

Die
Verwendung des Drehstroms
insbesondere
des hochgespannten Drehstroms
für den
Betrieb Elektrischer Bahnen

Betrachtungen und Versuche

von

Dr. Ing. W. Reichel,

Oberingenieur der Siemens & Halske A.-G.



München und Berlin.

Druck und Verlag von R. Oldenbourg.

1903.

Herrn Wilhelm von Siemens

in Dankbarkeit gewidmet.

Vorwort.

Die vorliegende Studie ist vom Verfasser zunächst zu dem Zwecke geschrieben worden, um auf Grund derselben die Würde eines Doktor Ingenieurs an der Königlichen Technischen Hochschule zu Berlin zu erwerben. Die Betrachtung der Gründe, welche für die Verwendung des Drehstromes zum Betriebe elektrischer Bahnen bestimmend sind, führte im ersten Teile zur wissenschaftlichen Erörterung einer Anzahl von Fragen und Eigentümlichkeiten der anzuwendenden Stromarten. Da die Technik eine Wissenschaft der Anwendung anderer mehr abstrakter Wissenschaften ist, so ließen sich auch die aufgeworfenen Fragen am besten an der Hand bestimmter praktischer Anwendungsbeispiele untersuchen, wenn eine rein mathematische Behandlung nicht mehr ausreichte bzw. mußte auch auf die praktische Ausführung von Einzelheiten der Bahnsysteme eingegangen werden. Daher wird der erste Teil der Arbeit auch dem noch nicht Eingeweihten eine Anleitung zu ähnlichen Untersuchungen bieten können.

Der Abschnitt II des ersten Teiles sowie der zweite Teil, in welchem die neuesten Versuche auf dem genannten Gebiete besprochen werden, dürfte dagegen dem bereits mit dem Stoffe Vertrauten neue Anregungen geben, namentlich dem Eisenbahntechniker zur Erschließung neuer Verkehrseinrichtungen.

Stellenweise ist auf meine früheren Veröffentlichungen in der E.T.Z., Jahrgang 1900, Heft 23, Jahrgang 1901, Heft 34, 37, 38 und 41, Jahrgang 1902, Heft 32, Bezug genommen, so daß durch die vorliegende Studie eine Ergänzung und Zusammenfassung der früheren Veröffentlichungen entstanden ist.

Es sei mir noch vergönnt, an dieser Stelle dem Förderer der hier in Rede stehenden Arbeiten, Herrn Wilhelm von Siemens, meinen Dank dafür auszusprechen, daß ich an den gestellten Aufgaben mich beteiligen durfte, deren Lösung für jeden Techniker das höchste berufliche Interesse bietet.

Berlin, März 1903.

Der Verfasser.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
A. Einleitung	1
B. Über die Arten der Anwendung des Drehstroms für elektrische Bahnbetriebe und ihre Eigentümlichkeiten bezw. Vor- und Nachteile im Vergleich mit Gleichstrom	2
I. Anwendung für Straßenbahnen	2
II. Anwendung des Drehstroms für Bahnen mit eigenem Bahn- körper, Klein- oder Vorortbahnen und insbesondere bei Voll- bahnen	20
C. Betrachtung der Versuche, hochgespannten Drehstrom von 10000 Volt verketteter Spannung zum Bahnbetriebe zu ver- wenden. Grundzüge der angewendeten Konstruktionen . . .	27
I. Fahrleitungen	28
II. Ausarbeitung der Betriebsmittel	33
III. Neue Vorschläge des Verfassers zu weiteren Vervollkomm- nungen für Bahnanlagen mit 160 km Fahrgeschwindigkeit . .	44
Schlusswort	47
Anhang I. Bezeichnungen	48
• II. Berechnung eines Gleichstrommotors von 1025 kg Ge- wicht	49
• III. Berechnung eines Drehstrommotors von 1250 kg Ge- wicht für 650 (1150) Volt, 6 Pole, 100 Polwechsel (50 Perioden)	57
• IV. Aufstellung der Anfahrlinien	83
• V. Vergleichende Zusammenstellung der Beanspruchungs- werte der Wagenausrüstung	97
• VI. Ermittlung eines Verhältnisses der anzuwendenden Spannungen bei Gleichstrom und Drehstrom	100

	Seite
Anhang VII. Ermittlungen über die Beanspruchung der Leitungs- anlage	104
› VIII. Ausführungsbeispiel Burgdorf—Thun	123
› IX. Ausführungsbeispiel Lecco—Colico—Chiavenna (Sondrio)	131
› X. Ausführungsbeispiel Schnellbahn Berlin—Hamburg .	139
› XI. Berechnung der zum Andrücken des Schleifbügels an die Leitung erforderlichen Drehmomente bei ver- schiedenen Anordnungen	142
› XII. Berechnung des Kraftbedarfes und der Verbrauchs- ziffern für einen Zug von 260 t Gewicht bei 160 km Fahrgeschwindigkeit pro Stunde	151

A. Einleitung.

Als man in der ersten Hälfte der achtziger Jahre des 19. Jahrhunderts in den Voltainduktoren, wie man damals die Transformatoren nannte, ein bequemes Mittel erkannt hatte, um den Wechselstrom zur wirtschaftlichen Kraftübertragung auf große Entfernungen nutzbar zu machen, tauchte auch sehr bald in der Industrie der Gedanke auf, diese Stromart für den Betrieb elektrischer Eisenbahnen anzuwenden. Er fand z. B. einen Ausdruck in einem Patente, welches unter dem 18. Januar 1886 auf Neuerungen in der Anwendung von Voltainduktoren nachgesucht wurde und dessen erste beiden Ansprüche lauteten:

1. Auf einem mittels Wechselstrommotors elektrisch bewegten Fahrzeuge die Anbringung eines Voltainduktors, um dem Motor einen Strom von geringerer Spannung zuführen zu können, während in den Zuführungsleitungen ein Strom von hoher Spannung zirkuliert.
2. Die Aufstellung von Voltainduktoren neben dem Gleise einer elektrischen Eisenbahn und die Verbindung der primären Windungen der Induktoren mit der Wechselstromquelle, der sekundären Windungen mit den Schienen oder den neben den Schienen isoliert angebrachten Leitern, von welchen der Strom mittels Gleit- oder Rollkontakte dem Fahrzeuge zugeführt wird.

Eine Anwendung des Patentes fand aber noch nicht sogleich statt. Erst nachdem Ende der achtziger und Anfang der neunziger Jahre der verkettete Wechselstrom, besonders Drehstrom, in die Praxis Eingang gefunden hatte, wurden im Jahre 1892 die ersten Versuche angestellt, denselben für Bahnzwecke zu verwenden. Es wurden zu dem Zwecke in gewöhnlicher Art zwei oberirdische Leitungen gezogen, von denen je nach Belieben mittels zweier Schleifbügel oder mittels zweier Rollenkontakte der Strom entnommen werden konnte; die dritte Zuleitung wurde an die Fahrschienen angelegt, von denen der Strom mittels der Laufräder abgenommen wurde. Die Spannung zwischen zwei Zuleitungen, d. i. zwischen zwei Klemmen der Primärmaschine, war in

der üblichen Höhe der Bahnspannungen bemessen, mit etwa 500 bis 600 Volt. Das Fahrzeug, ein Untergestell eines gewöhnlichen Strafsenbahnwagens, war ausgerüstet mit einem Elektromotor, dessen Leistung mittels Schneckenübertragung auf die eine Laufachse übertragen wurde. In den mit Schleifringen versehenen sekundären Teil schaltete man zum Anlassen und Regeln der Geschwindigkeit je nach Bedarf Widerstände ein.

Die Versuche zeitigten günstige Ergebnisse, und die Ausführung der Versuchsanlage liefs erkennen, dafs das System zu Bahnzwecken sich eigne und die Anlage der Zuleitungen keine unüberwindlichen Schwierigkeiten bei der weiteren Ausbildung bieten würde. Die infolgedessen auftauchenden Pläne, dahingehend, zur Anwendung des Drehstromes im Grofsen längere Vollbahnstrecken nach entsprechendem Umbau in dauernden Betrieb zu nehmen, wurden aber nicht ausgeführt, sondern es blieb bei den Entwürfen, trotzdem vom rein technischen Standpunkte sicher zu erwarten war, dafs die neue Stromart für Fernbahnen besonders geeignet sein würde.

Auch die für Strafsenbahnen aufgestellten Drehstromentwürfe, die sich mit kleineren Mitteln hätten ausführen lassen, gelangten deshalb nicht zur Verwirklichung, weil infolge der dem Strafsenbahnbetriebe eigentümlichen Bedingungen keine Vorteile, sondern eher Nachteile damit verknüpft sind, an Stelle des gewöhnlich angewendeten Gleichstromes den Drehstrom zu benutzen. Über die Berechtigung der Anwendung beider Stromarten für die verschiedenen Systeme von Bahnen mögen nachstehende Betrachtungen Aufschluss geben.

B. Über die Arten der Anwendung des Drehstromes für elektrische Bahnbetriebe und ihre Eigentümlichkeiten bezw. Vor- und Nachteile im Vergleich mit Gleichstrom.

I. Anwendung für Strafsenbahnen.

Obwohl es sich übersehen läfst, dafs für Strafsenbahnen der Drehstrom unvorteilhaft ist, so erscheint es doch nützlich und lehrreich, eine genauere Betrachtung hierüber anzustellen und den Vergleich einer Benutzung von Drehstrom mit der üblichen Anwendung von Gleichstrom für ein bestimmtes praktisches Beispiel durchzuführen, da bei dieser Untersuchung eine gröfsere Anzahl Fragen zu erörtern sind, die für alle mit der einen oder andern Stromart betriebenen Bahnen in Betracht kommen.

Wenn zunächst von der Stelle ausgegangen wird, an der die elektrische Energie in mechanische umgesetzt wird, nämlich von den Fahrzeugen, so liegt klar auf der Hand, daß deren Einrichtung bei Drehstrom nicht so einfach, zweckmäßig und betriebssicher gestaltet werden kann wie bei Gleichstrom, erstens hinsichtlich

a) Apparate und Schaltausrüstung der Fahrzeuge.

Das Fahrzeug muß den drei Zuführungsleitungen entsprechend auch mit einer größeren Anzahl von Leitungen zur Verbindung der Motoren mit den Stromabnehmern, Fahrschaltern und Widerständen versehen werden. Die Leitungen werden noch besonders zahlreich dadurch, daß nachfolgende Bedingung zu erfüllen ist.

Das Bestreben, innerhalb der Städte langsamer zu fahren als außerhalb derselben und wenn möglich durch den Motorwagen einen bis zwei Anhängewagen ziehen zu lassen, bringt es mit sich, alle Radsätze anzutreiben und wenigstens zwei Motoren zu verwenden. Dieselben können bei Ausbildung als Gleichstrommotoren sowohl in Hintereinanderschaltung (für halbe Fahrt), als auch in Nebeneinanderschaltung für volle Fahrt arbeiten. Durch die folgerichtige Benutzung der Nebeneinanderschaltung nach der Hintereinanderschaltung wird beim Anfahren eine Kraftersparnis erzielt und ebenso auch bei halber Fahrt insofern, als es nicht nötig ist, die Fahrgeschwindigkeit durch Vorschalten von Widerständen zu vermindern. Dies ist bei Drehstrommotoren ebenfalls ausführbar und zwar mit Hilfe der Kaskadenschaltung (eine Art der Hintereinanderschaltung der Motoren), durch welche die Fahrgeschwindigkeit auf etwas weniger als die Hälfte der größten herabgemindert wird; jedoch entstehen durch die Einrichtung, abgesehen von einem Nachlassen in der Zugkraft, bedeutende Schwierigkeiten in der Schaltung. Denn es ist gewöhnlich notwendig, daß beide Motoren sowohl in Kaskaden-, als auch in Nebeneinanderschaltung mit voller Ausnutzung arbeiten sollen, und das macht die Schaltung sehr verwickelt, da drei Zuleitungen zu berücksichtigen sind anstatt deren zwei wie bei Gleichstrom. Die Umschaltung von Kaskaden- auf Nebeneinanderschaltung verlangt auch eine andere Bauart der Fahrschalter. Denn es muß möglich sein, jede der beiden Schaltungen, also entweder Kaskadenschaltung oder Nebeneinanderschaltung selbständig, und ohne Zwangläufigkeit auszuführen. Andernfalls, wenn also der Fahrschalter so ausgeführt wäre wie bei Gleichstrom, würde beim Ausschalten aus voller Fahrt, also aus Nebeneinanderschaltung auf Null, die Kaskadenschaltung überschritten werden müssen, und das würde bei raschem Ausschalten starke Funkenbildung ergeben, da die Motoren bei diesem Übergang stromerzeugend wirken würden. Es ist vorteilhaft, letztere Eigenschaft benutzen zu

können, aber unvorteilhaft, sie benutzen zu müssen. Der Fahrer muß also bei Übergang zwei Handgriffe mehr machen, nämlich Ausschalten und Umschalten. (Vergl. Schaltschema.)

Außerdem verlangt die Kaskadenschaltung, wenn die Motoren nicht mit einem Verhältnis der Windungszahlen 1:1 gewickelt sind, entweder ebenfalls eine Umschaltung der Widerstände oder einfacher einen besonderen Satz Widerstände. (Vergl. Schaltschema).

Die Zahl der Kontakte der Fahrschalter wird daher größer, diese selbst werden umfangreicher und schwerer als die für Gleichstrom. Dasselbe gilt von den Widerständen, den selbsttätigen Ausschaltern und den Sicherungen gegen zu starkes Anwachsen des Stromes. Zur richtigen Handhabung des Fahrschalters gehört unbedingt Spannungs- und Stromzeiger am Führerstand, da das Drehmoment von der Spannung abhängig ist. (Vergl. b) motorische Ausrüstung.) Die Handhabung muß sich nach der Höhe der Spannung richten. Einen deutlichen Überblick über die erforderliche Schaltausrüstung gewährt der Vergleich des hierzu aufgestellten Schaltschemas eines gewöhnlichen Straßenbahnwagens für Gleichstrom Fig. 1 (Tafel I) mit einem vom Verfasser für denselben Zweck entworfenen gleichwertigen Schema für Drehstrom (Fig. 2 und 3 Tafel I) sowie eine dazu aufgestellte Tafel der Ausrüstungsteile. Dieser Vergleich gilt nicht bloß für Straßenbahnwagen, sondern auch für alle Fahrzeuge und zeigt zur Genüge, daß die Ausrüstung für Gleichstrom wesentlich einfacher wird als für Drehstrom.

b) Die motorische Ausrüstung der Fahrzeuge einschl. der zum Anlassen erforderlichen Widerstände.

Das Eigentümliche des Straßenbahnbetriebes ist besonders der stete Wechsel zwischen schwacher und starker Kraftäußerung, der einerseits durch das immerwährende Ingang- und Stillsetzen, anderseits durch das abwechselnde Befahren von ebenen Strecken und von stärkeren Steigungen entsteht, die selbst bei Bahnanlagen in sonst vollkommen ebenen Städten immer auftreten.

1. Verhalten des Gleichstrommotors.

Diese Betriebsbedingungen zu erfüllen, ist der Gleichstrommotor geeigneter. Er ist fast ausnahmslos als Hauptschlufmaschine ausgeführt und besitzt dadurch die unübertreffliche Eigenschaft, ein von der Spannung unabhängiges und nur von der Stromstärke abhängiges Feld zu haben, d. h. sich dasselbe selbsttätig durch die verbrauchte Stromstärke zu regeln. Mit zunehmender Belastung steigt die letztere, also wird auch das magnetische Feld stärker. Da aber die elektromotorische Gegenkraft des Motors von diesem und von der Drehzahl abhängig

Tafel der Ausrüstungsteile.

System	Motoren	Fahrerhalter	Widerstände	Strom- abnehmer	Blitzableiter	Ausschalter	Leitungen
Gleichstrom	2 Stück	2 Stück mit 10 Schalt- stufen und je 28 Kontakten	1 Gruppe einfache	1 Stück einfacher	1 Stück einfacher	1 Stück automatischer, zugleich Hand- ausschalter 1 Stück Handausschalt. Beide einfach	17
Drehstrom für 2 Leitungen oberirdisch	2 Stück aber hierzu 1 Transformator zur Erhöhung der Spannung bei Kaskaden- schaltung	2 Stück mit je 52 bzw. 55 Kontakten	2 Gruppen 3 fache. (Eine für Kas- kaden- und eine für Neben- einanderschal- tung)	1 Stück zweipoliger	2 Stück	1 Stück automatischer, zugleich Hand- ausschalter 1 Stück Handausschalt. Beide zweipolig	42 (bei Anwendung eines Transfor- mators oder der Dreieck- schaltung für das Arbeiten der Motore in Kaskadenschalt- tung)

ist, so muß bei wachsendem Strom und Feld die Drehzahl sinken, bei abnehmendem steigen. Die äußersten Grenzen sind auf der einen Seite der Stillstand, auf der anderen Seite das Durchgehen bei Leerlauf. Bis zu dem Stillstand die Belastung zu treiben, ist nicht gut angingig, da die Stromstärke alsdann zu hoch steigen würde, und zwar bis zu einem Werte, der dem Quotienten aus der Spannung durch den gesamten Widerstand des Motors entspricht (Kurzschlußstrom). Das Drehmoment, welches dem Produkt Feld $\times$ Strom proportional ist steigt bei wachsendem Strom beständig, ohne daß der Motor abfällt. Sein höchstes nutzbares Drehmoment ist vom Spannungsabfall in den Zuleitungen ganz unabhängig. Daher arbeiten zwei Motoren in Hintereinanderschaltung bei der halben Spannung mit demselben Drehmoment wie in Nebeneinanderschaltung, und ebenso beim Anfahren, bei welchem ein Spannungsverlust künstlich durch die vorgeschalteten Widerstände erzeugt wird. Die Schaulinien eines solchen Hauptstrommotors geben das Verhalten des Motors deutlich zu erkennen (Fig. 2, Anhang II). Schon beim achten Teil des Kurzschlußstromes erreicht der Motor sein höchstes zum Anfahren benutztes Drehmoment.

2. Verhalten des Drehstrommotors bei voller Primärspannung und Drehzahl (Nebeneinanderschaltung).

Anders verhält sich der Drehstrommotor. Bei ihm ist nur die primäre Wickelung an die Zuleitungen angeschlossen, während die sekundäre keine Verbindung mit denselben hat, und daher der in ihr fließende sekundäre Strom durch Transformierung erzeugt wird. Derselbe übt auf das Nutzfeld, welches zur Erzeugung des Drehmomentes erforderlich ist, eine entmagnetisierende Wirkung aus. Wächst nun bei zunehmender Belastung das Drehmoment und der sekundäre Strom, so nimmt das Nutzfeld ab. Der primäre Strom wächst dabei ebenfalls, gleichzeitig tritt aber eine Vergrößerung des Streufeldes ein, während das Hauptfeld annähernd konstant bleibt. Dasselbe kann durch den sekundären Strom nicht verstärkt werden, wie es eigentlich der Fall sein müßte. Das Drehmoment ist innerhalb der Arbeitsgrenzen abhängig von der Spannung und dem Verbrauchsstrom.

Da das Drehmoment proportional ist dem Produkt aus Sekundärstrom und Nutzfeld, so wird der Motor bei stetig zunehmender Belastung vom Leerlauf ab, zunächst bei starkem Nutzfeld und geringem Strom, ein stetig wachsendes Drehmoment erzeugen bis zu einem Höchstwert und dann ein stetig kleiner werdendes Drehmoment bis zum schwächsten Feld und größten Strom (Kurzschlußstrom). Der Motor hat also die unangenehme Eigenschaft, bei Überschreitung einer bestimmten Belastungsgrenze abzufallen und nutzlos so großen Strom aufzunehmen, daß die Isolierung infolge zu starker Erwärmung leidet.

Während des eben besprochenen Belastungsvorganges sinkt die Drehzahl erst sehr langsam (die Schlüpfung wächst), so daß sie innerhalb der Belastungsgrenzen vom normalen bis zum höchsten nutzbaren Drehmoment (mindestens 10% unter dem größten Moment, besser mehr) als konstant angesehen werden kann. Zuletzt sinkt die Drehzahl sehr rasch bis zum vollständigen Stillstand. Wenn nämlich das Feld schwächer wird, so muß, damit die für den wachsenden Strom nötige wachsende Spannung entstehen kann, die Schlüpfung wachsen, d. h. die Umdrehungen des Läufers müssen hinter den Umläufen des Hauptfeldes mehr und mehr zurückbleiben. Dieser Vorgang der Verringerung der Drehzahl kann auch künstlich durch Einschalten von Widerständen in den sekundären Stromkreis hervorgerufen werden, also können die Umdrehungen des Motors durch diese geregelt werden.

Die Veränderlichkeit der Felder und Ströme bei voller Spannung und regelrechter Drehzahl ist in Anhang III, Fig. 2 bildlich dargestellt und damit das durch die Schaulinien in Anhang III, Fig. 3 und 4 gekennzeichnete Verhalten des Motors ohne weiteres verständlich.

Innerhalb der Arbeitsgrenzen ist die Drehzahl als wenig veränderlich anzusehen. Wird sie durch Antreiben des Motors (auf Gefällstrecken) über den Synchronismus hinaus gesteigert, so gibt die Maschine negatives Drehmoment und liefert Strom, statt solchen aufzunehmen. Der Motor wirkt also als Stromerzeuger bremsend auf das Fahrzeug, was für das Befahren von Gefällen zur Erzielung gleichmäßiger Geschwindigkeit und Kraftgewinns ausgenutzt werden kann. Das ist allerdings auch bei Gleichstrommotoren möglich, wenn man deren Hauptschlufwicklung getrennt erregt (durch Akkumulatorenatterie oder durch besondere Zuleitung).

Die geringe Veränderlichkeit der Drehzahl der Drehstrommotoren bringt aber auch noch einen unbequemen Nachteil insofern mit sich, als die Drehstrommotoren in Nebeneinanderschaltung bei kurzgeschlossener Sekundärwicklung nur dann richtig arbeiten, wenn die Außendurchmesser der Bandagen gleich sind. Es dürfen also stets für ein und dasselbe Fahrzeug nur Motoren an solchen Triebachsen verwendet werden, bei denen die Bandagenabnutzung die gleiche ist. Verschiedenheiten derselben rufen schädliche Überlastungen der Motoren hervor. Hat z. B. die eine Bandage einen Durchmesser von 880 mm, die andere von 836 mm, so ist ein Unterschied von 5% auch in den Umdrehungen vorhanden. Für eine Fahrt auf der Wagerechten stellen dann die Umdrehungen der Motoren sich etwa so ein, daß der eine mit 968 Umdrehungen arbeitet und mit positivem Drehmoment von 55,6 mkg, der andere mit 1018 Umdrehungen und negativem Moment von 35 kg. Die eine Maschine arbeitet untersynchron als Motor und bewegt den Wagen, treibt dazu aber noch die andere Maschine an, welche über-

synchron als Stromerzeuger arbeitet und Strom an das Netz zurückgibt. Der eine Motor würde also stark überlastet werden. Das übrigbleibende Drehmoment von 20,6 mkg wird für die Fortbewegung des Wagens mit 27,7 km-Std. verbraucht. Die Unterschiede in der Belastung werden kleiner, wenn in die sekundäre Wicklung Ballastwiderstände eingeschaltet werden, wodurch wiederum der Wirkungsgrad etwas sinkt.

Bei Gleichstrommotoren mit Hauptschlufwicklung ist der Nachteil nicht in der Weise vorhanden; einer der Motoren macht bei dem angegebenen Unterschied der Durchmesser 5 % mehr Umdrehungen und nimmt dafür weniger Strom auf, aber ohne daß der andere Motor Schaden leidet.

Aus den Darstellungen Anhang III Fig. 2, 3 und 4 ersieht man, daß das größte Drehmoment nicht überschritten werden darf und man gut tut, mindestens noch 10 % unter demselben zu bleiben, um den Motor nicht der Gefahr auszusetzen, daß er abfällt.

Da die Erregung des Motors von der Spannung abhängig ist, so ist das größte nutzbare Drehmoment nicht unabhängig vom Spannungsverlust in der Leitung, sondern ändert sich vielmehr unter Voraussetzung engerer Grenzen proportional dem Quadrate der Quotienten der Spannungen. Denn es ist allgemein: $M = C \cdot J \cdot N$ und $M' = C \cdot J' \cdot N'$ (M' stellt das einer kleineren Spannung entsprechende Drehmoment und C eine Konstante dar). Daher ist auch

$$\frac{M'}{M} = \frac{N' \cdot J'}{N \cdot J}.$$

Es stehen aber ferner sowohl die größten Ströme als das Feld in geradem Verhältnis zu den Spannungen, und es ist daher ferner

$$\frac{J'}{J} = \frac{N'}{N} = \frac{E'}{E}, \text{ also auch } \frac{M'}{M} = \left(\frac{E'}{E}\right)^2.$$

Bei $E' \sim 0,9 E$, also bei 10 % Spannungsverlust in den Zuleitungen, ist das höchste Nutzmoment nur noch etwa 80 % vom Drehmoment bei voller Spannung. Es kann daher leicht folgender Fall eintreten: Sinkt bei starker Belastung die Spannung, so sinkt das Drehmoment, der Primärstrom steigt infolgedessen, da die Zugkraft am Radumfang sich nicht ändert, die Spannung fällt noch mehr, das Moment wird noch kleiner u. s. f., ohne daß der Führer des Wagens sogleich etwas bemerkt, wenn keine Strom- oder Spannungszeiger vorhanden sind.

Der zu große Spannungsverlust könnte nur durch einen Spannungserhöher (Zusatztransformator), der in die Zuleitung (und zwar entweder auf der Strecke stehend oder auf dem Wagen befindlich) eingeschaltet ist, ausgeglichen werden; geschieht dies nicht, so muß die Spannung in den Zuleitungen möglichst hoch gewählt werden, um möglichst gleichmäßig zu bleiben, oder der Motor muß sehr reichlich

bemessen werden. Das gilt sowohl für das Befahren von Steigungen, als auch für das Anfahren. Für letzteres kommt noch in Betracht und zwar ebenfalls ungünstig, daß die Widerstände länger als bei Gleichstrom eingeschaltet sein müssen, bis der Motor ohne sie mit voller Drehzahl und Schaltung arbeiten kann.

3. Befahren von Steigungen.

Auf der Steigung haben beide Arten Motoren dieselbe Zugkraft zu leisten, aber der Hauptstrommotor geht unter gleichzeitig wachsender Zugkraft in der Drehzahl herunter, während der Drehstrommotor dieselbe mit nur geringer Verminderung beizubehalten bestrebt ist (auch bei wachsender Zugkraft).

Es würde daher die Wahl bleiben, entweder die Steigungen mit etwa halber Geschwindigkeit zu befahren, oder den Motor bei der großen Geschwindigkeit stark zu belasten und die unverhältnismäßig großen Kraftmengen mit in Kauf zu nehmen.

Letztere üben eine unbequeme Wirkung auf Leitungsnetz und Kraftwerk aus, welche beide für die Aufnahme dieser starken Stöße bemessen sein müssen und daher in der Anlage teurer werden und auch im Betriebe teurer arbeiten.

Um den Betrieb für die Steigungen so zu gestalten, wie es wünschenswert erscheint, nämlich dieselben langsamer zu befahren, könnte man, ohne das Drehmoment zu vermindern, Periodenzahl und Spannung in dem gegebenen Verhältnis z. B. von $\frac{50}{1150} = \frac{1}{23}$ auf $\frac{33}{700} = \frac{1}{21}$ ändern. Denn es ist $M = C \cdot J \cdot N$ und $N = C' \cdot \frac{E}{Z}$. Die Windungszahl Z ist beim fertigen Motor unveränderlich, also ist das Feld unveränderlich, wenn $\frac{E}{Z}$ unverändert bleibt. Ist aber anderseits N ungeändert, so ändert sich auch J nicht, d. h., das Moment $M = C \cdot J \cdot N$ behält die gleiche GröÙe.

Eine solche Änderung der Periodenzahl würde aber im Kraftwerk besondere Umformermaschinen, ferner besondere Zuleitungen und im Betriebe besondere Vorsicht bei der Handhabung der Schaltung an den Übergangsstellen von niedrigerer auf höhere Periodenzahl erforderlich machen. Es wird daher zu überlegen sein, ob es bei Vorhandensein von zwei Motoren und von starken Steigungen nicht zweckmäßig ist, mit Kaskadenschaltung zu fahren, wodurch aber die Zeit der starken Beanspruchung sehr wächst, also größere Erwärmung des Motors eintritt und der Fahrplan verschlechtert wird. Diese Kaskadenschaltung bringt außerdem andere Nachteile mit sich.

4. Verhalten des Drehstrommotors bei Kaskadenschaltung.

In erster Linie sinken bei gewöhnlicher Kaskadenschaltung ohne Zuhilfenahme besonderer Einrichtungen das höchste Drehmoment und die Drehzahl auf etwa die Hälfte, die höchste Leistung daher auf etwa den vierten Teil. Kosinus und Wirkungsgrad werden schlechter, so daß der Motor namentlich innerhalb der Städte bei langsamer Fahrt unökonomisch arbeitet. Erfahrungsgemäß ist z. B. der Wirkungsgrad und Kosinus bei Parallelschaltung 0,85 und 0,85, bei Kaskadenschaltung 0,75 und 0,60.

Die gewöhnliche Kaskadenschaltung (vergl. Stromschema) im Sinne der Hintereinander- und Nebeneinanderschaltung bei Gleichstrom kann nicht anders eingerichtet werden, als daß der Läufer des Motors I auf den Läufer des Motors II geschaltet und der Ständer vom Motor II auf Widerstand bzw. kurzgeschlossen arbeitet. Denn gewöhnlich ist das Verhältnis der primären zu den sekundären Windungen größer als 1, so daß nur die gleichartigen Wicklungen, also die sekundären, miteinander arbeiten können.

Das Sinken des Drehmomentes und der Leistung ist dadurch verursacht, daß die Läuferwicklung des Motors I nicht mehr wie vorher auf induktionslosen Widerstand arbeitet, sondern auf die Wicklung vom Läufer II; also sind Strom und Spannung nicht mehr in gleicher Phase, sondern unter einem bestimmten Winkel gegeneinander verschoben. Die Folge ist eine Verschiebung der Einzelfelder des Motors gegeneinander und ein starker Spannungsabfall an den Klemmen des die Spannung für Motor II erzeugenden Läufers I und daher auch Verminderung der Drehmomente zunächst von Motor II und dann auch von Motor I infolge verminderter Energieaufnahme. Sind nun bei Nebeneinanderschaltung die Motoren bereits bis an die Abfallgrenze hin beansprucht, und ist es trotzdem Bedingung, daß bei Kaskadenschaltung dasselbe höchste Drehmoment geleistet wird, wie bei Nebeneinanderschaltung, so ist an der Primärwicklung des Motors I eine Spannungserhöhung nötig, die am besten durch einen Transformator vorzunehmen ist.

Eine Umschaltung des primären Teils des ersten Motors von Stern auf Dreieck würde das Moment auf das etwa $1\frac{1}{2}$ fache steigern, aber sehr viele Leitungen bedingen (vergl. Tafel I Fig. 3).

Das Verhalten der Motoren wird durch die Spannungserhöhung mittels Transformator dem Normalen angenähert, wie weiter unten für ein Zahlenbeispiel erläutert und berechnet ist (Anhang III, Fig. 5 und 6, 7 und 8). Die durch Versuche gefundenen Schaulinien zeigen ziemlich gute Übereinstimmung mit den Rechnungswerten (vergl. Anhang III Fig. 9 und 10). Zum Zwecke der Spannungserhöhung kann sowohl ein gewöhnlicher als auch ein Zusatztransformator angewendet werden.

Das Schaltschema (vergl. dieses) wird selbst bei Benutzung eines Transformators natürlich durch die notwendigen Schaltungen verwickelt, das Gewicht des notwendigen Transformators kommt zum Wagengewicht hinzu.

Die Kaskadenschaltung hat außerdem noch den Nachteil ungleicher Erwärmungen der Motoren im Eisen und Kupfer, indem im Motor I fast doppelt so große Verluste entstehen, als im Motor II. Dieser Nachteil muß in der Schaltung wenigstens dadurch einigermaßen ausgeglichen werden, daß die Motoren abwechselnd als erste arbeiten.

Das eben Gesagte gilt für eine Kaskadenschaltung von zwei Motoren, wenn beide der verwendeten Motoren sowohl für die Kaskaden- als für Nebeneinanderschaltung benutzt und dabei bis nahe zur Abfallgrenze angestrengt werden müssen. Wenn aber nicht beide Motoren voll ausgenutzt zu werden brauchen, sondern wenn es mit Rücksicht auf Erwärmung zulässig ist, einen der beiden Motoren bei Nebeneinanderschaltung nicht mehr zu benutzen, so läßt sich derselbe natürlich für diesen besonderen Zweck mit besonderer Wickelung versehen und es sind dann weder besondere Widerstände für Kaskadenschaltung noch ein Zusatztransformator erforderlich. Denn die Zugkraft sinkt bei Kaskadenschaltung zwar auf die Hälfte, aber es arbeitet dann die doppelte Zahl Motoren. Werden ferner in einem solchen Falle die Motoren mit Rücksicht auf Kupferbelastung bei Nebeneinanderschaltung noch nicht bis nahe an die Abfallgrenze hin belastet, so kann dies doch für kurze Zeit bei Kaskadenschaltung geschehen, und dann gibt die doppelte Zahl Motoren ein größeres Drehmoment bei Kaskadenschaltung, als die einfache Zahl bei Nebeneinanderschaltung.

Eine solche Benutzung findet bei der elektrischen Bahn Lecco—Colico—Chiavenna (Sondrio) von Ganz & Co. statt, und es ist dabei der Wirkungsgrad bei Kaskadenschaltung 0,77—0,80 und der Cosinus 0,65—0,67 (vergl. Electrician November 1901, 1225 bis 1227).

5. Bauart der Motoren.

Hinsichtlich der Bauart der Motoren ist zu bemerken, daß bei den Drehstrommotoren etwaige Ausbesserungsarbeiten erschwert sind, namentlich wenn die Wickelung in halb oder ganz geschlossenen Nuten untergebracht ist. Das ist aber bei kleineren Typen nötig, da andernfalls durch Verwendung von Wickelungsschablonen, die in offene Nuten eingelegt werden, der Übergangsquerschnitt im Luftspalt bedeutend kleiner wird und der Kosinus der Phasenverschiebung viel geringer wird.

Bei Gleichstrommotoren lassen sich nach Abnehmen der Pole die Feldspulen mit Leichtigkeit entfernen: am Anker können einzelne Schablonen aus den offenen Nuten leicht herausgehoben werden.

Die unter 2, 3, 4 aufgeführten Nachteile des Verhaltens der Drehstrommotoren bleiben bestehen, so lange es nicht gelingt, Drehstrommotoren mit veränderlicher Drehzahl zu bauen und den Einfluss des Kosinus φ zu kompensieren. Zur ziffernmäßigen Erläuterung möge noch nachfolgendes Beispiel dienen:

6. Zahlenbeispiel.

Verlangt sei, daß ein Motorwagen von 20 Sitz- und 15 Stehplätzen nebst zwei Anhängewagen von gleichem Fassungsraume einerseits eine Steigung von $q = 40\text{‰}$ und 800 m Länge mit zwei Haltestellen nehmen und anderseits auf der Wagerechten etwa 30 km in der Stunde höchste Fahrgeschwindigkeit entwickeln soll. Die Steigung liegt an einer Stelle der Strecke, wo die Spannung nicht unter etwa 90‰ abgefallen sein darf. Dasselbe wird beim Vergleich auch für das Anfahren auf der Wagerechten vorausgesetzt. Spannung für Gleichstrom am nächsten Speisepunkt 725 Volt, auf der Steigung 650 Volt. Die Spannung von 725 Volt soll möglichst wenig überschritten werden. Alle 400 m ist eine Haltestelle auf der Steigung, alle 500 m auf der Wagerechten.

Die Berechnungen der Motoren und die Anfahrlinien sind in den Anhängen II, III und IV zusammengestellt, und das Ergebnis dieser und der zahlenmäßige Vergleich zwischen einer Ausrüstung für Gleichstrom und einer solchen für Drehstrom ist im Anhang V durchgeführt.

Die Berechnungen sind zunächst des Vergleiches wegen für dieselbe Spannung von 650 Volt aufgestellt, aber gleichzeitig ist der Berechnung des Drehstrommotors auch diejenige für 1150 Volt beigelegt, die für die Aufstellung der Anfahrlinien und die Berechnung der Leitungsanlage zu benutzen ist.

Endlich ist auch die höchste Spannung von 2000 Volt angegeben, für welche der Motor sich noch wickeln lassen würde, bei der er aber schon ungünstig arbeitet.

Da beim Gleichstrommotor die Drehzahlen bei starker Belastung erheblich niedriger sind als beim Drehstrommotor, so hat er weniger Perioden als dieser, kann also mit erheblich höheren Sättigungen im wirksamen Eisen arbeiten, ohne doch zu große Eisenverluste zu haben.

Die bei starker Belastung niedrigere Drehzahl des Gleichstrommotors verlangt auch einen Ausgleich im Fahrplan derart, daß der Gleichstrommotor mit etwas größerer Zahnradübersetzung ausgerüstet werden muß, im vorliegenden Falle mit 1:5,1, gegenüber der größten anwendbaren von 1:5,8 des Drehstrommotors. Beim höchsten Moment von 85,5 mkg hat der Gleichstrommotor nur etwa 60‰ der Drehzahl des Drehstrommotors beim größten Moment, dadurch wird die Höchstleistung für den Zug wesentlich kleiner, und zwar unter Berücksichtigung