



Die „Sammlung Vieweg“ hat sich die Aufgabe gestellt, Wissens- und Forschungsgebiete, Theorien, chemisch-technische Verfahren usw., die im Stadium der Entwicklung stehen durch zusammenfassende Behandlung unter Beifügung der wichtigsten Literaturangaben weiteren Kreisen bekanntzumachen und ihren **augenblicklichen Entwicklungsstand zu beleuchten**. Sie will dadurch die Orientierung erleichtern und die Richtung zu zeigen suchen, welche die weitere Forschung einzuschlagen hat.

Verzeichnis der bisher erschienenen Hefte siehe 3. und 4. Umschlagseite.

Als Herausgeber der einzelnen Gebiete, auf welche sich die Sammlung Vieweg zunächst erstreckt, sind tätig und zwar für:

Physik (theoretische und praktische, und mathematische Probleme):

Herr Professor **Dr. Karl Scheel**, Physikal.-Techn. Reichsanstalt, Charlottenburg;

Kosmische Physik (Astrophysik, Meteorologie und wissenschaftliche Luftfahrt — Aerologie — Geophysik):

Herr Geh. Ober-Reg.-Rat Professor **Dr. med. et phil. R. Assmann** in Gießen;

Chemie (Allgemeine, Organische und Anorganische Chemie, Physikal. Chemie, Elektrochemie, Technische Chemie, Chemie in ihrer Anwendung auf Künste und Gewerbe, Photochemie, Metallurgie, Bergbau):

Herr Professor **Dr. B. Neumann**, Techn. Hochschule, Breslau;

Technik (Elektro-, Maschinen-, Schiffbautechnik, Flugtechnik, Motoren, Brückenbau):

Herr Professor **Dr.-Ing. h. c. Fritz Emde**, Techn. Hochschule, Stuttgart;

Biologie (Allgemeine Biologie der Tiere und Pflanzen, Biophysik, Biochemie, Immunitätsforschung, Pharmakodynamik, Chemotherapie):

Herr Professor **Dr. phil. et med. Carl Oppenheimer**, Berlin-Grünwald.

Die Wahl der Stromart für größere elektrische Bahnen

Von

Dr. W. Kummer

Ingenieur

Professor an der Eidgen. Techn. Hochschule in Zürich

Mit 7 Abbildungen



Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

1916

Alle Rechte vorbehalten.

ISBN 978-3-663-06144-1 ISBN 978-3-663-07057-3 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-663-07057-3

Copyright, 1916, by Springer Fachmedien Wiesbaden

Ursprünglich erschienen bei Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig, Germany 1916

Vorwort.

Die Wahl der Stromart für eine mit elektrischer Betriebskraft zu versorgende größere Eisenbahnanlage erfordert eine um so bedeutendere Gewissenhaftigkeit bei der Untersuchung und Prüfung aller in Betracht zu ziehenden Gesichtspunkte, als ja besonders im Eisenbahnwesen die Festsetzung jeglicher grundlegenden technischen Maßnahme zu meist geradezu unabsehbaren Konsequenzen führt. Der Wunsch der Betriebsleiter nach technischer Vereinheitlichung und der Drang erfinderischer Bautätigkeit nach rastloser technischer Weiterentwicklung haben besonders auf dem Gebiete der elektrischen Zugförderung jene Gegensätzlichkeit immer und immer wieder aufleben lassen, die das Kennzeichen technischer Neuerungen während ihrer Sturm- und Drangperiode bildet. Gerade weil in manchem Einzelfalle die entscheidende Wahl der Stromart für eine größere elektrische Bahn mit so viel Schwierigkeit getroffen wurde, weist die einschlägige Literatur so verschiedenartige Urteile zur sogenannten „Systemfrage“ der elektrischen Zugförderung auf. Indessen scheinen doch mehr und mehr gewisse elektrische Stromverteilungssysteme für gewisse Gattungen von Eisenbahnen eine besondere Eignung zu zeigen, so daß man annehmen darf, die Entwicklung der elektrischen Bahnen und ihrer Stromversorgung dürfte sich in nicht allzuferner Zeit in ruhigerer Gangart bewegen. Um so mehr darf heute die „Wahl der Stromart für größere elektrische Bahnen“

unbedenklich zum Gegenstand einer Abhandlung von abklärender Tendenz gemacht werden.

Für die Bearbeitung dieser Abhandlung konnte sich der Verfasser einerseits auf die eigene Abklärung stützen, die er seiner langjährigen Lehrtätigkeit und der mehrjährigen Mitwirkung in der „Schweizerischen Studienkommission für elektrischen Bahnbetrieb“ verdankt, während er andererseits durch längere praktische Betätigung auf dem Gebiete der elektrischen Zugförderung in den Besitz eines eigenen, reicheren Erfahrungsmaterials gesetzt wurde. Er verdankt Herrn Prof. Dr. Fr. Emde in Stuttgart, die Anregung zur Niederschrift dieser Abhandlung, sowie verschiedene wertvolle Ratschläge bei deren endgültiger Festlegung.

Zürich, im Juni 1916.

W. Kummer.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Vorwort	III
Einleitung.	
1. Die Systemfrage der elektrischen Zugförderung als Systemfrage der elektrischen Energieübertragung	1
2. Die weiteren Gesichtspunkte zur Systemfrage der elektrischen Zugförderung	2
I. Stromart und Energieübertragung.	
3. Größe und Schwankungen der zu übertragenden Leistungen	3
4. Hauptspeisepunkte bei direkter und bei indirekter Verteilung	8
5. Fahrleitungen und Fahrspannung	9
6. Spannungs- und Energieverluste der Fahrleitungen	10
7. Empfindlichkeit der Triebfahrzeuge gegen Fahrspannungs-Schwankungen	13
8. Die Scheinaufnahme bis zu den Hauptspeisepunkten	14
9. Entfernungen der Speisepunkte und Fahrspannung	19
10. Die Versorgung der Speisepunkte	22
11. Übersicht über die Argumente vom Standpunkt der Energieübertragung	24
II. Stromart und Fahrdienst.	
12. Die Adhäsion der Triebfahrzeuge	25
13. Die Fahrgeschwindigkeit und ihre Regelung	27
14. Die Anfahrverhältnisse	31
15. Bremsung und Energierückgewinnung	35
16. Lokomotiven und Motorwagen	36
17. Die mehrfache Zugförderung	38
18. Fahrleitungen und Hauptspeisepunkte	39
19. Übersicht über die Argumente vom Standpunkte des Fahrdienstes	40
III. Stromart und Betriebssicherheit.	
20. Fahrspannung und Triebfahrzeuge	40
21. Fahrspannung und Fahrleitung	43
22. Fahrleitung und Schwachstromanlagen	45
23. Fahrspannung und Hauptspeisepunkte	46
24. Übersicht über die Argumente vom Standpunkte der Betriebssicherheit	47

IV. Stromart und Wirtschaftlichkeit.

	Seite
25. Grundlegende Beziehungen für die wirtschaftliche Erörterung der Systemfrage	48
26. Die Frequenz der Wechselstrombahnen	51
27. Wirkungsgrade und Leistungsfaktoren	52
28. Totgewichte und Anlagekosten der Triebfahrzeuge	54
29. Anlagekosten der Fahrleitungen	57
30. Anlagekosten der Hauptspeisepunkte	57
31. Die Energiepreise am Hauptspeisepunkte	58
32. Die Jahreskosten des Fahrdienstes	62
33. Übersicht über die Argumente vom Standpunkte der Wirtschaftlichkeit	64

V. Beispiele und Schlußfolgerung.

34. Systemscheidungen europäischer Bahnen	65
35. Systemscheidungen amerikanischer Bahnen	69
36. Allgemeine Schlußfolgerung über die Wahl der Stromart für größere elektrische Bahnen	70

Einleitung.

1. Von einer Wahl der Stromart kann überhaupt nur bei solchen elektrischen Bahnen die Rede sein, bei denen die elektrische Arbeit den Einzelfahrzeugen oder zusammengestellten Zügen mittels einer oder mehrerer, parallel zum Bahngleise verlaufender Fahrleitungen zugeführt wird, mit oder ohne Benutzung des Geleises als elektrischer Rückleitung. Die Zugförderung mittels Akkumulatoren-Fahrzeugen, die übrigens nur für kleinere Aufgaben des Fahrdienstes geeignet ist, scheidet also für eine Betrachtung über die Wahl der Stromart für größere elektrische Bahnen völlig aus. Demgemäß ist die Systemfrage der elektrischen Zugförderung insbesondere auch als eine Systemfrage der allgemeinen elektrischen Energieübertragung zu betrachten, so daß die Wahl der Stromart für elektrische Bahnen in bedeutendem Maße von dem jeweils erforderlichen Aufwand an Leitungsmaterial abhängig wird; d. h. die Wahl der Stromart wird ganz besonders durch die Grundsätze beeinflußt, nach denen man elektrische Energieübertragungen nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten berechnet. Eine ähnliche elektrische Systemfrage ist schon vor einem Menschenalter, anläßlich der Entwicklung der elektrischen Beleuchtungstechnik, aufgetaucht und hat schon damals den Wettbewerb des Gleichstroms, des Einphasenwechselstroms und des Mehrphasenwechselstroms hervorgerufen. Dieselben Stromverteilungssysteme stehen sich auch in der Systemfrage der elektrischen Zugförderung gegenüber, immerhin bei höheren Spannungen der Energieverbraucher, und, soweit Wechselströme in Betracht kommen, meist mit niedrigeren Frequenzen als bei der elektrischen Beleuchtung.

Da die Systemfragen der elektrischen Energieübertragung in so ausgesprochenem Maße mit der wirtschaftlichen Forderung eines möglichst kleinen Aufwandes an Leitungsmaterial verknüpft sind, erscheint es gerechtfertigt, unsere Abhandlung über die Wahl der Stromart für größere elektrische Bahnen mit der Darlegung der Beziehungen der Stromart zur besonderen Form der Energieübertragung, wie sie für elektrische Bahnen ausgestaltet ist, zu beginnen.

2. Indessen ist der Gesichtspunkt wirtschaftlicher Energieübertragung trotz des hohen Gewichtes, das wir ihm zuerkennen müssen, nicht ausschlaggebend oder mindestens nicht allein ausschlaggebend. Vielmehr erscheint sofort ein weiterer maßgebender Gesichtspunkt in der Berücksichtigung der technischen Anforderungen, die der Fahrdienst selbst an die Anlagen stellt. Dieser Gesichtspunkt besitzt schon deshalb eine hervorragende Bedeutung, weil sich die elektrische Zugförderung wiederholt im Wettbewerb mit dem in langer und glänzender Entwicklung groß gewordenen Dampfbetriebe durchzusetzen hatte oder noch durchzusetzen hat, wobei jedesmal die elektrische Zugförderung mindestens dieselben, wenn nicht gar neue und höhere technische Leistungen als der Dampfbetrieb in Aussicht stellen und verwirklichen muß. Für besondere Bahngattungen, wie namentlich für städtische Schnellbahnen, hat die elektrische Zugförderung in dieser Hinsicht übrigens hervorragende Erfolge zu verzeichnen. Nicht weniger bedeutungsvolle Anforderungen, wie seitens des Fahrdienstes, treten an die elektrische Zugförderung auch in dem Gesichtspunkt höchstmöglicher Betriebssicherheit heran. Die Bedingungen hoher Wirtschaftlichkeit aller Anlagenteile bei ausreichender Betriebssicherheit erweitern sich über den Rahmen der in die Energieübertragung gehörenden Bauwerke und müssen schließlich zu einer endgültigen Entscheidung über die Stromart führen. An Hand einer Betrachtung der Systementscheidungen von verschiedenen großen Bahnverwaltungen werden wir die grundsätzlichen, a priori erkannten Argumente zur Wahl der Stromart praktisch anerkannt

sehen, und können hierauf zu einer allgemein gültigen Schlußfolgerung über die Wahl der Stromart für größere elektrische Bahnen gelangen.

I. Stromart und Energieübertragung.

3. Für jede Art von Energieübertragung spielt die Größe der zu übertragenden Leistung eine grundlegende Rolle. Bei einer mit elektrischer Betriebskraft zu versorgenden Eisenbahnanlage steht die Größe der zu übertragenden Leistung im Zusammenhang mit der Größe des zu bewältigenden Verkehrs, mit der Linienführung der Bahn und mit der Art des Fahrdienstes. Der zu bewältigende Verkehr wird zahlenmäßig erfaßt durch den sog. Jahresverkehr Q in Tonnenkilometern (tkm) des Gesamtzugsgewichtes. Bei 8760 Stunden des Jahres folgt mit

$$P = \frac{Q}{8760} \quad (1)$$

der Verkehr in Tonnenkilometern für 1 Stunde (h), also eine in tkm/h gemessene Größe. Wir bezeichnen mit \bar{z} die durchschnittliche Zugkraft am Radumfang für 1 t Zuggewicht, ausgedrückt in kg/t und entsprechend der von der motorischen Ausrüstung der Züge entwickelten mechanischen Durchschnittsleistung. Damit erhalten wir für die zusammengerechnete durchschnittliche und in Pferdestärken (PS) ausgedrückte mechanische Leistung \bar{L} am Radumfang, bezogen auf sämtliche Züge; den Betrag:

$$\bar{L} = \frac{P \cdot \bar{z}}{270}$$

Indem man P durch die wirkliche oder fiktive durchschnittliche Zugzahl \bar{n} ausdrückt, nämlich die Zahl der auf der Strecke befindlichen Züge mit einer kommerziellen durchschnittlichen Geschwindigkeit von \bar{v} Kilometern in der Stunde

und mit einem durchschnittlichen Gesamtgewichte von \bar{G} Tonnen, und

$$P = \bar{n} \cdot \bar{G} \cdot \bar{v}$$

setzt, folgt:

$$\bar{L} = \frac{\bar{n} \cdot \bar{G} \cdot \bar{v} \cdot \bar{z}}{270}.$$

Neben der auf diese Weise ermittelten Durchschnittsleistung am Radumfang aller Züge zusammen muß aber auch die in einem bestimmten Zeitpunkt auftretende Maximalleistung am Radumfang aller auf der Strecke befindlichen Züge bekannt sein. Offenbar ist der entsprechende Ausdruck für diese mit L_{max} bezeichnete Leistung ähnlich gebildet, wie der vorhin entwickelte Ausdruck \bar{L} ; wir haben nur den geänderten Größen der Zugzahl, des Gewichtes eines Zuges, der Geschwindigkeit und der Zugkraft pro Tonne den Index m anzufügen und dürfen schreiben:

$$L_{max} = \frac{n_m \cdot G_m \cdot v_m \cdot z_m}{270}.$$

Bei der elektrischen Energieübertragung handelt es sich indessen nicht um die Leistungen \bar{L} und L_{max} am Radumfang, sondern um die Leistungen elektrischer Anlagenteile

$$\frac{1}{\eta} \cdot \bar{L} \quad \text{sowie} \quad \frac{1}{\eta_m} \cdot L_{max}$$

bei Benutzung richtig verstandener Wirkungsgrade $\bar{\eta}$ und η_m .

Es ist nun eine Eigentümlichkeit des Bahnbetriebes, daß das Verhältnis der maximalen zur mittleren mechanischen Leistung im Zusammenhang mit der Größe des Jahresverkehrs eine gewisse Gesetzmäßigkeit aufweist, die übrigens nach den Prinzipien der Wahrscheinlichkeitsrechnung durchaus nahe liegend erscheint. Dieses Verhältnis, das sog. Schwankungsverhältnis der Leistung, ergibt sich zunächst für den Radumfang, für den es den Ausdruck erhält:

$$k = \frac{L_{max}}{\bar{L}} = \frac{n_m \cdot G_m}{\bar{n} \cdot \bar{G}} \cdot \frac{v_m \cdot z_m}{\bar{v} \cdot \bar{z}}.$$

Mit Hilfe der Abkürzungen

$$\frac{n_m \cdot G_m}{\bar{n} \cdot \bar{G}} = k_1 \quad \text{sowie} \quad \frac{v_m \cdot z_m}{\bar{v} \cdot \bar{z}} = k_2$$

zerlegt sich der Verhältniswert k in das Produkt der zwei Einzelverhältnisse k_1 und k_2 gemäß

$$k = k_1 \cdot k_2,$$

wobei also k_1 das Schwankungsverhältnis des Brutto-Gesamtgewichtes und k_2 das Schwankungsverhältnis der Einheitsleistungen pro Tonne darstellt. Der Zähler des Verhältnisses k_1 hat den Charakter eines Momentangewichtes, der Nenner den eines Durchschnittgewichtes. Analog ist der Zähler von k_2 eine Momentan-Einheitsleistung, der Nenner von k_2 eine durchschnittliche Einheitsleistung. Durch die Wahrscheinlichkeitsrechnung a priori, wie auch aus der Betrachtung umfangreicher Projektrechnungen a posteriori, läßt sich feststellen, daß das Verhältnis k_2 von der Verkehrsgröße einer einzelnen Bahnlinie oder eines umfangreichen Netzes nur wenig beeinflußt wird, während k_1 dagegen ausgesprochen mit der Verkehrsgröße der Linie oder des Netzes variiert, so daß dann auch k dieselbe Variation erkennen läßt. Durch k_2 wird im Verhältnis k die Eigenart der Linienführung und des Fahrdienstes zum Ausdruck gebracht. Betrachtet man eine große Zahl Linien, sowie vollständiger Netze von sehr verschiedener räumlicher Ausdehnung, also auch stark verschiedenem Jahresverkehr, dagegen von ähnlicher Ausnutzung der Bahnanlage, die sich zahlenmäßig durch den Quotienten des Verkehrs P und der (in Kilometern anzugebenden) Streckenlänge oder Netzgröße l , die sogenannte Verkehrsdichte

$$p = \frac{P}{l} \quad (2)$$

ausdrücken läßt (die also in Tonnen pro Stunde erscheint), so erkennt man, daß k mit wachsendem Q langsam abnimmt und für sehr große Werte von Q der Zahl 3 nahe kommt, wie dies für normalspurige Adhäsionsbahnen mit mittelgroßer Verkehrsdichte auf S. 6 in Abb. 1 veranschaulicht ist.

Die Leistungsschwankung k am Radumfang kann nun in ein für die Behandlung der elektrischen Energieübertragung brauchbares Schwankungsverhältnis an einem innerhalb der eigentlichen elektrischen Anlage liegenden Orte der Energiewanderung

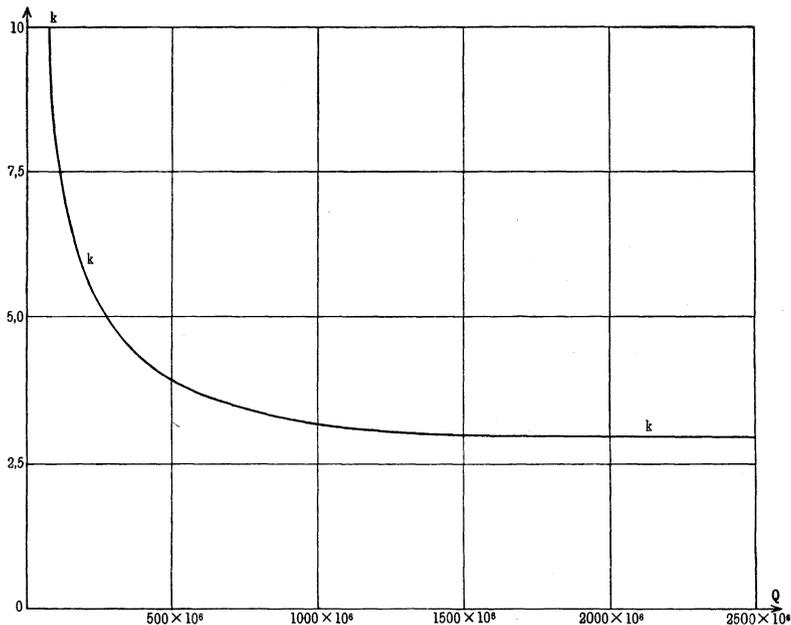


Abb. 1. Abhängigkeit des Schwankungsverhältnisses k vom Jahresverkehr Q .

übergeführt werden, wozu die bereits eingeführten Wirkungsgrade $\bar{\eta}$ und η_m zu benutzen sind. Wird das derart definierte Schwankungsverhältnis mit K bezeichnet, so folgt:

$$K = \frac{\frac{1}{\eta_m} \cdot L_{max}}{\frac{1}{\bar{\eta}} \cdot \bar{L}} = \frac{\bar{\eta}}{\eta_m} \cdot \frac{L_{max}}{\bar{L}} = \frac{\bar{\eta}}{\eta_m} \cdot k = \frac{\bar{\eta}}{\eta_m} \cdot k_1 \cdot k_2.$$

Durch Einführung des Wirkungsgradverhältnisses

$$k_\eta = \frac{\eta_m}{\bar{\eta}},$$

dessen Zähler auf einen Momentanwert, dessen Nenner auf

Durchschnittswerte Bezug nimmt, entsprechend den für k_1 und k_2 getroffenen Begriffsbestimmungen, folgt weiter:

$$K = \frac{1}{k_\eta} \cdot k_1 \cdot k_2.$$

Nun ist stets

$$k = k_1 \cdot k_2 > 1 \quad \text{und} \quad k_\eta > 1,$$

und allgemein gilt

$$K < k.$$

Im allgemeinen ist aber K nur um wenige Prozente kleiner als k .

Es sind die Größen k und k_η in etwelchem Maße abhängig von der Stromart des elektrischen Bahnbetriebes. Diese Abhängigkeit, die später noch etwas näher zu betrachten sein wird, macht sich natürlich auch bei den Werten K geltend; indessen ist diese Abhängigkeit zahlenmäßig unbedeutend.

Um über die Größenordnung der zu übertragenden Leistungen $\frac{1}{\eta} \cdot \bar{L}$ und $\frac{1}{\eta_m} \cdot L_{max}$ aufgeklärt zu werden, bediene man sich auf Grund des zu bewältigenden Verkehrs P der Beziehung:

$$\frac{1}{\eta} \cdot \bar{L} = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{P \cdot \bar{z}}{270},$$

wobei man für normalspurige Adhäsionsbahnen in erster Annäherung mit

$$\bar{z} = 8 \text{ bis } 12 \text{ kg/t}$$

rechnen darf; die kleineren Werte \bar{z} kommen in Betracht für Nebenbahnen, die größeren für die rascher fahrenden Hauptbahnen.

Den Wert k kann man für den dem vorliegenden Verkehr P entsprechenden Jahresverkehr Q der Abb. 1 entnehmen, und wegen $K \approx k$ ergibt sich dann:

$$\frac{1}{\eta_m} \cdot L_{max} = K \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \bar{L}.$$

Zunächst ist es natürlich noch unbestimmt, mit welchen leitungstechnischen Anordnungen die am Radumfang benötigten

Leistungen \bar{L} und L_{max} vom energiespendenden Kraftwerk aus durch die verschiedenen elektrischen Anlagenteile hindurch bis in die Triebfahrzeuge hinein übertragen werden; indessen ist sofort ersichtlich, daß größere elektrische Bahnen auch größere Leistungen $\frac{1}{\eta} \cdot \bar{L}$ und $\frac{1}{\eta_m} \cdot L_{max}$ aufweisen werden, zu deren Übertragung ohne weiteres hohe oder höhere Übertragungsspannungen nötig werden. Von den Anordnungen des Fahrdienstes, also von der Bemessung der Größen \bar{n} , \bar{G} und \bar{v} , sowie von der Eigenart der Linienführung hängt es dann weiter ab, welche durchschnittlichen und maximalen Leistungen an die einzelnen Züge oder Einzelfahrzeuge aus der Fahrleitungsanlage unmittelbar abgegeben werden müssen.

4. Bei der Klassifizierung der verschiedenen Systeme elektrischer Energieübertragung bedient man sich mit Vorliebe der Einteilung in sogenannte „direkte“ und in sogenannte „indirekte“ Stromverteilungssysteme. Für Betriebe, bei denen die maßgebenden Energieverbraucher notwendigerweise in Parallelschaltung liegen, wie gerade auch bei der elektrischen Zugförderung, ist das Stromverteilungssystem ein direktes oder indirektes, je nachdem die Spannung und die Stromart der Energieverbraucher und des oder der Kraftwerke übereinstimmen oder nicht. Die letzte Kategorie, also die indirekte Stromverteilung, umfaßt die beiden Einzelfälle, daß Energieverbraucher und Kraftwerke sich entweder nur in den vorkommenden Höchstspannungen oder außerdem auch noch in der maßgebenden Stromart unterscheiden. Die indirekte Stromverteilung bedingt demnach Unterwerke, in denen entweder nur die Spannung, oder sowohl Spannung als auch Stromart umgewandelt wird; solche Unterwerke bilden für die mit Strom zu versorgenden Bahnlagen Hauptspeisepunkte, neben denen als weitere Hauptspeisepunkte noch das oder die Kraftwerke dienen können. Bei direkter Stromverteilung sind als Hauptspeisepunkte nur das oder die Kraftwerke selbst zu betrachten, wobei immerhin, im Falle von Gleichstrombahnen, ein vorgeschobenes Akkumulatoren-

Unterwerk unter Umständen auch die Rolle eines Hauptspeisepunktes spielen kann, und das Stromverteilungssystem gleichzeitig doch noch als ein „direktes“ angesprochen werden darf. Als Hauptspeisepunkte hat man also stets solche Kraftwerke oder Unterwerke zu bezeichnen, die, unter Zuhilfenahme von Maschinen, Transformatoren oder Akkumulatoren, einzeln oder zusammen angeordnet, Strom unter derjenigen Spannung an die Bahnlinien abgeben, die den energieverbrauchenden Triebfahrzeugen von der Fahrleitungsanlage unmittelbar mitgeteilt und daher zweckmäßig mit dem Namen „Fahrspannung“ bezeichnet wird.

5. Die Höhe der in den Hauptspeisepunkten für die Speisung der Fahrleitungsanlage bereit gestellten Fahrspannung bildet nun geradezu eines der wesentlichsten Merkmale der verschiedenen, für die elektrische Zugförderung benutzten Stromsysteme. Für die Wahl der Fahrspannung sind maßgebend die Rücksichten auf die Fahrleitungsanlage selbst, sowie auch Rücksichten auf die Ausrüstung der Triebfahrzeuge. Diese letzteren Rücksichten gehören jedoch nur insoweit in die vorliegende Erörterung der Beziehungen zwischen der Stromart und der Energieübertragung an sich, als das Maß der für die Triebfahrzeuge zulässigen Spannungsschwankungen auf die Höhe der Fahrspannung einwirkt. Hier ist die Fahrspannung vor allem vom Standpunkte der Fahrleitungen bei verschiedenen elektrischen Betriebssystemen zu betrachten. Die Bauarten von Fahrleitungen, die hier in Betracht kommen, sind einerseits Fahrleitungen mit Stromschienen in der Nähe der Bahngleise (sogenannte dritte und vierte Schienen), sowie andererseits einpolige und zweipolige Oberleitungssysteme.

Die meistens als sogenannte „dritte Schienen“ ausgeführten Stromschienen für die Stromhinleitung — während für die Stromrückleitung das Bahngleise dient — sind für Gleichstrombahnen mit Fahrspannungen von meistens 500 bis 800 Volt, neuerdings in Amerika bis zu Fahrspannungen von 2400 Volt ausgebildet worden. Grundsätzlich muß die Nähe

des Bahnoberbaues als erschwerend für die Durchführbarkeit einer ausreichenden, keinen Zufälligkeiten ausgesetzten Isolation betrachtet werden; es muß auch darauf hingewiesen werden, daß Personen, die das Geleise begehen, durch diese Leitungsanordnungen in Gefahr kommen. Die bei Dreileiter-Gleichstrombahnen zuweilen benutzte sogenannte „vierte“ Schiene neben der „dritten“ weist die Nachteile dieser Bauart in verstärktem Maße auf. Es muß deshalb die Anlage von Stromschienen stets zur Wahl von wesentlich niedrigeren Fahrspannungen führen, als die Anlage von Oberleitungssystemen.

Das Leitungssystem der einpoligen Oberleitung ist bereits für Spannungen bis zu rund 22000 Volt im Versuchsbetriebe, 16000 Volt im regelmäßigen Betriebe als betriebsicher erprobt. Grundsätzlich für Gleichstrom und für Einphasenstrom in gleicher Weise verwendbar, hat es die höchsten Betriebsspannungen bei Einphasenstrom erreicht, und zwar aus Gründen, die besonders mit dem für die Triebfahrzeuge zulässigen Spannungswert zusammenhängen.

Demgegenüber ist das Leitungssystem der doppelpoligen Oberleitung, das für Drehstrom und Dreileiter-Gleichstrom in Frage kommt, grundsätzlich wieder weniger gut isolierbar und daher auch wieder für weniger hohe Spannungen zu gebrauchen, als das vorhergenannte. Für Drehstrom ist es bis auf 6000 Volt praktisch erprobt, während für Gleichstrom besonders mit Rücksicht auf die Triebfahrzeuge an eine so hohe Spannung weniger zu denken ist.

6. Die in der Fahrleitungsanlage unmittelbar auftretenden Spannungs- und Energieverluste sollen aus technischen und wirtschaftlichen Gründen ein gewisses Maß nicht überschreiten, wie dies übrigens bei jeder elektrischen Energieübertragung auf größere Entfernung gefordert werden muß. Die absolute Größe dieser Verluste ist bedingt durch die gewählte Fahrspannung, durch die in gewissen Leitungsanordnungen zu übertragenden Leistungen und durch die Eigenart des Bahnbetriebes. Gerade die Eigenart des Bahnbetriebes

erschwert jedoch die strenge Behandlung dieses Problems, da ein eigentlicher stationärer Zustand der Belastung niemals besteht. Auf den schwankenden Charakter des Energieverbrauches der elektrischen Zugförderung wird indessen hinreichende Rücksicht genommen, wenn die Spannungs- und Energieverluste einerseits im Zeitpunkt des stärksten Verbrauches und anderseits im Zeitpunkt des durchschnittlichen Verbrauches für den in Betracht gezogenen Streckenabschnitt untersucht werden. Daß streng genommen die Fahrleitungen außer Widerstand und Selbstinduktion auch Kapazität und Ableitung an Erde aufweisen, daß außerdem das Leitungsmaterial der „Hinleitung“ aus Kupfer, das der „Rückleitung“ aber aus Eisen besteht, erschwert weiter eine strengere Behandlung der Verhältnisse; es genügt für die praktische Anwendung die Berücksichtigung der Leitungskonstanten des Widerstandes und der Induktivität, wobei jedoch das verschiedene Verhalten der Hinleitung und der Rückleitung einigermaßen berücksichtigt werden muß.

Das allgemeinere Problem der Ermittlung der Spannungsverluste umfaßt auch die Ermittlung der Energieverluste, angesichts der Möglichkeit der Zerlegung der Spannungen in induktive und in induktionslose, also effektbildende Spannungskomponenten. Da der Gleichstrombetrieb als Sonderfall des Wechselstrombetriebes aufgefaßt werden kann, so handelt es sich um die Spannungsverhältnisse von Leiteranordnungen mit beliebig vielen parallelen Leitungen, weil neben den eigentlichen Fahrleitungen auch sogenannte Speiseleitungen und Verstärkungsleitungen in Frage kommen können, die von Wechselströmen durchflossen werden, die stets vollständigen Einphasen- oder Mehrphasensystemen angehören; eine dieser parallelen Leitungen ist durch das Bahngeleise gebildet, während alle anderen meistens durch oberirdische Kupferleitungen gebildet sind. Gleichstrom und Einphasenstrom liefern für einfache oberirdische Hin- und Schienenrückleitung pro Ampère und pro Kilometer Bahnlänge einen totalen Spannungsfall von

$$\varepsilon_t = \sqrt{\varepsilon_s^2 + \varepsilon_r^2},$$

wenn mit ε_s die induktive, mit ε_r die induktionslose Spannungskomponente bezeichnet wird; bei Gleichstrom ist ε_s gleich Null zu setzen, während für Wechselstrom ε_s der verwendeten Frequenz proportional ist; auch auf ε_r ist bei Wechselstrom ein Einfluß der Frequenz im Sinne der Vergrößerung von ε_r mit wachsender Frequenz festzustellen. Soll der Spannungsfall bei Drehstrom mit dem Spannungsfall bei Gleichstrom und bei Einphasenstrom verglichen werden, dann ist er bei Drehstrom zu beziehen auf $\frac{1}{\sqrt{3}}$ Ampère und auf 1 km, damit bei gleichen zu übertragenden Leistungen verglichen werden kann, d. h. es haben bei Drehstrom nur 0,577 Ampère, bei Einphasen- und Gleichstrom dagegen 1,000 Ampère als gleichwertige Übertragungsstromstärken zu gelten. Es kann dann auch bei Drehstrom mit

$$\varepsilon_t = \sqrt{\varepsilon_s^2 + \varepsilon_r^2}$$

gerechnet werden, wobei sich jedoch, wegen der Benutzung des Geleises für die eine der drei Phasen, eine Unsymmetrie des Spannungsfalls ergibt, die indessen durch Bildung eines Mittelwertes genügend genau ausgeglichen wird.

Für eingleisige Normalspur mit Gesamtkupferquerschnitten der Fahrleitung von 100 mm^2 in einem oder in zwei Fahrdrähten, bei Annahme von 15 Per./sec bei Wechselstrom und bei Drehstrom, gelten vergleichsweise folgende Werte:

$$\varepsilon_t = 0,21 \frac{\text{Volt}}{\text{Amp.km}} \text{ für Gleichstrom } (\varepsilon_r = \varepsilon_s = 0,21),$$

$$\varepsilon_t = 0,33 \frac{\text{Volt}}{\text{Amp.km}} \text{ für Einphasenstrom } (\varepsilon_r = 0,24),$$

$$\varepsilon_t = 0,29 \frac{\text{Volt}}{\text{Amp.km}} \text{ für Drehstrom } (\varepsilon_r = 0,26).$$

Mit wachsender Frequenz macht sich die Vergrößerung von ε_t besonders bei der Oberleitung, die Vergrößerung von ε_r besonders im Geleise geltend. In den angegebenen Werten für ε_t und für ε_r kommt ein gewisser Unterschied der Stromart übrigens schon wohl ausgeprägt zum Ausdruck. Indessen

bilden diese Werte, für sich betrachtet, keinen wesentlichen Gesichtspunkt für die Systemwahl.

Die damit festgelegte absolute Größe der Verluste für Einheitsstromstärken in gewissen, praktisch bedeutungsvollen Leitungsanordnungen dienen dazu, die Verluste selbst für die in Betracht kommenden Leistungen und Fahrspannungen zu berechnen, insbesondere die Maxima der Spannungsverluste, die dann bei der vorausgesetzten Fahrspannung eine gewisse Spannungsschwankung, also einen relativen, in Prozenten der Fahrspannung ausdrückbaren maximalen Spannungsfall darstellen, dessen Zulässigkeit einer besonderen Prüfung bedarf.

7. Das Kriterium für den in den Fahrleitungsanlagen zulässigen maximalen Spannungsfall bildet die Empfindlichkeit der Triebfahrzeuge gegen die zu erwartenden Spannungsschwankungen. Darin weisen die verschiedenen Stromarten, die für die unmittelbare Speisung von Triebfahrzeugen in Betracht kommen, gewisse Eigenheiten auf, die jetzt angegeben werden sollen.

Gleichstrom-Triebfahrzeuge werden in der langen Praxis des Gleichstrom-Bahnbetriebes fast ausnahmslos mit Reihenschlußmotoren ausgerüstet, die sich auch beim Auftreten verhältnismäßig bedeutender Spannungsschwankungen bewährt haben; Spannungsfälle von 20 Proz. und bis auf 30 Proz. der Fahrspannung kommen auf Gleichstrombahnen recht häufig vor. Mit dem Bahnbetrieb sind derartige Schwankungen deshalb verträglich, weil das vom Motor abgebbare maximale Drehmoment vom Spannungswerte so gut wie unabhängig ist, während auf den der Spannungsschwankung entsprechenden Fall der Drehzahl bei der Aufstellung der Fahrpläne leicht Rücksicht genommen werden kann. Nachteilig ist allerdings die Abhängigkeit dieser Schwankung von der zufälligen Belastung der Züge, so daß eine obere Grenze für den Betrag der Schwankungen unbedingt eingehalten werden muß.

Einphasenstrom-Triebfahrzeuge verwenden heute so gut wie ausschließlich den Einphasen-Reihenschlußmotor, der sich ähnlich verhält, wie der Gleichstrom-Reihenschlußmotor;

infolge seiner Induktivität ist er allerdings in etwas weniger hohem Grade spannungsunempfindlich. Da jedoch auf den Einphasen-Triebfahrzeugen die Spannung stets mittels Transformatoren reguliert wird, so ist das Einphasen-Triebfahrzeug dadurch wieder weniger spannungsempfindlich als das Gleichstrom-Triebfahrzeug, solange nicht die Leistungsfähigkeit der Transformatorenanlage überschritten wird.

Für Drehstrom-Triebfahrzeuge, die bisher ausschließlich mit Drehstrom-Induktionsmotoren betrieben worden sind, ist die Spannungsregelung auf dem Fahrzeug von besonderer Tragweite. Beim Drehstrom-Induktionsmotor ist nämlich, im Gegensatz zum Reihenschlußmotor irgend einer Stromart, das maximal erhältliche Drehmoment unmittelbar durch das Quadrat der zugeführten Spannung bestimmt, so daß bei verminderter zugeführter Spannung eine erhebliche Verminderung des erreichbaren Drehmoments und die Gefahr des Steckenbleibens eines Zuges eintritt, wenn nicht durch eine auf dem Triebfahrzeug angeordnete, besonders leistungsfähige Spannungsregulierung nachgeholfen werden kann.

Unter Berücksichtigung der aufgeführten Verhältnisse der Empfindlichkeit verschiedener Fahrzeugausrüstungen gegen einen Spannungsfall in den Fahrleitungsanlagen müssen für größere elektrische Bahnen, die nicht an die äußerste Grenze des Zulässigen gehen dürfen, folgende Ansätze des normal zulässigen Spannungsfalls aufgestellt werden:

Bei Gleichstrom- und Einphasenstrom-Betrieb:

$$y = 17,5 \text{ Proz.},$$

bei Drehstrom-Betrieb:

$$y = 15,0 \text{ Proz.},$$

wobei also das Zeichen y für den normal zulässigen Spannungsfall, ausgedrückt in Prozenten der Fahrspannung am Speisepunkt, eingeführt sein möge.

8. Im Zusammenhang mit der Beanspruchung der Fahrleitungsanlage, und also in etwelchem Maße auch mit der Bemessung der Fahrspannung selbst, steht die verhältnismäßige

Scheinaufnahme der Triebfahrzeuge der verschiedenen elektrischen Systeme für übereinstimmende Fahrleistungen, samt dem, auf Grund der bereits erörterten Verhältnisse, in der Fahrleitungsanlage selbst hinzutretenden Anteil am Scheinverbrauch; wir haben also die Wirkungsgrade und Leistungsfaktoren der im Betrieb befindlichen Triebfahrzeuge samt den sie speisenden Fahrleitungen in Betracht zu ziehen, wobei sich für die verschiedenen Stromarten der elektrischen Zuförderung offenbar gewisse charakteristische Werte einstellen werden. Die derart eingeführten Wirkungsgrade und Leistungsfaktoren beziehen sich also auf die Leistungen an den Hauptspisepunkten der Fahrleitungsanlage. Diese Leistungen drücken wir aus für die im Abschnitt 3 eingeführten Verkehrs- und Netzgrößen. Durch

$$p = \frac{P}{l} \quad (2)$$

haben wir für eine in Kilometern gemessene Netzgröße oder Streckenlänge l die Verkehrsdichte in Tonnen pro Stunde eingeführt. Nach Abb. 2 wird die Streckenlänge l im allge-

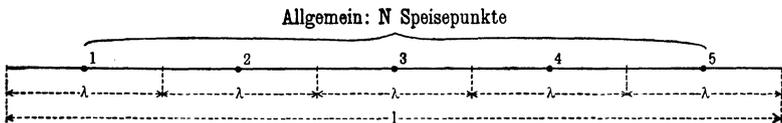


Abb. 2. Unterteilung einer Bahnstrecke in N Einzelstrecken mit N Hauptspisepunkten.

meinen durch N Spisepunkte bedient, die je in der Mitte von N Streckenabschnitten gleicher Länge λ liegen und je λ Kilometer voneinander entfernt sind. Dabei ist also

$$l = N \cdot \lambda. \quad (3)$$

Für jeden Spisepunkt muß dann mit einer durchschnittlichen Leistung am Radumfang der von ihm versorgten Triebfahrzeuge von

$$\frac{p \cdot \lambda \cdot \bar{z}}{270} \text{ Pferdestärken}$$

gerechnet werden, wenn mit \bar{z} wiederum die durchschnittliche

Zugkraft am Radumfang, gemäß Abschnitt 3, bezeichnet wird. Am Speisepunkt selbst entspricht ihr die in Watt ausgedrückte durchschnittliche Leistung

$$\overline{W}_s = \frac{1}{\overline{\eta}_s} \cdot p \cdot \lambda \cdot \bar{z} \cdot \frac{9,81}{3,6}, \quad (4)$$

wenn mit $\overline{\eta}_s$ der durchschnittliche Wirkungsgrad vom Radumfang bis zum Speisepunkt eingeführt wird. Mit Hilfe des Schwankungsverhältnisses k am Radumfang folgt die Maximalleistung in Watt am Speisepunkt zu

$$W_{s \max} = \frac{1}{\eta_{sm}} \cdot k \cdot p \cdot \lambda \cdot \bar{z} \cdot \frac{9,81}{3,6},$$

wobei η_{sm} den bei Eintreffen der Maximalleistung maßgebenden Wirkungsgrad vom Radumfang bis zum Speisepunkt bedeutet. Es folgt natürlich

$$\frac{W_{s \max}}{\overline{W}_s} = \frac{\frac{1}{\eta_{sm}}}{\frac{1}{\overline{\eta}_s}} \cdot k = \frac{k}{k_\eta} = K,$$

gemäß unseren früheren Definitionen. Die den Leistungen \overline{W}_s und $W_{s \max}$ entsprechenden Scheinleistungen sind bei Einführung sinngemäß verstandener Leistungsfaktoren:

$$\begin{aligned} \overline{J}_s \cdot \overline{E}_s &= \frac{\overline{W}_s}{\cos \overline{\varphi}_s} \\ J_{sm} \cdot E_{sm} &= \frac{W_{s \max}}{\cos \varphi_{sm}} \end{aligned} \quad (5)$$

wobei die Gleichheit der in Volt gemessenen Spannungen

$$E_{sm} = \overline{E}_s = E_s$$

eine Spannungsregelung am Speisepunkt voraussetzt, während \overline{J}_s und J_{sm} für Gleichstrom und Einphasenstrom direkt die Stromstärken in Ampère, für Drehstrom dagegen das $\sqrt{3}$ -fache des Leitungsstromes in Ampère bedeuten sollen, um die Ausdrücke allgemein brauchbar zu machen. Für verschiedene Stromarten werden nun die eingeführten Wirkungsgrade und Leistungs-

faktoren unterschiedliche Werte aufweisen. Insbesondere ist natürlich für Gleichstrom sowohl $\cos \bar{\varphi}_s$, als auch $\cos \varphi_{sm}$ gleich 1 zu setzen. Weiter kann die allgemein gültige Bemerkung ausgesprochen werden, daß der Einfluß der Fahrleitungsanlage auf den Leistungsfaktor so gut wie bedeutungslos ist, während ihr Einfluß auf die Wirkungsgrade sich nach der induktionslosen Komponente des maßgebenden Spannungsfalls γ richtet. Der Zahlenwert der Wirkungsgrade vom Radumfang bis zum Hauptspeisepunkt wird, angesichts der für die verschiedenen Stromarten nur unbedeutend variierenden Größe γ , wesentlich von der Wirkungsweise der benutzten Fahrzeugmotoren beeinflusst sein, von der dann auch die Leistungsfaktoren am Speisepunkt in entscheidender Weise abhängig sind. Die Wirkungsgrade der Fahrzeugmotoren variieren nun besonders mit der Benutzungsart und mit den Belastungen; für Motoren verschiedener Stromarten sind sie bei Abgabe gleicher Zugkräfte und Geschwindigkeiten wenig verschieden, wenn es sich um die der normalen Leistung entsprechenden Daten handelt; bei Zugkräften und Geschwindigkeiten, die von den entsprechenden Normaldaten abweichen, können dagegen, je nach der Art der Regelung und nach den besonderen Verhältnissen jedes Motorsystems, ziemlich erhebliche Abweichungen eintreten. Im Zusammenhang mit dem Wirkungsgrad der Motoren selbst steht auch der Wirkungsgrad der Getriebe zwischen Motorwelle und Radumfang, der bei Übersetzungen 1:1 am größten, bei andern Übersetzungen also kleiner ist. Da jedoch die Motordrehzahlen niemals kleiner als die Triebzahnradzahlen sein werden, und da weiter schnellaufende Motoren im allgemeinen günstigere Wirkungsgrade aufweisen, als langsam laufende, so besteht zwischen den Wirkungsgraden der Motoren selbst und den Wirkungsgraden der Getriebe ein Ausgleich, der dahin wirkt, daß für gegebene Geschwindigkeiten und Zugkräfte am Radumfang der Totalwirkungsgrad zwischen Radumfang und Motorklemmen im allgemeinen kaum davon abhängt, ob die Motoren als sogenannte langsam laufende oder als sogenannte schnellaufende Maschinen ausgeführt werden. Demgegenüber ist aber bei Motoren für

Drehstrom und Einphasenstrom die Drehzahlbemessung für die Motoren von Einfluß auf ihren Leistungsfaktor, und zwar im Sinne eines günstigeren Verhaltens der schnellaufenden Motoren. Für die Triebfahrzeuge ist endlich noch der Wirkungsgrad der außerhalb der Motoren liegenden Regulierorgane, allfälliger Leistungstransformatoren, sowie der weiteren Nebenapparatur in Betracht zu ziehen. Maßgebend ist dabei die Regulieranordnung, die für Gleichstrom und Drehstrom nur für bestimmte Geschwindigkeitsstufen wirtschaftlich ausfällt, da beim praktischen Betriebe nur die Serienparallelregelung bei Gleichstrom, und nur die Pol- und Kaskadenumschaltung bei Drehstrom in Betracht zu ziehen sind; zwischen diesen Geschwindigkeitsstufen müssen zur Regelung Widerstände gebraucht werden, was die Wirkungsgrade ungünstig beeinflusst. Dagegen bedient sich der Einphasenbetrieb der transformatorischen Regelungsart, die zu kleineren Energieverlusten führt, wenn eine stetige Regelung über ein größeres Drehzahlgebiet in Betracht gezogen werden muß. Durch Leistungstransformatoren und durch Transformatoren überhaupt werden die Wirkungsgrade und Leistungsfaktoren der Fahrzeuge nur in unwesentlichem Maße beeinflusst.

Der Vergleich der verschiedenen Stromarten unter sich, in bezug auf die in ihren einzelnen Elementen gewürdigten Werte der Wirkungsgrade vom Radumfang bis zum Speisepunkt und der Leistungsfaktoren am Speisepunkt, zeigt nun, daß für das Eintreffen der Maximalleistung am Speisepunkt keine allgemein gültigen Zahlenwerte gegeben werden können, sondern daß sich von Bahn zu Bahn stark wechselnde Verhältnisse geltend machen. Andererseits können für größere elektrische Bahnen hinlänglich zutreffende allgemeine Vergleichszahlen für $\bar{\eta}_s$ und $\cos \bar{\varphi}_s$ gegeben werden, und zwar:

$$\left. \begin{array}{l} \bar{\eta}_s = 0,82 \\ \cos \bar{\varphi}_s = 1,00 \end{array} \right\} \text{für Gleichstrom}$$
$$\left. \begin{array}{l} \bar{\eta}_s = 0,73 \\ \cos \bar{\varphi}_s = 0,68 \end{array} \right\} \text{für Drehstrom,}$$
$$\left. \begin{array}{l} \bar{\eta}_s = 0,72 \\ \cos \bar{\varphi}_s = 0,68 \end{array} \right\} \text{für Einphasenstrom.}$$

9. Wir sind nun in der Lage, die Zahl N der Hauptspeisepunkte zu bestimmen, die einer (in Kilometern gemessenen) Bahn-Netzgröße oder Bahn-Streckenlänge l zuzuteilen sind, und gemäß

$$l = N \cdot \lambda$$

den (in Kilometern anzugebenden) Speisepunktabstand λ zu ermitteln. Für die Annahme, die Durchschnittsleistung treffe am Hauptspeisepunkt bei ungünstigster Stellung der Züge ein, folgt, daß die maßgebende Stromstärke \bar{J}_s einseitig in einer Entfernung $\frac{\lambda}{2}$ vom Speisepunkt von den Zügen auf die Fahrleitung übergeht. Sind nun für diesen Zustand y Prozente Spannungsfall mit Rücksicht auf die Arbeitsweise der Fahrzeuge normal zulässig, dann ist

$$\frac{y \cdot E_s}{100} = \bar{J}_s \cdot \varepsilon_t \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (6)$$

zu setzen. Durch die Vereinigung der Gleichungen (4), (5) und (6) folgt nun die Beziehung:

$$\lambda = \frac{E_s}{\sqrt{p}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{100}{2y} \cdot \frac{9,81 \cdot \bar{z} \cdot \varepsilon_t}{3,6 \cdot \bar{\eta}_s \cdot \cos \bar{\varphi}_s}}} = \frac{E_s}{\sqrt{p}} \cdot \frac{1}{C},$$

die wir als analytischen Zusammenhang zwischen den Größen λ , E_s , p und einer Systemkonstanten C zu betrachten haben. Diese Beziehung darf als eine wichtige Grundlage der Systemerörterungen vom Standpunkt der allgemeinen elektrischen Energieübertragung hingestellt werden. Für die Systemkonstante

$$C = \sqrt{\frac{100}{2y} \cdot \frac{9,81 \cdot \bar{z} \cdot \varepsilon_t}{3,6 \cdot \bar{\eta}_s \cdot \cos \bar{\varphi}_s}}$$

erhalten wir dann bei der Annahme

$$\bar{z} = 12$$

und bei Benutzung der in den vorhergehenden Abschnitten 6, 7, 8 für ε_t , für y , für $\bar{\eta}_s$ und für $\cos \bar{\varphi}_s$ mitgeteilten Zahlen die einfachen Werte

$$C \approx 5,0 \text{ für Gleichstrom,}$$

$$C \approx 8,0 \text{ für Drehstrom und für Einphasenstrom}$$

bei 15 bis 16 Per./sec.

Natürlich gelten diese einfachen Werte, in denen der Unterschied des Verhaltens von Drehstrom und Einphasenstrom vollkommen verwischt erscheint, streng genommen nur für eine ganz bestimmte Anordnung des Bahngeleises mit einem ebenfalls bestimmten Gesamtkupferquerschnitt der Fahrdraht- und Verstärkungsleitungen. Bei anderen Verhältnissen als den hier vorausgesetzten ändern sich die Werte C entsprechend; da jedoch die Größen \bar{z} , ε_t , γ , $\bar{\eta}_s$, $\cos \bar{\varphi}_s$ im Ausdruck für C nur in der Potenz $\frac{1}{2}$ auftreten, so ändert sich C bei einer Änderung dieser Größen prozentual je nur halb so viel, als jene Größen selbst sich prozentual ändern, wobei es sich übrigens nur um kleinere Änderungen handeln kann. Infolgedessen sind die angeschriebenen Werte für C in weiten Grenzen als unveränderlich zu betrachten; daher ist die Beziehung

$$\lambda = \sqrt{p} \cdot \frac{1}{C} \quad (7)$$

zur Diskussion der Systemwahl auf Grund der Größen l , E_s und p in hohem Maße geeignet.

In Abb. 3 bringen wir diese Beziehung auch graphisch zum Ausdruck, indem wir die Größe λ in Abhängigkeit von p für die Fahrspannungen 625, 1250, 2500, 5000 Volt bei Gleichstrom und für 1000, 2000, 4000, 8000, 16000 Volt bei Wechselstrom (Drehstrom, sowie Einphasenstrom) durch Kurven darstellen. Es dürfen also für gleiche Fahrspannung und gleichen Verkehr die Speisepunkte bei Gleichstrom im Verhältnis

$$\frac{8,0}{5,0} = 1,60,$$

was unseren Annahmen entspricht, weiter auseinander liegen als bei Drehstrom und Einphasenstrom. Für andere Annahmen wird dieses Verhältnis nur unwesentlich geändert erscheinen. Auf alle Fälle kommt aber scharf und deutlich die Überlegenheit des Gleichstroms über die anderen Stromarten auf Grund des Zusammenhanges der Größen λ , E_s und p zum Ausdruck. Je größer nämlich λ für einen bestimmten Wert von p ausfällt, desto kleiner wird die Gesamt-

zahl der Speisepunkte und demgemäß, *ceteris paribus*, das Anlagekapital und die Betriebskosten. Wird die Vergrößerung von λ bei gegebenem p durch die Vergrößerung der Fahrspannung E_s bewirkt, so ist zu beachten, daß die Spannungserhöhung mit einer Verteuerung der Anlagen verknüpft ist, so daß ohne weiteres klar wird, daß unsere Beziehung für sich allein das Problem der Stromwahl noch nicht entscheidend beeinflusst. Dagegen lehrt unsere Beziehung einwandfrei, daß

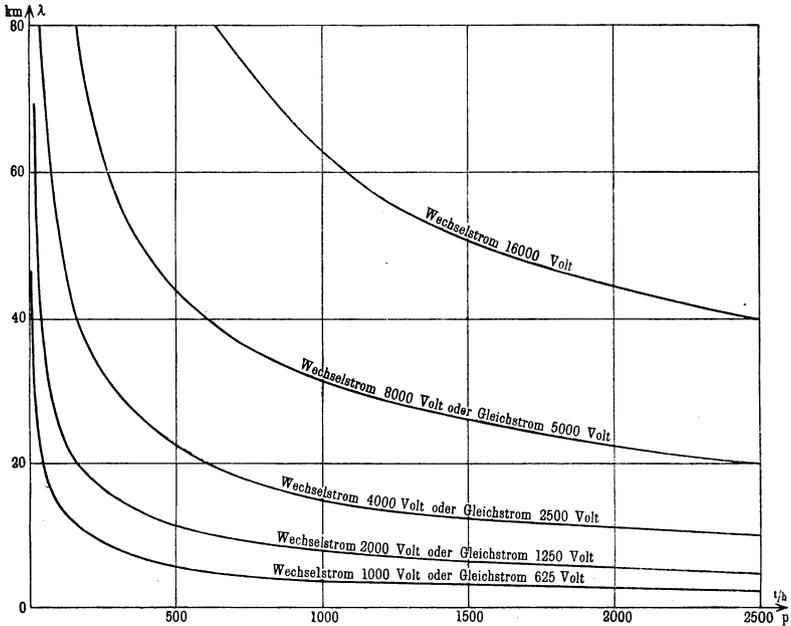


Abb. 3. Abstand der Hauptspeisepunkte bei verschiedener Verkehrsdichte, Stromart und Fahrspannung.

bei größerem Verkehr eine hohe Fahrspannung unbedingt gefordert werden muß, wenn nicht die Zahl der Hauptspeisepunkte sehr groß sein soll. Verkehrsgrößen mit

$$p < 100 \text{ t/h}$$

sind bei schwach befahrenen Nebenbahnstrecken anzutreffen, während

$$p > 2000 \text{ t/h}$$

das Kennzeichen stark befahrener Bahnstrecken, ganz besonders aber das Kennzeichen der Stadtschnellbahnen bildet. Größere elektrische Bahnen werden im mindesten ein

$$p > 200 \text{ t/h}$$

aufweisen. Der in unsere Beziehung einzusetzende Wert von p ist um so höher zu bemessen, je sicherer man rechnen will, d. h. je mehr innere Reservekraft vom Hauptspeisepunkt bei außergewöhnlich hoher Beanspruchung der Bahnanlage gefordert wird.

10. Vom Standpunkte der Energiebeschaffung aus erhebt sich nun die wichtige Frage, ob die Hauptspeisepunkte im allgemeinen eigentliche Kraftwerke mit Primärkraftmaschinen oder nur Unterwerke mit Einrichtungen zur allfälligen Energietransformation sein sollen. Die Beantwortung dieser Frage entbehrt jedoch eines spezifisch eisenbahntechnischen Interesses insofern, als sie bei jeder größeren elektrischen Anlage aufgeworfen werden könnte und als solche bereits ihre allgemeine Lösung in dem Sinne gefunden hat, daß aus wirtschaftlichen Gründen eine möglichst niedrige Zahl von Kraftwerken mit Primärkraftmaschinen angestrebt wird. Es werden daher auch größere elektrische Bahnen im allgemeinen nur aus wenigen solchen Kraftwerken mit Energie versorgt werden. Diese Kraftwerke können dann gleichzeitig Hauptspeisepunkte für die von ihnen versorgten Bahnen sein, wenn sie günstig zu den Bahnen liegen; die meisten Hauptspeisepunkte der Bahnen werden jedoch im allgemeinen durch Unterwerke mit Einrichtungen zur Energietransformation gebildet sein. Was nun die Energieübertragung zwischen solchen Unterwerken und den sie speisenden Kraftwerken angeht, so handelt es sich auch hier um ein technisches Problem, das eines spezifisch eisenbahntechnischen Interesses entbehrt, dabei aber doch auch seine „Systemfrage“ hat. Die um die Eigenverluste eines Unterwerkes vergrößerte Leistung W_s muß auf die durch örtliche Verhältnisse bestimmte Entfernung l_f der Fernübertragung mit einem aus technischen und wirtschaftlichen

Gründen festgelegten Leitungstypus bei einem gegebenen zulässigen Effektverlust oder Spannungsverlust übertragen werden. Für die Spannung E_f dieser Fernübertragung führt dies auf eine Beziehung:

$$E_f = C_f \cdot \sqrt{l_f \cdot W_s}, \quad (8)$$

in der C_f wiederum eine Systemkonstante bedeutet, die jedoch zufolge der Möglichkeit sehr großer Variation im Leitungstypus in viel stärkerem Maße von diesem abhängig ist, als es für die Systemkonstante C der Fahrleitung der Fall war. Wenn indessen für die Systeme Gleichstrom, Drehstrom und Einphasenstrom entsprechende und vergleichbare Leitungstypen vorausgesetzt werden, dann wird sich für Gleichstrom wiederum eine kleinere Konstante C_f , für Drehstrom und Einphasenstrom werden sich dagegen wiederum größere, auch wieder ganz oder fast gleiche Konstanten C_f einstellen. Damit folgt auch für dieses Übertragungsproblem eine Überlegenheit des Gleichstroms insofern, als für gleiche Werte l_f und W_s die Übertragungsspannung E_f dabei weniger hoch ausfällt als bei Drehstrom und Einphasenstrom. Für die in Wirklichkeit eintretenden Verhältnisse ergeben sich aber für alle Stromarten so hohe Werte von E_f , daß diese, als hohe Vielfache der entsprechenden zulässigen Fahrspannungen E_s , im allgemeinen bei keinem der Stromsysteme mehr unmittelbar mit der Spannung der Kraftwerksgeneratoren übereinstimmen werden; damit wird aber, wie aus der allgemeinen Praxis der elektrischen Übertragung großer Leistungen auf große Entfernungen genugsam bekannt, das Stromsystem des Gleichstroms gegenüber den Stromsystemen des Drehstroms und des Einphasenstroms nicht mehr wettbewerbsfähig, da dem Gleichstrom eben das Hilfsmittel des Transformators, des ruhenden und fast verlustlos arbeitenden Spannungswandlers für große und größte Leistungen fehlt. Es wird daher im allgemeinen Fall der Energieübertragung zwischen Kraftwerken und Unterwerken diese Übertragung nur mittels Drehstrom oder mittels Einphasenstrom verwirklicht werden, woraus dann auch die Wahl derselben Stromart für die Kraftwerke folgt.

Damit ist aber die Wahl der Stromart in der Fahrleitung, d. h. die Wahl der Stromart der elektrischen Zugförderung an sich, noch keineswegs präjudiziert, da eben in den Unterwerken eine Energietransformation nicht nur hinsichtlich der Spannung, sondern auch hinsichtlich der Stromart in Frage kommen kann. Auf alle Fälle ziehen wir auch die Möglichkeit einer Spannungsregulierung in den Unterwerken in Betracht, um die früher schon vorausgesetzte Konstanz der Fahrspannung E_s in den Hauptspeisepunkten unabhängig vom Spannungsfall in der Energieübertragung aus den Kraftwerken zu gewährleisten. Die Spannung kann sowohl bei reinen Spannungs-Transformations-Unterwerken als auch bei Unterwerken mit Stromumwandlung leicht durch selbsttätig wirkende Vorrichtungen reguliert werden.

11. Wir haben bisher zu unserem Thema der Wahl der Stromart für größere elektrische Bahnen die Gesamtheit derjenigen Argumente betrachtet, die sich aus den Gesetzen der elektrischen Energieübertragung allein ableiten ließen. Für die Übertragung in der Fahrleitungsanlage, d. h. zwischen den fahrenden Zügen sowie Einzelfahrzeugen und den Hauptspeisepunkten, bestehen neben den elektrotechnischen Beziehungen auch besondere eisenbahntechnische Beziehungen, die die für die Systemwahl dieser Übertragung maßgebenden Größen in eine Schlußbeziehung bringen, gemäß unserer Formel (7), die die Systeme des Drehstroms und des Einphasenstroms unter sich als gleichwertig und gegenüber dem System des Gleichstroms als minderwertig erscheinen läßt. Zu genau demselben Schluß würde die Betrachtung der rein elektrotechnischen Beziehungen der Energieübertragung zwischen den Hauptspeisepunkten und den Kraftwerken führen, wenn nicht jetzt schon die Notwendigkeit einer wesentlich höheren Spannung für die Übertragung nach den Speisepunkten als für die Übertragung auf die Fahrleitungen als im allgemeinen zutreffende Erfahrungstatsache zu berücksichtigen wäre. Damit wird aber, in Übereinstimmung mit der allgemeinen Praxis der elektrischen Übertragung großer Leistungen auf große Entfernungen, das System des Gleich-

stroms für die Übertragung zwischen den Hauptspeisepunkten und den Kraftwerken minderwertig gegenüber den Systemen des Drehstroms und des Einphasenstroms. Offenbar führt nun die verschiedene Wertigkeit der Stromsysteme für die beiden Übertragungsgebiete zu dem Schluß, jedem Übertragungsgebiet das dafür hochwertigere Stromsystem zuzuweisen, nämlich dem Übertragungsgebiet zwischen Kraftwerken und Hauptspeisepunkten ein ein- oder mehrphasiges Wechselstromsystem, dem Übertragungsgebiet der Fahrleitungsanlage dagegen das Gleichstromsystem. In diesem Sinne, also anscheinend rein nur aus übertragungstechnischen Gründen, ist in der Systemwahl der kleineren elektrischen Bahnen im allgemeinen entschieden worden. Die Forderung einer Prüfung weiterer Argumente für die Systemwahl tritt jetzt an uns heran.

II. Stromart und Fahrdienst.

12. Da größere elektrische Bahnen stets Adhäsionsbahnen sein werden, die Bewegung der Züge oder Einzelfahrzeuge somit stets auf der Art Kraftübertragung beruht, wie sie beim gleitungslosen Abwälzen der zylindrischen Räder auf der Bahn auftritt, so ergibt sich als eine erste wichtige Beziehung zwischen Stromart und Fahrdienst eine solche zwischen der Stromart und der durch diese allfällig bedingten größeren oder kleineren Adhäsion der Triebfahrzeuge. Damit ein Gleiten der Triebräder während der Fahrt ständig ausgeschlossen bleibt, muß nach der Theorie der Kraftübertragung durch Reibungsräder zwischen der entwickelten Zugkraft Z am Radumfang und dem Achsdruck oder der Achsbelastung G der die Zugkraft Z aufweisenden Triebachse die Beziehung bestehen:

$$Z < \mu \cdot G,$$

in der μ die sog. Reibungszahl für gleitende Reibung bedeutet, die im Eisenbahnwesen auch als „Adhäsionskoeffizient“ bezeichnet wird. Die Kräfte Z und G werden in Kilogrammen

oder auch in Tonnen ausgedrückt. Für ein gegebenes Fahrzeug auf einer gegebenen Bahn ist μ abhängig von der Geschwindigkeit, und zwar in der Weise, daß bei Stillstand in abgerundeter Zahl

$$\mu \approx \frac{1}{5}$$

gesetzt werden kann, während für Geschwindigkeiten von 50 bis 60 km/h etwa

$$\mu \approx \frac{1}{7,5}$$

zu setzen ist. Demgemäß kann bei voller Ausnutzung der Adhäsion bei Stillstand ohne weiteres eine im Verhältnis von

$$\frac{7,5}{5} = 1,5$$

größere Zugkraft am Radumfang aufgebracht werden, als bei Geschwindigkeiten von etwa 50 bis 60 km/h. Die Möglichkeit der Entwicklung einer höheren Zugkraft bei Stillstand als bei rascher Fahrt ist wertvoll im Hinblick auf die Verhältnisse bei der Anfahrt, während welcher von der Fahrzeugausrüstung nicht nur die Zugkraft zur Überwindung der Reibung, sondern auch die Zugkraft zur Massenbeschleunigung aufgebracht werden muß. Demgemäß muß auch von der motorischen Fahrzeugausrüstung eine entsprechende Zugkraftsteigerung bei Stillstand gegenüber der Fahrt bei höherer Geschwindigkeit gefordert werden können. Tatsächlich ist auch diese Zugkraftsteigerung bei Motoren aller Stromarten leicht herstellbar, so daß in dieser Beziehung eine „Systemfrage“ nicht vorhanden ist. Andererseits weisen aber die Motoren verschiedener Stromarten insoweit ein ungleiches Verhalten auf, als während einer Ankerumdrehung des Motors bei Gleichstrom-Bahnmotoren ein absolut gleichbleibendes Drehmoment geliefert wird, von Drehstrom-Bahnmotoren ein Drehmoment, das mit sehr guter Annäherung als gleichbleibend betrachtet werden kann, während das Drehmoment der Einphasenmotoren während einer Ankerumdrehung sich im allgemeinen aus einem gleichbleibenden Mittelwert und aus einem mit doppelter Frequenz

pulsierenden Zusatz-Drehmoment zusammensetzt. Angesichts dieser Unterschiede in der Eigenart der Triebkraft von Motoren verschiedener Stromart ist wiederholt geltend gemacht worden, das Reibungsgewicht (oder „Adhäsionsgewicht“) von Einphasenlokomotiven mit unmittelbar antreibenden Einphasenmotoren müsse erheblich unter demjenigen von Gleichstromlokomotiven und Drehstromlokomotiven vom selben Totalgewichte liegen, weil zufolge der pulsierenden Triebkraft der Einphasenmotoren die Triebräder schon bei verhältnismäßig niedrigen mittleren Zugkräften am Radumfang zu gleiten beginnen müßten. Sowohl für diese Ansicht, als auch für die Antithese, es stehe die Adhäsion der Wechselstromlokomotiven derjenigen der Gleichstromlokomotiven und der Drehstromlokomotiven nicht nach, sind Belege aus der Erfahrung beigebracht worden. Eine klare Vorstellung über die tatsächlichen Verhältnisse läßt sich auf Grund der rechnerischen Untersuchung der elastischen Deformation des Getriebes zwischen Motor und Radumfang einer bei Stillstand anziehenden Lokomotive durchführen, wobei der Einfluß der Stromart verschiedener Bahnmotoren auf die Schwingungen der Zugkraft am Radumfang aus dem Energieaustausch zwischen Elastizität und Massenträgheit leicht festzustellen ist. Das Ergebnis einer solchen Untersuchung lehrt, daß im allgemeinen hinsichtlich der Adhäsion der Fahrzeuge ein verschiedenes Verhalten bei Motoren verschiedener Stromart nicht zu erwarten ist, wobei allerdings bei Einphasenfahrzeugen eine Verschlechterung der Adhäsion bei Übereinstimmung der Schwingungszahl des federnden Antriebsapparates mit der Frequenz der pulsierenden Antriebskraft eintreten könnte, aber durch Erhöhung der Nachgiebigkeit des Antriebsapparates wieder die normale Adhäsion herstellbar ist.

13. Während also der durch die Stromart bedingte konstante oder pulsierende Charakter des Drehmomentes eines Bahnmotors keinen bedeutenden Beitrag zur Systemfrage beizubringen vermag, hat dagegen die Eigenart eines Bahnmotors hinsichtlich der mit der Stromart zusammenhängenden Ab-

hängigkeit der am Radumfang entwickelten Zugkräfte von der Fahrgeschwindigkeit für den Fahrdienst der Bahnen eine geradezu grundlegende Bedeutung; diese Eigenart der Bahnmotoren hinsichtlich ihres Zugkraft - Geschwindigkeitszusammenhanges ist analytisch gegeben durch eine Funktion

$$Z = f(v)$$

zwischen der auf den Radumfang bezogenen Motorzugkraft Z und der Umfangsgeschwindigkeit v der Triebräder; dieser Funktion entspricht die sogenannte „Zugkraft-Geschwindigkeitskurve“ der Bahnmotoren, für die weiter auch die Bezeichnung „mechanische Charakteristik“ gebräuchlich ist, sowie also auch die größere oder geringere Eignung eines Bahnmotors zur Regelung der Fahrgeschwindigkeit.

An die elektrische Zugförderung muß natürlich die Anforderung gestellt werden, daß der als Grundlage des gesamten Verkehrs dienende Fahrplan mit größtmöglicher Regelmäßigkeit und Pünktlichkeit eingehalten wird; er darf durch die zu erwartenden Unregelmäßigkeiten im Verkehr nicht beeinträchtigt werden. Infolgedessen muß jede beliebige Fahrgeschwindigkeit innerhalb möglichst weiter Grenzen bei jeder in Betracht kommenden Zugkraft eingestellt werden können, damit die Fahrzeiten unabhängig von der Zugsbelastung und von der Streckenbelastung eingehalten werden können. Der Fahrplan seinerseits ist aufgebaut auf der Annahme gewisser Geschwindigkeiten für bestimmte Zugsgattungen (Schnellzüge, Personenzüge, Güterzüge) und für gewisse Steigungsgrade. Aus wirtschaftlichen Gründen wird man nämlich nicht für alle Züge gleiche Geschwindigkeiten verlangen, sondern die mit hohen Kosten verbundenen, für das Geleise zulässigen Maximalgeschwindigkeiten nur für Schnellzüge und Personenzüge anwenden, während für Güterzüge im allgemeinen erheblich niedrigere Fahrgeschwindigkeiten vollauf genügen; ebenso wird man auch größere Steigungen stets langsamer befahren lassen als horizontale Strecken, um damit zu kleineren Maximaleffekten für die Zugförderung zu gelangen. Innerhalb der dadurch festgelegten Geschwindigkeitsskala für verschiedene Zugsgattungen

für die Fahrt auf verschiedenen Steigungsgraden muß nun die Fahrzeit vom zufälligen Zuggewicht unabhängig sein und sich die mittlere Zuggeschwindigkeit zur Einholung von Verspätungen ausnahmsweise steigern lassen. Die grundlegende Eigenschaft der Geschwindigkeitsskala, die durch höhere Geschwindigkeiten für horizontale Strecken und herabgesetzte Geschwindigkeiten auf größeren Steigungen festgelegt ist, bedingt für die Bahnmotoren Zugkraft-Geschwindigkeitskurven

$$Z = f(v),$$

bei denen höhere Zugkräfte (Drehmomente) niedrigeren Geschwindigkeiten, also niedrigere Zugkräfte (Drehmomente) höheren Geschwindigkeiten zugeordnet sind. Motoren mit solchen Zugkraftkurven sind bei allen Stromarten verhältnismäßig leicht auszubilden; die verlangte Eigenschaft der Funktion

$$Z = f(v)$$

ist zuerst durch den Reihenschlußmotor für Gleichstrom verwirklicht worden, weshalb in der Folge die betreffende Zugkraft-Geschwindigkeitskurve den Namen „Reihenschluß-Charakteristik“ erhalten hat. Dieselbe Kennlinie ergeben ohne weiteres auch einphasige und mehrphasige Wechselstrommotoren, wenn ihr Rotor mit einem Stromwender ausgerüstet und zum Stator in Reihe geschaltet wird; für Drehstrommotoren wird zwar von dieser Schaltmöglichkeit kein Gebrauch gemacht, sondern vielmehr die Reihenschlußcharakteristik am asynchronen Drehstrommotor durch die Methoden der sogenannten Stufenschaltung (Polumschaltung, sowie Kaskadenumschaltung) zu erreichen gesucht.

Bei Speisung mit einer bestimmten Klemmenspannung liefert nun der Reihenschlußmotor für Gleichstrom und für Einphasenwechselstrom bloß eine einzige Kennlinie:

$$Z = f(v),$$

die wir in der Abb. 4 durch die ausgezogene Kurve wiedergeben. Die Notwendigkeit, den Fahrplan einzuhalten, erfordert jedoch eine ganze Schar solcher Kurven wie die gestrichelten

Linien der Abb. 4. Für Gleichstromfahrzeuge kann eine solche Kurvenschar bei Anwendung der Serienparallelschaltung mehrerer Motoren wenigstens in bestimmten Abstufungen verwirklicht werden; für dazwischenliegende Kennlinien bleibt die Vorschaltung von Widerständen oder die Feldschwächung, falls man sonstige, übrigens allzu komplizierte Mittel außer Betracht läßt, wobei aber Vorschaltwiderstände die Ökonomie

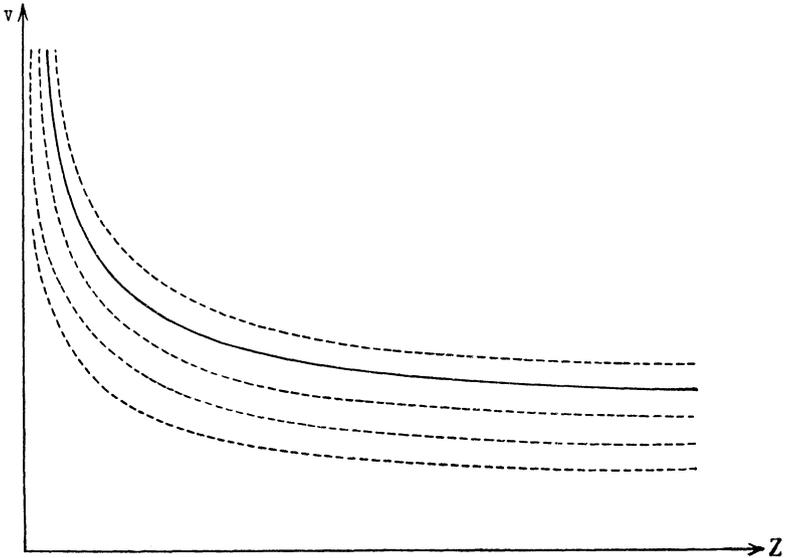


Abb. 4. Kennlinien der Reihenschlußmotoren.

herabsetzen, die Feldschwächung die Einfachheit und Sicherheit beeinträchtigt. Dagegen läßt sich der Einphasenserienmotor auf beliebige Kennlinien leicht, ökonomisch und sicher mit Hilfe eines Reguliertransformators einstellen, der zwar das Fahrzeug beschwert, aber bei der hohen Fahrspannung meist sowieso zur Spannungsreduktion auf das dem Motor zuträgliche Maß erforderlich ist; übrigens kann bei kleineren Motoren durch Bürstenverschiebung ohne einen Transformator dasselbe Resultat erreicht werden.

Der asynchrone Drehstrommotor kann bei Stufenschaltung Kennlinien nach Art von Reihenschlußcharakteristiken liefern,

wie sie durch Abb. 5 veranschaulicht werden. Zwischen diesen Stufengeschwindigkeiten liegende Kennlinien verlangen den unökonomischen Gebrauch von Rotorvorschaltwiderständen, ähnlich wie beim Gleichstromserienmotor.

Es ergibt sich daher, daß die zur Einhaltung eines Fahrplans erforderlichen Bedingungen durch Einphasen-Serienmotoren am vollkommensten erfüllt werden können, während Gleichstrommotoren und Drehstrommotoren diesen

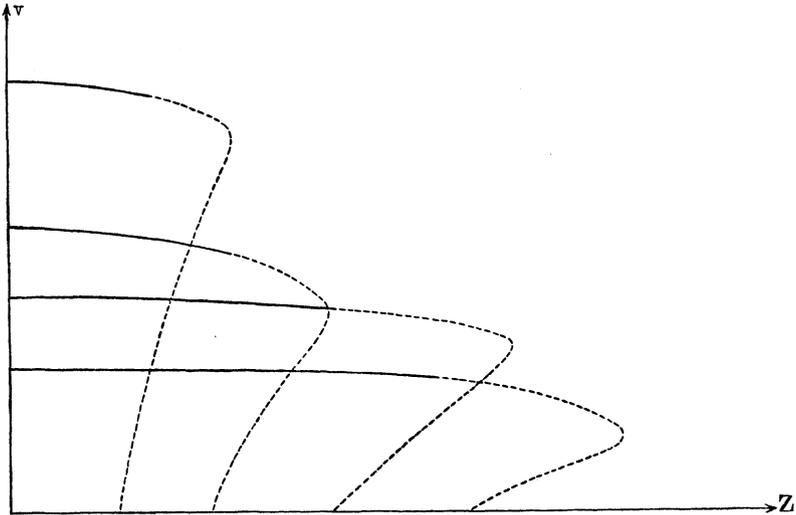


Abb. 5. Kennlinien der Drehstrom-Stufenmotoren mit reihenschlußartigem Verhalten.

Bedingungen nur bei gewissen größeren oder kleineren Einbußen an Ökonomie oder an Einfachheit und Sicherheit einigermaßen oder ausreichend entsprechen können.

14. Die schwersten Anforderungen an die Zugkraft eines Bahnmotors stellt die Anfahrt. Um das (in Tonnen ausgedrückte) Zuggewicht G vom Stillstand auf die gewünschte Fahrgeschwindigkeit zu bringen, muß eine Zugkraft entwickelt werden, die, gemessen in Kilogramm, durch

$$Z = G \cdot \left(w + \frac{1000}{g} \cdot \frac{1}{3,6} \cdot \xi \cdot \frac{dv}{dt} \right) \quad (9)$$

ausdrückbar ist; in diesem Ausdruck wird durch w der Widerstand der Fahrbewegung in kg/t , durch $g = 9,81 \text{ m/sec}^2$ die Beschleunigung der Erdschwere, durch $\xi = 1,05$ bis $1,35$ ein Koeffizient zur Berücksichtigung der rotierenden Massen neben den in Richtung der Fahrt bewegten Massen, und durch dv die Änderung der Fahrgeschwindigkeit von v Kilometern pro Stunde in dt Sekunden bezeichnet. Die Widerstandsgröße w zerfällt in drei Teile:

$$w = w_0 + w_c + w_s,$$

wobei w_0 den Widerstand auf gerader und horizontaler Bahn, w_c den Zusatzwiderstand zur Kurvendurchführung und w_s den

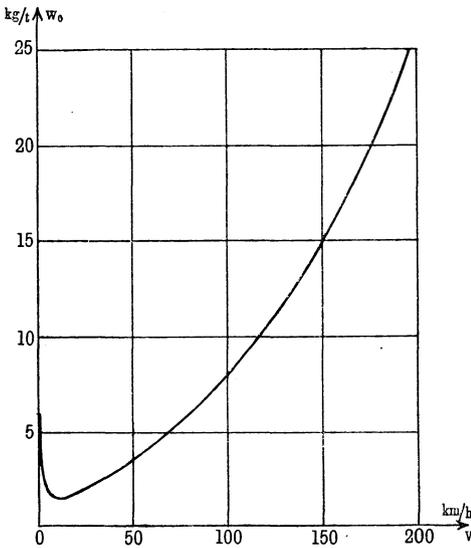


Abb. 6. Widerstandskurve für die Fahrt auf gerader und horizontaler Bahn.

Zusatzwiderstand zur Überwindung von Steigungen bedeuten. Der Widerstand auf gerader und horizontaler Bahn ist abhängig von der Fahrgeschwindigkeit, wie der Abb. 6 zu entnehmen ist. Der Zusatzwiderstand zur Durchführung von Krümmungen vom Radius R Meter ist nach der Formel von Röckl für Normalspurbahnen:

$$w_c = \frac{650}{R - 55}$$

Endlich kann w_s für Adhäsionsbahnen mit sehr

guter Annäherung durch die in Promillen ausgedrückte Steigung s ersetzt werden, die positiv, null oder negativ sein kann. Indem man durch

$$\gamma = \frac{1}{3,6} \cdot \frac{dv}{dt}$$

die Beschleunigung in m/sec^2 ausdrückt, erhält man die den

Verlauf einer Zuganfahrt nach Maßgabe des benutzten Motors oder der benutzten Charakteristik

$$Z = f(v)$$

besonders kennzeichnende Größe. Da die Reihenschlußcharakteristik oder eine ihr ähnliche Motorkennlinie in Betracht kommt, so ist γ während des Anfahrvorganges derart variabel, daß γ zunächst höhere Werte annimmt und während der Anfahrt kleiner und kleiner wird; demgemäß ist dann während

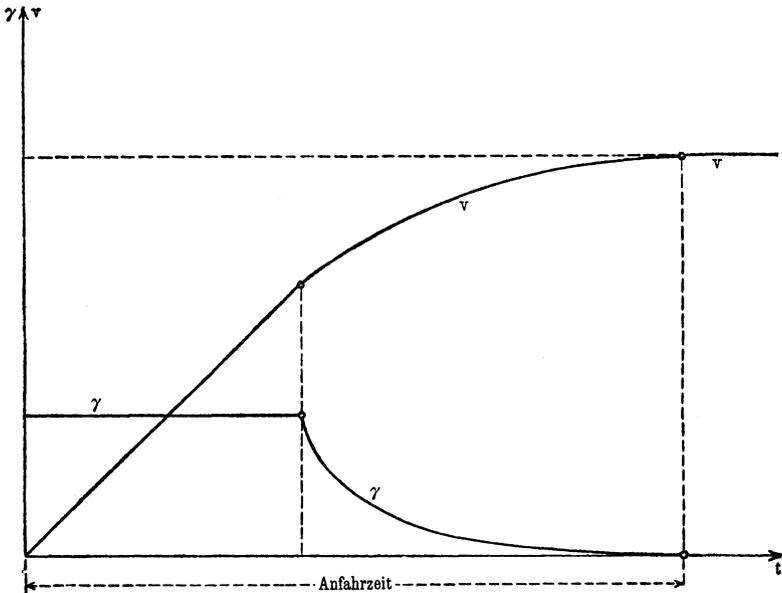


Abb. 7. Schematische Kurven der Geschwindigkeit und Beschleunigung bei der Anfahrt.

einer Anfahrt auf einer Bahn konstanter Neigung und Krümmung (meistens die horizontale und gerade Linie) der Verlauf der Fahrgeschwindigkeit v und der Anfahrbeschleunigung γ durch Kurven gekennzeichnet, die in Abb. 7 schematisch veranschaulicht sind. Irgend eine Zuganfahrt wird nun am kürzesten und prägnantesten gekennzeichnet durch den ihr entsprechenden Mittelwert $\bar{\gamma}$ der Beschleunigung; je höher er ist, um so höher muß auch der zum Beschleunigen benutzte

Mittelwert der Zugkraft sein, deren Entwicklung natürlich einen entsprechenden Effektaufwand bedingt. Es werden somit für die verschiedenen Zugsgattungen aus wirtschaftlichen Gründen nicht ohne weiteres gleichbleibende mittlere Beschleunigungen gerechtfertigt sein. Vielmehr wird zweckmäßig eine gewisse erwünschte mittlere Anfahrbeschleunigung $\bar{\gamma}$ unter Berücksichtigung der Entfernung der Haltestellen, der zu erreichenden Höchstgeschwindigkeit, des zulässigen maximalen Effektes, des erforderlichen Adhäsionsgewichtes und der gewünschten minimalen Fahrzeit anzunehmen sein. Es wird das Bedürfnis nach einer hohen mittleren Anfahrbeschleunigung sich um so stärker geltend machen, je kleiner die Entfernung der Haltestellen ist und je kürzer die Fahrzeit sein soll, ein Fall, der bei städtischen Schnellbahnen am ausgeprägtesten vorliegt.

Je nach den für eine Anfahrt angenommenen Beschleunigungsverhältnissen wird nun während der Anfahrt eine höhere Zugkraft als bei der normalen Fahrt entwickelt werden müssen. Als normale Fahrt hat dabei die mit der normalen Geschwindigkeit auf der für die Motorerwärmung maßgebenden Bahnstrecke (meist eine Steigungsstrecke) zu gelten. An den Bahnmotor tritt damit die Anforderung einer Überlastbarkeit hinsichtlich der zu entwickelnden Zugkraft, die übrigens im Verhältnis 1,5 : 1,0 mit einer vollen Ausnutzung der Adhäsion wohl verträglich ist, wie wir bereits gesehen haben. Eine Zugkraft-erhöhung im Verhältnis 1,5 : 1,0 oder auch in noch stärkerem Maße, z. B. 2,0 : 1,0, kann mit den Motoren jeder Stromart ohne weiteres erzielt werden. Immerhin weisen die Bahnmotoren verschiedener Stromarten hierbei auch gewisse Eigentümlichkeiten auf. So ist bei den Reihenschlußmotoren für Gleichstrom und Einphasenstrom auf die durch den Stromwender gesteckte obere Grenze der Stromaufnahmefähigkeit besonders zu achten, während bei Drehstrom-Asynchronmotoren ihre Empfindlichkeit gegen Spannungsschwankungen in Betracht gezogen werden muß. Weiter stimmen bei den verschiedenen Motorarten auch die Kennlinien

$$Z = f(v)$$

nicht überein. Um sie den gewünschten Anfahrverhältnissen anzupassen, müssen bei Gleichstrom und bei Drehstrom Widerstände vorgeschaltet werden, was bei Einphasenstrom nicht nötig ist.

15. Wie bei der Anfahrt, so erlangt auch bei der Bremsung von Zügen die Zugkraft am Radumfang besondere Werte, die etwas näher zu betrachten sind; es handelt sich dabei ganz allgemein um negative Zugkräfte, indem die Größen w_s und $\frac{dv}{dt}$ einzeln oder gleichzeitig negativ werden können. Es wird w_s negativ beim Abwärtsbefahren von Steigungen, und $\frac{dv}{dt}$, und damit auch γ , wird negativ beim eigentlichen Bremsen, d. h. beim Stillstellen oder beim Einstellen der Züge auf kleinere Fahrgeschwindigkeit. Ebenso wie die Anfahrbeschleunigung der Züge im Einklang mit dem Adhäsionsgewicht zu bemessen ist, muß auch die Wahl der Bremsverzögerung im Einklang mit dem Adhäsionsgewicht stehen. Die am Radumfang auftretende negative Zugkraft beim Abwärtsbefahren von Steigungen und bei der eigentlichen Bremsung kann grundsätzlich zur Einleitung generatorischer Wirkungen in den Fahrzeugmotoren und damit zur elektrischen Energierückgewinnung benutzt werden. Bei der eigentlichen Bremsung ist jedoch von der Energierückgewinnung überhaupt wenig zu erwarten, und zwar aus folgendem Grunde: Sowohl die Rücksicht auf kurze Fahrzeit, als auch die Forderung raschester Stillstellung des Zuges im Bedarfsfall führen auf die Wahl hoher Bremsverzögerungen, wobei aber die Möglichkeit der Rückgewinnung der lebendigen Kraft des Zuges deshalb abnimmt, weil einesteils die lebendige Kraft zur Überwindung des Rollwiderstandes während der Bremsperiode nur noch auf einer kurzen Strecke direkt verwendet wird und weil andernteils eine steigende und für die praktische Ausführung immer weniger geeignete Anzahl von Triebachsen erforderlich wird. Günstiger stehen die Aussichten der Energierückgewinnung beim Abwärtsbefahren von Steigungen, weil bei Steigungen mit

$$s > w_o + w_c$$

die elektrische Energierückgewinnung benutzt werden kann. Sie kann in doppelter Weise nützlich sein: einerseits durch den direkten Energiegewinn und andererseits durch Vermeidung der Abnutzung mechanischer Bremsorgane (Bremsklötze und Radreifen), die sonst die überschüssige negative Zugkraft von der Größe

$$G \cdot (s - w_o - w_c)$$

aufnehmen müssen. Den beiden Vorteilen steht jedoch der schwere Nachteil gegenüber, daß bei Zügen mit Anhängewagen diese nicht selbst gebremst werden, sondern mit ihren Puffern unmittelbar auf die Puffer der Triebfahrzeuge drücken müssen, wodurch der aus Gründen der Betriebssicherheit erwünschte gestreckte Zustand der Wagenkuppelungen verloren geht. Weiter bringt die elektrisch zurückgewonnene Energie die Kraftwerksgeneratoren zeitweilig in die Gefahr des Durchbrennens, die nur mit Betriebskomplikationen sicher abzuwenden ist. Auch werden die Bahnmotoren bei der Rückgewinnung mehr erwärmt als sonst. Schließlich ist der Wert der zurückgewonnenen Energie in vielen Fällen recht problematisch, wenn für ihre naturgemäß unregelmäßig gelieferten Quantitäten gerade keine Verwendung besteht.

In den Fällen, in denen die elektrische Energierückgewinnung als wertvoll zu betrachten ist, kommt die verschiedene Eignung der verschiedenen Stromarten dafür zur Geltung. In dieser Hinsicht ist festzustellen, daß die asynchronen Drehstrommotoren eine solche Rückgewinnung in der einfachsten und besten Weise ermöglichen, indem sie ja durch die bloße Tatsache, daß höhere, übersynchrone Drehzahl vorhanden ist, völlig selbsttätig in Drehstromgeneratoren übergehen. Demgegenüber ist die Einleitung generatorischer Wirkungen bei Gleichstrom- und Einphasenserienmotoren mit erheblichen schalttechnischen Komplikationen verbunden.

16. Die Triebfahrzeuge für die elektrische Zugförderung können sowohl als Lokomotiven wie auch als Motorwagen ausgebildet werden. Die Möglichkeit, leicht Motorwagen auszubilden, ist übrigens geradezu eines der wichtigsten

Merkmale der elektrischen Zugförderung und ist für die Entwicklung der leichteren elektrischen Bahnen von hoher Bedeutung gewesen. Da der Motorwagenbetrieb gegenüber dem Lokomotivbetrieb zu einer Verkleinerung des totalen Zuggewichtes führt, die um so ausgesprochener ist, je größer die Fahrgeschwindigkeit und je größer die Steigung ist, so sind nach dieser Erwägung Motorwagen für schnellfahrende Personenzüge auf allen Linien und besonders auch auf Bergstrecken vorteilhaft. Falls außerdem noch hohe Anfahrbeschleunigungen entwickelt werden müssen, die mit Rücksicht auf die benötigten Zugkräfte nach einem hohen Adhäsionsgewicht rufen, so kann dieses Gewicht bei einem Minimum an totalem Zuggewicht am vorteilhaftesten wiederum mittels des Motorwagenbetriebes beigebracht werden. Dagegen hat der Motorwagen den Nachteil, daß, wenn seine motorische Ausrüstung für Revisionen usw. außer Betrieb gesetzt wird, er auch nicht mehr für die Beförderung von Transportgut verwendbar ist; auch sonst noch muß mit gewissen Nachteilen des Motorwagens gerechnet werden, die aus seiner gleichzeitigen Bestimmung als zugförderndes und als Transportgut aufnehmendes Fahrzeug folgen. Demgegenüber bieten Lokomotiven große Vorteile bei der Zugbildung und bei der Verwendung des Rollmaterials überhaupt, die besonders beim Schnellzugsdienst und beim Güterzugsdienst zur Geltung kommen.

Abgesehen vom städtischen Schnellbahnverkehr, der für den Motorwagen ein seiner Eigenart wohl entsprechendes Anwendungsgebiet darstellt, dürfte für größere elektrische Bahnen der Lokomotivförderung doch eine größere Bedeutung zuzuweisen sein als der Zugförderung mittels Motorwagen. Es ist nun die Frage zu behandeln, ob im Hinblick auf die Ausbildung geeigneter Lokomotiven und Motorwagen vom Standpunkt des Fahrdienstes aus ein wesentlicher Unterschied der verschiedenen elektrischen Betriebssysteme und der Stromarten festgestellt werden kann. Insoweit als hierbei der Einfluß der Zugkraftgeschwindigkeits-Charakteristik der Bahnmotoren in Betracht kommt, mag auf das bereits in den Abschnitten 13 und 14 Mitgeteilte hingewiesen werden. Die für die Zug-

kraftgeschwindigkeits-Regelung neben den Motoren benötigten Nebenapparate, wie Vorschaltwiderstände, Reguliertransformatoren usw., lassen sich auf den Lokomotiven ohne weiteres und viel leichter unterbringen als auf den Motorwagen, was insoweit wertvoll ist, als von den Lokomotiven von vornherein schon eine weitergehende Anpassung an die verschiedensten Bedürfnisse des Fahrdienstes gewünscht wird. Andererseits ist die Schwierigkeit groß, eine in weiten Grenzen regelbare motorische Ausrüstung in den Motorwagen der Wechselstromsysteme unterzubringen, bei denen schon die Motoren an sich schwerer ausfallen als beim Gleichstromsystem. Für Bahnbetriebe, bei denen also, wie bei städtischen Schnellbahnen, ein starkes Bedürfnis nach Verwendung von Motorwagen besteht, muß daher der Gesichtspunkt des Einbaues der benötigten motorischen Ausrüstung in die Motorwagen ernsthaft in Betracht gezogen werden, wobei sich das Gleichstromsystem als besonders günstig erweist, und zwar in um so höherem Maße, als die Fahrspannung verhältnismäßig weniger hoch liegt.

17. Sowohl beim Lokomotivbetrieb als auch beim Motorwagenbetrieb muß für die Zugbildung die Möglichkeit der mehrfachen Zugförderung vorhanden sein, d. h. es soll möglich sein, in demselben Zuge bei Bedarf zwei oder noch mehr Triebfahrzeuge gleichzeitig für die Zugförderung nutzbar zu machen. Dazu dient dann vorzugsweise eine gemeinsame Steuerung aller auf dem Zuge befindlicher Bahnmotoren von zentraler Stelle aus, d. h. irgend ein System der sogenannten Mehrfachsteuerung. Für eine gute, derart gesteuerte mehrfache Zugförderung bildet das richtige Zusammenarbeiten der auf verschiedenen Triebfahrzeugen befindlichen Bahnmotoren das Hauptfordernis. Serienmotoren für Gleichstrom und für Einphasenstrom arbeiten ohne besondere Schwierigkeit richtig zusammen; es ist nicht einmal notwendig, daß die Motoren von derselben Bauart und Größe sind, wenn sie nur auf annähernd gleiche Geschwindigkeit einstellbar sind und ähnlich verlaufende Kennlinien aufweisen. Bei asynchronen Drehstrom-

motoren muß dagegen ein durch ungleiche Abnutzung der Radreifen u. dgl. verursachter Unterschied in der Drehzahl durch Einstellbarkeit der Rotorwiderstände der betreffenden Motoren ausgeglichen werden, damit wesentlich ungleiche Motorbelastungen (Unterbelastung bei den einen, Überbelastung bei den anderen Motoren) vermieden werden.

Ogleich also die mehrfache Zugförderung bei allen Stromarten verhältnismäßig leicht durchführbar ist, kann sie doch bei Gleichstrom und Einphasenstrom einfacher und daher sicherer bewirkt werden als bei Drehstrom.

18. Für den Fahrdienst der elektrischen Bahnen kommt auch der Bauart der Fahrleitungen eine gewisse Bedeutung zu, insbesondere insoweit, als gewisse Bauarten den Fahrdienst erschweren können. Dies gilt namentlich für das Rangieren (Verschieben) der Züge bei Weichen, wenn im Falle des Drehstromsystems doppelpolige Fahrleitungen benutzt werden müssen, oder wenn im Falle des Gleichstromsystems der Strom ausschließlich durch die sogenannte dritte Schiene zugeführt wird. Eine Beeinträchtigung der Möglichkeit hoher Fahrgeschwindigkeiten durch die Bauart der Fahrleitung oder der Stromabnehmer ist bei den wohlgeprobten heutigen Konstruktionen für alle Stromarten völlig ausgeschlossen. Ein von der doppelpoligen Fahrleitung des Drehstromsystems herührender fahrtechnischer Nachteil, der durch geeignete Schaltanordnung unschädlich gemacht werden muß, liegt im Eintreten einer Phasenvertauschung, wenn ein Drehstromfahrzeug auf einer Drehscheibe umgewendet wird oder mittels eines Geleisdreiecks gleichfalls in eine zur ursprünglichen umgekehrte Stellung gebracht wird.

Auch nur von geringerem Einfluß auf den Fahrdienst ist die Bauart der Hauptspeisepunkte. Ein gewisser Einfluß besteht aber insofern, als ein Speisepunkt mit selbsttätiger Spannungsregelung die Geschwindigkeitsregelung auf den von ihm aus mit Energie versorgten Zügen zu erleichtern vermag. Da jedoch eine selbsttätige Spannungsregelung bei allen Strom-

arten in einfachster Weise bewerkstelligt werden kann, so kann aus der Bauart der Speisepunkte kein Einfluß der Stromart auf den Fahrdienst abgeleitet werden.

19. Ein Überblick über die Argumente, die vom Standpunkt des Fahrdienstes aus für eine bestimmte Stromart geltend gemacht werden können, läßt uns bald die eine, bald die andere als die geeignetere erscheinen oder zuweilen gar alle Stromarten als ganz oder nahezu gleichwertig. Immerhin ist ziemlich scharf die kleinste Summe von Vorzügen beim Drehstromsystem zu finden, während der Gleichstrom und Einphasenstrom sich in der Anzahl der Vorzüge etwa gleich stehen. Werden die Vorzüge des Gleichstromsystems und des Einphasensystems für den Fahrdienst genauer gegeneinander abgewogen, so kommt man zu dem Schlusse, daß für elektrische Bahnen, bei denen die Lokomotivförderung eine erhebliche Bedeutung besitzt, die Vorzüge des Einphasenstroms für die Regelung der Fahrgeschwindigkeit und der Anfahrt dieser Stromart das Übergewicht verleihen, während für elektrische Bahnen, bei denen ein reiner oder vorwiegender Motorwagenbetrieb am Platze ist, im allgemeinen der Gleichstrom den Vorzug verdient.

III. Stromart und Betriebssicherheit.

20. Die Beziehungen zwischen der Stromart und der Betriebssicherheit müssen schon aus dem Grunde als besonders bedeutungsvoll anerkannt werden, weil unsere Erörterungen über die Beziehungen zwischen der Stromart und der Energieübertragung die Wichtigkeit der Wahl hoher Fahrspannungen und hoher Fernübertragungs-Spannungen ergeben haben. Die Wahl hoher Spannungen für Fahrleitung und Fernübertragung ist natürlich nicht ohne Wirkung auf die allgemeine Betriebssicherheit der Anlagen. Bei dem Einfluß der Höhe der Spannung der Fernübertragung auf die Betriebssicherheit handelt

es sich um Beziehungen, die aus der allgemeinen Starkstromtechnik zu übernehmen sind und hier nicht eingehend erörtert zu werden brauchen. Dagegen ist der Einfluß der Höhe der Fahrspannung auf die Betriebssicherheit der unter der Fahrspannung stehenden Anlagen und Einrichtungen eine Angelegenheit, die in ganz besonderem Maße in unsere Erörterungen hineingehört.

In erster Linie haben wir hier den Einfluß hoher Fahrspannungen auf die Betriebssicherheit der Triebfahrzeuge zu erörtern. Beim Gleichstromsystem hängt die Betriebssicherheit der Triebfahrzeuge (Lokomotiven und Motorwagen) mit der Fahrspannung so eng zusammen, daß die höchstmögliche Betriebsspannung geradezu hieraus hervorgeht. Dies beruht darauf, daß sich die für Gleichstrom-Triebfahrzeuge maximal zulässige Fahrspannung besonders nach der für die Gleichstrombahnmotoren maximal zulässigen Motorspannung zu richten hat. Dadurch, daß man mehrere Gleichstrombahnmotoren dauernd in Serie schaltet oder, um annähernd dasselbe Resultat zu erreichen, Motoren mit doppelten Kollektoren oder gar mit Doppelankern verwendet, kann man die Fahrspannung allenfalls zweimal oder höchstens viermal so hoch machen, als die Motorspannung. Es mag bemerkt werden, daß in dieser Weise als höchste Spannung bisher rund 5000 Volt für den Fahrdraht bei einer höchsten Motorspannung von 2500 Volt erreicht werden konnten, wobei die Motoren außerdem mit je zwei Ankern zu je 1250 Volt ausgerüstet waren¹⁾. Wie aus der allgemeinen Starkstromtechnik bekannt ist, ist die Ankerspannung durch die Konstruktion und das Verhalten des Stromwenders (Kommutators, Kollektors) im Betriebe eingeschränkt. Durch die Einführung der Hilfspole (Wendepole, Kommutationspole) ist es gelungen, für Ankerspannungen von 1000 bis 1500 Volt ein betriebssicheres Verhalten des Stromwenders auch kleinerer Bahnmotoren zu erreichen. Solche kleinere Bahnmotoren finden namentlich für Motorwagen Ver-

¹⁾ Versuchsanlagen der „Michigan United Traction Company“ in Nordamerika.

wendung. Größere Bahnmotoren, wie sie für elektrische Lokomotiven in Frage kommen, werden ohne weiteres für noch höhere, sagen wir etwa für 1,5- bis 2-fache Beträge der Ankerspannungen betriebssicher gebaut werden können, obgleich bisher noch keine elektrischen Bahnen mit solchen Motoren im Betriebe stehen. Schon bei den bisher höchsten Fahrspannungen von 2500 bis 5000 Volt Gleichstrom wirkt nämlich auch die Betriebssicherheit der der Fahrspannung ausgesetzten Apparate und Einrichtungen zur Regelung und Steuerung der Motoren spannungsbeschränkend. Wohl ist durch indirekte Steuerungseinrichtungen mit Hilfsstromkreisen niedriger Spannung zur Speisung der Steuerorgane ein gewisser Fortschritt verwirklicht worden; indessen enthält der zwischen Stromabnehmer und Rad- und Schienenrückleitung liegende Hochspannungsstromkreis der Fahrzeuge stets gewisse spannungsschwache Stellen außerhalb der Motoren, die etwa dieselbe Betriebssicherheit haben werden, wie die für Motorwagen benutzten Bahnmotoren selbst. Jedoch wird dieser Stromkreis voraussichtlich weniger betriebssicher gebaut werden können als große, im Stromwender oder Anker unterteilte Bahnmotoren, wie sie für die leistungsfähigsten Lokomotiven in Frage kommen. Die Rücksicht auf die Betriebssicherheit der Gleichstrom-Triebfahrzeuge wirkt daher auf die Wahl der Fahrspannung in dem Sinne, daß diese für Gleichstrom bei 5000 Volt an der Grenze des technisch möglichen liegt und so leicht nicht weiter hinauf gesetzt werden dürfte.

Für das Einphasensystem und für das Drehstromsystem wird die Betriebssicherheit der Triebfahrzeuge im Hinblick auf die Bahnmotoren deshalb völlig unabhängig von der Fahrspannung, weil durch den Gebrauch des Transformators die Motorspannung unter allen Umständen so niedrig gehalten werden kann, daß die Bahnmotoren gegen die ihnen aufgedrückte Spannung den höchsten Grad der Sicherheit erlangen, den elektrische Maschinen mit rotierenden Teilen überhaupt besitzen. Der sicherste Apparat eines solchen Fahrzeuges ist übrigens der Transformator selbst, besonders wenn er als sogenannter „Öltransformator“ gebaut wird. In seinem Hoch-

spannungsstromkreis wird sich außer dem Stromabnehmer und dem Anschluß an die Rad- und Schienenrückleitung als Schaltapparat jedenfalls auch ein Ölschalter befinden, den man als einen Schaltapparat von derart hoher Betriebssicherheit zu betrachten hat, wie ihn die Gleichstromtechnik nicht aufweist. Sowohl der Transformator als auch der Ölschalter der Fahrzeuge für Drehstrombetrieb und für Einphasenbetrieb besitzen volle Sicherheit gegen Spannungen, die ein mehrfaches der für Fahrleitungen in Betracht kommenden Werte sind, da ja die Sicherheit der Fahrleitungen selbst für die Fahrspannung gewisse obere Grenzen zieht.

Wir erkennen daher, daß die Betriebssicherheit der Triebfahrzeuge beim Gleichstrom eine obere Grenze der Fahrspannung schafft, die wir durch die Zahl 5000 Volt darstellen wollen, während beim Drehstrom und beim Einphasenstrom die Betriebssicherheit der Triebfahrzeuge nicht zur Einschränkung der Fahrspannung führt.

21. Der Einfluß der Fahrspannung auf die Betriebssicherheit der Fahrleitungen ist im Zusammenhang mit den üblichen Bauformen der Fahrleitungen zu beurteilen. Als solche kommen in Betracht: Das Leitungssystem der sogenannten dritten Schiene, sowie die einpolige und zweipolige Oberleitung.

Das Leitungssystem der dritten Schiene — eventuell auch der vierten Schiene, die zwar keine erhebliche praktische Bedeutung besitzt — ist nur beim Gleichstromsystem in Betracht zu ziehen. Infolge der Nähe des Bahnoberbaues bietet die Durchführung einer betriebssicheren Isolation gewisse Schwierigkeiten, so daß die bisher für dieses Leitungssystem zugelassene und angewendete Fahrspannung 2400 Volt nicht überschritten hat. Soweit wie eine diese Grenze nicht überschreitende Fahrspannung für die Bedürfnisse der Energieübertragung einer Bahn genügt, ist die dritte Schiene wegen ihrer hohen Festigkeit gegen mechanische Einflüsse vom Standpunkte der Betriebssicherheit geradezu angezeigt. Im allgemeinen verlangt jedoch die Wirtschaftlichkeit der Energie-

übertragung für größere elektrische Bahnen höhere Fahrspannungen, als sie für die dritte Schiene zulässig sind. Es kommen dann einpolige oder zweipolige Oberleitungen in Betracht. Die Erfahrung hat bewiesen, daß einpolige Oberleitungen für 15000 bis 16000 Volt Fahrspannung sogar in langen Tunnels eine vollständige Betriebssicherheit aufweisen; damit wird für Einphasenstrom die Zahl 16000 Volt zur normalen oberen Grenze für die Fahrspannung, während für Gleichstrom die Rücksicht auf die Sicherheit der Triebfahrzeuge diese Grenze bereits auf 5000 Volt ansetzen ließ. Die doppelpolige Oberleitung kommt normal für Drehstrom und ausnahmsweise für Gleichstrom in Frage. Doppelpolige Gleichstrom-Oberleitungen werden notwendig, wenn die Fahrleitung als sogenannte Dreileiteranlage ausgeführt werden soll. Grundsätzlich würde dabei, bei Anwendung des Schienenstranges als sogenannten „Mittelleiters“ zwischen jedem Oberleiter und den Schienen und bei entsprechender Unterteilung der Fahrzeugausrüstung, die für die Gleichstrom-Fahrzeuge zulässige obere Grenze von 5000 Volt erreicht werden können, insofern sich die zweipolige Oberleitung von 2×5000 Volt als betriebssicher erweisen würde. Dies trifft indessen nicht zu. Vielmehr ist schon die Isolierung der zweipoligen Oberleitung bei deren Bau grundsätzlich viel schwieriger durchzuführen, als die der einpoligen Oberleitung. Im Betriebe kommt dann das bei Doppelpoligkeit erhöhte Auftreten von Kurzschlüssen hinzu, die durch die Stromabnehmer verursacht werden, sowie die Erschwerungen durch die Weichenanlagen. Man wird daher für Gleichstrom-Dreileiteranlagen mit Höchstwerten der Fahrspannung rechnen müssen, die ganz erheblich unter denjenigen von Gleichstromanlagen mit einpoliger Fahrleitung liegen und daher den Gebrauch jener Anordnungen keineswegs erwünscht erscheinen lassen. Tatsächlich wird heute eine Gleichstrom-Dreileiteranlage auch überhaupt nicht mehr in Betracht gezogen. Dagegen ist für Drehstrom-Bahnen die doppelpolige Oberleitung unentbehrlich; dazu kommt hier weiter in Betracht, daß Wechselstromleitungen ganz allgemein kurzschlußsicherer sind, als Gleichstromleitungen, infolge der

viel größeren Gefährlichkeit des Gleichstromlichtbogens gegenüber dem, aller Halbperioden durch Null gehenden Wechselstromlichtbogen. Diese Bemerkung gilt übrigens auch für einpolige Oberleitungen, derart, daß für eine einpolige Gleichstrom-Oberleitung auch aus diesem Grunde und nicht allein wegen des Verhaltens der Ausrüstung der Triebfahrzeuge, ein viel kleinerer Höchstwert der Fahrspannung zugrunde gelegt werden muß, als für eine einpolige Einphasen-Oberleitung. Zurückkommend auf die doppelpolige Drehstrom-Oberleitung muß man betonen, daß sie, gegenüber der doppelpoligen Gleichstrom-Oberleitung, bei gleichen übertragenen Leistungen zwar etwas größere Stromstärken führen wird, ohne dadurch an Sicherheit gegen das Auftreten von Lichtbogen merklich einzubüßen. Obwohl bei Drehstrombahnen höhere Fahrspannungen als 6000 Volt zwischen Oberleitung und Schienenstrang bisher nicht vorgekommen sind, darf als obere zulässige Grenze für diese Spannung unbedenklich die Zahl 8000 Volt angegeben werden.

Die Betriebssicherheit der Fahrleitungen führt uns daher zu einer oberen Grenze der Fahrspannung von 16000 Volt für das Einphasensystem und einer solchen von 8000 Volt für das Drehstromsystem; dagegen hatten wir für das Gleichstromsystem die obere Fahrspannungsgrenze bereits vom Gesichtspunkt der Betriebssicherheit der Triebfahrzeuge aus zu normieren.

22. Durch die Energieübertragung in den Fahrleitungen der elektrischen Bahnen werden Telegraphen- und Fernsprechlinien, die diesen Bahnen entlang geführt sind, gewissen Störungen ausgesetzt, die vom Standpunkt der Betriebssicherheit besonders dann beurteilt werden müssen, wenn diese Telegraphen- und Fernsprechlinien zur Sicherung des Bahnbetriebes selbst dienen sollen. Die Telegraphen- und Fernsprechlinien werden von den Fahrleitungen elektrischer Bahnen einerseits durch statische Induktion (Influenz) beeinflusst, andererseits durch dynamische Induktion, und endlich bei direktem Übertritt von Bahnstrom in die Schwachstromanlagen.

Die statische Induktion oder das elektrische Feld bewirkt Ladespannungen der Schwachstromlinien, sowie auch Ladeströme, die besonders bei Wechselstrom als Bahnstrom zu erheblichen Störungen des Betriebes von Telegraphen- und Fernsprechlinien führen können. Die dynamische Induktion (die Pulsation des magnetischen Feldes) bewirkt bei Wechselstrom als Bahnstrom die Entstehung von Sekundärströmen in den Schwachstromlinien, die ebenso sehr oder noch mehr störend wirken können, als die durch die statische Induktion (die Pulsation des elektrischen Feldes) erzeugten Ladeströme. Sowohl die Ladeströme, als auch die Sekundärströme können durch Kreuzen oder Verdrillen der doppelpolig geführten Schwachstromlinien beseitigt werden. Die doppelpolige Leitung der Schwachströme, bei der also auf die sogenannte Erdrückleitung verzichtet wird, ist notwendig, schon um zu verhindern, daß die Bahnströme, als sogenannte vagabundierende oder Streuströme, in die Schwachstromanlagen übertreten. Für die statischen und dynamischen Einwirkungen der Wechselstrom-Fahrleitungen auf Telegraphen- und Fernsprechlinien ist nicht nur die Frequenz des Bahnstromes selbst, sondern auch die Frequenz allfälliger höherer Harmonischer von Bedeutung, weshalb Oberschwingungen noch besonders zu vermeiden sind. Es lassen sich durch verhältnismäßig einfache Maßnahmen die störenden Einflüsse, denen die Schwachstromanlagen längs elektrischer Bahnen ausgesetzt sind, bei allen Stromarten für die Bedürfnisse der Praxis ausreichend beseitigen, und zwar bei Wechselstrom (Einphasenstrom und Drehstrom) meist etwas weniger leicht, als bei Gleichstrom.

23. Vom Standpunkt der Betriebssicherheit der eigentlichen Bahnanlagen ist auch noch der Einfluß zu beachten, den die Fahrspannung auf die Hauptspeisepunkte hat, an denen zum allermindesten Transformatoren vorhanden sein werden. Sind die Fahrleitungen mit Einphasenstrom oder mit Drehstrom gespeist, dann braucht der Hauptspeisepunkt tatsächlich nur den so betriebssicheren Transformator als einzigen Energieumsetzungsapparat zu enthalten; dagegen ver-

langt die Zugförderung mittels Gleichstrom, daß die Hauptspeisepunkte rotierende Umformungsmaschinen oder allenfalls die bisher nur für Leistungen von wenigen Hundert Kilowatt gebrauchstüchtigen Quecksilberdampf-Gleichrichter enthalten. Da die Energie von dem oder den Kraftwerken nach den Hauptspeisepunkten normalerweise mit Einphasenstrom oder Drehstrom für Spannungen von 40 000 bis 100 000 Volt übertragen werden wird, so sind im Falle von Gleichstrom-Fahrleitungen neben den Umformungsmaschinen oder Gleichrichtern noch Transformatoren erforderlich. Die Verwendung von zweierlei Stromarten und weiteren Energieumsetzungseinrichtungen neben der Transformatoranlage muß die Sicherheit bei Gleichstrom als Fahrstrom gegenüber Wechselstrom unfehlbar erniedrigen, und zwar auch dann noch, wenn einmal wirklich betriebssichere große Gleichrichter bestehen werden, da das Einfachere immer das Sicherere bleiben wird.

Vom Standpunkt der Betriebssicherheit der Hauptspeisepunkte kann auch noch die Anlage von Energiereserven, besonders in Form von Akkumulatorenbatterien, in diesen Hauptspeisepunkten in Aussicht genommen werden. Derartige Einrichtungen vermögen weiter durch einen Ausgleich der Schwankungen des Leistungsbedarfes von Nutzen zu sein, wobei sie dann als eigentliche Pufferanlagen wirken. Angesichts der hohen Anlagekosten und Betriebskosten solcher Pufferanlagen für größere elektrische Bahnen, trotz relativ kleiner Erhöhung der eigentlichen Betriebssicherheit, ist ihre Zweckmäßigkeit oder Unzweckmäßigkeit restlos vom Standpunkt der Wirtschaftlichkeit zu beurteilen.

Die Betriebssicherheit der Hauptspeisepunkte gegen die Fahrspannung muß daher bei Einphasen- und Drehstrombahnen größer sein, als bei Gleichstrombahnen.

24. Um die Beziehungen zwischen der Stromart und der Betriebssicherheit der elektrischen Bahnen darzulegen, haben wir untersucht, in welcher Weise diese Betriebssicherheit mit der Fahrspannung in Zusammenhang gebracht wird. Damit ist offenbar der Einfluß der Stromart auf die

Betriebssicherheit in seiner wesentlichsten Erscheinungsform aufgegriffen, da ja die verschiedenen, für den Betrieb größerer elektrischer Bahnen in Betracht kommenden Stromarten sich ganz besonders auch durch die Fahrspannung unterscheiden. Vom Standpunkt der Betriebssicherheit sind für die Fahrspannungen der verschiedenen Stromarten geradezu die oberen Grenzen der noch zulässigen Werte festgelegt, und zwar wie folgt:

5000 Volt für Gleichstrom,
8000 Volt für Drehstrom,
16000 Volt für Einphasenwechselstrom.

Die angegebene Spannungsgrenze für Gleichstrom ist durch die Rücksicht auf die Fahrzeugausrüstungen festgelegt, während sich die angegebenen Spannungsgrenzen bei Drehstrom und bei Einphasenstrom aus der Rücksicht auf die Fahrleitungen selbst ergeben. Auch bei Bemessung der Fahrspannung aller Stromarten auf diese oberen Grenzen sind Triebfahrzeuge, Fahrleitungen und Speisepunkte ausnahmslos noch etwas betriebssicherer für Einphasenstrom und Drehstrom, als für Gleichstrom als Fahrstrom.

IV. Stromart und Wirtschaftlichkeit.

25. Durch unsere Aufstellung oberer Grenzen für die Fahrspannung E_s , derart, daß bei den drei in Betracht kommenden Stromarten dann alle Anlagenteile, denen die Fahrspannung aufgedrückt wird, ungefähr gleich betriebssicher sind, wird eine erste Grundlage für den Vergleich der Wirtschaftlichkeit der Stromarten für den Betrieb größerer elektrischer Bahnen geschaffen. Wird weiter vorausgesetzt, daß sich der wirtschaftliche Vergleich der Stromarten auf Bahnen gleicher Verkehrsdichte p und gleicher Streckenlänge oder Netzgröße l erstrecken soll, daß sich diese Bahnen weiter auch in der Linienführung und in ihren sonstigen allgemeinen Verhältnissen so viel als nur möglich entsprechen sollen, dann

dürften die notwendigen Grundlagen für einen einwandfreien Vergleich der Systeme auf Wirtschaftlichkeit im wesentlichen gegeben sein.

Nach unserer Formel (7) (S. 20) erhalten wir mit den gegebenen, maximal zulässigen Werten E_s und C einfache Zusammenhänge zwischen Speisepunktabstand λ und Verkehrsdichte p , derart, daß

$$\lambda = \frac{1000}{\sqrt{p}} \text{ bei Gleichstrom und Drehstrom,}$$

$$\lambda = \frac{2000}{\sqrt{p}} \text{ bei Einphasenstrom}$$

gesetzt werden darf. Da für gegebene p und l auch die Verkehrsgrößen P und Q gemäß den Formeln (1) und (2) (S. 3 und 5) gegeben sind, indem ja

$$p \cdot l = P = \frac{Q}{8760}$$

zu setzen ist, und da weiter gemäß Abb. 1 (S. 6) durch den Jahresverkehr Q auch schon das Schwankungsverhältnis k der Leistung am Radumfang festliegt, so folgen damit auch schon alle wesentlichen Baudaten der zugrunde gelegten elektrischen Bahnanlage.

Betrachten wir beispielsweise eine Bahnanlage mit

$$p = 900 \text{ t/h; } l = 100 \text{ km.}$$

Dann folgt aus den Formeln (1) und (2)

$$Q = 788,4 \text{ Millionen } \frac{\text{t. km}}{\text{Jahr}};$$

sowie aus Formel (7)

$$\begin{cases} \lambda = 33,3 \text{ km bei Gleichstrom und Drehstrom,} \\ \lambda = 66,7 \text{ km bei Einphasenstrom.} \end{cases}$$

Die Zahl der Speisepunkte N kann mit

$$N = \frac{100}{33,3} = 3 \text{ bei Gleichstrom und Drehstrom}$$

genau nach Rechnung benutzt werden, während für die dritte Stromart statt mit

$$N = \frac{100}{66,7} = 1,5$$

tatsächlich mit

$$N = 2 \text{ bei Einphasenstrom}$$

zu rechnen ist, weshalb dann auch

$$\lambda = 50 \text{ km bei Einphasenstrom}$$

zu korrigieren ist. Man könnte also für Einphasenstrom statt des angenommenen $E_s = 16000$ Volt ein $E_s = 12000$ Volt verwenden. Bleibt man beim Ansatz $E_s = 16000$ Volt, so bedeutet dies eine innere Reserve der Speisepunkte. Nach Abb. 1 (S. 6) entspricht unserem Werte Q ein Schwankungsverhältnis von

$$k = 3,3 \text{ für das Kraftwerk.}$$

Den Speisepunkten mit einem Jahresverkehr von $\frac{Q}{3}$ bzw. $\frac{Q}{2}$ entsprechen nach Abb. 1 (S. 6) Schwankungsverhältnisse von

$$\begin{cases} k = 5,0 \text{ für Gleichstrom und Drehstrom,} \\ k = 4,3 \text{ für Einphasenstrom.} \end{cases}$$

Schätzt man das Wirkungsgradverhältnis k_η zwischen Radumfang und Speisepunkt auf etwa 1,05 für alle drei Stromarten, dann sind für die Ausrüstung der Speisepunkte die Schwankungsverhältnisse

$$\begin{cases} K = 4,75 \text{ für Gleichstrom und Drehstrom,} \\ K = 4,1 \text{ für Einphasenstrom} \end{cases}$$

maßgebend. Unser Zahlenbeispiel ergibt uns also trotz der für die Ausnutzung des Einphasenstroms verhältnismäßig ungünstigen Streckenlänge eine um 16 Proz. günstigere Ausrüstung der Speisepunkte, ganz abgesehen davon, daß für drei Speisepunkte noch höhere Kosten für Landerwerb und Bauten entstehen werden, als für nur zwei Speisepunkte.

Weil aber unser Zahlenbeispiel auch gerade eine solche Streckenlänge aufweist, daß es zwei Stromsysteme gegenüber

dem dritten in der Anzahl der benötigten Speisepunkte günstiger erscheinen läßt, als sie es tatsächlich sind, so zeigt es uns, daß die aus konkreten Projektbearbeitungen auf die Wirtschaftlichkeit verschiedener Stromarten gezogenen Schlüsse nur mit der größten Vorsicht verallgemeinert werden dürfen. Immerhin tritt die wirtschaftliche Überlegenheit des Einphasenstromes über die beiden anderen Stromarten hervor.

26. Bei Verwendung von Wechselstrom in Form von Drehstrom oder von Einphasenstrom zur Zugförderung hat die Frequenz des verwendeten Wechselstromes einen noch zu erörternden Einfluß auf die Wirtschaftlichkeit. In unseren Systemkonstanten C ist auf die für Drehstrombahnen und Einphasenbahnen meist übliche Frequenz von 15 bis 16 Per./sec insoweit bereits Rücksicht genommen worden, als die in C vorkommende Größe ϵ_t von der Frequenz abhängig ist und übrigens durch eine kleine Frequenz günstig beeinflußt wird. Der Schwerpunkt der Frequenzfrage liegt aber nicht auf dem Gebiete der Energieübertragung durch die Leitungen und Geleise, sondern auf dem Gebiete der Bahnmotoren, insbesondere der für Einphasenwechselstrom.

Mit Rücksicht auf die Forderung einer guten Stromwendung müssen die Einphasen-Bahnmotoren einer gegebenen Leistung um so mehr Pole erhalten, je größer die Frequenz des speisenden Wechselstromes ist. Dabei wird bei Frequenzen, die wesentlich höher als 16 Perioden pro Sekunde sind, schon für verhältnismäßig schwache Motoren eine hinsichtlich ihrer Raum- und Gewichtsansprüche ungünstig wirkende hohe Polzahl erreicht, wobei noch die Verschlechterung von Leistungsfaktor und Wirkungsgrad hinzutritt. Die Wahl kleiner Frequenzen für Einphasenbahnen ist daher eine unbedingt notwendige Maßnahme, trotz der Verteuerung von Transformatoren und Kraftwerksgeneratoren bei kleinerer Frequenz und trotz weiterer Nachteile, auf die wir zum Teil noch einzugehen haben werden.

Bei Drehstrom spricht für eine kleine Frequenz die Rücksicht auf den Bau langsam laufender Bahnmotoren, insofern

man dieser Rücksicht ein größeres Gewicht beilegen will; sie ist nämlich von keiner wesentlichen Bedeutung. Die Vorteile und Nachteile der Wahl einer niedrigeren Frequenz bei Drehstrom gleichen sich einigermaßen aus und treten übrigens in keiner scharfen Weise auf, so daß die Wahl der Frequenz bei Drehstrombahnen keinem Zwange in einer bestimmten Richtung unterworfen ist wie bei den Einphasenbahnen.

27. Unter den Beziehungen zwischen der Stromart und der Wirtschaftlichkeit kommt auch den Wirkungsgraden und den Leistungsfaktoren eine größere Bedeutung zu. Über die Wirkungsgrade und Leistungsfaktoren zwischen Radumfang und Hauptspeisepunkt hatten wir uns, mit Rücksicht auf ihre Bedeutung für die Energieübertragung durch die Fahrleitung, bereits im Abschnitt 8 (Seite 18) zu äußern. Wir haben uns hier also noch mit den Wirkungsgraden und Leistungsfaktoren der Speisepunkte zu befassen. Was weiter die Energieerzeugung und Energieübertragung vor dem Speisepunkt angeht, so liefern sie uns hier keinen Gesichtspunkt zur Systemfrage, da wir für alle Systeme übereinstimmend Drehstrom- oder Wechselstromkraftwerke mit gleichwertigen Fernübertragungen von 40 000 bis 100 000 Volt bis zu den Hauptspeisepunkten anzunehmen haben. In den Wirkungsgraden und Leistungsfaktoren der Hauptspeisepunkte machen sich nun bemerkenswerte Unterschiede der Systeme geltend.

Die reinen Transformationsspeisepunkte, wie sie für das Drehstromsystem und für das Einphasensystem in Betracht kommen, verwenden als einzigen Energieumsetzungsapparat den Transformator, der für Speisepunkte mit großen modernen Einheiten bis 98 Proz. Wirkungsgrad im Zeitpunkt der Maximalbelastung und bis 94 Proz. Wirkungsgrad im Tagesdurchschnitt der Belastung ergibt. Bei schwächerem Verkehr fallen dagegen für die Ermittlung der Jahreswirkungsgrade die Leerlaufverluste außerordentlich ins Gewicht, während die Verluste durch Stromwärme geringere Bedeutung besitzen. Ältere Einphasen- oder Drehstrombahnen mit einer großen Zahl von Speisepunkten, infolge zu niedrig gewählter Fahrspannungen,

mit verhältnismäßig kleinen Transformatoren, die Eisenkörper aus unlegiertem Blech besitzen, haben hinsichtlich der Jahreswirkungsgrade recht ungünstige Ergebnisse gezeitigt. Der heutige Großtransformator mit legiertem Blech und mit über 90 Proz. Jahreswirkungsgrad hat uns von jenen unangenehmen Erfahrungen befreit. Der Leistungsfaktor der Transformatoren ist auf der Primärseite nahezu derselbe wie auf der Sekundärseite, so daß die Phasenverschiebung einer Fernübertragung, die einen reinen Transformatorspeisepunkt versorgt, mit der betriebsmäßigen Phasenverschiebung in der Fahrleitungsanlage fast übereinstimmen dürfte.

Speisepunkte mit Umformungseinrichtungen, wie sie für Gleichstrom als Fahrstrom in Betracht kommen, müssen für die von uns vorausgesetzten Spannungen der Fernübertragung neben den eigentlichen Energieumformungseinrichtungen auch noch Transformatoren haben. Sind die Umformer als Einankerumformer gebaut, dann kann der Speisepunkt im Zeitpunkt der Maximalbelastung 95 Proz. Wirkungsgrad erreichen; bei Umformern, die als Motorgeneratoren ausgeführt sind, dürfte jener Wirkungsgrad 91 Proz. erreichen. Der Tageswirkungsgrad solcher Umformungswerke variiert außerordentlich, je nach den Verhältnissen von 70 bis 90 Proz. Da die Umformungsmaschinen zu Zeiten des Verkehrsstillstandes stets abgeschaltet und stillgesetzt werden, so kann auch der Jahreswirkungsgrad solche Werte aufweisen. Wenn die Umformungspeisepunkte noch Akkumulatorenbatterien zum Leistungsausgleich enthalten, so hat dies auf den Jahreswirkungsgrad wenig Einfluß, da den verkleinerten Verlusten in den Maschinen die Mehrverluste in den Batterien gegenüberstehen. Die allfälligen Vorteile einer solchen Pufferung, die wohl bei kleineren, selten bei größeren elektrischen Bahnen von Bedeutung sind, beruhen auf der Möglichkeit, das Verhältnis $\frac{L_{max}}{L}$ der Umformungsmaschinen zu korrigieren, jedoch kaum auf der Verbesserung des Wirkungsgrades. Die Primärseite von Umformerwerken kann einen Leistungsfaktor = 1,0 aufweisen, wenn die Erregung der synchronen Antriebsmotoren entsprechend geregelt wird.

In neuester Zeit ist als Umformungsapparat der Quecksilberdampfgleichrichter in Betracht zu ziehen, dessen Energieverlust proportional der Stromstärke und dem Spannungsfall im Lichtbogen ist. Da dieser Spannungsfall je nach der Verbrauchsspannung 13 bis 20 Volt beträgt und vom Belastungsstrom so gut wie unabhängig ist, so besitzt der Gleichrichter für jede Belastung denselben Wirkungsgrad. Für eine Anlage zur Abgabe von 1000 Volt Gleichstrom, wie sie zurzeit möglich ist, werden Gleichrichter und Transformator zusammen im Zeitpunkt der Maximalbelastung etwa 94 Proz. Wirkungsgrad erreichen, d. h. etwa dieselbe Güte, wie eine Anlage gleicher Größe mit Einankerumformer, aufweisen. Daneben ist noch die eigene Phasenverschiebung des Gleichrichters entsprechend einem Leistungsfaktor von 0,80 bis 0,95, je nach Belastung, in Betracht zu ziehen.

Betrachtet man jetzt für die verschiedenen Stromarten den Gesamtwirkungsgrad zwischen Radumfang und Speisepunkt-Primärseite, so erkennt man, daß ein gewisser Ausgleich insofern besteht, als den höheren Wirkungsgraden des Gleichstroms zwischen Radumfang und Speisepunkt weniger hohe Wirkungsgrade im Speisepunkt entsprechen, während andererseits Drehstrom und Einphasenstrom weniger hohe Wirkungsgrade zwischen Radumfang und Speisepunkt, dagegen die höheren Wirkungsgrade im Speisepunkt aufweisen. Immerhin wird doch das Gleichstromsystem gegenüber den beiden anderen Systemen etwas günstiger abschneiden, wobei noch das Fehlen einer Phasenverschiebung im eigentlichen Bahnstrom hinzukommt. Die Schlußfolgerung über die Wirkungsgrade gilt nur als grobe Annäherung, da die Wirkungsgrade erfahrungsgemäß, je nach den Verhältnissen, innerhalb jeder einzelnen Stromart ebenso sehr wechseln können wie von einer Stromart zur anderen.

28. Einen wichtigen wirtschaftlichen Gesichtspunkt haben wir nun in den Gewichten und Anlagekosten der elektrischen Triebfahrzeuge zu erblicken. Diese Gewichte sind nicht nur als Parallelkriterium zum Preis in Betracht zu ziehen,

sondern sind auch im Hinblick auf die durch sie bewirkte Vergrößerung der Rollmaterial-Totgewichte bedeutungsvoll. Es stehen diese Gewichte mit der von den Triebfahrzeugen verlangten Leistungsfähigkeit in engem Zusammenhang. Die das Gewicht von Elektromotoren und Triebwerken unmittelbar bestimmende Größe ist das Drehmoment, auf das man daher zweckmäßig die zu vergleichenden Gesamtgewichte bezieht, trotzdem in diesen auch Anlageteile, wie Transformatoren, Widerstände, Schalter usw., enthalten sind, deren Einzelgewichte nicht direkt mit dem Drehmomente zusammenhängen.

Bei den Motorwagen haben wir nur das Gewicht des Teils, der nicht zur Aufnahme von Transportgut dient, d. h. nur das Gewicht der elektrischen Ausrüstung samt mechanischem Zubehör in Betracht zu ziehen. Wir beziehen dieses in Kilogrammen anzugebende Gewicht direkt auf das vom Motorwagen am Radumfang zu entwickelnde Drehmoment, das, in Kilogramm-Metern ausgedrückt, für die meist üblichen Räder von 1 m Durchmesser einen Zahlenwert gleich der halben, in Kilogrammen ausgedrückten Zugkraft am Radumfang ergibt. Für die verschiedenen Stromarten ergeben sich dann relative Ausrüstungsgewichte in Kilogrammen pro 1 mkg Drehmoment als Vergleichszahlen, nämlich:

- 5—7 kg/mkg bei Gleichstrommotorwagen,
- 7—8 kg/mkg bei Motorwagen für Drehstrom
und Einphasenstrom.

Man erkennt den Vorsprung des Gleichstroms vor den beiden anderen Stromarten, der mit unseren Mitteilungen (im Abschnitt 16, S. 38) über allgemeine Ausbildungsmöglichkeit von Motorwagen übereinstimmt. Der Vorsprung des Gleichstroms vor den beiden anderen Stromarten kommt in ähnlichem Relativmaßstabe auch in den Anlagekosten solcher Motorwagen-ausrüstungen zum Ausdruck.

Für elektrische Lokomotiven ist eine Beziehung ihres Gewichtes auf das von ihnen am Radumfang entwickelte Drehmoment in den Adhäsionsverhältnissen begründet. Wenn eine Lokomotive vom Gesamtgewicht G , und vom Adhäsions-

gewicht (Reibungsgewicht) G_o am Radumfang eine Zugkraft Z zu entwickeln hat, so muß für genügende Adhäsion

$$Z \leq \mu \cdot G_o$$

sein. Bei einem Triebradhalbmesser r ist

$$Z \cdot r = D$$

das Lokomotivdrehmoment am Radumfang. Es läßt sich nun bilden

$$\frac{G_t}{D} = \frac{G_t}{Z \cdot r} \geq \left(\frac{G_o}{G_t} \right) \cdot \frac{1}{\mu} \cdot \frac{1}{r}$$

Da das sogenannte Adhäsionsverhältnis $\left(\frac{G_o}{G_t} \right)$ im Grenzfall, bei Lokomotiven mit lauter Triebachsen, gleich 1 werden kann, so ist bei $r = 1$ m das Verhältnis $\frac{G_t}{D}$ im Grenzfall gleich $\frac{1}{\mu}$. Gewöhnlich liegt bei Lokomotiven der Triebradhalbmesser r in der Gegend von 0,75 m; für $\left(\frac{G_o}{G_t} \right) = 1$ und $\mu = \frac{1}{7,5}$ würde dann unabhängig von der Stromart

$$\frac{G_t}{D} = 10 \text{ kg/mkg}$$

sein. Dieser besondere Wert ist bei Lokomotiven aller Stromarten wiederholt erzielt worden. Der Vergleich der Stromarten ergibt nämlich auf Grund von Ausführungserfahrungen:

- | | | | |
|------|--------|-----|-------------------------|
| 7—10 | kg/mkg | für | Gleichstromlokomotiven, |
| 8—10 | ,, | ,, | Drehstromlokomotiven, |
| 9—11 | ,, | ,, | Einphasenlokomotiven. |

Der Gewichtsvergleich ausgeführter elektrischer Lokomotiven ergibt eine angenäherte Parität von Gleichstrom und Drehstrom, während für Einphasenstrom etwas ungünstigere Verhältnisse bestehen. Ähnliche Zahlen finden sich auch in den Anlagekosten von Lokomotiven für die drei Stromarten. Indessen ist zu beachten, daß die bisherigen Ausführungen für Gleichstrom bloß Fahrspannungen bis 3000 Volt, für Drehstrom bloß solche von 3000 und 6000 Volt betreffen, während für Einphasenstrom den Ausführungen mit 16 000 Volt bereits die

höchste von uns in Betracht gezogene Fahrspannung zugrunde liegt. Die Erhöhung der Fahrspannung des Gleichstroms auf 5000 Volt und des Drehstroms auf 8000 Volt wird diesen zwei Stromarten eine Verteuerung der Lokomotiven bringen, die besonders für Gleichstrom außerordentlich fühlbar sein muß und dann jeglichen Unterschied in den Anlagekosten von Lokomotiven der drei Stromarten verwischen dürfte.

29. Die Anlagekosten der Fahrleitungen sind in hohem Maße abhängig von den Anforderungen an die Isolierung und davon, wie hohe Fahrgeschwindigkeiten verlangt werden. Für die Vergleichung der Stromarten spielt daher die verschiedene Isolierung eine bedeutende Rolle, während bei einer Beschränkung auf Oberleitungen ohne weiteres entsprechende Maßnahmen zur Erzielung gleicher Fahrgeschwindigkeiten, im besonderen also Kettenaufhängungen, vorausgesetzt werden können. Im Vergleich der Stromarten kann ohne weiteres für die Fahrleitungen wiederum ein Gesamtkupferquerschnitt von 100 mm^2 , in einem oder in zwei Fahrdrähten, zugrunde gelegt werden, wie wir dies (im Abschnitt 6, S. 12) bei Berücksichtigung des Spannungsfalls in den Fahrleitungen schon getan haben. Unter diesen Umständen wird dann die einpolige Fahrleitung für Gleichstrom von 5000 Volt etwas billiger ausfallen als die einpolige Fahrleitung für Einphasenstrom von 16000 Volt und als die doppelpolige Fahrleitung für Drehstrom von 8000 Volt. Der Unterschied der Anlagekosten, der von den gewählten Leitungsnormalien außerordentlich stark beeinflußt werden kann, dürfte aber doch im allgemeinen nur von geringer Bedeutung sein.

30. Über die Unterschiede der Ausrüstung der Hauptspeisepunkte bei den drei Stromarten haben wir uns (im Abschnitt 27, S. 52) schon so eingehend geäußert, daß wir hier ohne weiteres erklären können, es müsse das Gleichstromsystem gegenüber den Wechselstromsystemen (Einphasenstrom und Drehstrom) auch dann die höheren Anlagekosten ergeben, wenn aus den Spannungs-, Linien- und Verkehrsgrundlagen

dieselbe Zahl von Hauptspeisepunkten hervorgehen sollte. Bei den von uns aufgestellten zulässigen Höchstwerten der Fahrspannung wird sich aber, wie wir (im Abschnitt 25, S. 49) bereits gezeigt haben, nur für Gleichstrom und Drehstrom dieselbe Zahl von Hauptspeisepunkten ergeben, dagegen eine kleinere Zahl bei Einphasenstrom, abgesehen vom Fall einer ganz abnorm kurzen Bahnlinie. Ebenda haben wir aber auch schon den für den Einphasenstrom hieraus erwachsenden Vorzug vor den beiden anderen Stromarten gekennzeichnet. Die zusammenfassende Betrachtung über die Anlagekosten der Speisepunkte ergibt nun eine klar und deutlich vorliegende Abstufung der Billigkeit, nach der das Einphasensystem an erster Stelle, das Drehstromsystem an zweiter Stelle und das Gleichstromsystem an dritter und letzter Stelle erscheint.

31. Indem wir uns nun damit befassen, für die drei Stromarten die Gestehungspreise der elektrischen Arbeit auf der Primärseite und auf der Sekundärseite der Hauptspeisepunkte zu vergleichen, erhalten wir ein Bild des Zusammenwirkens der in den Abschnitten 25, 27 und 30 einzeln betrachteten wirtschaftlichen Gesichtspunkte. Als Primärseite der Hauptspeisepunkte muß das Sammelschienensystem für 40 000 bis 100 000 Volt bezeichnet werden, das an die von dem oder den Kraftwerken herkommende Fernübertragung angeschlossen ist, während die Sekundärseite mit dem an die Fahrleitung angeschlossenem Sammelschienensystem übereinstimmt. Der Preis der elektrischen Arbeit, bezogen auf die Primärseite, werde als Eintrittsenergiepreis, der auf die Sekundärseite bezogene als Austrittsenergiepreis unterschieden. Bei Kraftwerken mit Wasserkraftausnutzung ist der Eintrittsenergiepreis fast unabhängig von der Menge der pro Jahr erzeugten Arbeit; bei Kraftwerken mit Wärmekraftausnutzung ist der Eintrittsenergiepreis natürlich nicht nur durch einen von der Energieproduktion unabhängigen Betrag bestimmt, sondern enthält neben einem derart festgelegten Anteil einen weiteren Anteil, der der Energieproduktion entsprechend wächst oder abnimmt. Bezieht man aber den Eintrittsenergie-

preis auf die Einheit der eintretenden Energiemenge, dann ergeben sich für Großbetrieb nahezu dieselben Preiszahlen, gleichgültig ob die Energie aus Wasserkraftwerken oder aus Wärmekraftwerken bezogen wird. Es dürfte dieser Preis im allgemeinen etwa bei

2—3 Pf./kWh

liegen. Der Eintrittsenergiepreis wird nun vom Austrittsenergiepreis um diejenigen Beträge übertroffen, die für Zins, Amortisation und Erneuerung, sowie für die Energieverluste und für die Bedienung der Hauptspeisepunkte in Anrechnung gebracht werden müssen. Die damit entstehende Differenz zwischen Eintrittsenergiepreis und Austrittsenergiepreis bildet nun ein recht bemerkenswertes wirtschaftliches Argument für die Wahl der Stromart. Obwohl jede andere Bahnanlage wieder andere Verhältnisse und damit auch andere Differenzen zwischen den Energiepreisen am Eintritt und Austritt der Hauptspeisepunkte aufweisen muß, wollen wir doch versuchen, die Preisdifferenz in Prozenten des Eintrittsenergiepreises vergleichsweise für die drei Stromarten der Fahrleitung allgemein anzugeben, nämlich:

10—25 Proz. beim Einphasenstrombahnbetrieb,
15—40 „ „ Drehstrombahnbetrieb,
45—75 „ „ Gleichstrombahnbetrieb.

Der Austrittsenergiepreis an den Hauptspeisepunkten einer Bahn geht direkt ein in die Rechnung der Bahnbetriebskosten, genauer in die „Fahrdienstkosten“.

Wir haben bisher stillschweigend vorausgesetzt, daß der Eintrittsenergiepreis an den Hauptspeisepunkten, obgleich von Fall zu Fall wechselnd, doch nicht notwendig für die drei Stromarten bei demselben Bahnprojekte verschieden zu bewerten sei; es muß daher nachgeprüft werden, ob eine solche Voraussetzung zulässig ist. Diese Nachprüfung ist um so mehr gerechtfertigt, als ja bei Einphasenbetrieb unbedingt und bei Drehstrombetrieb allenfalls mit einer Frequenz zu rechnen ist, die niedriger sein wird als die für die allgemeine Licht- und Kraftversorgung in Europa übliche. Es darf somit die Frage aufgeworfen werden, ob nicht mit einem niedrigeren „Eintritts-

energiepreis“ gerechnet werden darf, wenn die in den Hauptspisepunkt eintretende Energie nicht mit der für Einphasenbetrieb notwendigen niedrigen Frequenz von etwa 15 bis 16 (höchstens 25) Per./sec, sondern mit der üblichen Frequenz 50 sec^{-1} behaftet ist; falls dabei eine erhebliche Verbilligung von 50 periodigem gegenüber 15 periodigem Primärstrom eintrete, dann würde eine Umformung des 50 periodigen Primärstroms in Gleichstrom und damit das Gleichstromsystem selbst in wirtschaftlicher Hinsicht eine gründlich geänderte Stellung einnehmen. Ein geringerer Energiepreis bei 50 periodigem gegenüber 15 periodigem Strom kann kaum aus einem Unterschied der Anlage- und Betriebskosten der entsprechenden Kraftwerke hergeleitet, wohl aber deshalb als möglich angesehen werden, weil dem 50 periodigen Strom der Energiemarkt der allgemeinen Licht- und Kraftversorgungen ohne weiteres offen steht, während der 15 periodige Strom diesen Markt erst nach einer Frequenzumformung bedienen könnte. Da die die elektrischen Bahnen mit Energie versorgenden Kraftwerke aus Reservesicherheitsgründen stets überschüssige Energie bereit haben müssen, Wasserkraftwerke in Form von Wasserakkumulierung, Wärmekraftwerke in Form von Wärmeakkumulierung, schon mit Rücksicht auf die Schwankungen der Leistung, so scheint die Nebenenergieabgabe solcher Werke an die allgemeine Licht- und Kraftversorgung auf den ersten Blick aussichtsreich. Nun sind aber wegen des raschen Tempos der Leistungsschwankungen im Bahnbetrieb und der damit verbundenen großen und dauernden Beanspruchungen der Kraftwerksgeneratoren tatsächlich nur in Wasserkraftwerken kleinere Leistungen überschüssig, während jedoch die für die Zugförderung größerer elektrischer Bahnen in Anspruch genommenen Leistungen recht erhebliche Beträge ausmachen. Es müßte daher als sehr unwirtschaftlich bezeichnet werden, wollte man diese großen Leistungen einer Umformung unterwerfen, um damit als Endzweck lediglich die bessere Verwertung der überschüssigen und kleineren Leistungen zu bewirken. Da andererseits auch die Umformung der überschüssigen Leistung selbst Mehrkosten verursacht, die deren Markt im allgemeinen

nicht verträgt, so sind besondere Kraftwerksgeneratoren für die allfällige Ausnutzung überschüssiger Leistung in Aussicht zu nehmen, sobald dafür gute wirtschaftliche Gründe sprechen, was in jedem Fall erst besonders zu untersuchen ist. Auf Grund dieser Erörterung besteht also keine Veranlassung, für den „Eintrittsenergiepreis“ an den Hauptspeisepunkten bei den verschiedenen Stromarten der Sekundärseite etwa andere Ansätze anzunehmen und damit den oben mitgeteilten Vergleich der Energieaustrittspreise zu berichtigen.

Es bleibt uns noch die Aufgabe, den Einfluß von Speisepunkt-Pufferungsanlagen auf den Energiepreis zu erörtern. Solche Pufferungsanlagen, von denen (in den Abschnitten 23 und 27) bereits die Rede war, haben für kleinere elektrische Bahnen erheblichen wirtschaftlichen Wert, da solche Bahnen ohne weiteres am richtigsten den Gleichstrom als Fahrstrom und den Drehstrom als Primärstrom der Speisepunkte erhalten, wie sich übrigens aus unserer Abhandlung auch beweisen läßt. Da bei solchen Bahnen für den Gesamtjahresverkehr Q stets nur kleine Zahlenwerte resultieren, so kommen ihnen nach Abb. 1, S. 6, auch besonders hohe Schwankungsverhältnisse k (und ohne Pufferung auch hohe Schwankungen K bis in die Kraftwerke hinein) zu. Die dem kleinen Werte Q entsprechenden, ebenfalls nur kleinen Leistungen von den Kraftwerken an könnten aber angesichts der besonders hohen Schwankungen nur zu ungünstig hohen Preisen abgegeben werden. Durch Speisepunkt-Pufferung werden aber die Schwankungen für die Primärseite der Speisepunkte wesentlich verkleinert und damit der Eintrittsenergiepreis in erheblichem Maße günstig beeinflusst. Eine Anwendung dieses Verfahrens auf größere elektrische Bahnen hat von vornherein mit den für solche viel kleineren Leistungsschwankungen, und zwar vom Radumfang bis ins Kraftwerk hinein, zu rechnen. Damit wird die wirtschaftliche Bedeutung der Speisepunkt-Pufferung wesentlich geändert, und zwar in dem Sinne, daß ihre Vorteile im allgemeinen verloren gehen. Wie den Zahlen unseres Abschnitts 25 zu entnehmen ist, hat im Wettbewerb der Stromarten die Pufferung, für die die größte Streckenlänge bedienenden Speisepunkte des Ein-

phasensystems am wenigsten Berechtigung, wo sie übrigens, wie auch bei Drehstrom, eine maschinelle Ausrüstung der Speisepunkte erheischen würde, die ohne eine Pufferung entbehrlich ist. Sobald eben die den einzelnen Speisepunkten zugeordnete Verkehrsgröße zu ähnlichen Werten des Schwankungsverhältnisses führt, wie die Verkehrsgröße der ganzen Bahnen, dann ist eine Speisepunkt-Pufferung völlig wertlos. Die an das Kraftwerk herantretenden Anforderungen zur möglichst rationellen Befriedigung des schwankenden Energiebedürfnisses entbehren dann aber jeglicher Beziehung zur Systemfrage.

Über die Energiepreise am Speisepunkt kommen wir deshalb zu dem Ergebnis, daß für größere elektrische Bahnen der maßgebende Austrittsenergiepreis mit vollster Schärfe das Einphasensystem in die erste Linie der wirtschaftlichen Bewertung stellt, worauf in deutlichem Abstand erst das Drehstromsystem und dann das Gleichstromsystem folgt.

32. Das Zusammenwirken aller mit der Systemwahl der elektrischen Bahnen verknüpften wirtschaftlichen Gesichtspunkte muß offenbar in den jährlichen Betriebskosten der Zugförderung, in den sogenannten „Jahreskosten des Fahrdienstes“, zum Ausdruck kommen. Diese Betriebskosten werden von den verschiedenen Bahnverwaltungen der europäischen und der außereuropäischen Länder in der mannigfaltigsten Form gebucht, so daß es schon für die bestehenden Dampfbahnen außerordentlich schwer ist, die von verschiedenen Bahnverwaltungen bekannt gegebenen Betriebskosten des Fahrdienstes richtig zu vergleichen. Vom theoretischen Standpunkt aus besteht dagegen auch nicht die geringste Schwierigkeit, den Begriff der „Jahreskosten des Fahrdienstes“ richtig festzulegen und zu umschreiben. Wir führen hier die einzelnen Teile dieser Jahreskosten des Fahrdienstes auf und fügen die notwendigen Erläuterungen bei.

1. Die Personalausgaben betreffen alle in Form von Gehältern, Löhnen, Nebenbezügen, Versicherungen usw. entstehenden Jahresausgaben für das mit der Führung und Bedienung der Triebfahrzeuge verwendete Personal.

2. Die Ausgaben für elektrische Arbeit betreffen den „Austrittsenergiepreis“, für die Energieabgabe aller Hauptspiseipunkte zusammengerechnet.

3. Die Ausgaben für verschiedene Betriebsmaterialien betreffen sämtliche Kosten für Schmierung, Reinigung und Beleuchtung der Triebfahrzeuge und Anhängewagen, sowie der für ihre Aufbewahrung bestimmten Räume.

4. Die Ausgaben für Unterhalt und Erneuerung betreffen sämtliche Kosten der Instandhaltung der benötigten Triebfahrzeuge und Anhängewagen, sowie aller Fahrleitungsanlagen der Bahn bis an die sekundären Sammelschienen der Hauptspiseipunkte.

5. Die Ausgaben für Verzinsung, Amortisation und Rückstellung betreffen alle Geldbeträge, die gemäß dem Anlagekapital für die Triebfahrzeuge und Anhängewagen, ihre Aufbewahrungs- und Reparaturräume und die Fahrleitungsanlagen samt ihrem vollständigen Zubehör jährlich zu entrichten sind, wie sie aus dem Titel einzeln hervorgehen.

Die Systemwahl macht sich geltend für die unter (2), (3), (4) und (5) genannten Einzelposten, jedoch kaum für den unter (1) aufgeführten. Die Schwankungen der relativen Bedeutung, die die fünf Einzelposten innerhalb der Gesamtsumme der Jahreskosten des Fahrdienstes von einer Bahn zur anderen, selbst bei absolut gleichmäßiger Buchung, erleiden, sind im allgemeinen viel größer als der Einfluß der Systemwahl auf die einzelnen Teilposten. Die folgende Zusammenstellung soll einen Anhalt dafür geben, welche relative Bedeutung den Teilposten gegenüber der Summe der Fahrdienstkosten im großen und ganzen etwa eingeräumt ist.

1. Personal	14—30 Proz.
2. Elektrische Arbeit	12—32 „
3. Betriebsmaterialien	4—8 „
4. Unterhalt und Erneuerung	16—24 „
5. Verzinsung, Amortisation und Rückstellung	20—40 „
Summe der Jahreskosten des Fahrdienstes	100 Proz.

Wird eine solche Rechnung der Jahreskosten des Fahrdienstes auf Grund von Projektdaten für eine bestimmte

größere Bahnanlage unter Berücksichtigung aller drei Stromarten aufgestellt, so zeigt sich wiederum die Reihenfolge: Einphasenstrom, Drehstrom, Gleichstrom im Sinne einer fallenden Wirtschaftlichkeit. Bei den Höchstwerten der jeweils zulässigen Fahrspannung, wie wir sie auf S. 48 genannt haben, ist jedoch der Einphasenstrom im Hinblick auf die gesamten Jahreskosten des Fahrdienstes dem Drehstrom nur um wenige Prozente (je nach Verhältnissen etwa 2 bis 8 Proz.) überlegen, während sich der Abstand der Wirtschaftlichkeit des Drehstroms von der des Gleichstroms eher wieder schärfer geltend macht. Es muß deshalb vom Standpunkt der Jahreskosten des Fahrdienstes aus festgestellt werden, daß die dem Gleichstrom wohl ersichtlich überlegenen Wechselstromsysteme (Einphasenstrom und Drehstrom) unter sich einen nur wenig scharf erkennbaren Unterschied zugunsten von Einphasenstrom aufweisen.

33. Indem wir vom Standpunkt der Wirtschaftlichkeit aus alle wirtschaftlichen Gesichtspunkte zur Wahl der Stromarten größerer elektrischer Bahnen der Reihe nach in Betracht zogen, sind wir zu der Erkenntnis gekommen, daß hinsichtlich der Triebfahrzeuge bei Gleichstrom eine etwas höhere Wirtschaftlichkeit gegenüber Drehstrom und Einphasenstrom zu erwarten ist, während sich die Stellung des Gleichstroms gegenüber den beiden Wechselstromsystemen sehr entschieden verschlechtert hinsichtlich der Hauptspeisepunkte; die Fahrleitungsanlage liefert zur wirtschaftlichen Beurteilung der Systemwahl keinen erheblichen oder entscheidenden Beitrag. Die Zusammenlegung aller mit der Systemwahl in Beziehung stehenden wirtschaftlichen Faktoren führte uns hierauf zur Betrachtung der „Jahreskosten des Fahrdienstes“, wodurch schließlich doch eine deutlich erkennbare Abstufung der Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Stromarten festgestellt werden konnte, und zwar ist im Sinne fallender Wirtschaftlichkeit diese Abstufung durch die Reihenfolge: Einphasenstrom, Drehstrom, Gleichstrom gekennzeichnet.

V. Beispiele und Schlußfolgerung.

34. Unsere Behandlung der Gesichtspunkte für die Wahl der Stromart größerer elektrischer Bahnen würde jeglichen Zusammenhanges mit der Wirklichkeit entbehren, wenn wir nicht auch bereits vorliegende wichtige Systementscheidungen bedeutender Eisenbahnverwaltungen in Betracht zögen. Zunächst sollen einige Systementscheidungen europäischer Bahnen einer kurzen Würdigung unterzogen werden.

Eine bemerkenswerte, weittragende Systementscheidung haben im Dezember 1906 die Italienischen Staatsbahnen gefällt, zugunsten des Drehstromes mit 15 Per./sec und 3000 Volt Fahrspannung, den diese Verwaltung seit dem Jahre 1902 am Betriebe der Veltlinbahn praktisch kennen und schätzen gelernt hatte; gleichzeitig mit dieser Entscheidung wurde ein Kredit von 70 Millionen Lire gewährt zur Einführung des Drehstrombetriebes auf einer Streckenlänge von 330 km. Die grundsätzlichen Erwägungen, die zu dieser Entscheidung geführt haben, beruhen vorwiegend auf den von der Verwaltung gesammelten eigenen Erfahrungen, einerseits mit dem bereits erwähnten Drehstromsystem, andererseits mit Gleichstrom von 650 Volt Fahrspannung; das zur Zeit jener Entscheidung bereits vorhandene, wenn auch noch wenig entwickelte Einphasensystem vermochte nicht in ernsteren Wettbewerb zu treten. Sonst wäre jene Entscheidung vermutlich mindestens hinausgeschoben worden.

Dagegen ist das seit dem Jahre 1902 brauchbar gewordene Einphasensystem seit seinem Auftreten sowohl in Deutschland, als auch in der Schweiz und in Schweden unverzüglich von den Verwaltungen in ernsthafteste Erwägung gezogen oder zu Versuchen zugelassen worden.

So hat die preußische Staatsbahn schon seit dem Jahre 1903 eine Versuchsstrecke zu Proben mit dem Einphasensystem bereit gestellt, nachdem sie übrigens von 1900 bis

1902 in ähnlicher Weise den Gleichstrom und den Drehstrom zur Erprobung kommen ließ. Die ersten Systementscheidungen im Zusammenhang mit Kreditforderungen betreffen Vorortbahnen, 1902 zugunsten von Gleichstrom mit 650 Volt Fahrspannung für die Strecke Berlin—Groß-Lichterfelde, 1904 zugunsten von Einphasenstrom mit 25 Per./sec und 6300 Volt Fahrspannung für die Strecke Blankenese—Hamburg—Ohlsdorf; es folgten nun 1910 und 1911 die Entschlüsse und Kreditgewährungen für die Strecken Dessau—Bitterfeld, Bitterfeld—Leipzig und Lauban—Königszell, für die, nach dem Vorbilde der schweizerischen Bahnen, der Einphasenstrom mit einer Frequenz von 15 bis $16\frac{2}{3}$ sec⁻¹ und einer Fahrspannung von 15000 Volt normalisiert gewählt wurde. Durch Gesetzentwurf und mehrere Denkschriften wurde dann 1911 und 1912 die Elektrifizierung der Berliner Stadt-, Ring- und Vorortbahn vorbereitet und, mit Rücksicht auf Einheitlichkeit des später in und um Groß-Berlin einzurichtenden Hauptbahnbetriebes, wiederum das Einphasensystem in Aussicht genommen, wofür dann im Jahre 1913 der förmliche Beschluß zustande kam; mit Rücksicht auf die durch kurze Fahrstrecken und damit verbundenes häufiges Anfahren gekennzeichnete Eigenart dieses Stadtschnellbahn-Betriebes ist die Triebmittelfrage abklärenden Versuchen vorbehalten geblieben, die auch heute noch nicht abgeschlossen sind. Da im Verlaufe dieser Versuche auf die Vorteile des Gleichstromsystems zur Ausbildung von Schnellbahn-Motorwagen hingewiesen wurde, sind dann auch derartige Triebmittel zu den Versuchen zugelassen und damit gewissermaßen die Systementscheidung wieder in Frage gestellt worden; indessen ist der Wechselstrombetrieb keineswegs aufgegeben worden; durch die Parallelversuche mit Gleichstrom und mit Wechselstrom soll vorläufig nur die noch wünschenswerte Abklärung über Einzelheiten erfahrungsmäßig beigebracht werden.

Die Badische Staatsbahn hat von 1906 an die Einführung des elektrischen Betriebes auf der Wiesentalbahn studiert; die Untersuchung der Systemfrage führte zum Entschluß, Einphasenstrom von 15 Per./sec mit 10000 Volt Fahr-

spannung zu verwenden, wofür 1910 das Material bestellt worden ist.

In besonders eingehender Weise hat die Bayerische Staatsbahn die Einführung des elektrischen Betriebes, und die Eignung der Stromarten im besondern, in einer 1908 verfaßten Denkschrift behandelt, in der das System des Einphasenwechselstromes zur Anwendung empfohlen ist; die Folge dieser Untersuchung war die Ausführung der Elektrifizierung der Strecke Salzburg—Berchtesgaden mit Einphasenstrom von 15 Per./sec und 10000 Volt.

In der Schweiz ist von den Schweizerischen Bundesbahnen 1902 eine Versuchsstrecke zu Versuchen mit Einphasenstrom bereitgestellt worden, deren wesentlichstes Ergebnis die Erkenntnis der Vorteile einer Frequenz von 15 bis 16 Per./sec war, wodurch die, im Jahre 1904 auf private Initiative gegründete, aber mit Beteiligung des Staates organisierte „Schweiz. Studienkommission für elektrischen Bahnbetrieb“ im Oktober 1908 zur scharfen Formulierung des Postulates der niedrigen Frequenz gelangte, das für viele europäische Bahnverwaltungen wegleitend geworden ist. Die Elektrifizierung der kurzen Simplonlinie mit Drehstrom von 15 Per./sec und 3000 Volt im Jahre 1906 ist im wesentlichen aus dem internationalen Charakter dieser, die Schweiz mit Italien verbindenden Linie zu beurteilen. Im Jahre 1912 empfahl die Studienkommission den Bundesbahnen endgültig das Einphasensystem, das dann von dieser Bahnverwaltung 1913 einem Kreditbegehren für die Elektrifizierung der Gotthardbahn zugrunde gelegt wurde, immerhin unter dem Vorbehalt auf die Wahl der Stromart noch zurückkommen zu dürfen. Zu Beginn des Jahres 1916 ist dann die Systemfrage mit der förmlichen Annahme des Einphasenwechselstromes von 15 bis 16 Per./sec und etwa 15000 Volt Fahrspannung entschieden worden, nachdem sich inzwischen dieses System auf der mit bedeutender finanzieller Beteiligung des Kantons Bern erbauten „Berner Alpenbahn“ bei besonders schwierigen klimatischen und fahrtechnischen Verhältnissen als richtig gewählt ausgewiesen hatte.

In Schweden sind von den Schwedischen Staatsbahnen seit Juni 1905 auf zwei Versuchsstrecken umfangreiche Versuche mit Einphasenstrom von 25 Per./sec und mit Fahrspannungen von 5000 bis 22000 Volt angestellt worden. Größere Elektrifikationsausführungen sind indessen erst seit 1912 im Gange, nämlich Kiruna-Riksgränsen (heute im Betrieb) und Kiruna-Lulea (heute im Bau), einheitlich für Einphasenstrom von 15 Per./sec und 15000 Volt Fahrspannung.

Die Österreichischen und die Ungarischen Staatsbahnen haben im Laufe der letzten 10 Jahre ausgedehnte Studien über die Einführung des elektrischen Betriebes auf einzelnen Linien angestellt, deren Frucht kleinere Ausführungen mit Einphasenstrom von 15 Per./sec und 10000 Volt Fahrspannung sind.

In Frankreich ist vom Standpunkt der Systemfrage größerer elektrischer Bahnen der Versuchsbetriebe der Gesellschaften „Paris-Lyon-Méditerranée“ und „Chemins de fer du Midi“, je mit Einphasenstrom von $16\frac{2}{3}$ Per./sec und 12000 Volt Fahrspannung zu gedenken.

In England haben besonders die Londoner Bahnen größere Elektrifizierungen durchgeführt, unter denen mit Rücksicht auf angestellte Studien zur Systemfrage die „London, Brighton and South Coast Railway“ durch die Wahl von Einphasenstrom mit 25 Per./sec und 6000 Volt Fahrspannung zu nennen ist; die Wahl der Stromart dieser Bahn ist stark beeinflusst durch die Rücksicht auf den bestehenden Hauptverkehr auf große Entfernung, der neben dem Stadtbahnverkehr zu bewältigen ist. Es bestehen für diese bemerkenswerte Anlage also entsprechende Verhältnisse, wie für die Berliner Stadt-, Ring- und Vorortbahn.

Aus den weiteren europäischen Ländern dürfte hier nur noch die Systementscheidung der Norwegischen „Rjukanbahn“ zu erwähnen sein, für die ebenfalls Einphasenstrom von 15 Per./sec und 10000 Volt Fahrspannung gewählt worden ist.

Unsere Übersicht über europäische Systementscheidungen bei der Vorbereitung und Durchführung der Elektrifizierung größerer Bahnen hat uns somit nur bei einer Verwaltung eine Entscheidung zugunsten von Drehstrom (Italienische Staatsbahnen), bei allen anderen Verwaltungen Entscheidungen zugunsten von Einphasenstrom erkennen lassen. Das doch in Europa ebenfalls weitverbreitete Gleichstromsystem ist demnach anscheinend zu kurz gekommen. Um Mißverständnisse zu vermeiden, müssen wir darauf hinweisen, daß eben Gleichstrom in Europa ausschließlich für Sonderfälle angewandt ist; die überwiegende Mehrzahl dieser Sonderfälle betrifft eigentliche Kleinbahnen und nicht größere elektrische Bahnen. Da, wo es sich um größere elektrische Bahnen handelt, sind es ausgesprochene Spezialbahnen, bei denen in ihrer Besonderheit schon eine besondere Eignung des Gleichstromes vorliegt, wie namentlich bei den eigentlichen und reinen Stadtschnellbahnen. In solchen Fällen kommt die Wahl der Stromart unter einer beschränkten Zahl von Gesichtspunkten zustande. Damit rechtfertigen wir den Ausschluß dieser Fälle von der besonderen Erwähnung.

35. Von außereuropäischen Systementscheidungen haben wir uns, weil wir nur größere elektrische Bahnen mit normalem Betriebscharakter betrachten, lediglich mit Entscheidungen nordamerikanischer Eisenbahnverwaltungen zu befassen. Bis zum Jahre 1902 sind die elektrischen Bahnen von Nordamerika ausschließlich mittels Gleichstrom betrieben worden, weshalb man von einer „Systemfrage“ gar nicht sprechen konnte. Als dann 1902 durch die „Westinghouse Co.“ das Einphasensystem vorgeschlagen und ausgeführt wurde, griff auch die andere große Elektrizitätsfirma, die „General Electric Co.“, nach dem neuen Bahnsystem, ohne indessen solche Erfolge zu erzielen, wie die „Westinghouse Co.“. Die „General Electric Co.“ kam vielmehr dazu, zunächst 1906 die einzige amerikanische Drehstromlinie im „Cascade Tunnel“ mit 25 Per./sec und 6000 Volt Fahrspannung auszuführen und hierauf Gleichstrombahnen für stets wachsende Fahrspannung

zu bauen. So kam es, daß von 1909 an die eine Firma, die „Westinghouse Co.“, die Entwicklung des Einphasensystems mit besonderem Nachdruck förderte, während die andere Firma, die „General Electric Co.“, ausschließlich das System des hochgespannten Gleichstromes vertrat. Da andererseits die Gesamtheit der nordamerikanischen Bahnen sich im Besitz von Aktiengesellschaften befindet und die staatlichen Organe äußerst wenig Einfluß auf das Eisenbahnwesen ausüben können, so sind die Systementscheidungen bei Einführung des elektrischen Betriebes amerikanischer Bahnen vorwiegend zu einer „Firmenfrage“ geworden, derart, daß mit der Annahme des Elektrifizierungs-Projektes der einen oder der anderen Firma zugleich auch die eine oder die andere Stromart „gewählt“ ist. Die Systementscheidungen müssen deshalb bei nordamerikanischen Bahnen durchaus anders bewertet werden, als bei europäischen Bahnen.

Bedeutendere Ausführungen nach dem Einphasensystem, Bauart Westinghouse, mit 25 Per./sec und 11000 Volt Fahrspannung weisen auf die Bahnen: „New York, New Haven und Hartford“, „New York, Westchester und Boston“, „Boston und Maine“, „Pennsylvania“, „Norfolk und Western“. Bemerkenswert ist die für europäische Begriffe hohe Frequenz von 25 sec^{-1} , die jedoch durch die Übereinstimmung mit der für Kraftwerke der allgemeinen Licht- und Kraftversorgung weit verbreiteten Norm, sowie durch ihre Zweckmäßigkeit für den bisher meist gewählten Antrieb der Bahnstromgeneratoren durch Dampfturbinen zu erklären ist.

Bedeutendere Ausführungen nach dem System des hochgespannten Gleichstromes, Bauart „General Electric Co.“, stellen die Bahnen „Butte Anaconda und Pacific“, sowie „Canadian Northern“ für 2400 Volt Fahrspannung und die besonders bedeutende Bahn „Chicago, Milwaukee und St. Paul“ mit 3000 Volt Fahrspannung dar.

36. Wir sind nun in der Lage, die Schlußfolgerung aus unseren Ausführungen über die Wahl der Stromart für größere elektrische Bahnen zu ziehen. Vom Standpunkt der Energie-

übertragung kamen wir dazu, Gleichstrom für die Fahrleitung, eines der Wechselstromsysteme für die Fernübertragung zu bevorzugen. Die Anforderungen des Fahrdienstes ließen den Drehstrom gegen den Gleichstrom und den Einphasenstrom ins Hintertreffen kommen. Eine Betrachtung der Beziehungen zwischen der Stromart und der Betriebssicherheit führte zur grundlegenden Feststellung der oberen Grenzen der noch zulässigen Fahrspannungen, wonach im Sinne fallender maximaler Fahrspannung die Stromarten in die Reihenfolge: Einphasenstrom, Drehstrom, Gleichstrom kommen. In Würdigung der für die Wirtschaftlichkeit maßgebenden Faktoren ergab sich endlich eine Abstufung der Systeme im Sinne fallender Wirtschaftlichkeit nach der Reihenfolge: Einphasenstrom, Drehstrom und Gleichstrom.

Erinnern wir uns nun, daß uns die Rücksicht auf die Betriebssicherheit zur Festsetzung der Fahrspannungen führte, des wichtigsten Kennzeichens der Systeme, im Hinblick auf die Parität der Systeme, und daß damit der Standpunkt der Energieübertragung eliminiert wird, dann erkennen wir als schließlich ausschlaggebende Argumente zur Systemwahl nur noch die Anforderungen des Fahrdienstes und die Anforderungen der Wirtschaftlichkeit. Da der Drehstrom wegen der Anforderungen des Fahrdienstes, der Gleichstrom wegen der Anforderungen der Wirtschaftlichkeit als ausgesprochen unvorteilhaft erscheint, während der Einphasenstrom den Anforderungen in beiden Richtungen wohl entspricht, so lautet unsere Schlußfolgerung über die Wahl der Stromart für größere elektrische Bahnen deshalb zugunsten des Einphasenstromes, und zwar des Einphasenstromes mit niedriger Frequenz und hoher Fahrspannung, bezogen aus Hauptspisepunkten, die nur eine transformatorische Energieumsetzung zu besorgen haben.

Unsere Schlußfolgerung befindet sich im Einklang mit den bereits getroffenen Entscheidungen der Mehrzahl der großen europäischen Bahnverwaltungen, von denen wiederum die meisten auf Grund äußerst sorgfältiger Untersuchungen, die

zum Teil durch die Erfahrungen kostspieliger Versuchsbetriebe wesentlich gestützt sind, getroffen worden sind. Für die weitere Entwicklung der elektrischen Zugförderung auf größeren Bahnen ist diese Lage deshalb äußerst erfreulich, weil damit den noch zögernden Eisenbahnverwaltungen die Wahl der fortschrittlichen, weil hygienischen, von der Kohlenförderung freier machenden Betriebsart der Eisenbahnen bedeutend erleichtert wird.

Bisher erschienene Hefte der
Sammlung Vieweg

- Heft 1. Dr. Robert Pohl und Dr. P. Pringsheim-Berlin: *Die lichtelektrischen Erscheinungen*. Mit 36 Abbildungen. M. 3,—.
- Heft 2. Dr. C. Freiherr von Girsewald-Berlin-Halensee: *Peroxyde und Persalze*. M. 2,40.
- Heft 3. Diplomingenieur Paul Béjeuhr-Charlottenburg: *Der Blériot-Flugapparat und seine Benutzung durch Pégoud vom Standpunkte des Ingenieurs*. Mit 26 Abbildungen. M. 2,—.
- Heft 4. Dr. Stanislaw Loria-Krakau: *Die Lichtbrechung in Gasen als physikalisches und chemisches Problem*. Mit 3 Abbildungen und 1 Tafel. M. 3,—.
- Heft 5. Professor Dr. A. Gockel-Freiburg i. d. Schweiz: *Die Radioaktivität von Boden und Quellen*. Mit 10 Abbildungen. M. 3,—.
- Heft 6. Ingenieur D. Sidersky-Paris: *Brennereifragen: Kontinuierliche Gärung der Rübensäfte. — Kontinuierliche Destillation und Rektifikation*. Mit 24 Abbildungen. M. 1,60.
- Heft 7. Hofrat Professor Dr. Ed. Donath und Dr. A. Gröger-Brünn: *Die flüssigen Brennstoffe, ihre Bedeutung und Beschaffung*. Mit 1 Abbildung. M. 2,—.
- Heft 8. Geh. Reg.-Rat, Professor Dr. Max B. Weinstein-Berlin: *Kräfte und Spannungen. Das Gravitations- und Strahlenfeld*. M. 2,—.
- Heft 9/10. Geh. Reg.-Rat, Professor Dr. O. Lummer-Breslau: *Verflüssigung der Kohle und Herstellung der Sonnentemperatur*. Mit 50 Abbildungen. M. 5,—.
- Heft 11. Dr. E. Przybyllok: *Polhöhen-Schwankungen*. Mit 8 Abbildungen. M. 1,60.
- Heft 12. Professor Dr. Albert Oppel-Halle a. S.: *Gewebekulturen und Gewebepflege im Explantat*. Mit 32 Abbildungen. M. 3,—.
- Heft 13. Dr. Wilhelm Foerster-Berlin: *Kalenderwesen und Kalenderreform*. M. 1,60.
- Heft 14. Dr. O. Zoth-Graz: *Über die Natur der Mischfarben auf Grund der Undulationshypothese*. Mit 3 Textfiguren und 10 Kurventafeln. M. 2,80.
- Heft 15. Dr. Siegfried Valentiner-Clausthal: *Die Grundlagen der Quantentheorie in elementarer Darstellung*. Mit 8 Abbild. M. 2,60.
- Heft 16. Dr. Siegfried Valentiner-Clausthal: *Anwendung der Quantenhypothese in der kinetischen Theorie der festen Körper und der Gase. In elementarer Darstellung*. Mit 4 Abbildungen. M. 2,60.
- Heft 17. Dr. Hans Witte-Wolfenbüttel: *Raum und Zeit im Lichte der neueren Physik*. Eine allgemeinverständliche Entwicklung des raumzeitlichen Relativitätsgedankens bis zum Relativitätsprinzip. Mit 17 Abbildungen. M. 2,80.
- Heft 18. Dr. Erich Hupka-Tsingtau: *Die Interferenz der Röntgenstrahlen*. Mit 33 Abbildungen und 1 Doppeltafel in Lichtdruck. M. 2,60.