrad zu sehen ist.

Der durch Schlupf Widerstände geregelte Asynchronmotor wird vorerst da mit Vorteil angewendet werden wo infolge billiger Kraft eben nicht so auf den Wirkungsgrad zu achten

ist, aber auch dann, wenn eine Tourenregelung nur für Anlaufperioden oder eine kurzzeitige Regelung der Geschwindigkeit unter eine Normalgeschwindigkeit verlangt ist, kann auch bei hohen Stromkosten der Asynchronmotor dem Drehstromkommutatormotor überlegen sein.

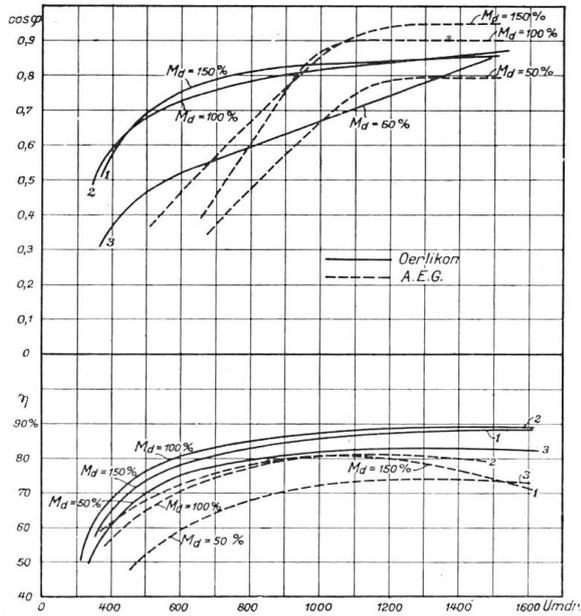


Fig. 10. Vergleich eines Polumschaltbaren Motors mit einem Drehstrom-Nebenschlusskommutatormotor.

für die Drehmomente 50, 100 und 150 % des Normaldrehmomentes bezogen auf die Tourenzahlen durchwegs höher liegt als der Wirkungsgrad des Drehstromkommutatormotors und zwar für normales Drehmoment für den ganzen Tourenregelungsbereich zirka 7—10 %. Auf den oberen Geschwindigkeitsstufen (über 1000) sind die Werte des Leistungsfaktors  $\cos \varphi$  beim Drehstromkommutatormotor für die Drehmomente 100 und 150 % höhere als beim Stufenmotor, für die niederen Geschwindigkeiten für die drei genannten Drehmomente und auch in einem bestimmten über 1000 Touren gelegenen Tourenregelungsbereich bei halbnormalen Drehmoment ist der Leistungsfaktor beim Stufenmotor günstiger als beim Nebenschlusskommutatormotor.

Vergleichen wir die beiden Motoren bezüglich der Tourenregulierung miteinander so ergibt sich für den Drehstromkommutatormotor der Vorteil dass die Anzahl der Tourenstufen zwischen zwei, allerdings nur etwa im Verhältnis 1:3 zueinander stehenden Endwerten, beliebig gross gewählt werden kann. Wie wir bereits bei der kurzen Besprechung des Nebenschlusskommutatormotors gesehen haben wird der Tourenabfall zwischen Leerlauf und voller Belastung beim Kommutatormotor schon bei einer Tourenstufe die in der Nähe der halbsynchronen liegt sehr gross, aus welchem Grunde der Regelungsbereich bei den Drehstrom-Nebenschlusskommutatormotoren ohne Zuhilfenahme besonderer komplizierter Regelungsmittel nicht erweitert werden kann. Der Vergrößerung des Tourenregelungsbereiches bei den Stufenmotoren liegt nichts im Wege. Würde der Stufenmotor der Figur 2 z. B. noch mit einer Wicklung versehen, die für die Polzahlen 24 und 48 umschaltbar wäre, so könnte man die Tourenzahl jenes Motors in 6 Stufen von zirka 125 bis zirka 1500 oder im Verhältnis 1:12 regulieren ohne dass auf irgend einer der Tourenstufen der Tourenabfall zwischen Leerlauf und voller Belastung grösser ausfällt als die Schlüpfung bei normalen Drehstrommotoren ausmacht.

Es ist erwähnt worden, dass die Anzahl der Zwischenstufen beim Kollektormotor beliebig gross gewählt werden könne. Theoretisch ist dies allerdings möglich, in der Praxis dürfte dies aber schwer auszuführen sein. Die Regelung der Tourenzahl des Nebenschlusskommutatormotors erfolgt durch Verändern der Rotorspannung. Diese ver-

Die Schaulinien der Figur 10 zeigen den Verlauf des Wirkungsgrades und Leistungsfaktors eines Vierstufenmotors der Maschinenfabrik Oerlikon (ausgezogene Linien) und eines Drehstromkommutatormotors mit Nebenschlusscharakteristik der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft Berlin (punktirte Linien). Der Stufenmotor ist für konstantes Drehmoment entsprechend 25 PS bei 1450 Touren gebaut und auf die Polzahlen 4, 8, 6 und 12 umschaltbar, entsprechend den synchronen Geschwindigkeiten 1500, 1000, 750 und 500 Touren per Minute. Der Drehstromkommutatormotor ist ebenfalls für konstantes Drehmoment entsprechend 25 PS. bei ungefähr 1500 Touren gebaut und ist die Tourenzahl in 6 Stufen regulierbar, und zwar im Leerlauf auf 1500, 1200, 975, 910, 730 und endlich 550 Touren. Siehe betreffend den Stufenmotor auch die Figur 2, betr. den Kommutatormotor die Figur 7.

Die Vergleichskurven auf Figur 10 zeigen nun, dass der Wirkungsgrad des Stufenmotors

schiedenen Rotorspannungen entnimmt man z. B. einem besonderen Reguliertransformator, oder aber man kann dieselben auch der mit Anzapfungen versehenen Statorwicklung entnehmen. In beiden Fällen ist die Anzahl der Geschwindigkeitsstufen gegeben durch die Anzahl der Anzapfungen pro Phase und dass man nur eine beschränkte Zahl solcher Anzapfungen anbringen kann, ist ohne weiteres klar.

Wie wir aus einer Veröffentlichung der A. E. G. entnehmen können, sind die Motoren gewöhnlich für 4, 6 oder die grösseren Typen auch gar für 12 Tourenstufen, was das Maximum sein dürfte, eingerichtet. Ausser der Verteuerung des Reguliertransformators oder der Statorwicklung wird durch eine grössere Anzahl Tourenstufen auch der Regulierschalter immer teurer und komplizierter, erhält derselbe doch schon bei 6 Geschwindigkeiten mindestens 18 Kontakte.

Für die Regelung der Stufenmotoren benötigt man weder einen Stufentransformator noch Anzapfungen an der Statorwicklung, sondern eben einen dem Regulierschalter beim Drehstromkommutatormotor ungefähr gleichwertigen Polumschalter und je nach der Stufenzahl eine, zwei oder drei voneinander getrennte gewöhnliche Statorwicklungen. Die Kontaktzahl bei einem zweistufigen Polumschalter beträgt ausser den drei Zuleitungskontakten 6, bei einem vierstufigen Motor 12 und endlich bei einem sechsstufigen Motor 18 Kontakte für die Umschaltung der Statorwicklung oder Wicklungen.

Ich glaube man wird nicht gross fehlgehen, wenn man annimmt, dass der Polumschalter für den Stufenmotor und der Regulierschalter für den Drehstromkommutatormotor bezüglich Preis und in betriebstechnischer Hinsicht bei gleicher Stufenzahl ungefähr gleichwertig sind. Von den beiden Motoren ist aber jedenfalls der Stufenmotor in jeder Beziehung ob seiner Einfachheit dem Kommutatormotor weit überlegen, indem eben dessen Rotor ein gewöhnlicher billiger und keiner Wartung bedürftiger Kurzschlussanker ist. Der einfache Aufbau des rotierenden Motorteiles beim Stufenmotor kommt auch deutlich im Preisunterschiede der beiden Motortypen zum Ausdruck, denn der Kollektornebenschlussmotor inkl. Transformator und Regulierschalter wird heute mindestens noch 40—60 % teurer sein als ein polumschaltbarer Motor mit Zubehör. Der Drehstromkommutatornebenschlussmotor hat gegenüber dem Stufenmotor den einen Vorzug dass die Anzahl der Zwischenstufen grösser gewählt werden kann als bei diesen.

Das Anwendungsgebiet für diesen Motor liegt also hauptsächlich dort wo für einen nicht über 1:3 gehenden Regelungsbereich eine Stufenzahl zwischen 6 und 12 verlangt wird. Genügen für den gleichen Regelungsbereich 4 Stufen, oder für einen noch grösseren Regelungsbereich, z. B. 1:12, 6 Geschwindigkeitsstufen, so ist ohne Zweifel der polumschaltbare Motor dem Nebenschlusskommutatormotor vorzuziehen.

Sehen wir nun in wieweit diese 4 regulierbaren Drehstrommotoren den Bedürfnissen der Praxis entsprechen. Die beiden zuerst miteinander verglichenen Motoren haben Seriecharakteristik, das heisst die Tourenzahl derselben ist stark von der Belastung abhängig. Der durch Schlupf Widerstände geregelte Asynchronmotor und der Drehstromkommutatorseriemotor können also nur für den Antrieb von solchen Arbeitsmaschinen verwendet werden, bei denen eine Veränderung der Tourenzahl mit der Belastung erwünscht ist (wie z. B. Kranen, Winden etc.), oder bei denen das Drehmoment bei jeder Geschwindigkeit konstant oder nahezu konstant bleibt, (wie z. B. bei Stoff-Druckmaschinen, Ringspinnmaschinen etc.) oder Schwankungen der Tourenzahl infolge Belastungsänderungen auf den Gang der Arbeitsmaschine nicht nachteilig einwirken (wie z. B. bei Pumpen, Gebläsen etc.).

Die beiden Motoren mit Nebenschlusscharakteristik finden Verwendung für den Antrieb von Arbeitsmaschinen, bei welchen bei grossen Drehmomentsänderungen gleich bleibende Geschwindigkeit eingehalten werden soll und der ruckweise Uebergang von einer Geschwindigkeitsstufe auf die andere auf den Gang der Arbeitsmaschine von nicht nachteiligem Einfluss ist, (wie z. B. bei Werkzeugmaschinen, Pumpen, Ventilatoren etc.).

Eine weitere Gruppe von Arbeitsmaschinen — ich erinnere nur an die Papiermaschinen — erfordert aber einen Antriebsmotor dessen Tourenzahl von einem minimalen kontinuierlichen bis zu einem maximalen Wert geregelt werden kann und welcher auf allen Geschwindigkeitsstufen Nebenschlusscharakteristik hat.

Wie aus der vorstehenden Besprechung ersichtlich ist kann weder der gewöhnliche Asynchron- oder Stufenmotor der Drehstromserien oder der Nebenschlusskommutatormotor ohne Zuhilfenahme automatischer Regelungsvorrichtungen diesen Anforderungen gerecht werden. Die Praxis bedarf also noch eines weiteren Motors, dessen Tourenzahl wie z. B. bei dem Serienkommutatormotor durch Bürstenverschiebung innert weiten Grenzen zu regeln ist und der bei allen Bürstenstellungen Nebenschlusscharakter hat. Die Schaffung eines solchen Motors auf rein elektrischem Wege dürfte ohne Zuhilfenahme von besonderen Regelungsmaschinen oder mit der Bürstenverschiebung gekuppelten Drehtransformatoren und dergl. kaum möglich sein. Uebrigens ist bis heute auch unter Zuhilfenahme derartiger Reguliermaschinen irgendwelcher Art kein Nebenschlusskommutatormotor bekannt geworden bei dem eine kontinuierliche Regelung der Tourenzahl innert weiten Grenzen möglich wäre.

Aussichtsreicher erscheint die Anwendung mechanischer Regelungseinrichtungen zur automatischen Verstellung der Bürsten in Abhängigkeit von der Tourenzahl beim Drehstromserienkommutatormotor. Die Regelung der Tourenzahl bei diesem Motor erfolgt ausschliesslich durch Bürstenverschiebung und zwar vom Stillstand aus bis zu einer maximalen Geschwindigkeit. Bringt man also die Bürstenbrücke in Verbindung mit einem Fliehkraftregulator, welcher bei Aenderungen des Drehmomentes bzw. bei einer Veränderung der Motortourenzahl die Bürstenbrücke in dem einen oder anderen Sinne verschiebt, so kann bei einem Serienkommutatormotor für die verschiedenen Geschwindigkeitstufen Nebenschlusscharakteristik erreicht werden. Dabei ist ein solches Regelungsverfahren an sich gar nichts ungewöhnliches indem ja jede Dampfmaschine, Dampfturbine etc. Seriencharakteristik hat und nur eben auch der Fliehkraft- oder irgend ein anderer Regler zwischen Leerlauf und Belastung praktisch konstante Tourenzahl hält. Meistens sollen aber solche durch einen Regler gesteuerte Maschinen nur mit einer Tourenzahl umlaufen, oder dann soll dieselbe höchstens im Verhältnis 1 : 2 regulierbar sein, während in unserem Falle nun eine weitgehende Veränderung der Tourenzahl des Kommutatormotors verlangt ist und die Verhältnisse für die Anwendung eines Fliehkraftreglers wegen der mit der hohen Tourenstellung verbundenen starken Veränderlichkeit der Empfindlichkeit etc. des Fliehkraftreglers, nicht so einfach liegen. Schaltet man zwischen Fliehkraftregler und die zu steuernde Motorwelle eine Vorrichtung, die derart wirksam ist dass sich die Grenzwerte der Umlaufzahlen des Fliehkraftreglers anders zueinander verhalten als die Grenzwerte der Umlaufzahlen der gesteuerten Maschine, so braucht der Regler nur für einen verhältnismässig kleinen Regelungsbereich eingerichtet sein, während die Geschwindigkeit des Arbeitsmotors doch in grossen Grenzen verändert werden kann. Die Maschinenfabrik Oerlikon treibt zu dem Zwecke den Fliehkraftregler nicht direkt von der Maschinenwelle aus an sondern über einen besonderen kleinen als Regulatormotor bezeichneten und vom Netz gespeisten Asynchronmotor mit drehbarem Rotor und Stator. (Siehe Figur 11.) Der Rotor dieses Regulatormotors steht direkt oder über mechanische Uebersetzungen mit der Welle der zu steuernden Maschine in Verbindung, der Stator des Regulatormotors der über drei Schleifringe vom Netz Strom erhält, ist gekuppelt mit dem Fliehkraftregulator. Ist die Tourenzahl des Arbeitsmotors z. B. von 100 auf 1000, also im Verhältnis 1 : 10 zu regulieren, die Polzahl des Regulatormotors 6, die Periodenzahl des zugeführten Stromes 50 und wird der Rotor des Regulatormotors dem Drehsinne des Drehfeldes entgegen angetrieben, so läuft bei 1000 Touren am Arbeitsmotor der Fliehkraftregler, wenn die Uebersetzungsverhältnisse der mechanischen Triebe zwischen Stator und Regulator und Rotor und Arbeitsmaschinenwelle 1 sind, mit  $1000 + 1000$  also 2000 Touren um. Bei 100 Touren des Arbeitsmotors erhält man  $1000 + 100$  also 1100 Touren am Fliehkraftregulator oder die Tourenzahl des Fliehkraftreglers hat sich nur im Verhältnis 1,8 : 1 geändert.

Die Aenderung der Umdrehungszahl während des Ganges geschieht in bekannter Weise z. B. durch Entspannen oder Anspannen einer Regulierfeder von Hand oder mittelst eines kleinen Steuermotors. Da ferner beim Regulieren eines Drehstromkommutatormotors eine Bürstenbrücke verschoben werden muss, so wird aus leicht einzusehenden Gründen auch bei kleinen Maschinen ein indirekt wirkender, also z. B. ein Oeldruckregler in Anwendung kommen müssen. Es ist noch zu erwähnen, dass sich eine Fernsteuerung der

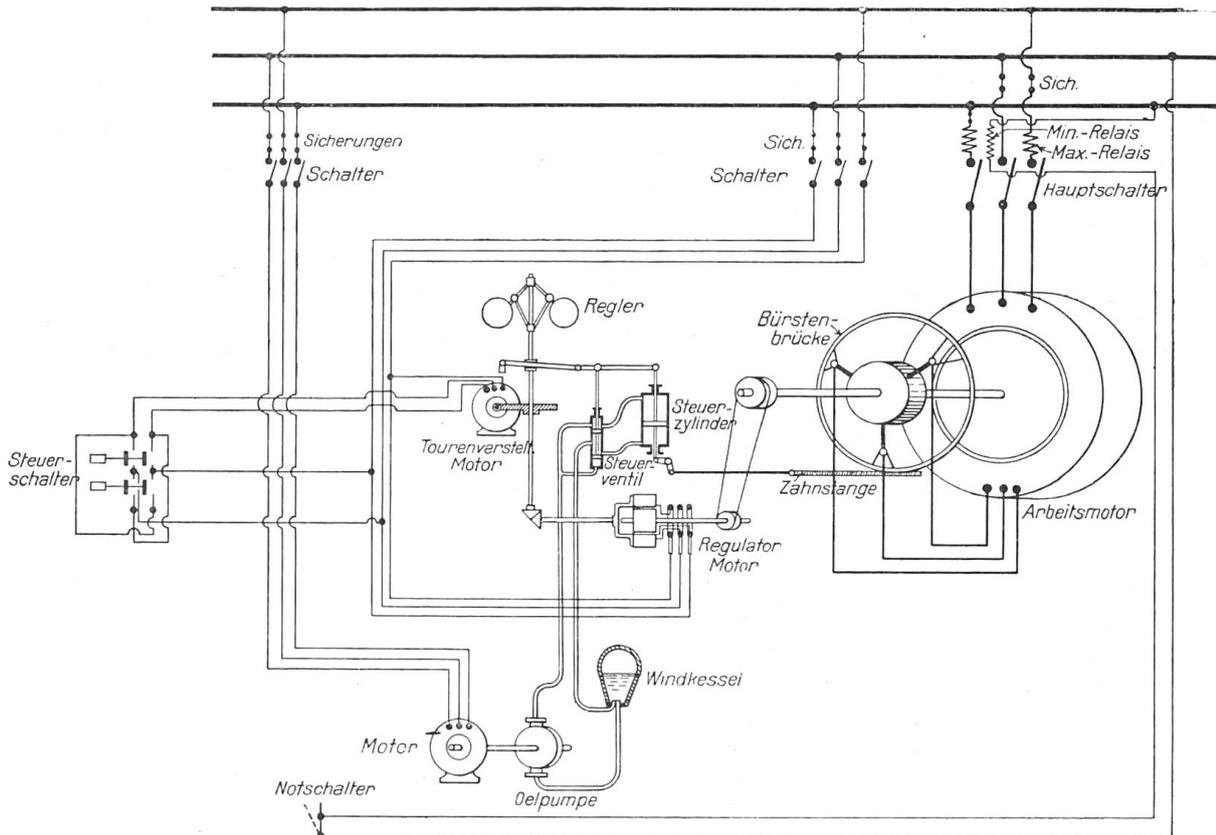


Fig. 11. Schaltungs- und mechanisches Schema für Drehstromserienkommutatormotor mit automatischer Tourenregelung.

Tourenzahl, wie aus der Figur 11 ersichtlich ist, ohne weiteres ausführen lässt; auch das Ein- und Ausschalten des Hauptschalters kann automatisch erfolgen. Ferner ist auch der Preis einer solchen automatischen Tourenregelungseinrichtung nicht übermässig hoch und derselbe natürlich prozentual umso kleiner je grösser der Arbeitsmotor ist.

Jedenfalls ist es also möglich bei dem durch Bürstenverschiebung gesteuerten Serienkommutatormotor unter Zuhilfenahme eines Fliehkraftregulators für alle Geschwindigkeiten Nebenschlussverhalten herzustellen.

Zusammenfassend sehen wir also dass der Drehstromserienkommutatormotor vor allem den mit schlechterem Nutzeffekt arbeitenden Asynchronmotor mit Schlupf Widerstandsregelung ersetzt und dass unter Anwendung einer automatischen Bürstenverstellvorrichtung mit demselben der idealste Nebenschlussmotor mit kontinuierlichem unbeschränktem Regelungsbereich hergestellt werden kann. Also nur der Umstand, dass man die Leistung des Drehstromkommutatorserienmotors nicht beliebig hochtreiben kann, setzt der ganz allgemeinen Verwendung desselben eine Grenze.

Der Drehstromnebenschlusskommutatormotor ist mit dem Stufenmotor zu vergleichen vor welchem er den Vorteil der grösseren Zahl Geschwindigkeitsstufen, allerdings bei kleinerem Regelungsbereich und beträchtlich schlechterem Nutzeffekt, hat. Die Anwendung des Nebenschlusskommutatormotors bleibt auf die Fälle beschränkt wo eine verhältnismässig grosse Zahl Geschwindigkeitsstufen bei kleinem Regelungsbereich gefordert werden und der sprungweise Uebergang von Stufe zu Stufe nicht von Nachteil ist. Aber auch hier kann die Verwendung eines Drehstromserienmotors in Verbindung mit einem Regulator in Frage kommen, insbesondere dann, wenn es sich um grössere Leistungen (über 50 PS) handelt und die Netzspannung so gering ist dass Stator und Rotor direkt in Serie geschaltet werden können. Der Nebenschlusskommutatormotor hat vor dem Drehstromserienkommutatormotor den Vorzug dass man bei demselben ob der festen Bürstenstellung Wendepole anbringen kann. Daraus ergibt sich die Möglichkeit die Nebenschlussmotoren für höhere Leistungen zu bauen.