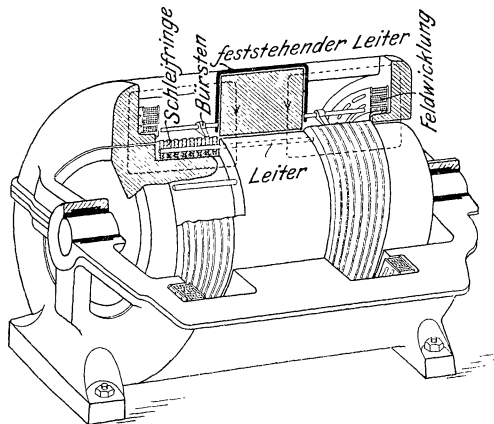


Fig. 54.

Unipolarmaschine von Noeggerath.



körper und zweier hintereinander geschalteter Scheiben auf einer Welle zu einer geringeren Schleifring- und Bürstenzahl führt. Noeggerath berichtet über folgende Ausführungen von Unipolarmaschinen der General Electric Co. nach Fig. 54:

eine Versuchsmaschine für 300 KW, 500 V, 3000 Uml./min, eine elektrolytische Maschine für 6 V, 8000 Amp, 1200 Uml./min, einen Umformer von $125/6\frac{1}{4}$ V, mehrere Maschinen mit stehender Welle von 500 KW, 300 bis 600 V und 2000 Uml./min, sowie 2000 KW, 200 bis 600 V und 900 Uml./min. Die Unipolarmaschinen lassen sich in der Spannung beliebig regeln. Durch einfaches Umschalten der feststehenden Leiter und Klemmen kann man einen Stromerzeuger von 600 V auf 300 oder 150 V bei gleichbleibender Leistung bringen. Man kann auch einem und demselben Stromerzeuger verschiedene Spannungen entnehmen. Zur Stromabnahme von den mit 125 m/sk umlaufenden Schleifringen werden Bürsten aus zwei verschiedenen Metallen benutzt.

Die Umlaufzahlen der üblichen Dampfturbinen sind immer noch so groß, daß die Preise der elektrischen Turbostromerzeuger fast so hoch sind wie die der langsam laufenden Stromerzeuger zur unmittelbaren Kupplung mit Dampfmaschinen gleicher Leistung. Der geringste Preis bei gegebener Leistung liegt bei 30 bis 60 vH unter den jetzt gebräuchlichen Turbinenumlaufzahlen. Eine Gleichstromturbodynamo für 270 KW, 3000 Uml./min und 300 V kostet fast genau soviel wie eine 270 KW-Maschine für 130 Uml./min. Eine Drehstromturbodynamo für 330 KVA, 3000 Uml./min ist allerdings um rd. 20 vH billiger als die entsprechende langsam laufende Bauart für 125 Uml./min. (Schluß folgt.)

Neue elektrische Güterzuglokomotive der Italienischen Staatsbahnen.¹⁾

Von K. von Kando.

(hierzu Tafel 8)

(Schluß von S. 1255)

Stromverbrauch.

Wie die in Fig. 5 und 6 gegebenen Schaulinien zeigen, haben die Motoren der Drehstromlokomotive bei Einzelschaltung einen Wirkungsgrad von 95 vH, der zwischen $3\frac{1}{2}$ und 8 t Zugkraft nahezu unveränderlich ist; der Wirkungsgrad ist andererseits von $1\frac{1}{4}$ t Zugkraft bis über die durch die Anhaftung begrenzte größte Zugkraft hinaus höher als 90 vH. Bei Kaskadenschaltung der Motoren beträgt der Höchstwert des Wirkungsgrades 89 vH, und er bleibt zwischen 2 und 10 t Zugkraft über 85 vH. Die in der letzten Zeit veröffentlichten Einphasenmotoren haben bei großer Leistung einen höchsten Wirkungsgrad von 90 bis 92 vH, während bei hoher Geschwindigkeit oder bei Schaltung mit niedrigerer Spannung des Fahrschalters der Wirkungsgrad wesentlich sinkt, und zwar bis 80 vH.

Wir sehen nun, daß ein genauer Vergleich der Wirtschaftlichkeit, gegründet auf die Linien des Wirkungsgrades, nicht allgemein, sondern nur in bestimmten Fällen möglich ist. Diese Zahlen zeigen aber doch, daß der Stromverbrauch beim Einphasenstrom auch ohne Berücksichtigung des Energieverlustes im Transformator der Einphasenlokomotive größer ist als bei einem gleich schweren und mit gleicher Geschwindigkeit auf derselben Strecke beförderten Drehstromzuge. Der Einphasenstrom ist nur in solchen Fällen wirtschaftlicher, wo das Anfahren einen großen Teil des Stromverbrauches ausmacht, weil ein beträchtlicher Teil der Verluste, und zwar die Verluste im Anlaufwiderstand der Drehstromlokomotive, beim Einphasensystem vollständig wegfallen.

Wir wollen nun die Bedeutung des Fortfalles der Widerstandverluste während des Anlassens an einem bestimmten Fall betrachten. Nehmen wir an, daß ein Zug von 335 t Gesamtgewicht auf gerader wagerechter Linie von der preußischen Güterzuglokomotive und ein Zug von 412 t Gesamtgewicht²⁾,

ebenfalls auf wagerechter gerader Linie von der Drehstromlokomotive beschleunigt werde. Bei der Berechnung der zur Beschleunigung notwendigen Kraft haben wir 10 vH für die umlaufenden Massen zum Gesamtgewicht des Zuges zugeschlagen, und für die rollende Reibung haben wir im Durchschnitt 4 kg/t gerechnet. Die Verluste in den Zahnrädern der Wechselstromlokomotive und in den Kuppelstangen der Drehstromlokomotive sind mit je 5 vH berücksichtigt. Die Stufenschaltung der Wechselstromlokomotive haben wir so gedacht, daß der Motor bei jeder Spannung möglichst in der Gegend seines besten Wirkungsgrades¹⁾ arbeitet, und bei der Drehstromlokomotive haben wir sowohl bei Kaskaden- als bei Einzelschaltung 10 t Zugkraft am Radumfang angenommen.

Die in Fig. 7 und 8 gegebenen Schaulinien zeigen den Strom- und Wattverbrauch in beiden Fällen²⁾: bei Drehstrom sind zur Beschleunigung des Zuges bis 44 km/st 19200 W-st verbraucht, bei Wechselstrom 13000; an V-Amp-st sind bei Drehstrom 21350, bei Wechselstrom 16750 verbraucht. Wenn wir den Verbrauch auf die Tonne des Gesamtzuggewichtes erstrecken, so ergeben sich bei Drehstrom 46,6 W-st und 51,8 V-Amp-st, bei Einphasenstrom 38,8 W-st und 50 V-Amp-st; folglich erfordert das Anlassen der Drehstromlokomotive auf die Tonne 20 vH mehr Watt und $3\frac{1}{2}$ vH mehr Volt-Ampere. Wenn wir hingegen in beiden Fällen die Nutzlast als Grundlage nehmen, so sind an Wattstunden auf die Tonne Nutzlast bei Drehstrom 54,4, bei Einphasen-Wechselstrom 47,2, an Volt-Ampere-Stunden bei Drehstrom 60,6, bei Einphasen-Wechselstrom 60,7 verbraucht. Somit ist der Unterschied zwischen Drehstrom- und Einphasen-Wechselstrom nur 15,2 vH des Wattverbrauches zugunsten des Einphasenstromes, wogegen im Volt-Ampere-Verbrauch kein wesentlicher Unterschied bemerkbar ist. Bei allen diesen Rechnungen ist der Energieverlust im Transformator der Wechselstromlokomotive unberücksichtigt gelassen worden. Wenn wir

¹⁾ Sonderabdrücke dieses Aufsatzes (Fachgebiet: Eisenbahnbetriebsmittel) werden an Mitglieder postfrei für 65 Pfg gegen Voreinsendung des Betrages abgegeben. Nichtmitglieder zahlen den doppelten Preis. Zuschlag für Auslandporto 5 Pfg. Lieferung etwa 2 Wochen nach Erscheinen der Nummer.

²⁾ Das Gewicht des Drehstromzuges ist hier dasselbe wie im vorhergehenden Abschnitte; das Gewicht des Wechselstromzuges hingegen ist im Verhältnis der der Stundenleistung entsprechenden Zugkräfte ange-

nommen. S. ETZ 1908 S. 427; W. Wechmann, »Die erste Wechselstromlokomotive auf der preußischen Staatsbahn«.

¹⁾ Die Zugkräfte, Geschwindigkeiten, Wirkungsgrade und Leistungsfaktoren sind aus den in dieser Zeitschrift 1908 S. 1148 von Dr. Eichberg veröffentlichten Schaulinien entnommen.

²⁾ Die Schaulinien der Zugkraft enthalten auch die für Reibung der Zahnräder und Schubstangen angenommenen 5 vH.

auch ihn in Betracht ziehen, so vermindert sich der Unterschied im Wattverbrauch, und der Unterschied im Volt-Ampere-Verbrauch wird noch größer zugunsten der Drehstromlokomotive. Wenn wir bei Drehstrom statt zweier synchroner Geschwindigkeiten drei oder vier anwenden, oder wenn wir mit Stromrückgewinnung bremsen, wird die gesamte zur Beschleunigung verbrauchte, abzüglich der beim Bremsen zurückerstatteten Energie wesentlich geringer als die von der Wechselstromlokomotive verbrauchte sein. Ich behalte mir vor, diese meine Behauptung in einem andern Aufsatz zahlen-

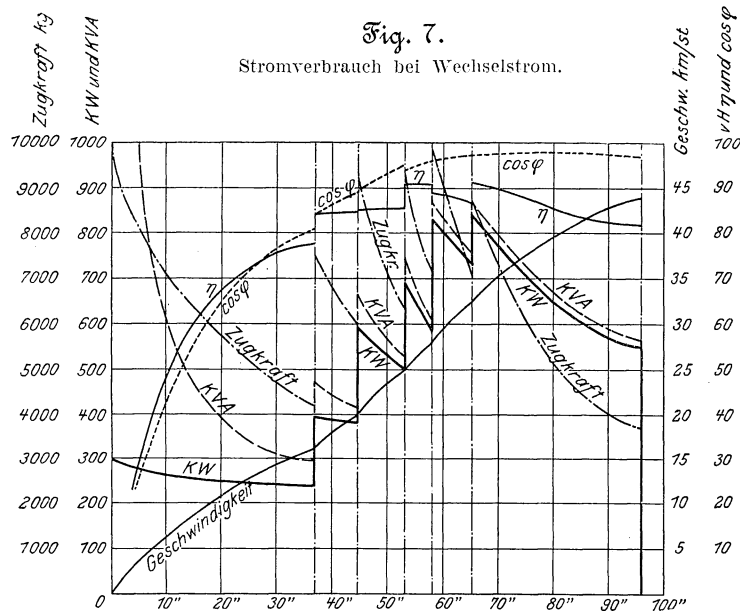
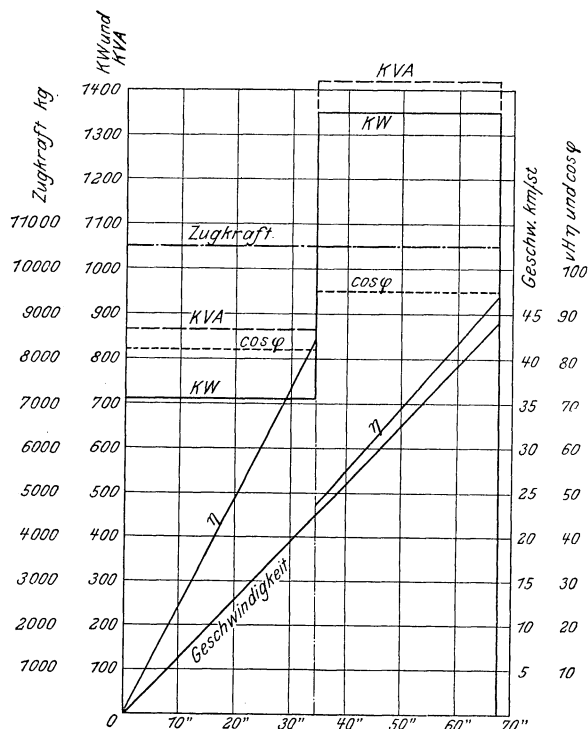


Fig. 8. Stromverbrauch bei Drehstrom.



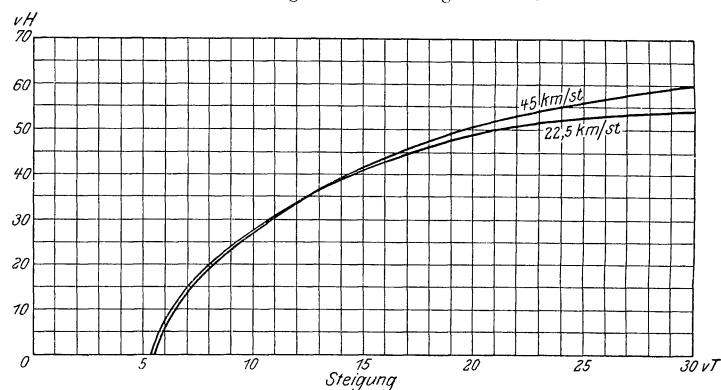
mäßig nachzuweisen; hier möchte ich meine Folgerung rein auf das Ausgeführte beschränken.

Auf wagerechter Strecke oder auf mäßigen Steigungen ist im Stromverbrauch bei beiden Stromarten, wie wir sehen, kein großer Unterschied; wesentlich wird der Unterschied jedoch, sobald die Steigungen einen solchen Wert erreichen, daß die Lokomotiven der talifahrenden Züge mit Stromrückgewinnung arbeiten können. In dem Diagramm Fig. 9 ist die durch die beschriebene Drehstromlokomotive zurückgewinnbare Energie

als Funktion der Steigung in vH der bei der Bergfahrt auf derselben Steigung verbrauchten Energie für 22 und 45 km/st Geschwindigkeit dargestellt¹⁾. Wir sehen, daß bei einer Steigung von 26 vH, also auf einer Linie wie die oben behandelte Teilstrecke Biasca-Airolo der Gotthard-Bahn, die zurückgewonnene Energie bereits 55 vH der bei Bergfahrt verbrauchten ausmacht. Wenn wir nun hierzu noch in Betracht ziehen, daß, wie aus Zahlentafel 3 (S. 1255) folgt, bei gleicher Nutzlast der Wechselstromzug um 16 vH schwerer ist, so wird die zur Berg- und Talfahrt für dieselbe Nutzlast notwendige Gesamtenergie bei Einphasenstrom ohne Stromrückgewinnung das 2,6fache der bei Drehstrom mit Stromrückgewinnung notwendigen Energie betragen. In dieser Zahl sind der schlechtere Wirkungsgrad des Wechselstrommotors und die besonderen Verluste im Transformator der Wechselstromlokomotive unberücksichtigt gelassen; ziehen wir auch sie in Rechnung, so wird die Verhältniszahl für Einphasenstrom noch ungünstiger, und zwar etwa 3 sein. Hier soll nicht unerwähnt gelassen werden, daß auch mit Einphasenstrom wie mit Gleichstrom die Rückgewinnung von Strom bei der Talfahrt theoretisch möglich ist, bei Gleichstrom durch Anwendung von Nebenschlußmotoren, bei Einphasen-Wechselstrom mittels besonderer Erregung der Motoren. Diese letztere muß jedoch zur Gattung des Betriebes mit Nebenschluß-Gleichstrommotoren gerechnet werden, die lange nicht den

Fig. 9.

Zurückgewonnene Energie in vH.

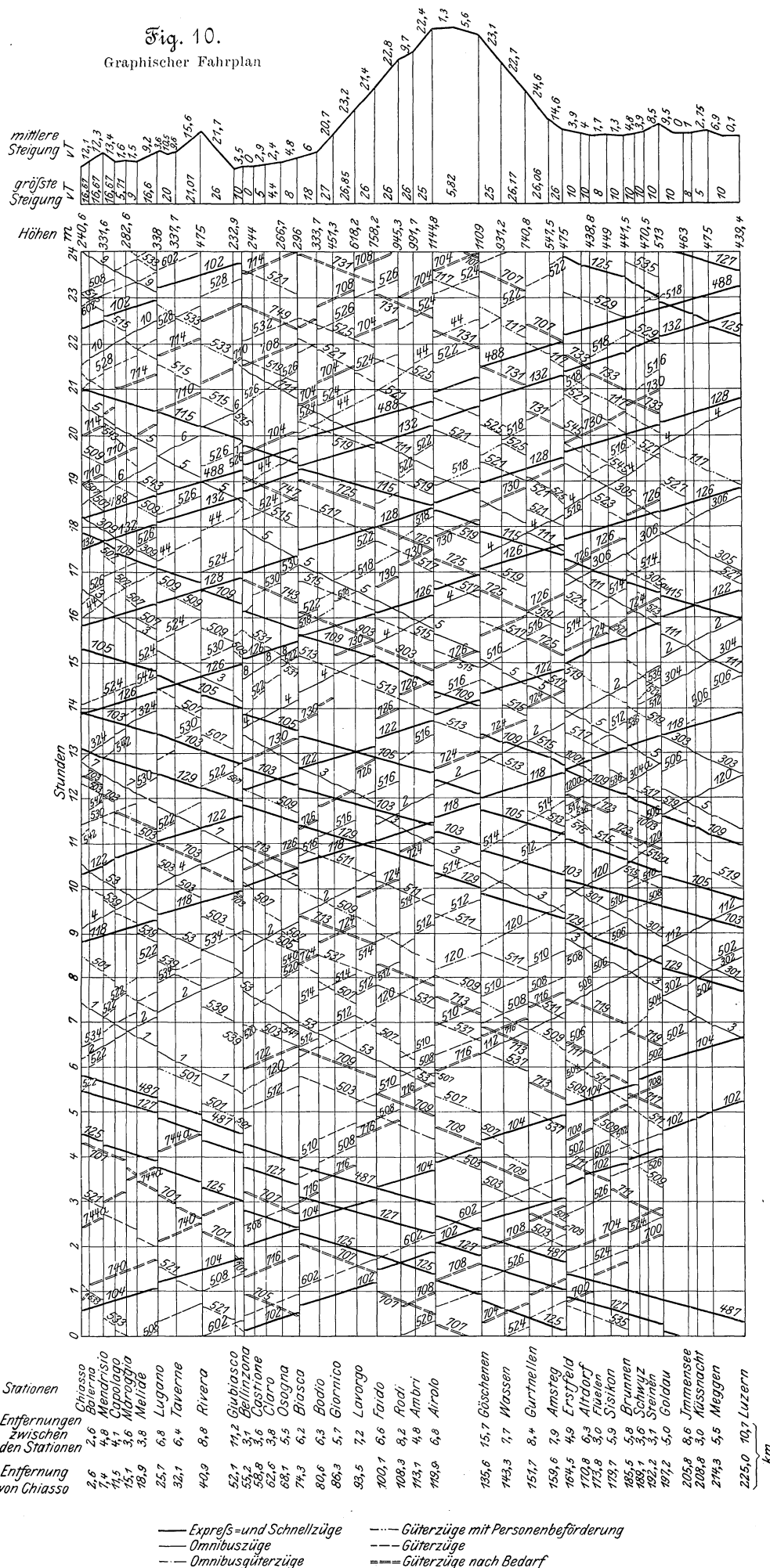


Vergleich mit der einfachen und selbsttätigen Stromrückgewinnung des Drehstromsystems aushält, und es muß infolgedessen von den bis jetzt bewährten Betriebsarten in erster Linie das Drehstromsystem als solches betrachtet werden, bei dem man mit Stromrückgewinnung auf der Talfahrt in der Praxis rechnen kann.

Um die wirtschaftliche Tragweite der Stromrückgewinnung in einem Beispiel zu beleuchten, werde ich im Nachstehenden den Stromverbrauch auf der Linie Luzern-Chiasso der Gotthard Bahn unter der Voraussetzung berechnen, daß ein dem jetzigen gleichwertiger Verkehr mit der hier beschriebenen Drehstromlokomotive abgewickelt wird.

Da die Geschwindigkeit von 45 km/st zur Einhaltung des Fahrplanes der Schnell- und Expreszüge nicht mehr genügt, habe ich vorausgesetzt, daß diese Züge mit Lokomotiven gleicher elektrischer Einrichtung, jedoch mit größerem Trieb-raddurchmesser befördert werden, und zwar so, daß ihre synchrone Geschwindigkeit anstatt 45 60 km/st ausmache. Eine Lokomotivform mit drei oder vier synchronen Geschwindigkeiten und 90 km/st Höchstgeschwindigkeit hätte dem Schnell- und Expreszugverkehr besser entsprochen; denn mit dieser Lokomotive könnte man die Fahrzeit durch Schnellerfahren auf ebener Strecke wesentlich verkürzen; ich wollte aber die ausgeführte Bauart wenigstens im elektrischen Teil als Grundlage meiner Folgerungen beibehalten. Der Fahrplan ist so aufgestellt, daß die Züge alle in der jetzigen fahrplanmäßigen Fahrzeit ihren Weg zurücklegen. Fig. 10 zeigt den graphischen Fahrplan der angenommenen Züge. Alle regelmäßigen Züge des jetzigen Verkehrs sind beibehalten, und es ist voraus-

¹⁾ Die Reibungsverluste im Lokomotivgetriebe sind mit 5 vH der Leistung berücksichtigt.



schiedenen elektrischen Stromarten die Stromrückgewinnung nicht als vernachlässigbar betrachtet werden darf.

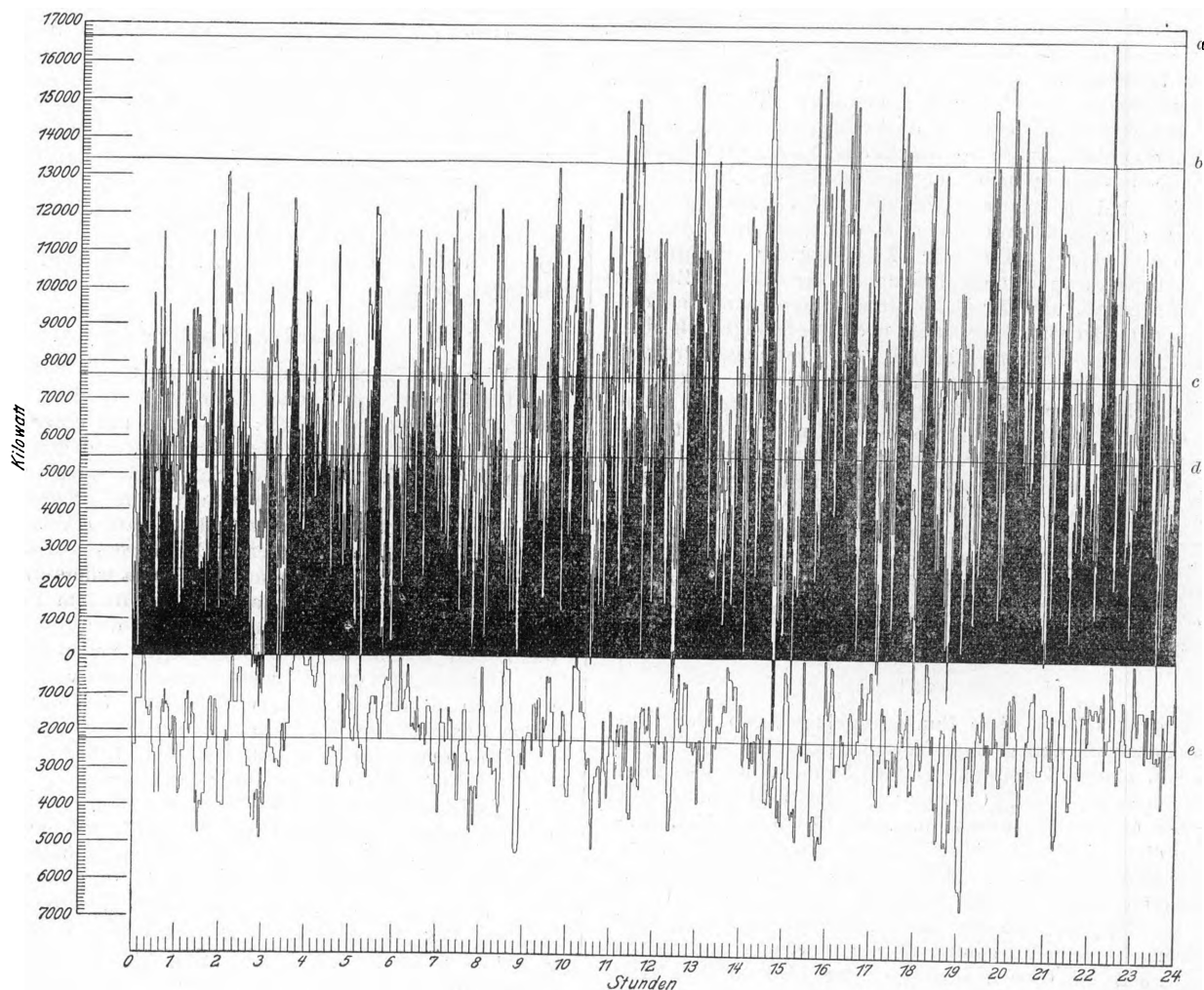
Nicht nur der mittlere Stromverbrauch ist bei Stromrückgewinnung geringer als diese, sondern auch der stärkste Belastungsstoß, wie aus dem Verbrauchdiagramm ersichtlich ist. In unserm Falle beträgt der stärkste Stoß ohne Stromrückgewinnung 16660 KW, mit Stromrückgewinnung 13400 KW, also 3260 KW weniger. Ohne dieser Zahl, die von der zufälligen Verteilung der fahrenden Züge auf der Linie abhängt, eine besondere Wichtigkeit beimessen zu wollen, kann man ihr doch die Größenordnung der Ersparnis entnehmen, die man infolge der Stromrückgewinnung auch in den Anlagekosten für Kraftwerk und Leitung erwarten darf.

stung, also mit rd. 550 KW, das macht in 4 min rd. 130 000 KW-sk, und somit bleiben 270 000 KW-sk zur Beschleunigung der in Bewegung befindlichen Massen. Während dieser Zeit sind durchschnittlich drei Expres-, $2\frac{1}{4}$ Omnibus und $1\frac{3}{4}$ Güterzüge, zusammen durchschnittlich 3130 t in Bewegung.

Die Beschleunigung dieser Massen¹⁾ um 30 vH, also der Expreszüge von 60 auf 78 km/st und der Omnibus- und Güterzüge von 45 auf 58 km/st, verzehrt 240 000 KW-sk, genügt folglich, um den in Betracht gezogenen Ueberschuß an Energie aufzunehmen.

In Wirklichkeit wäre die Geschwindigkeitszunahme kleiner, weil die Leerlaufverluste der Kraftübertragung mit zunehmender Periodenzahl und Spannung wachsen. Sollte aber

Fig. 11. Stromverbrauch.



a größter Stromstoß ohne Stromrückgewinnung b größter Stromstoß mit Stromrückgewinnung c Tagesdurchschnitt ohne Stromrückgewinnung
d Tagesdurchschnitt mit Stromrückgewinnung e Tagesdurchschnitt der rückgewonnenen Energie

Gegen die praktische Verwendbarkeit der Stromrückgewinnung könnte die Einwendung gemacht werden, daß es Augenblicke gibt, wo zur Verwertung der zurückzugewinnenden Energie nicht genügende Belastung durch in Berg- oder ebener Fahrt befindliche Züge vorhanden ist. Wenn wie in unserm Fall die Dynamos, Leitungen, Transformator-Nebenerwerke die zurückerstattete Energie für ihre Leerlaufverluste nicht verbrauchen, so bleibt noch immer die Masse der Dynamos und der in Fahrt befindlichen Züge, die durch die überflüssige Energie beschleunigt wird, und hierdurch erhält diese eine nützliche Verwendung.

Es wird interessant sein, die Größenordnung dieser Beschleunigung in unserm Falle rechnerisch zu untersuchen.

Die größte negative Fläche des Verbrauchdiagrammes fällt zwischen 14⁴³ und 14⁴⁷ Uhr und macht rd. 400 000 KW-sk aus. Die Leerlaufverluste der ganzen Anlage schätzen wir keinesfalls zu hoch mit 10 vH der durchschnittlichen Lei-

eine ungünstige Verteilung der Energie einen länger dauernden Ueberfluß an zurückerstatteter Energie ergeben, so kann im Kraftwerk ein selbsttätiger Widerstand verwendet werden, wie solche für die Kraftwerke der Kataraktunnel der Great Northern-Bahn und der Giovi-Linie in Ausführung sind. Dieser Widerstand wird mit dem Regler der Dampfturbine derartig verbunden, daß er bei einer Beschleunigung der Turbine über eine gewisse Grenze hinaus eingeschaltet wird und den für den Betrieb gefährlichen Ueberschuß der Energie selbsttätig verzehrt.

Die Erfahrung auf der Valtellina-Bahn zeigt, daß sich die Lokomotivführer in kurzer Zeit derartig an die synchrone Geschwindigkeit gewöhnen, daß sie sehr leicht ohne jedweden Geschwindigkeitsanzeiger die Ueberschreitung beurteilen können; um eine unzulässige Geschwindigkeitsteige-

¹⁾ + 10 vH für umlaufende Teile.

zung zu vermeiden, genügt es, daß einzelne der talfahren-den Züge ihre mechanische Bremsen in Tätigkeit setzen. Die Anwendung eines Geschwindigkeitsanzeigers erleichtert dies wesentlich.

Wir haben aus dem Vorhergehenden gesehen, wie sich die Drehstromlokomotive im Betrieb den Wechselstromlokomotiven gegenüber verhält; sehen wir nun, welche Vorteile die eine und die andre Stromart in den andern Gliedern der Anlage bietet, und betrachten wir Kraftwerk und Leitungsanlage nacheinander.

Kraftwerk.

Es ist bekannt, daß derselbe Stromerzeuger mit Dreiphasenwicklung ungefähr 50 vH mehr als mit Einphasenwicklung leistet, so daß schon aus diesen grundsätzlichen Eigenschaften der Wechselstrommaschinen die Einphasenstromerzeuger für dieselbe Leistung teurer kommen. Die Erfahrung mit den ersten Einphasenanlagen zur Zugförderung hat gezeigt, daß die Stromerzeuger, die an Hand der mit großen Drehstromerzeugern gesammelten Erfahrungen konstruiert waren, nicht nur die erwähnte Tatsache bestätigen, sondern auch derartige unvorhergesehene Nachteile aufwiesen, daß ganz andre Konstruktionsnormen erforderlich wurden. Es hat sich nämlich herausgestellt, daß bei Ueberlastung die bei Einphasenwicklung auftretenden großen Streufelder eine außerordentliche Erwärmung des Ankerkernes verursachten. Ein für Zugförderung geeigneter Einphasenstromerzeuger muß besonders für diesen Zweck konstruiert werden, und die Materialausnutzung wird im Vergleich mit dem Drehstromgenerator noch ungünstiger als das Verhältnis 2 : 3. Diesen Nachteil des Einphasenstromes gegenüber dem Drehstrom im Kraftwerk gleicht gewissermaßen die einfachere Schaltanlage aus. Man sollte aber diesen Vorteil nicht überschätzen. Denn gerade die teuersten Glieder der Schaltanlage, die Ausschalter, müssen, wenn sie auch anstatt dreipolig zwei- oder auch einpolig sein können, bei gleicher Leistung des Kraftwerkes und der Dynamoeinheiten der Unterbrechung derselben Energie gewachsen sein; folglich müssen ihre Elemente für die Hälfte oder für das Ganze der auszuschaltenden Energie bemessen sein, wogegen die Elemente des Dreiphasenausschalters je nur $\frac{1}{3}$ zu unterbrechen haben.

Leitungsanlage.

Hier sind wir an dem Punkt angelangt, wo der Einphasenstrombetrieb den größten Vorteil gegenüber dem Drehstrombetrieb bietet. Zweifellos gibt es Bahnen, bei denen die Kosten einer doppelten Oberleitung die Einführung des elektrischen Betriebes bereits unwirtschaftlich machen, wogegen mit einer einfachen Oberleitung die Anlagekosten in den Grenzen der wirtschaftlichen Möglichkeit bleiben. Außer dem Kostenpunkt spricht auch die Einfachheit der einfachen Oberleitung der doppelten gegenüber stark zugunsten des Einphasenstromes, jedoch spielt hier außer den wirklichen Gründen auch die Geschmackfrage eine große Rolle. Die Möglichkeit einer vollständig zuverlässigen und guten Ausführung der doppelten Oberleitung ist nach den Erfahrungen der letzten Jahre keine Frage mehr; sind doch in Europa heute bereits nicht weniger als drei Firmen ersten Ranges unter den strengsten Sicherheitsleistungen bereit, die Ausführung von solchen Leitungsanlagen zu übernehmen.

Bei 100 qmm Kupferquerschnitt der Leitung beträgt der Unterschied in den Herstellkosten einfacher und doppelter Kontaktleitungen angesichts der heutigen Kupferpreise rd. 3500 bis 4000 frs/km. Untersuchen wir nun in einem bestimmten Falle die Bedeutung dieses Nachteiles andern Vorteilen des Drehstrombetriebes gegenüber. Als Beispiel nehmen wir die Linie Chiasso-Luzern der Gotthard-Bahn. Die gesamte Gleislänge dieser Strecke beträgt 367 km; hierzu kommen an Stationsgleisen rd. 20 vH, zusammen also 440 km. Die Mehrkosten der doppelten Oberleitung machen folglich 1540 000 bis 1760 000 frs aus. Stellen wir diese den Mehrkosten der notwendigen Wechselstromlokomotiven gegenüber. Bei der Annahme, die wir zur Berechnung des Stromverbrauches auf der Linie Chiasso-Luzern machten, haben wir

gesehen, daß täglich 18 280 Lokomotivkilometer zurückzulegen wurden; mit 250 km für die Lokomotive gerechnet, schätzen wir die notwendige Anzahl der Lokomotiven mit 75 entschieden nicht zu hoch. (Die Gotthard-Bahn besitzt 169 Dampflokomotiven.) Den Preis einer Drehstromlokomotive mit 140 000 frs geschätzt, kommen die Gesamtkosten der Lokomotiven auf 10 500 000 frs. Es genügt also, wenn die Wechselstromlokomotiven gleicher Leistung nur 15 bis 17 vH teurer als die Drehstromlokomotiven sind, damit die durch die einfache Oberleitung beim Einphasenstrom erreichbare Ersparnis durch die Mehrkosten der Lokomotiven aufgezehrt wird. Dieser Unterschied wird aber viel größer. Wie wir aus Zahlentafel 3 gesehen haben, ist auf der Teilstrecke Biasca-Airolo, um dasselbe Zuggewicht zu befördern, bei einfachem Wechselstrom zweimal so viel Lokomotivkonstruktionsgewicht nötig als bei Drehstrom. Ohne daß hier bestimmte Zahlen für die Kosten von Wechselstromlokomotiven gegeben werden, kann schon gesagt werden, daß die Mehrkosten der Wechselstromlokomotiven bei gleicher Leistung ein Vielfaches der Ersparnis an den Kosten der Leitungsanlage ausmachen.

Bei dieser Beurteilung ist nur das Ausgeführte und nicht die Möglichkeit der weiteren Entwicklung der beiden Bauarten in Betracht gezogen, und obwohl zu erwarten ist, daß sowohl die Drehstrom- als auch die Wechselstromlokomotive in ihrer Leistungsfähigkeit auf die Gewichtseinheit noch Fortschritte machen wird, steht die Wechselstromlokomotive heute so weit hinter der Drehstromlokomotive zurück, daß nicht zu erwarten ist, daß sie diese in der Leistungsfähigkeit jemals wird einholen können.

Fahrdrachtspannung.

Was die Betriebsspannung anlangt, so haben sich seit der Einführung von hoher Spannung für die Zugförderung zwei Richtungen entwickelt: die eine mit einer mittelhohen Spannung von 3000 V¹⁾ bei Drehstromanlagen (Valtellina-Bahn, Simplon-Tunnel, Giovi, Savona-S. Giuseppe und andre von den Italienischen Staatsbahnen geplante Strecken), die andre mit einer Betriebsspannung von über 10 000 V ausschließlich bei den Wechselstrombahnen. Die Vorteile der Anwendung einer höheren Spannung sind allgemein bekannt. Außer der Ersparnis an Leitungskupfer, die in diesem Falle weniger wichtig ist, ist auch die Einfachheit in der Verteilung, wenn die höhere Spannung eine Uebertragung vom Kraftwerk auf die Oberleitung ohne Zwischenschaltung von Transformatorenstellen ermöglicht, ein Vorteil, der für die Anwendung hoher Spannung spricht. Die höchste bis jetzt im praktischen Betrieb verwandte Spannung beträgt 15 000 V, und zwar auf der Linie Seebach-Wettingen.

Es ist unmöglich, auf Grund der heutigen Erfahrungen eine Meinung darüber auszusprechen, welche höchste zulässige Spannung praktisch als Betriebsspannung von Fahrdrähten verwendet werden könnte. Eines ist aber zweifellos, nämlich daß diejenige Spannung, die für Fernleitungen zur Kraftübertragung noch mit voller Sicherheit benutzt werden kann, nie für die Oberleitungen von Bahnen verwendet werden darf; die höchsten Spannungen, die mit gutem Erfolge für jene Fernleitungen anwendbar sind (100 000 V), machen Isolatoren und Einführkonstruktionen nötig, die im Ladeprofil der Bahnen kaum mehr Platz finden können. Auch wenn die Isolierung des Fahrdrachtes selbst noch praktisch zu lösen wäre, würde die Einführung der Leitung in die Lokomotive doch solche Schwierigkeiten bieten, daß ihre Ueberwindung kaum mehr möglich wäre. Es wird also Fälle geben, und zwar hauptsächlich dort, wo Wasserkräfte zur Ausnutzung kommen, wo also die Lage des Kraftwerkes gegeben ist, in denen die entferntesten Punkte der zu speisenden Linien vom Kraftwerk soweit abliegen, daß die höchste zum Betrieb der Oberleitungen noch praktisch mögliche Spannung zur Kraftübertragung nicht genügt, diese jedoch noch mit den üblichen Mitteln der Hochspannungs-Kraftübertragung möglich ist. In solchen Fällen, und es sind deren gerade bei den zu elektrisierenden Hauptlinien

¹⁾ Im Katarakt-Tunnel der Great Northern-Bahn werden Drehstromlokomotiven mit 6000 V Betriebsspannung verwendet, aber mit spannungsverminderndem Transformator auf der Lokomotive.

viele vorhanden, fällt ein Hauptvorteil der hohen Betriebsspannung, das Fehlen der Transformator-Nebenwerke, fort. Ein Vorteil bleibt jedoch mit der hohen Fahrdrachtspannung verbunden, und zwar der, daß bei gleichen Betriebsbedingungen die Entfernung der Transformatorenstellen größer sein kann, ihre Belastung gleichmäßiger ist und infolgedessen die Gesamtleistung der Transformatoren in den Nebenwerken kleiner wird.

Diesem Vorteil der höheren Fahrdrachtspannung steht aber ein wesentlicher Nachteil gegenüber: die höhere Spannung erheischt in den Motoren der Lokomotive eine stärkere Isolierung und dünnere Drähte, und folglich wird bei der höheren Spannung der verfügbare Raum in den Anker-nuten ungünstiger ausgenutzt. Dies kann dadurch umgangen werden, daß man, wie beim Wechselstrom üblich, auf der Lokomotive spannungsvermindernde Transformatoren verwendet¹⁾. Mit dieser Lösung ist aber nicht nur die Verminderung der Anzahl der Transformatorenstellen, sondern sogar deren vollständiger Fortfall zu teuer bezahlt. Wenn wir in dem von uns in Betracht gezogenen Falle (elektrischer Betrieb der Strecke Chiasso-Luzern) die Gesamtleistung der Transformatoren der als notwendig angenommenen 75 Lokomotiven berechnen, so finden wir für eine Lokomotive rd. 1600 KW, also für alle 120 000 KW. Bestimmen wir demgegenüber die Leistung der in den Nebenwerken einzubauenden Transformatoren unter der Voraussetzung, daß sich die Stromrückgewinnung und der Stromverbrauch zwischen den Zügen nicht unmittelbar am Fahrdracht, sondern nur durch die Transformatorenstellen ausgleichen, so daß diese nicht nur die im Tagesdurchschnitt verzehrte Energie von 7650 KW, sondern auch die wiedergewonnene Energie von 2215 KW umzusetzen haben, also ihre Belastung 9865 KW im Tagesdurchschnitt ausmacht, und nehmen wir wegen ungleicher Verteilung der Belastung das Doppelte von diesem Wert an, so kommt als Transformatorenleistung der Nebenwerke auch nur $\frac{1}{6}$ von dem heraus, was an Transformatoren-Gesamtleistung auf die Lokomotiven entfällt²⁾.

Nun haben wir allerdings bei den Lokomotiven die Stundenleistung gerechnet, während für die Nebenwerke die Dauerleistung angenommen ist. Sollte infolgedessen der Preis auf das KW der Lokomotivtransformatoren nur halb so hoch sein wie der Preis auf das KW der Transformatoren der Nebenwerke, so wird die Ausgabe für die Transformatoren der Lokomotiven noch immer dreimal so groß wie die Ersparnis infolge des Fortfalls der Transformatoren der Nebenwerke sein. Man kann dieser Rechnung gegenüber einwenden, daß den Nebenwerken nicht nur die Kosten der Transformatoren, sondern auch solche der Schaltanlage und der Gebäude zur

¹⁾ auch bei den Drehstromlokomotiven des Katarakt-Tunnels (6000 V Betriebsspannung).

²⁾ Auf der Valtellina-Bahn beträgt die Gesamtleistung der Transformator-Unterstationen mit Aushilfe 3800 KW, die Gesamtleistung der Fahrbetriebsmittel 18 000 PS; diese müßten infolgedessen Transformatoren von rd. 15 000 KW Gesamtleistung erhalten, es ergäbe sich also die Verhältniszahl 1:4, trotz des schwachen Verkehrs, der die Belastung der Transformatoren sehr ungleichmäßig macht. Auf der Giovi-Strecke mit 33 vH Aushilfe und mit Transformatorstelle am Ende der elektrisch betriebenen Linie, die für die Verlängerung in beiden Richtungen schon mit Transformatoren versehen ist, macht die Gesamtleistung der Transformatoren 12 000 KW aus. Die Leistung der für diese Strecke bis jetzt bestellten Lokomotiven beträgt 50 000 PS und die hierzu notwendige Leistung der Transformatoren, die auf den Lokomotiven anzubringen wären, rd. 40 000 KW. Dabei müßte übrigens die Anzahl der Lokomotiven wesentlich vergrößert werden, sollte die Strecke in beiden Richtungen derartig ausgedehnt werden, daß die Transformatorstellen voll ausgenutzt werden.

Last zu legen sind, man sollte aber nicht vergessen, daß auch bei den Lokomotiven das Mitschleppen des Transformators Mehrkosten des mechanischen Teiles und der Schaltanlage der Lokomotive verursacht, und außerdem werden wegen der Unterteilung der Leitungsanlage Schalterkammern notwendig, die bei Verwendung von Transformatoren-Nebenwerken überflüssig sind.

Wenn die einfache Verteilung vom Kraftwerk aus auch noch so vorteilhaft erscheinen sollte, so hat sie bei großen Anlagen doch ihre ersten Nachteile. Große Stromerzeuger mit hoher Ueberlastfähigkeit, hauptsächlich wenn ihre umlaufenden Teile große kinetische Energie haben, wie die großen Turbodynamos, geben bei unmittelbarem Kurzschluß augenblicklich eine solche Energiemenge ab, daß sie von keinem Ausschalter mehr unterbrochen werden kann. Wenn das Kraftwerk die Fahrleitungen durch Transformatoren betreibt, so werden die Einwirkungen der Kurzschlüsse in der Oberleitung durch diese gedämpft. Kurzschlüsse in der Kraftübertragungsleitung sind viel weniger häufig und treten auch selten so heftig auf, weil das Erden eines Drahtes keinen unmittelbaren Kurzschluß gibt, wie das Erden eines Fahrdrahtes einer Bahn, bei der die Schienen als Rückleitung dienen. Die Erfahrung mit der größten Wechselstrombahn, der New Haven-Bahn, hat gezeigt, daß der Betrieb wegen der Zerstörungen, welche die Kurzschlüsse der Fahrleitung in der Schaltanlage und an den Stromerzeugern verursachten, solange unmöglich war, als man nicht Induktionsspulen, welche die Kurzschlußströme dämpften, in die Speiseleitung eingeschaltet hatte. Daß diese Induktionsspulen den Leistungsfaktor der Anlage und infolgedessen die Ausnutzung der Stromerzeuger unbedingt wesentlich verschlechtern, ist außer Frage.

Zum Schluß komme ich zum Gegenstand dieses Aufsatzes, zur Lokomotive, zurück. Wir sehen jeden Tag, welche Anstrengungen die Konstrukteure von Dampflokomotiven machen, um die Leistung der Dampflokomotive auf die Gewichtseinheit und ihre Wirtschaftlichkeit zu verbessern, wir sehen, welche Wichtigkeit die Eisenbahnfachleute jedem Fortschritt in dieser Richtung zuschreiben; bei der Beurteilung der verschiedenen elektrischen Betriebsarten hingegen sind diese beiden Hauptpunkte neben andern technischen Fragen beinahe vergessen worden. Die zehnjährige Entwicklung des Drehstrom-Bahnbetriebes und die sechsjährige Entwicklung des Wechselstrombetriebes zeigen, daß die Schwarzseherei hinsichtlich der Beseitigung gewisser technischer Schwierigkeiten, wie z. B. beim Einphasenstrom die Kommutierung, beim Dreiphasenstrom die Umständlichkeit der Oberleitung in Stationen und die Regelung der Geschwindigkeit usw., unbegründet war, da alle diese Fragen in zufriedenstellender Weise gelöst worden sind.

Wenn wir vor die Frage gestellt werden, welche Stromart wir wählen sollen, so dürfen wir nicht von mehr oder weniger wichtigen technischen Einzelfragen ausgehen, sondern müssen in erster Linie die Leistungsfähigkeit und die Wirtschaftlichkeit in Betracht ziehen; denn wenn die Elektriker den Sieg über die Dampflokomotive davontragen wollen, dürfen sie nicht mit elektrischen Lokomotiven hervortreten, die auf die Gewichtseinheit weniger oder kaum mehr als neuere Dampflokomotiven leisten, und diejenigen, die zwischen den Stromarten zu wählen haben, müssen wohl überlegen, was sie für gewisse technische Vorteile, wie z. B. die Einfachheit der einfachen Oberleitung, an Opfern in der Stromausnutzung und damit in den Betriebskosten bringen.