

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 56 (1965)

Heft: 10

Artikel: Fahrleitungen und Schnellverkehr

Autor: Merz, H.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916365>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 21.02.2026

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

des NIK nicht, wie es in den Gl. (4) und (5) gefordert wurde, exakt zu Null und die beiderseitigen Leerlauf- und Kurzschluss-scheinwiderstände W_l und W_k deshalb auch nicht genau ∞ bzw. 0. Gemäss Gl. (2) und (3) erhält man:

für die Eingangsseite

$$W_{1l} = \frac{A_{11}}{A_{21}} \quad W_{1k} = \frac{A_{12}}{A_{22}} \quad (38)$$

für die Ausgangsseite

$$W_{2l} = \frac{A_{22}}{A_{21}} \quad W_{2k} = \frac{A_{12}}{A_{11}} \quad (39)$$

Aus den Gl. (18) bis (21), (38) und (39) ergibt sich für den strominvertierenden NIK für $\text{Re}[S(f)] > 0$:

$$\text{Re}(W_{1l}) > 0 \quad \text{Re}(W_{1k}) \leq 0 \quad (40)$$

$$\text{Re}(W_{2l}) < 0 \quad \text{Re}(W_{2k}) \geq 0 \quad (41)$$

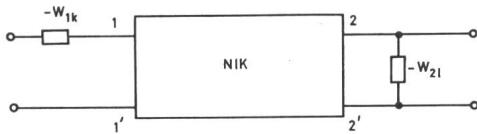


Fig. 11

Erweiterung des Bereichs von Abschlusswiderständen, in dem die Konvertierung mit einer bestimmten Genauigkeit erfolgt, durch zusätzliche Widerstände

für $\text{Re}[S(f)] > 0$ beim strominvertierenden NIK; für $\text{Re}[S(f)] < 0$ beim spannungsinvertierenden NIK; A_{11}, A_{12}, A_{21} und A_{22} sind die Elemente der Kettenmatrix des NIK ohne diese zusätzlichen Widerstände

Die verbleibenden negativen Widerstände lassen sich durch zusätzlich eingefügte positive Widerstände derselben Grösse in der in Fig. 11 dargestellten Weise kompensieren. Die Elemente der Kettenmatrix sind aus den Gl. (18) bis (21) zu be-

rechnen. Statt dessen können auch die betreffenden Leerlauf- und Kurzschluss-scheinwiderstände W_l und W_k an der ausgeführten Schaltung direkt gemessen werden. Für den Fall, dass $\text{Re}[S(f)] < 0$ ist, erhält man aus den Gl. (18) bis (21) mit den Gl. (38) und (39):

$$\text{Re}(W_{1l}) < 0 \quad \text{Re}(W_{1k}) \geq 0 \quad (42)$$

$$\text{Re}(W_{2l}) > 0 \quad \text{Re}(W_{2k}) \leq 0 \quad (43)$$

weil A_{12} und A_{21} ihre Vorzeichen wechseln.

Man kommt so auf die in Fig. 12 dargestellte Kompensationsschaltung.

Der spannungsinvertierende NIK führt, ausgehend von den Gl. (28) bis (31) mit den Gl. (38) und (39) auf dieselben Beziehungen (40) und (41) für $S < 0$, und auf die Gl. (42) und (43), für $S > 0$. Die Fig. 11 und 12 gelten somit für beide Arten von NIK.

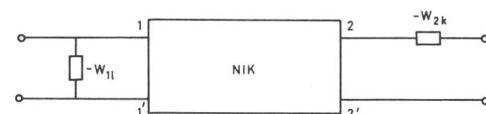


Fig. 12
Kompensationsschaltung

für $\text{Re}[S(f)] < 0$ beim strominvertierenden NIK, für $\text{Re}[S(f)] > 0$ beim spannungsinvertierenden NIK

Durch die Ausführung dieser Kompensation der Leerlauf- und Kurzschluss-scheinwiderstände erhält man eine wesentliche Erweiterung des Bereichs von Abschlusswiderständen, in dem die Konvertierung mit einer bestimmten Genauigkeit erfolgt.

Adresse des Autors:

W. Bitzer, Dipl.-Ing., Telefunken AG, Gerberstr. 34, D-715 Backnang.

Fahrleitungen und Schnellverkehr

Von H. Merz, Bern

621.332.31 : 656.052.432

Einleitend wird die Entwicklung der elektrischen Traktion für Schnellverkehr erwähnt; anschliessend folgt ein Hinweis auf die Probleme der Energieübertragung und eine Erläuterung des Verhaltens von Stromabnehmer und Fahrleitung bei hohen Geschwindigkeiten. Es werden die theoretischen Grundlagen besprochen und nachfolgend einige Fahrleitungsbauarten beschrieben.

1. Schnellverkehr

Bahnverwaltungen verschiedener Länder befassen sich neuestens intensiv mit der Frage der Erhöhung der Reisegeschwindigkeit. Die wichtigsten Verkehrsträger, Auto, Flugzeug und Eisenbahn stehen in einem Wettbewerb miteinander. Der Transportbedarf hat in den letzten Jahren gewaltig zugenommen. Der Reiseverkehr ist wesentlich grösser geworden und der Warenumsatz hat sich vervielfacht. «Auch die Eisenbahn muss schneller werden» [1]¹⁾, will sie mit der Entwicklung der Zeit Schritt halten. Die Eisenbahn ist privilegiert als Massenverkehrsmittel viele Reisende und grosse Mengen zu günstigen Bedingungen zu befördern. Die zwangsläufige Führung der Räder mit Spurkranz auf einem eigenen, unabhängigen Schienenstrang ermöglicht ihr ein sicheres, rationelles und rasches Fahren. Diese Vorteile müssen besonders bei elektrischer Traktion durch Leistungssteigerung und Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit ausgenützt werden [2; 3; 5...7].

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Das Flugzeug fliegt mit Überschallgeschwindigkeit über die erdgebundenen Schwierigkeiten hinweg, das Auto rast auf neu erstellten, modernen Strassen dahin. Und die Eisenbahn? — Sie besitzt in den meisten Fällen ihre vorhandenen, alten Linien, die in einer früheren Zeit erstellt wurden, wo noch niemand daran dachte und es für möglich und notwendig hielt, dass einmal regelmässig schwere Eisenbahnzüge mit über 200 km/h darauf fahren werden. Die bestehenden, nicht für hohe Geschwindigkeiten ausgebauten Linien bilden ein Haupthindernis für die Einführung des Schnellverkehrs. Länder mit günstigen topographischen Verhältnissen, langen, geraden Strecken mit grossen Stationsabständen haben es leichter, ihre Züge mit hoher Geschwindigkeit fahren zu lassen.

In der Schweiz wird nicht in erster Linie an eine Erhöhung der Spitzengeschwindigkeit gedacht. Auf dem bestehenden Eisenbahnnetz mit den vielen Kurven und Bergstrecken könnte eine höhere Fahrgeschwindigkeit nur auf einigen wenigen, geraden, flachen Streckenabschnitten, ein kleiner Prozentsatz, ausgenützt werden. Es sind vorerst betriebliche und organi-

satorische Massnahmen, tractionstechnische Verbesserungen und eine moderne Sicherungs- und Signaltechnik zur Steigerung der Leistungsfähigkeit der Bahn auszunützen. Höhere Geschwindigkeiten bedingen umfangreiche und teure Anpassungen der Anlagen [8]. Die Höchstgeschwindigkeit beträgt 125 km/h. Der Trans-Europ-Express (TEE) fährt auf gewissen Strecken in der Schweiz bis 140 km/h und die neuesten elektrischen Lokomotiven der SBB (Bo'Bo', Serie 11201-06, Typ Re 4/4 II) sind für 140 km/h konstruiert.

In Frankreich kann auf bestehenden Linien viel rascher gefahren werden. Am 21. Februar 1954 erreichte beispielsweise ein elektrischer Probezug zwischen Dijon und Beaune eine Geschwindigkeit von 243 km/h. Ein Jahr später, am 28. und 29. März 1955 stellten die Französischen Staatsbahnen (SNCF) auf der Linie Bordeaux—Dax, zwischen Morceux und Lanrothe, mit einer besonderen Zugskomposition den bekannten Weltrekord von 331 km/h auf [9; 10]. Mit diesen Versuchsfahrten wollten die Franzosen zeigen, wie rasch mit der Eisenbahn gefahren werden kann, unter Beanspruchung des Materials bis an die oberste Grenze, und damit Erfahrungen für einen zukünftigen Schnellverkehr sammeln.

An der 18. Tagung der «Internationalen Eisenbahnkongress-Vereinigung» vom 17.—27. Juni 1962 in München [11] wurde das sehr aktuelle Thema der Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit, das viele Bahnverwaltungen der ganzen Welt beschäftigt, mit grossem Interesse besprochen. Es konnte festgestellt werden, dass heute die technischen Voraussetzungen für einen zukünftigen Eisenbahnverkehr mit sehr hohen Geschwindigkeiten von 200 km/h grundsätzlich erfüllt sind.

Die Deutsche Bundesbahn (DB) hat auf den Fahrplanwechsel im Mai 1962 den «Rheingold»-Express mit einer Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h in Betrieb genommen. Sie ist bestrebt, die Fahrgeschwindigkeit nach Verbesserung einiger wichtiger Linien auf 200 km/h zu erhöhen. Mit diesem Ziel werden eingehende Untersuchungen und Versuchsfahrten mit elektrischen Triebfahrzeugen für grosse Geschwindigkeiten durchgeführt [3].

Ausserhalb Europas haben die Japaner das Ziel bereits erreicht und eine Schnellbahn für eine fahrplanmässige Geschwindigkeit von 210 km/h erstellt. Die Japanischen Staatsbahnen (JNR) waren gezwungen, zur Bewältigung ihres Verkehrs eine grosszügige Lösung zu realisieren. Die bestehende, wichtigste Verkehrsader zwischen den grossen Industriestädten Tokio—Nagoya—Osaka genügt dem ausserordentlichen Verkehrandrang nicht mehr. Die Schmalspurstrecke mit 1500 V Gleichstrom konnte nicht noch mehr ausgebaut werden; 1953 wurde eine Studienkommission für die Untersuchung und Abklärung der technischen und betrieblichen Verkehrsprobleme und der Systemfrage gegründet. Im Oktober 1954 rüstete die JNR eine erste Versuchsstrecke mit Industriefrequenz aus und beschloss anschliessend, zwischen Tokio und Osaka, neben der bestehenden Linie, die neue doppelspurige Tokaido-Schnellbahn mit eigenem Bahntrasse für Einphasenwechselstrom 60 Hz zu bauen. Im Jahre 1959 wurde damit begonnen und der Betrieb auf die Olympiade hin am 1. Oktober 1964 aufgenommen. Die über 500 km lange Strecke wird in rund 3 Stunden zurückgelegt. Für die Projektierung eines derartigen kühnen Unternehmens mussten neue, grundlegende Probleme und Fragen über den Betrieb mit sehr hohen Geschwindigkeiten abgeklärt werden. Schon frühzeitig führte die JNR mit ihrem Railway Technical Research Institute ein-

gehende Studien und Untersuchungen über geeignete Fahrzeugtypen, Laufeigenschaften, Vibrationen und Schwingungsercheinungen, über die Gestaltung des Oberbaus, die Signal- und Fernmeldeeinrichtungen, den Leistungsbedarf und die Energieversorgung, die zweckmässigsten Anlagen für die elektrische Traktion (Fahrleitungsanlagen), sowie über die Betriebssicherheit und die Wirtschaftlichkeit für den Bau der projektierten Schnellbahn durch. Die Japaner haben die Abklärungen äusserst gründlich durchgeführt und sind zu sehr interessanten Ergebnissen und z. T. neuen Erkenntnissen gelangt. Ein besonderes Problem bildet das Verhalten von Stromabnehmer und Fahrleitung bei hohen Geschwindigkeiten [4; 12...15].

Die Linienführung für den Schnellverkehr, die Anpassung und der Bau von Strecken und Anlagen für hohe Geschwindigkeiten sind mit grossen Kosten verbunden. Die Aufwendungen für den Unterhalt und den Betrieb steigen rasch an. Die Gesamtkosten müssen mit dem Nutzeffekt, dem Ertrag und den verkehrstechnischen Vorteilen koordiniert werden. Die Wirtschaftlichkeit setzt daher der Geschwindigkeitssteigerung praktische Grenzen [16].

Die Systemwahl für die elektrische Traktion spielt dabei eine wichtige Rolle. Verschiedene Bahnverwaltungen wählen Wechselstrom mit Industriefrequenz. Aus dem umfangreichen Gebiet der Eisenbahntechnik, der elektrischen Traktion, soll in diesem Artikel ein weniger bekanntes Thema, ein Sondergebiet des Leitungsbaues — die Fahrleitungen — im Zusammenhang mit der Entwicklung des Schnellverkehrs behandelt werden.

2. Fahrleitung und Stromabnehmer

Über die Fahrleitung und den Stromabnehmer wird der elektrischen Lokomotive bei Vollast eine Leistung von einigen tausend Kilowatt zugeführt. Zwischen Bügel und Draht muss dauernd ein guter Kontakt bestehen. Mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit wird der Bügellauf und die Stromabnahme unregelmässig. Es entstehen störende Funken und Stromunterbrechungen. Die Ursachen dieser Störungen und die Möglichkeiten für deren Behebung sollen in diesem Abschnitt erläutert werden.

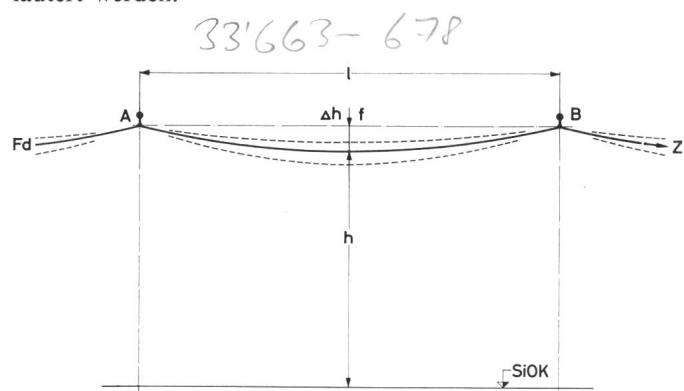


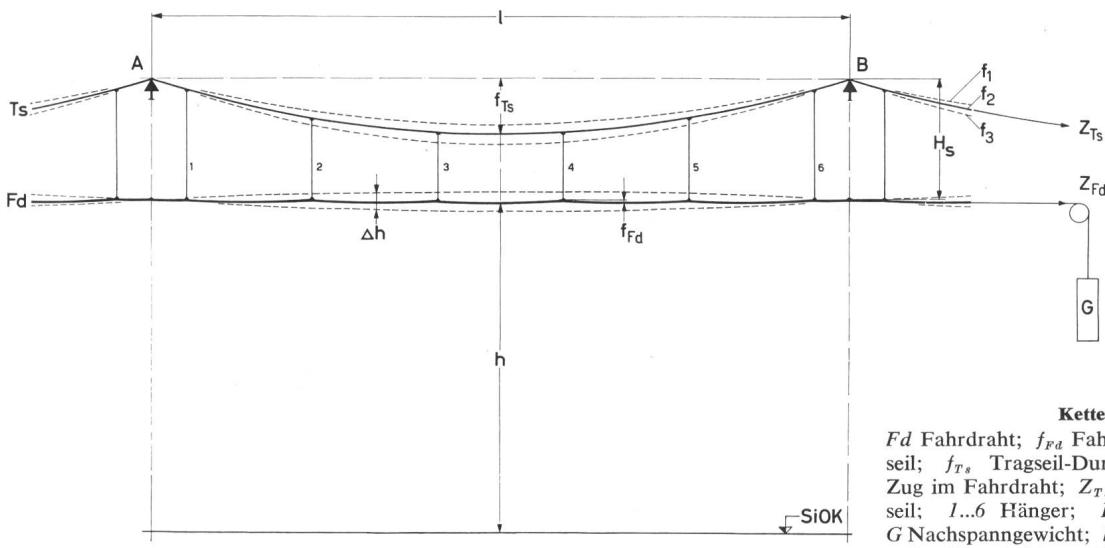
Fig. 1

Tramfahrleitung

Fd Fahrdräht; f Fahrdräht-Durchhang; l Spannweite (Mastabstand A-B); h Fahrdrähthöhe Mitte Spannweite über Schienen-Oberkante (SiOK); Δh Fahrdrähtanhalt; Z mechanischer Zug im Fahrdräht;

$$\text{Durchhangsformel: } f = \left[\frac{l^2 \gamma}{8 p} \right]$$

f Durchhang (cm); γ Leitergewichte [kg/cm^3]; l Spannweite [cm]; p Leiterzug [kg/cm^2]



und bei Niveauübergängen erfolgt die Montage auf 5,50 bzw. 6,00 m Höhe. Kleine Unregelmässigkeiten bei der Regulierung sind unvermeidlich. Geleiseunebenheiten und Fahrzeugschwankungen infolge der

Fig. 2
Kettenfahrleitung

F_d Fahrdrat; f_{Fd} Fahrdrat-Durchhang; T_s Tragseil; f_{Ts} Tragseil-Durchhang; Z_{Fd} mechanischer Zug im Fahrdrat; Z_{Ts} mechanischer Zug im Tragseil; 1...6 Hänger; H_s Fahrleitungs-Systemhöhe; G Nachspanngewicht; h Fahrdrathöhe Mitte Spannweite über Schienen-Oberkante (SiOK); Δh Fahrdratdistanz

Vorerst sei die einfachste Fahrleitungsart, die «Tramfahrleitung», ohne Tragseil, mit nicht nachgespanntem Fahrdrat betrachtet (Fig. 1). Der Fahrdrat hängt zwischen seinen Aufhängepunkten (Tragwerke A und B) parabelförmig durch [17]. Der Durchhang f ist von der Zugspannung Z der Leitung abhängig. Bei nicht nachgespanntem, fest verankertem Seil oder Draht verändert sich Z und somit f infolge der Wärmedehnung bekanntlich mit der Temperatur t . Bei einem höchsten Fahrdratzug von z. B. $Z_1 = 600$ kg und einer tiefsten Temperatur von $t_1 = -20^\circ\text{C}$ beträgt der kleinste Durchhang in der Mitte der Spannweite $f_1 = 31,1$ cm. Infolge der Temperaturschwankung Δt verändert sich der Durchhang. Bei einer maximalen Temperatur von $t_3 = +40^\circ\text{C}$ wird $f_3 = 73,6$ cm ($\Delta h = f_{\max} = f_3$).

Bei geringer Fahrgeschwindigkeit (Tram) vermag der Stromabnehmer den grossen Höhenveränderungen (Δh) der Kontaktleitung noch zu folgen. Wird die Fahrt jedoch rascher, so muss sich der Bügel dem Fahrdrat entlang entsprechend schneller hinauf und hinunter bewegen. Werden die Schwankungen zu gross und die Anzahl der Bewegungen zu rasch, so kann das Schleifstück des Stromabnehmers den Höhenänderungen nicht mehr folgen. Es treten Kontaktabhebungen und Stromunterbrechungen auf.

Für Überland und Vollbahnen mit grösseren Fahrgeschwindigkeiten genügt die einfache Tramfahrleitung nicht mehr. Es werden Kettenfahrleitungssysteme mit Vielfachaufhängung des Fahrdrahes verwendet. Der Fahrdrat ist in kurzen Abständen über Hängedrähte oder -seile an einem Tragseil (Fig. 2) aufgehängt. Der Fahrdrat ist in der Regel mit Gewichten G nachgespannt; sein Durchhang f_{Fd} zwischen zwei Hängern (1, 2...6) ist klein und konstant.

Anlässlich der Montage wird der Fahrdrat angenähert horizontal über der Schiene verlegt. Der Durchhang f_{Ts} des fest verankerten Tragseils variiert mit der Temperatur. Die daran aufgehängte Oberleitung macht die Schwankungen Sommer und Winter periodisch mit und verändert somit seine Höhenlage in der Mitte der Spannweite um

$$\Delta h_{\max} = f_{3Ts} - f_{1Ts}$$

In Tunnels, unter Brücken und Passerellen muss der Fahrdrat tiefer verlegt werden (gesetzliches Minimum für Normalspur in der Schweiz 4,80 m über Schienenoberkante). In Bahnhöfen

Federung beeinflussen die Lage und den Lauf des Stromabnehmerschleifstückes. Ferner ist der Einfluss der Windkräfte zu beachten (seitlicher Windabtrieb der Fahrleitung, Beeinflussung des Bügeldrucks durch Luftströmungen — aerodynamische Anpresskraft). Der Stromabnehmer hat die Schwankungen durch seine elastische Vertikalbewegung auszugleichen.

Ein Scherenstromabnehmer ist so konstruiert, dass er sich unabhängig von der Höhenlage in seinem Hubbereich mit einem konstanten, einstellbaren Druck (Federkraft P_0) vertikal nach oben und nach unten bewegt (Druckdiagramm, statische Charakteristik). Bei der Senkbewegung addieren sich zur eingestellten Federkraft die Reibungskräfte p_R . Der übliche Scherenstromabnehmer besteht aus dem Pantographengestell und der gefederten Wippe mit Schleifstück. Die grossen Höhenänderungen hat das Gestell und die kleinen Schwankungen die Wippe auszugleichen [18...24].

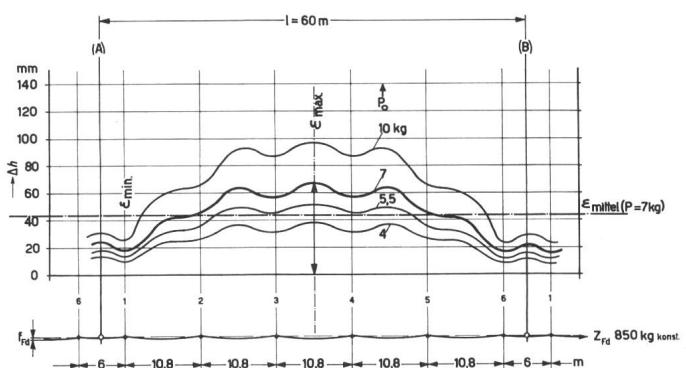


Fig. 3
Statischer Fahrdrat-Anhub

bei konstantem Fahrdratzug Z_{Fd} und verschiedenem statischen Stromabnehmerdruck P
 F_d 107 mm² Cu; T_s 50 mm² St; Z_{Ts} 500 kg (bei $t_2 = +10^\circ\text{C}$); Z_{Fd} 850 kg, konstant; P statischer Bügeldruck; Δh Fahrdratdistanz; ε Elastizitätskonstante der Fahrleitung; ε_{\max} maximale Elastizität Mitte Spannweite l ; ε_{\min} minimale Elastizität unter Tragwerk (A und B); ε_{med} mittlere Elastizität längs einer Spannweite

$$\Delta h = \varepsilon P, \varepsilon = \frac{\Delta h}{P} [\text{mm/kg}], \varepsilon = f(t) \sim \varepsilon_{\max} \cos \omega t, \omega = \frac{2 \pi v}{l}$$

Bei Annahme einer angenäherten sinusförmigen Funktion:

$$\varepsilon_{\text{med}} \sim \frac{2}{\pi} \varepsilon_{\max} \text{ (Mittelwert)}$$

Weitere Bezeichnungen s. Fig. 2

Berührt das Schleifstück die Fahrleitung, so wird der Fahrdrat durch den Druck angehoben. Zwischen Anpresskraft und Drahtgewicht (Gegendruck) herrscht in der Ruhelage, bei Stillstand des Fahrzeugs, Gleichgewicht. Der Drahtanhub Δh ist proportional dem Bügeldruck und der Elastizität ε der Fahrleitung. Fig. 3 zeigt statische Anhubkurven (Umhüllungskurven der angehobenen Fahrdrahtpunkte bei langsam bewegtem Stromabnehmer) einer Kettenfahrleitung gemäß Fig. 2, bzw. den Verlauf der Elastizität längs der Fahrleitung über eine Spannweite, bei konstantem Fahrdratzug, einer bestimmten Tragseilspannung Z_{Ts} und verschiedenem Bügeldruck.

Bei langsamer Fahrt ist der Einfluss der Massenbewegung gering. Das Verhalten von Stromabnehmer und Fahrleitung ist angenähert statischer Natur.

Früher beurteilte man den Bügellauf bei mittleren Geschwindigkeiten nach empirischen, im Betrieb gesammelten Erfahrungen. Mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit genügt aber diese Methode nicht mehr. Es muss auch das dynamische Verhalten von Bügel und Draht berücksichtigt werden [25...29].

Die Fahrleitung und der Stromabnehmer sind zwei bewegte, sich gegenseitig beeinflussende, gefederte Massensysteme. Bei grossen Geschwindigkeiten machen sich die durch die Massenbewegungen verursachten dynamischen Kräfte bemerkbar. Betrachtet man vorerst nur den Stromabnehmer allein in seiner freien Bewegung, ohne Berührung der Fahrleitung, so ist seine Zeit-Wegkurve (dynamische Charakteristik) angenähert eine Parabel nach folgenden Gleichungen:

$$\Delta h = \frac{b t^2}{2} \quad (\text{Parabelgleichung})$$

mit

$$b = \frac{p_b}{m_{St}}$$

wird

$$\Delta h = \frac{p_b t^2}{2 m_{St}}$$

und bei

$$t = \frac{s}{v}$$

ergibt sich

$$\Delta h = \frac{p_b s^2}{2 m_{St} v^2}$$

bzw.

$$p_b = \frac{2 m_{St} v^2}{s^2} \Delta h \quad (1)$$

Darin bedeuten:

- Δh Höhenänderung (in Richtung der y -Achse)
- p_b wirkende Kraft zur Beschleunigung des Stromabnehmers (bzw. Verzögerung beim Senken)
- b Beschleunigung (in Richtung der y -Achse)
- m_{St} auf den Scheitelpunkt des Schleifstückes reduzierte (äquivalente) Masse des Stromabnehmers (Gestell und Wippe)
- v Fahrgeschwindigkeit (in Richtung x -Achse)
- s Zurückgelegter Fahrweg (in Richtung der x -Achse)

Die Höhenänderung Δh nimmt mit dem Quadrat der Fahrgeschwindigkeit v ab und mit dem des zurückgelegten Weges s zu. Der zeitliche Bügelanstieg ist proportional der Anhubkraft und reziprok der Masse. Bei freier Bewegung ist $p_b = P$ (statische Anhubkraft).

Berührt der Bügel den Draht, so muss das Schleifstück zwangsläufig der Kontaktleitung folgen. Bei ansteigendem Fahrdrat (Anhub des Stromabnehmers) steht nicht mehr die volle Kraft P für das Anpressen des Kontaktes zur Verfügung; ein Teil davon wird für die vertikale Beschleunigung der Stromabnehmermasse beansprucht. Bei hoher Fahrgeschwindigkeit

muss der Anstieg (Höhenänderung) innerhalb sehr kurzer Zeit erfolgen. Der Stromabnehmer vermag mit seiner noch zur Verfügung stehenden Kraft, nebst der Überwindung des elastischen Anhubes der Fahrleitung, sich nicht mehr genügend rasch nach oben zu bewegen. Die restliche Anpresskraft reduziert sich und wird schliesslich gleich Null ($p_y \leq 0$). Das Schleifstück springt von der Kontaktleitung ab; es entsteht ein Kontaktunterbruch. Die Wippe schnellt anschliessend hoch und prallt wieder an den Fahrdrat an; Bügel und Draht werden dadurch auf Schlag und Biegung beansprucht. Bei sich neigendem Fahrdrat (Senken des Stromabnehmers) addieren sich zur Federkraft die Reibungs- und Trägheitskräfte. Die Anpressung erhöht sich entsprechend bei harten Stellen schlagartig mit Deformationen von Bügel und Draht. Ohne Berücksichtigung der Fahrleitungsmasse gelten für den Vorgang folgende Formeln [25]:

a) für die Aufwärtsbewegung

$$p_y = (P_0 - p_R) - p_b$$

b) für die Abwärtsbewegung

$$p_y = (P_0 + p_R) + p_b$$

für $(P_0 \pm p_R) = P$ und p_b gemäß Gl. (1) eingesetzt ergibt:

$$p_y = P \mp \left(\frac{2 m_{St} v^2}{s^2} \Delta h \right) \quad (2)$$

Mit steigender Anpresskraft wird der Fahrdrat mehr angehoben und das Tragseil dadurch entlastet. Infolge seiner Elastizität hebt es sich ebenfalls an [30; 31]. Zur richtigen Beurteilung des dynamischen Verhaltens muss auch die Fahrleitungsmasse berücksichtigt werden. Die für das Anheben des Fahrdrahes notwendige potentielle Kraft ist proportional der Elastizität, dessen Wert ε von der Fahrleitungsbauart abhängt. Wegen der Wechselwirkung zwischen kinetischer und potentieller Energie weicht die Fahrdratlage [$y = f(t$, bzw. x oder s)] während der Fahrt bei hoher Geschwindigkeit wesentlich von der statischen Anhubkurvenform (Fig. 3) ab. Die vertikale Lage des Fahrdrahes kann während der Fahrt, unter Spannung, mit einer in einem Beobachtungswagen eingebauten Höhenmessapparatur gemessen und registriert werden. Fig. 4 zeigt derartig aufgenommene Höhendiagramme.

Die beim Zusammenwirken der beiden Systeme, Stromabnehmer und Fahrleitung, auftretenden Kräfte sind schematisch in Fig. 5 dargestellt. Die Elastizität ändert sich während des Stromabnehmerlaufes längs der Fahrleitung. Die Massen der Fahrleitung und des Stromabnehmers werden bei der Auf- und Abbewegung in vertikaler Richtung beschleunigt, bzw. deren Bewegung verzögert. Die Anpresskraft verringert, bzw. erhöht sich entsprechend. Bleibt der Bügel am Draht ($p_y > 0$), so gilt [nach Gl. (2)]:

$$P = p_y \pm p_b$$

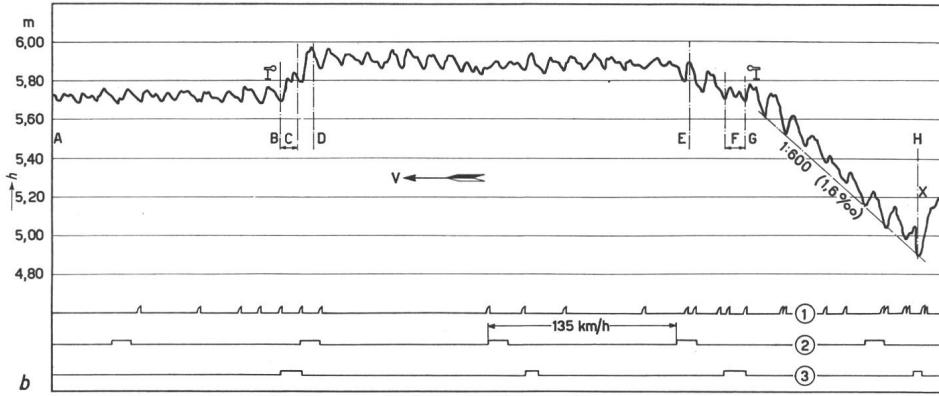
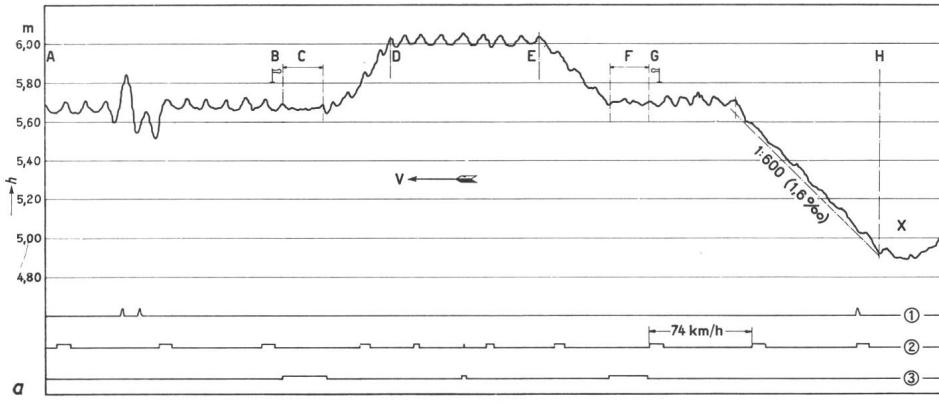
für $p_b = m b = m \frac{\partial y^2}{\partial t^2}$ und für $p_y = \frac{y}{\varepsilon}$ eingesetzt ergibt:

$$P = \frac{y}{\varepsilon} \pm m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

wobei $m = (m_{St} + m_{Fl})$ bedeutet.

Umgeformt mit:

$$v = \frac{\partial x}{\partial t}, \quad \text{bzw.} \quad \partial t = \frac{\partial x}{v}$$



ergibt die Bewegungsgleichung beider Systeme (Stromabnehmer und Fahrdrähten):

$$(m_{st} + m_{fl}) v^2 \frac{dy^2}{dx^2} = P - \frac{y}{\varepsilon} \quad (3)$$

Wird die Elastizität längs der Fahrleitung angenähert als eine sinusförmige Funktion des Weges (s , bzw. x), resp. der Zeit t angenommen, so ergibt sich:

$$\varepsilon = f(t) \approx \varepsilon_{max} \cos(\omega t)$$

Zur einfacheren Berechnung verwendet man (nach Fig. 3) einen Mittelwert:

$$\varepsilon_{med} \approx \frac{2}{\pi} \varepsilon_{max}$$

Durch Lösung der Differentialgleichung und Einsetzen der durch Versuche ermittelten Werte für m_{st} , m_{fl} und ε kann die vertikale Bewegung des Kontaktpunktes C , bzw. der Anhub (Δh oder y) ermittelt werden. Niebler [25] versuchte eine Lösung durch ein graphisches Näherungsverfahren für

$$y = f(t, \text{ bzw. } x \text{ oder } s)$$

und Kumezawa [29] für $y = f(v)$ durch Auflösung der Funktion in eine Fourierreihe und Auswertung mittelst elektronischer Rechenmaschine.

Der Verlauf von $y = f(v)$ zeigt verschiedene Resonanzgebiete, wo mit starkem Fahrdrähtanhub, grossen Kontaktindruckänderungen und Stromunterbrechungen zu rechnen ist.

Das wichtigste Kriterium für die Güte der Stromübertragung bildet die durch vergleichende Messfahrten zu bestimmende Anzahl und Dauer der Kontaktunterbrechungen. Erwünscht wäre, während der Fahrt den wirklich auftretenden, momentanen Kontaktindruck zwischen Bügel und Draht messen und daraus Unregelmässigkeiten an Ort und Stelle ermitteln und beseitigen zu können.

Bückner hat ein Verfahren entwickelt und darüber eine Dissertation mit ausführlicher Theorie und Berechnung ge-

schrieben [25]. Die veränderliche Höhenlage und Elastizität, sowie Unregelmässigkeiten und Unstetigkeiten der Fahrleitung haben Schwankungen und Schwingungen im Netz zur Folge. Die Eigenfrequenz einer Kettenfahrleitung kann angenähert nach folgenden Formeln (Schwingungsgleichung) bestimmt werden:

$$T = 2 \pi \sqrt{m \varepsilon}$$

Mit dem Mittelwert (Fig. 3) für ε eingesetzt, wird:

$$T = 2 \pi \sqrt{m \frac{2}{\pi} \varepsilon_{max}} = \sqrt{8 \pi m \varepsilon_{max}}$$

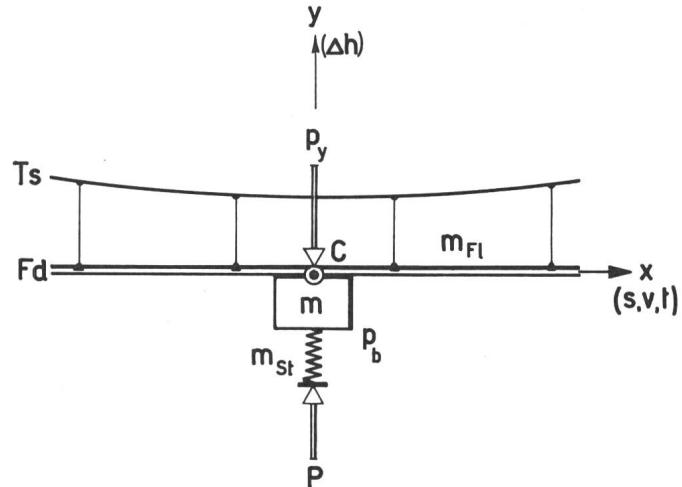


Fig. 5

Schematische Darstellung der bei der Bewegung von Stromabnehmer und Fahrleitung auftretenden dynamischen Kräfte

m_{st} äquivalente, auf den Scheitelpunkt C reduzierte Stromabnehmermasse nach Gl. (1); m_{fl} äquivalente Fahrleitungsmasse; $m = (m_{st} + m_{fl})$; Δh Fahrdrähtanhub; P statische Anhubkraft des Stromabnehmers, $P = (P_0 \pm p_r)$ Formel [2], P_0 Stromabnehmer-Federkraft; p_r vertikal wirkende Reibungskräfte des Stromabnehmers; p_b Beschleunigungskraft des Stromabnehmers Gl. (1); p_y zur Überwindung des elastischen Anhubes der Fahrleitung notwendige

$$\text{vertikale Kraft, } p_y = \frac{y}{\varepsilon}$$

$$\varepsilon = f(t) \text{ Elastizität der Fahrleitung}$$

Fig. 4
Fahrleitungs-Höhendiagramme

Beispiele

- a eine mit mittlerer Geschwindigkeit von 74 km/h befahrene Strecke
- b eine andere mit hoher Geschwindigkeit von 135...140 km/h befahrene Strecke
- A-B und G-H freie Strecke vor Signal mit z. T. nicht einwandfrei einregulierter Fahrdrähtelage; C, F Streckentrennungen; C-D und E-F Änderung der Höhenlage auf Stationsgebiet D-E; G-H starke Neigung (1 : 600 bzw. 1,6 %); X tiefe Fahrdrähtelage (Straßenüberführungen, Brücken, Passerellen, Tunnels usw.)
- v Fahrgeschwindigkeit (in Fahrrichtung)
- ① Markierungsstreifen für Unregelmässigkeiten (Funkengbildung, seitliche Fahrdrähtabweichung usw.); ② Zeitmarkierung; ③ Markierungsstreifen für charakteristische Merkmale der Strecke, wie Streckentrennungen, Stationen, Brücken, Überführungen usw.

und die kritische Geschwindigkeit:

$$v_k = \frac{2l}{T} \quad (4)$$

wobei m die gesamte Fahrleitungsmasse längs einer Spannweite bedeutet [25].

Überschreitet die maximale Fahrgeschwindigkeit v_k , so sind unter Umständen Massnahmen gegen Resonanzschwingungen vorzusehen durch Anpassen der Aufhängung, unsymmetrische Hängerteilung und allfällig durch Einbau von Dämpfungen [29; 64...67]. Es wurden verschiedene Fahrleitungssysteme mit Hilfstragseilen und zum Teil komplizierten Aufhängungen (Fig. 16) entwickelt. Die Aufhängungspunkte und Abspannungen der Fahrleitung bilden Knotenpunkte, wo Reflexionen auftreten. Es entstehen Oberwellen und Resonanzerscheinungen. Es kann beobachtet werden, dass Fahrleitungsschwingungen dem Stromabnehmer voraus eilen. Solche Hubwellen stören bei hohen Geschwindigkeiten den regelmässigen Bügelauf und verursachen eine schlechte Stromabnahme.

Einige europäische Bahnverwaltungen haben sich im Rahmen des «Office de Recherche et d'Essais» (ORE) der Union Internationale des Chemins de fer (UIC) zu Fachgruppen zusammengeschlossen, um gemeinsam Fragen über das Verhalten von Stromabnehmer und Fahrleitung bei hohen Geschwindigkeiten zu prüfen und abzuklären. Über die Resultate der Untersuchungen sind verschiedene Berichte abgefasst worden, deren Schlussfolgerungen und Empfehlungen wertvolle Richtlinien und Hinweise für den Bau von Fahrleitungen und die Konstruktion von Stromabnehmern für hohe Geschwindigkeiten enthalten [34].

Stromabnehmer und Fahrleitung bilden elektrisch einen Gleitkontakt. Der Stromübergang erfolgt über viele kleine, wandernde, sich verformende Kontaktflächen. Das Gleiten wird durch Fremdschichten, Oxydhaut und die natürliche Verschmutzung (Epilamen) ermöglicht. Die Oxydschichten werden gefrittert, bei den Molekularhäuten tritt der wellenmechanische Tunneleffekt auf [32]. Zwischen Bügel und Draht besteht keine reine mechanische Berührung, selbst wenn das Stromabnehmer-Schleifstück aus Metall besteht. Es sind stets schmierende Fremdschichten vorhanden. Die Kontaktspannung ist im Vergleich zur Betriebsspannung klein, einige Volt. Zwischen den sich beschleifenden Flächen tritt ein Materialverschleiss auf. Die elektrothermische Abnutzung ist gegenüber der mechanischen wesentlich grösser. Graphit und Kohle haben eine gute schmierende Wirkung. Bei Verwendung von Kohlen-schleifstücken wird der Fahrdrähtverschleiss wesentlich geringer. Die Wahl des Schleifstückmaterials ist bei hohen Geschwindigkeiten für die Abnutzung von Bügel und Draht sehr wichtig [33]. Ein schlechtes dynamisches Verhalten, Funkenbildungen und Stromunterbrechungen haben einen grossen Materialverschleiss zur Folge.

Zusammenfassend gelten zur Erreichung eines gleichmässigen Fahrdrähtanhubes und Kontaktdruckes und zur Vermeidung von Funkenbildungen und Stromunterbrechungen für den Fahrleitungsbau für hohe Geschwindigkeiten folgende Richtlinien:

- Möglichst geringe bewegte Stromabnehmermasse im Verhältnis zur Fahrleitung;
- Nicht zu leichte und zu elastische Fahrleitung, genügende Biegefesteitigkeit des Fahrdrähtes;
- Hinreichender Bügeldruck, einerseits um einen guten Kontakt zu ermöglichen und anderseits nicht zu gross wegen des Fahrdrähtanhubes und Materialverschleisses; Koordination zwischen Stromabnehmer und Fahrleitung;

d) Gleichmässige Verteilung der Massen und Elastizität, Vermeidung unstabter Stellen und Unregelmässigkeiten (harte Punkte längs der Fahrleitung, zweckmässige Aufhängung (Y-Beisel, Hilfstragseil usw.);

e) Kleine Mastabstände, nachgespannte Fahrdrähte und Tragseile, hoher Fahrdräht- und Tragseilzug;

f) Vermeidung rasch wechselnder, starker Fahrdrähtneigungen und grosser Höhenunterschiede;

g) Vermeidung von Schwingungen und Resonanzerscheinungen durch geeignete Wahl der Aufhängung (unsymmetrische, kleine Hängerteilung; Anpassung der Y-Beiseillänge und eventuell Einbau von Dämpfern usw.); gute Regulierung des Drahtwerkes.

Im Abschnitt 3 werden einige Fahrleitungsbauarten, die auf Grund der neusten Erkenntnisse und obiger Grundsätze für hohe Geschwindigkeiten entwickelt wurden, beschrieben.

3. Fahrleitungsbauarten

Es ist zu unterscheiden zwischen leichten Fahrleitungen für Einphasenwechselstrom 15000 V, 16 $\frac{2}{3}$ Hz bzw. 25000 V, 50 Hz und schweren Gleichstrom-Fahrleitungen für 1500 V, bzw. 3000 V. Hier seien vorwiegend die Hochspannungs-Wechselstromfahrleitungen beschrieben, das Drehstromsystem und die dritte Schiene (Stromschiene) nur nebenbei, der Vollständigkeit halber erwähnt, da diese für hohe Geschwindigkeiten nicht von Bedeutung sind.

Die Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) mit ihrem Einphasenwechselstromnetz 15000 V, 16 $\frac{2}{3}$ Hz, besitzen keine Fahrleitungen für besonders hohe Geschwindigkeiten. Auf der Gotthardstrecke baute man zu Beginn der Elektrifikation (1920) ein System für 70...90 km/h mit einem Zwischenseil, ohne Nachspannung des Fahrdrähtes (Fig. 6). Durch ein Verschlingen des Zwischenseils mit dem Fahrdräht wurde ein gleichmässiger mechanischer Zug erreicht. Der Durchhang variierte zwischen Sommer und Winter infolge der Temperaturschwankungen um etwa 46 cm [35]. Diese Bauart wird nicht mehr ausgeführt. Die Fahrleitungen der Gotthardstrecke sind inzwischen auf Normalausführung (Fig. 2) abgeändert worden. Die bei den SBB übliche Konstruktion entspricht der einfachen Kettenfahrleitung mit nachgespanntem Fahrdräht und fest verankertem Tragseil [36...38]. Die Mastabstände betragen auf geraden Strecken in der Regel 60 m. Auf einem Teil des Netzes (Kreis I) sind Fahrleitungen mit 100 m Spannweite vorhanden, die sich für hohe Geschwindigkeiten weniger gut

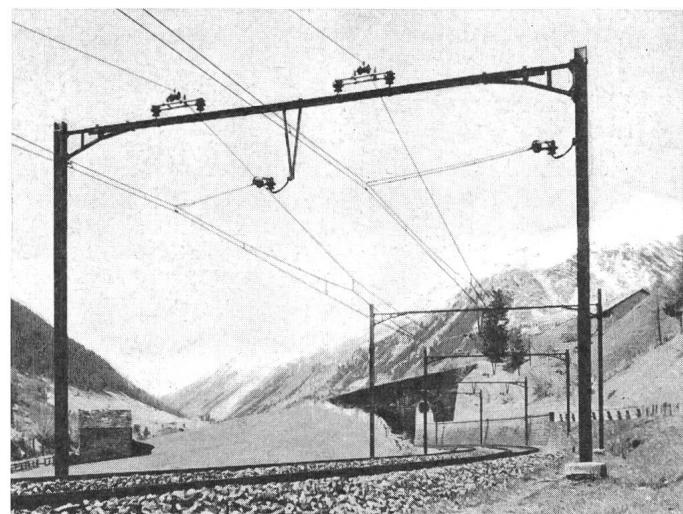


Fig. 6
Alte «Gotthard»-Fahrleitung
Bauart SBB 1920, mit Zwischenseil und nicht nachgespanntem Fahrdräht, 15 kV, 16 $\frac{2}{3}$ Hz

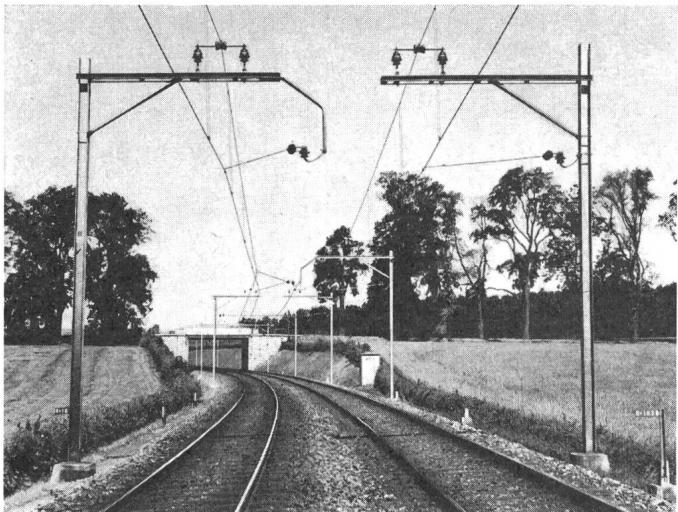


Fig. 7
Fahrleitung SBB
neue Konstruktion
Einzeltragwerke auf Doppelpururstrecke

eignen und sukzessive umgebaut werden. Einspurige Nebenlinien mit mittleren Fahrgeschwindigkeiten wurden teilweise mit leichten, windschiefen Fahrleitungen und Holzmasten ausgerüstet.

Ein grosser Teil der doppelpurigen Hauptstrecken besitzt noch ältere Fachwerk-Tragmaste mit Konsolen und leichten Quertraversen, auf welchen Doppelisolationen befestigt sind. Später elektrifizierte Linien wurden mit Einzelmasten und festen Auslegern versehen (Fig. 7). In neuerer Zeit werden kurze, leichte Spurhalter an Auslegerrohre (Fig. 8) eingebaut.

Stark belastete Strecken mit grossen Steigungen (Gotthard) erhalten einen grösseren Leiterquerschnitt (Fahrdrat 150 mm² Cu, Tragseil 92 mm² Bimetall St./Cu). Der Fahrdrat ist in Abständen von 800...1200 m mit Gewichten nachgespannt.

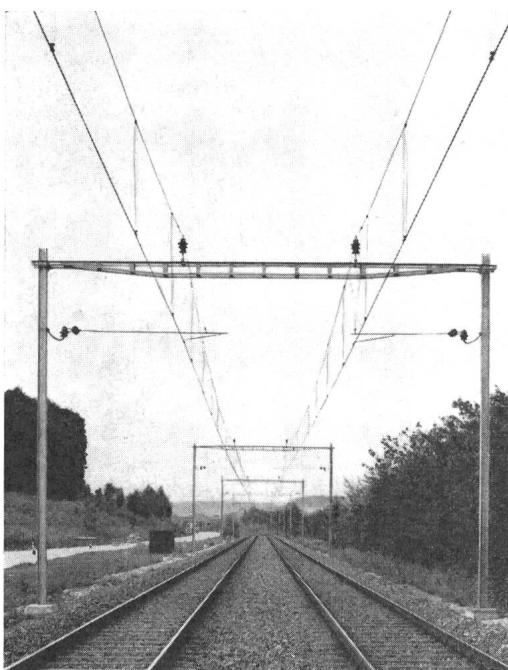


Fig. 8
Fahrleitung SBB
neue Konstruktion
Tragwerke mit Joch auf Doppelpururstrecke

Typisch für die Schweiz sind in Bahnhöfen die mehrere Geleise überbrückenden Fachwerkquerträger (Joch). Seiljocher finden weniger häufig Anwendung.

Einfache Kettenfahrleitungen ohne nachgespanntes Tragseil haben — wie wiederholt erwähnt — den grossen Nachteil der Temperaturabhängigkeit. Der nachgespannte Fahrdrat muss die Höhenänderungen des nicht nachgespannten, fest verankerten Tragseils mitmachen; seine für einen bestimmten Temperaturbereich einregulierte horizontale Lage über dem Geleise wird somit nicht dauernd eingehalten. Zudem erfolgt der Drahtanhalt längs der Kontaktleitung ungleichmässig (Fig. 3). Der Fahrdrat wird in der Mitte der Spannweite stark und unter den Tragwerken durch den Bügeldruck nur wenig angehoben, was bekanntlich bei hohen Geschwindigkeiten zu Kontaktunterbrechungen führt.

Die SBB-Fahrleitungen wurden ursprünglich für 90 km/h gebaut. Über 110...130 km/h wird der Bügellauf, je nach Zustand der Leitung, unregelmässig und die Stromabnahme weniger gut. Es entstehen gelegentlich Funken und Stromunterbrüche. Bei einwandfreier Regulierung der Fahrdrahlage und bei gutem Unterhalt der Anlagen genügen die bestehenden Fahrleitungen noch hinreichend den heutigen Bedürfnissen. Die einfache Kettenfahrleitung kann durch den Einbau der sogenannten Y-Aufhängung etwas verbessert und dadurch für 130...140 km/h befahrbar gemacht werden.

Die grösste und wichtigste normalspurige Privatbahn in der Schweiz — die Lötschbergbahn (BLS) — besitzt eine ähnliche Fahrleitungsbauart wie die SBB, mit etwas anderer Isolation. In neuester Zeit hat sie einen grossen Teil ihres Fahrleitungsnets grosszügig modernisiert, umgebaut und erneuert, den steigenden Anforderungen des Verkehrs angepasst und die Leiterquerschnitte erhöht (Fig. 9) [39].

Die Deutsche Bundesbahn (DB), mit dem gleichen elektrischen Traktionssystem, verwendete anfänglich eine einfache Kettenbauart, die «Einheitsfahrleitung 1928» welche maximal

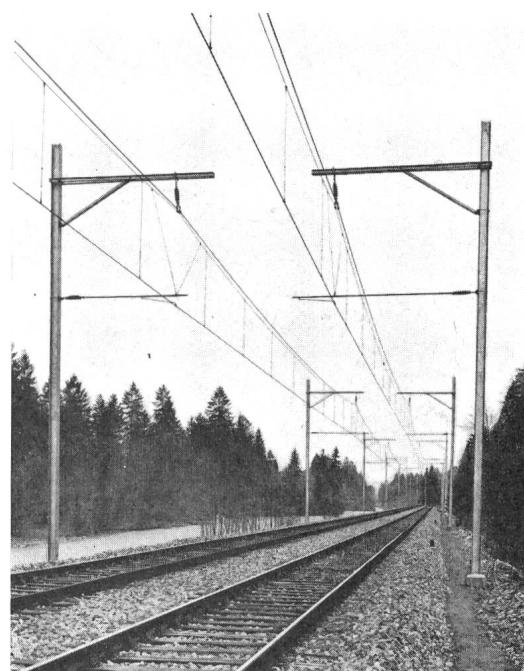


Fig. 9
Fahrleitung BLS
neue Konstruktion
Einzeltragwerke auf Doppelpururstrecke, 15 kV, 16 2/3 Hz

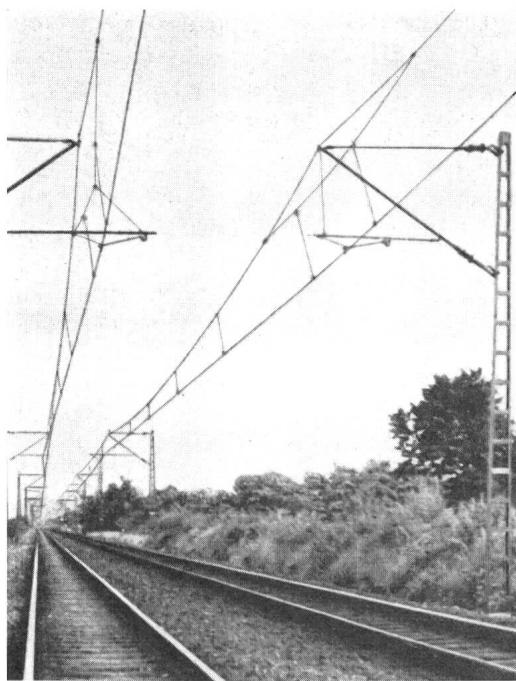


Fig. 10
Regelfahrleitung 1950 DB
 Einzeltragwerke auf Doppelpurstrasse, 15 kV, 16% Hz

mit 120 km/h befahren werden konnte. Für grössere Geschwindigkeiten von 140...160 km/h genügt dieses System nicht mehr. Nach langjähriger Entwicklung entstand auf Grund der Erfahrungen die heutige bewährte «Regelfahrleitung 1950» für 160 km/h [43]. Es ist eine verbesserte Kettenfahrleitung mit Y-Beiseil und gewichtsnachgespanntem Fahrdräht und Tragseil, auf Doppelpurstrassen mit getrennten Einzelmasten, schräg nach oben gerichteten, schwenkbaren Auslegern, abgestützt auf Vollkern-Stabisolatoren und leichtem, angelenktem Spurhalter (Fig. 10) [40...47].

Im Zusammenhang mit der Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit und der Einführung des Schnellverkehrs führt die DB ein-

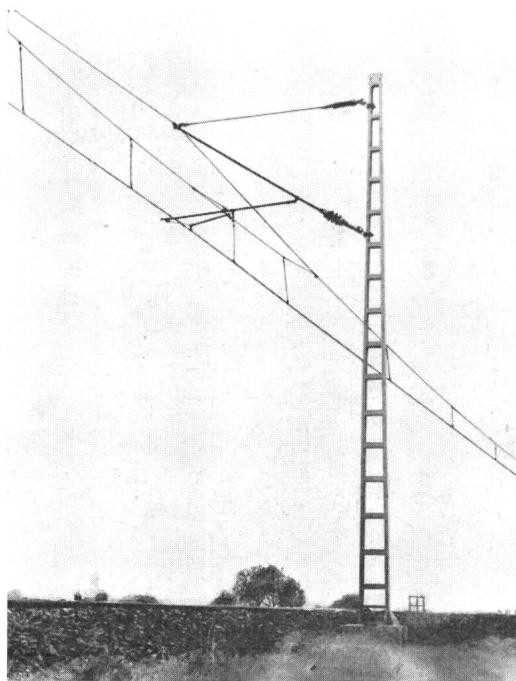


Fig. 11
Neueste Fahrleitungsbauart der DB für 200 km/h
 Einzeltragwerk (Stützpunkt) der Versuchsstrecke Forchheim-Bamberg

gehende Studien und Versuche mit sehr hohen Geschwindigkeiten bis über 200 km/h durch. Die Regelfahrleitung zeigt auch bei 160...200 km/h ein gutes Verhalten und einen einwandfreien Stromübergang. Mit einigen Verbesserungen kann die Fahrleitung fahrplanmässig mit 200 km/h befahren werden (Fig. 11) [3].

Die Fahrleitungsanlagen der Österreichischen Bundesbahnen (OeBB), mit dem gleichen elektrischen Traktionsystem, entsprechen weitgehend der DB-Regelfahrleitung. Das Tragseil ist ebenfalls nachgespannt und der Fahrdräht an einem Y-Beiseil aufgehängt. Die frühere Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h wurde nach einigen Verbesserungen an der Oberleitung auf 130 km/h erhöht. Es sind Bestrebungen im Gange, die Geschwindigkeit noch weiter zu steigern.

Anerkennenswert sind die Fahrleitungen der Schwedischen Staatsbahnen (SJ). Seit Beginn ihrer Elektrifikation (1910) mit 15000 V, 16 $\frac{2}{3}$ Hz, wurde eine Bauart mit nachgespanntem Tragseil und schwenkbaren Auslegern an Tragisolatoren verwendet; ein bewährtes System, das den heutigen modernen Fahrleitungen für hohe Geschwindigkeiten entspricht. In neuerer Zeit benützen auch die SJ zur Verbesserung des dynamischen Verhaltens angelenkte, leichte Spurhalter wie die DB.

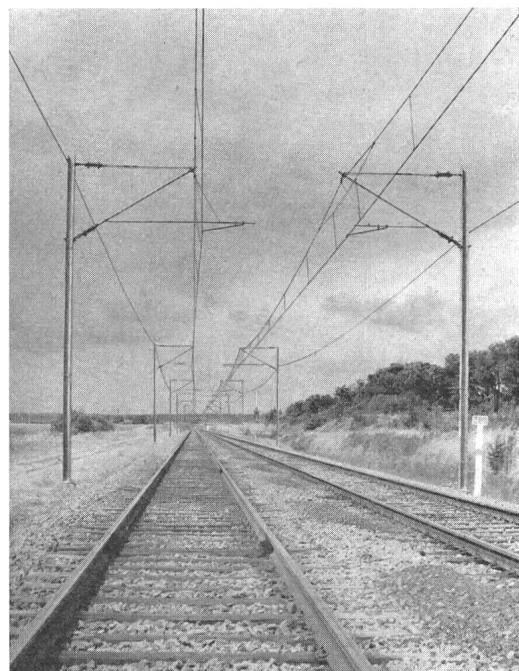


Fig. 12
Neue Wechselstrom-Fahrleitung SNCF für sehr hohe Geschwindigkeiten
 150 und 180...220 km/h
 Einzeltragwerk auf Doppelpurstrasse, 25 kV, 50 Hz

Die Französischen Staatsbahnen (SNCF) begannen in den 20-er Jahren wichtige Hauptstrecken ihres Eisenbahnnetzes (Région du Midi) mit Gleichstrom 1500 V zu elektrifizieren. Die «Ligne-Impériale» Paris — Dijon — Lyon — Marseilles wurde in den Jahren 1950—1962 mit Gleichstrom und schweren Fahrleitungen grossen Leiterquerschnittes ausgerüstet, obwohl die SNCF sich schon seit 1945 mit der Frage der Einführung eines neuen, rationelleren Stromsystems befassten. Der Anschluss Culoz—Genf mit Gleichstrom erfolgte im September 1956.

Die Aufwendungen für die ortsfesten Gleichstromanlagen (Unterwerke und Fahrleitungen) kommen für grosse Leistun-

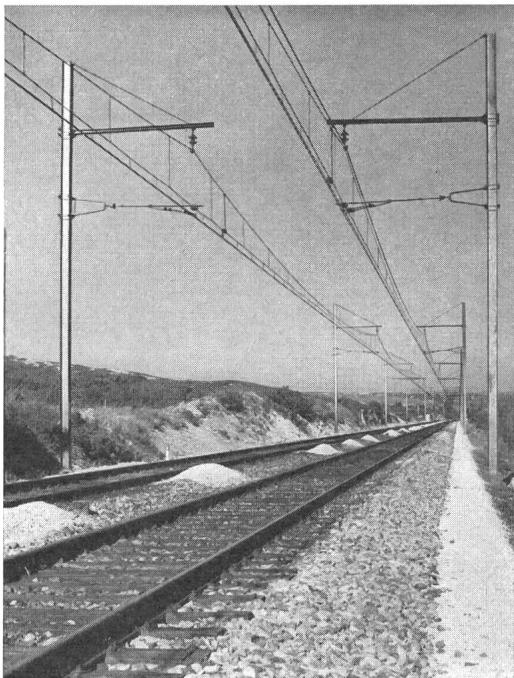


Fig. 13
Gleichstrom-Fahrleitung SNCF, 1,5 kV

gen teuer zu stehen. Die Ströme, der Spannungsabfall und die Übertragungsverluste werden sehr gross. Im Gegensatz zu früheren Zeiten und anderen Ländern besitzt Frankreich ein leistungsfähiges, gut ausgebautes Drehstrom-Landesnetz, das die Energieversorgung der Bahn übernehmen kann. Die Entwicklung der Technik ermöglicht heute gleichwertige Bahnmotoren, bzw. elektrische Lokomotiven für Industriefrequenz zu bauen. Eingehende Studien, Untersuchungen und Vergleiche führten in Frankreich zum Entschluss, das Einphasen-Wechselstromsystem mit Industriefrequenz einzuführen.

Die schweren Gleichstromfahrleitungen (Fig. 13) eignen sich zwar wegen ihrer Stabilität und geringen, gleichmässig verteilten Elastizität besser für hohe Geschwindigkeiten als die leichten Wechselstrom-Kontakteleitungen. Der bekannte Geschwindigkeits-Weltrekord mit 331 km/h wurde auf einer Gleichstromstrecke gefahren [9; 10].

Mit der Einführung der Industriefrequenz mussten in Frankreich für die elektrische Traktion leichte Wechselstrom-Fahrleitungen für hohe Geschwindigkeiten neu entwickelt und gebaut werden.

Das neue Einphasenwechselstromsystem wurde 1950/51 vorerst versuchsweise mit 20 kV Betriebsspannung auf der Strecke Aix-les-Bains—Annecy—La-Roche-sur-Foron in Betrieb genommen und erprobt [48]. Man erstellte verschiedene Fahrleitungsbauarten mit windschiefer und senkrechter Aufhängung, mit und ohne Spurhaltung und Nachspannung des Fahrdrähtes. Es zeigte sich bald, dass sehr elastische, leichte Kontakteleitungen für hohe Geschwindigkeiten weniger geeignet sind. Zudem ist es schwierig, die kurvenlineare Lage des Fahrdrähtes nachträglich genau anzupassen. Der Anhub der Kontakteleitung wird bei starkem Bügeldruck zu gross. Es kommen Bügelentgleisungen vor und es treten unerwünschte Schwingungen auf. Ursprünglich war in Frankreich vorgesehen, das wirtschaftliche Wechselstromsystem auf weniger frequentierten Nebenlinien einzuführen. Die guten Erfahrungen anlässlich des Versuchsbetriebes auf der Linie von Annecy veranlassten jedoch die SNCF ihr Konzept zu ändern

und zukünftig stark befahrene Hauptlinien mit Industriefrequenz zu elektrifizieren.

Die erste grosse Elektrifikation mit 25000 V, 50 Hz, erfolgte 1954 auf der mit schweren Güterzügen befahrenen Strecke Valenciennes—Thionville [49], mit anschliessender Fortsetzung (1957) nach Strasbourg—Mulhouse und Basel. Im Grenz- und Systemwechselbahnhof Basel besteht eine erwähnenswerte Fahrleitungs-Umschaltanlage [50; 51]. Die SNCF erstellten auf diesen Strecken ein neues, modernes Wechselstrom-Fahrleitungssystem für 160 km/h (Fig. 12). Im Prinzip entspricht die Ausführung mit einigen konstruktiven Abweichungen der Regelbauart der DB.

Im Verlaufe der Weiterentwicklung drängte sich das Bedürfnis auf, das Wechselstromnetz auch mit höheren Geschwindigkeiten für den Schnellverkehr befahren zu können. Es musste untersucht werden, bis zu welchen Höchstgeschwindigkeiten die für 160 km/h gebauten Wechselstromfahrleitungen sich noch eignen. In einem umfassenden Versuchsprogramm führten die SNCF in den letzten Jahren eingehende Untersuchungen, Mess- und Versuchsfahrten mit sehr hohen Fahrgeschwindigkeiten durch. Auf der Strecke Strasbourg—Mulhouse wurden vom 24. Oktober bis 17. November 1961 wiederholt Geschwindigkeiten von 200...225 km/h mit einwandfreier Stromabnahme erreicht. Das Wechselstromfahrleitungssystem der SNCF bewährt sich daher auch für 160...200 und mehr km/h [52].

Die Italienischen Staatsbahnen (FS) haben im Gegensatz zu Frankreich eine leichte Gleichstrom-Kettenfahrleitung für 3000 V, ähnlicher Bauart wie die SBB (Fig. 2) mit einem festverankerten Tragseil, jedoch mit zwei Fahrdrähten, die abwechselungsweise in kurzen Abständen an Hängern aufgehängt sind.

Italien macht grosse Anstrengungen sein Eisenbahnnetz zu modernisieren und das noch vorhandene Drehstromnetz auf Gleichstrom umzubauen. Am 5. Dezember 1963 wurden mit einem Triebwagen anlässlich von Fahrleitungs-Versuchsfahrten auf der Strecke Livorno—Rom, zwischen Grosseto und Montepescali, Spitzengeschwindigkeiten von 225 km/h erreicht [53; 54; 69].

Die British Railways (BR) haben sich aus analogen Gründen wie die SNCF 1955/56 entschlossen, das Einphasen-

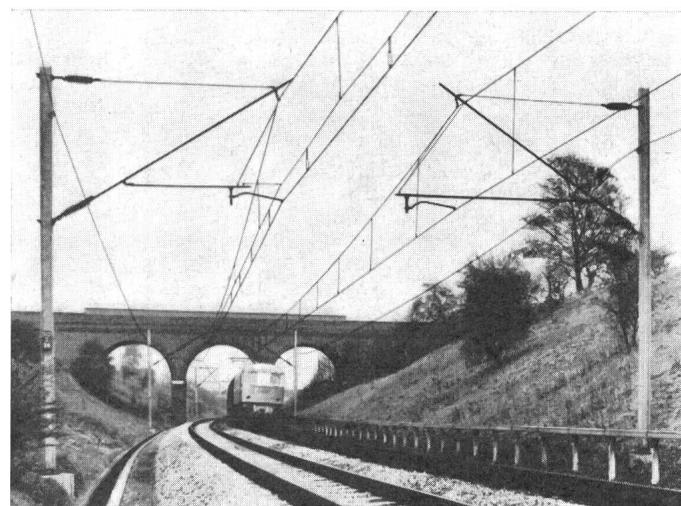


Fig. 14
Fahrleitungsbauarten BR, 25 kV, 50 Hz
Versuchsausführungen

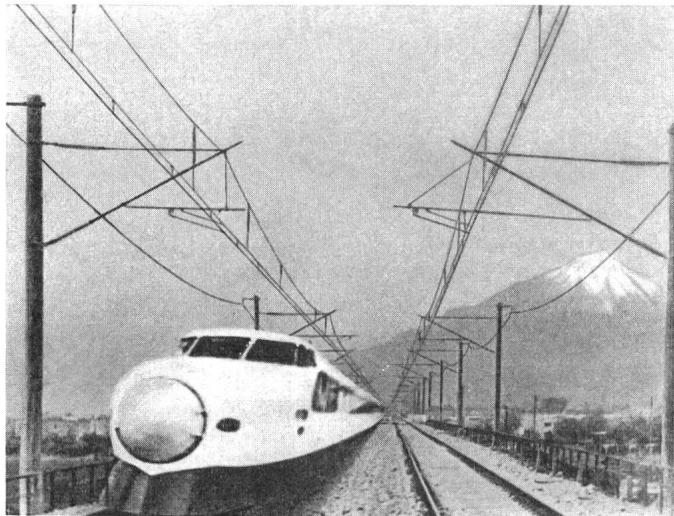


Fig. 15
Fahrleitung der Tokaido-Schnellbahn JNR, 25 kV, 60 Hz

wechselstromsystem mit Industriefrequenz 25000 V, 50 Hz einzuführen [55]. Das bisherige elektrische Eisenbahnnetz wird mit 1500 V Gleichstrom betrieben. Der Übergang auf ein anderes Traktionssystem stellt England vor grosse, neue Aufgaben und Probleme. Die Verhältnisse liegen im Vergleich zu Frankreich in mancher Beziehung anders und schwieriger. Die Einführung einer neuen Stromart verlangte vorerst ebenfalls eingehende Studien der Grundlagen, die Abklärung zahlreicher technischer und betrieblicher Fragen bzw. die praktische Erprobung von Maschinen und Anlagen. Die BR gingen in mancher Beziehung eigene Wege. Es wurden je nach

Strecke und Geschwindigkeit verschiedene Fahrleitungsbaarten miteinander verglichen und eigene Erfahrungen und Erkenntnisse gesammelt, sowie zahlreiche Mess- und Versuchsfahrten durchgeführt (Fig. 14) [60]. Auf Strecken mit grossen Geschwindigkeiten, 120...160 km/h, bevorzugen die BR wegen des nach ihrer Ansicht besseren Verhaltens, trotz der grösseren Bau- und Unterhaltskosten, Verbund-Kettenfahrleitungen (compound catenary, Fig. 16C und D) gegenüber dem einfacheren, verbesserten Kettenfahrleitungssystem mit Y-Aufhängungen (modified-Y simple catenary) der DB und SNCF (Fig. 16B). In England bestehen einige Sonderheiten, die bei der Elektrifizierung mit Einphasenwechselstrom zu berücksichtigen waren. Wegen des teilweise sehr engen Lichtraumprofils mussten einige Streckenabschnitte umschaltbar, mit niedriger Betriebsspannung 25/6,25 kV, 50 Hz, ausgerüstet werden (Abstand zwischen Fahrdräht und Lademasse — spannungsführende Teile und Masse — bei 25 kV 28 cm, und bei 6,25 kV 10 cm). Ferner erachtete man zur Vermeidung von störenden Einflüssen zwischen dem 25 kV, 50 Hz-Bahnnetz und dem Telefon-Fernsprechkabel besondere Schutzmaßnahmen für die Rückleitung des Traktionsstromes (Saugtransformatoren) als notwendig [56...59].

Für die Tokaido-Schnellbahn entwickelten die Japanischen Staatsbahnen (JNR) ein neues Fahrleitungssystem für sehr hohe Geschwindigkeiten von über 200 km/h. Ihr Railways Technical Research Institute führt seit einigen Jahren systematisch theoretische Studien und praktische Untersuchungen über verschiedene Fahrleitungsbauarten durch. Die bisher bekannten Grundlagen und Erkenntnisse über das dynamische Verhalten von Stromabnehmer und Fahrleitung bei höchsten

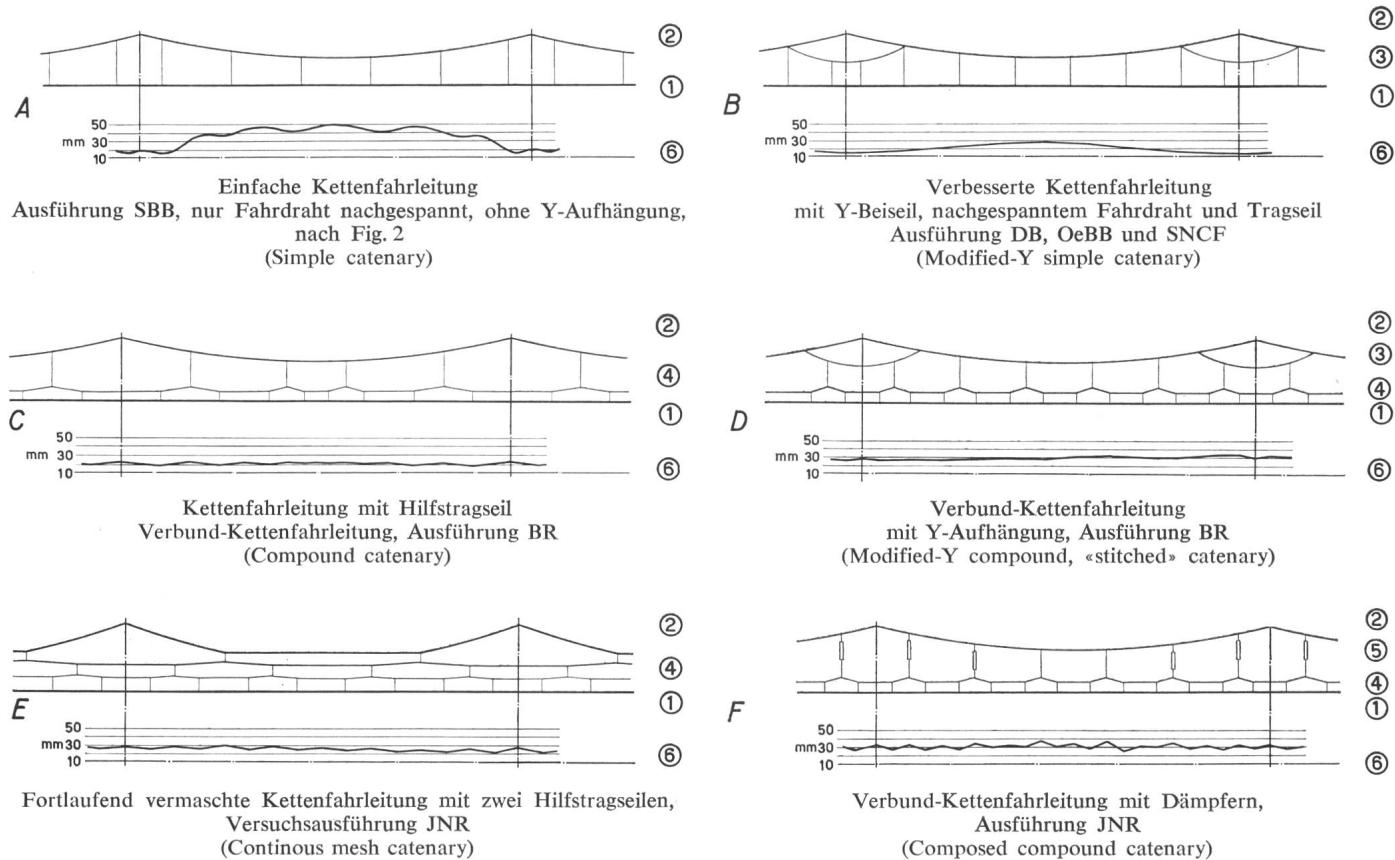


Fig. 16
Schematische Darstellung verschiedener Fahrleitungssysteme
Gegenüberstellung

① Fahrdräht; ② Tragseil; ③ Y-Aufhängung (Beiseil); ④ Hilfstragseil; ⑤ Dämpfer; ⑥ Fahrdräht-Anhubkurve (bei $P = 5,5$ kg)

Geschwindigkeiten wurden überprüft, ergänzt und erweitert. Durch Modellversuche ermittelte das Institut die Eigenschaften verschiedener Fahrleitungssysteme; Fahrleitungen mit günstigstem Verhalten in Bezug auf Fahrdrähtanhub, Elastizität und Schwingungerscheinungen im Modell wurden auf Versuchsstrecken gebaut und durch Messfahrten auf die Güte der Stromabnahme und ihr dynamisches Verhalten bei hohen Fahrgeschwindigkeiten getestet. Einfache Kettenfahrleitungen (nach Fig. 16A) kamen nicht in Frage. Verbesserte Kettensysteme mit nachgespanntem Fahrdräht und Tragseil und Y-Aufhängung (modified -Y simple catenary, Fig. 16B) konnten nicht ganz befriedigen wegen der Neigung zu Schwingungen. Bauarten mit Hilfstragseil, mit und ohne Y-Aufhängung (modified -Y compound, stitched catenary, Fig. 16 D) haben gute dynamische Eigenschaften, eine ausgeglichene Elastizität und weisen wenig Kontaktunterbrechungen auf; sie sind jedoch im Aufbau kompliziert und daher für die praktische Anwendung weniger erwünscht. Ein vielfach fortlaufend-vermaschtes System (continous mesh catenary, Fig. 16E) nach Kumezawa [63] hat auf Grund von Modelluntersuchungen ideale Verhältnisse ergeben; der Aufwand ist jedoch zu gross und die Ausführung zu teuer. Die Bauart wurde daher nicht angewandt.

Die JNR haben für die Tokaidobahn ein neuartiges, einfacheres Fahrleitungssystem (Fig. 15) mit in die Hänger eingebauten Dämpfern (composed compound catenary, Fig. 16F) entwickelt, erprobt und gebaut. Die Betriebserfahrungen werden zeigen, ob sich die Bauart mit regulierbarer Dämpfung auf die Dauer bewährt [29; 62; 64...67].

Die Triebwagenzüge der Tokaidoschnellbahn sind mit kleinen, besonders leichten Scherenstromabnehmern mit reduziertem Hubbereich ausgerüstet [4; 68]. Da die ganze Linie ein eigenes Bahntrasse, ohne Niveauübergänge, mit gleichmässiger Lichter-Höhe besitzt, konnten die Fahrleitungen durchgehend in angenähert gleicher Höhenlage über dem Geleise, ohne starke Neigungen und grosse Höhenunterschiede in der Fahrdrähtlage verlegt werden. Der Stromabnehmer hat daher während der Fahrt nur geringe Hub- und Senkbewegungen auszuführen; seine Masse ist im Vergleich zur Fahrleitung klein. Es bestehen günstige Voraussetzungen für ein gutes dynamisches Verhalten und für eine ununterbrochene Stromabnahme.

Ein anderes Problem bildet das aerodynamische Verhalten bei Tunneleinfahrten mit hohen Geschwindigkeiten wegen des plötzlichen Änderns der Luftdruckverhältnisse. In dieser Beziehung zeigt der kleine Stromabnehmer ebenfalls ein günstiges Verhalten.

4. Schlussbetrachtungen

Die Übersicht über die Fahrleitungsbauarten für hohe Geschwindigkeiten erhebt nicht Anspruch auf Vollständigkeit. Es konnten nur einige der wichtigsten Ausführungsbeispiele aufgeführt werden. Die theoretischen Grundlagen über das Verhalten von Stromabnehmer und Fahrleitung wurden soweit als es für das allgemeine Verständnis notwendig war gestreift, um einen Begriff der Probleme und Zusammenhänge zu geben.

Lange Zeit war die einfache Kettenfahrleitung die übliche Bauart. Mit der Einführung des Schnellverkehrs wurde die Stromabnahme problematisch und gab Anlass, das Verhalten bei hohen Geschwindigkeiten genauer zu untersuchen und

darüber Grundlagen aufzustellen. Für das eingehendere Studium sei auf die Literatur verwiesen.

Für den Konstrukteur ist es faszinierend, mit der Entwicklung und dem Fortschritt der Technik stets höhere Geschwindigkeiten zu erreichen und die Anlagen entsprechend weiter ausbauen zu können. Es darf dabei allerdings die Wirtschaftlichkeit nicht ausser acht gelassen werden. Nebst der Technik ist volkswirtschaftlich gesehen die Gesamtwirtschaftlichkeit der verschiedenen Verkehrsträger, deren technische und betriebliche Vor- und Nachteile miteinander zu vergleichen, um eine optimal mögliche Höchstgeschwindigkeit zu erstreben.

Literatur

- [1] H. Geitmann: Auch die Eisenbahn muss schneller werden. Bundesbahn 37(1963)1/2, S. 1...5.
- [2] G. Wiens: Die Eignung von Schienenfahrzeugen für Höchstgeschwindigkeit. Bundesbahn 37(1963)1/2, S. 7...14.
- [3] A. Kniffeler: Elektrische Triebfahrzeuge für den Schnellverkehr. Bundesbahn 37(1963)1/2, S. 22...26.
- [4] B. Boehm: Die japanische Schnellbahn Tokio–Osaka. Bundesbahn 37(1963)1/2, S. 69...75.
- [5] H. Sparkuhle: Der Schnell- und Schnellstverkehr auf der Schiene im Spiegel des deutschen und internationalen Fachschrifttums. Bundesbahn 37(1963)1/2, S. 76...86.
- [6] H.-C. Seeböhm: Probleme des Schnellverkehrs auf der Schiene. Festansprache. Glasers Annalen 88(1964)9, S. 305...311.
- [7] H. Geitmann: Probleme des Schnellverkehrs auf der Schiene. Glasers Annalen 88(1964)9, S. 311...316.
- [8] O. Witscher: Der Ausbau der Schweizerischen Bundesbahnen. ETR Eisenbahntechnische Rundschau 12(1963)12, S. 601...607.
- [9] F. Nouvion: Les expériences de Morceux. Récord du monde de vitesse sur voie ferrée, 28—29 mars 1955. Revue générale des chemins de fer 74(1955), S. 245...310.
- [10] D. Caire: Le ruban bleu du rail. Revue de l'association française des amis des chemins de fer (1955)191, S. 25...30.
- [11] Kurzbericht über die 18. Tagung vom 17.—26. 6. 1962 in München. Monatsschrift der Internationalen Eisenbahn-Kongress-Vereinigung. Deutsche Ausgabe 39(1962)11/12, S. 1207...1248.
- [12] The new Tokaido-Line. Sonderheft. Japanese Railway Engineering 4(1963)1.
- [13] W. Gassmann: Japan baut die schnellste Eisenbahn der Welt Tokio–Osaka. Techn. Rdsch. 53(1961)47, S. 9...13 und 55(1963)22, S. 41...43.
- [14] I. Kato: Die neue Tokaido Bahn. Monatsschrift der internationalen Eisenbahn-Kongress-Vereinigung. Deutsche Ausgabe 40(1963)12, S. 905...960.
- [15] G. Wiens: Die japanische Schnellbahn Tokio–Osaka in europäischer Sicht. Glasers Annalen 8(1964)3, S. 77...97.
- [16] W. Rösch und H. Schneider: Die Eisenbahnlinie München–Bozen und ihre Eignung für den Betrieb mit 200 km/h Höchstgeschwindigkeit. Glasers Annalen 87(1963)12, S. 559...567.
- [17] F. Niethammer: Leitungsseilkurve bei Berücksichtigung der Elastizität und Steifigkeit. E. u. M. 52(1934), S. 266...269.
- [18] B. Fink: Beitrag zur Dynamik des Stromabnehmers. Elektr. Bahnen 7(1931)9, S. 272...276.
- [19] J. Beier: Die Bauarten der Stromabnehmer und ihre Dynamik. Elektr. Bahnen 9(1933)2, S. 18...21 und S. 40...47.
- [20] F. Niethammer: Fahrdräht und Stromabnehmer. E. u. M. 52(1934), S. 549...553.
- [21] H. Schwaiger: Der Bügelstromabnehmer. (Statische und dynamische Charakteristik.) Maschinenbau und Wärmeleitwissch. 4(1949)1, S. 41...47.
- [22] J. Göttinger: Der Scherenstromabnehmer für hohe Fahrgeschwindigkeiten. Elektr. Bahnen 24(1953)2, S. 36...44.
- [23] A. Cipriani: Le azioni del pantografo sulla linea di contatto. Ingegneria Ferroviaria 9(1954)6, S. 492...500.
- [24] M. Garreau und M. Dupont: Le pantographe des locomotives électriques. Revue générale des chemins de fer. 76(1957), S. 665...686.
- [25] H. Nibler: Dynamisches Verhalten von Fahrleitungen und Stromabnehmern bei elektrischen Hauptbahnen. Elektr. Bahnen 21(1950)10, S. 234...241.
- [26] W. Bückner: Mechanische Probleme der Stromübertragung zwischen Fahrleitung und Stromabnehmer elektrischer Bahnen. Elektr. Bahnen 28(1957)11, S. 254...263.
- [27] M. Süberkrüb: Die Elastizität und die Dynamik von Fahrleitung und Stromabnehmer. Elektr. Bahnen 30(1959)3, S. 49...61.
- [28] M. Süberkrüb: Anpassung der Fahrleitung an hohe Fahrgeschwindigkeiten. Elektr. Bahnen 33(1962)1, S. 12...15.
- [29] I. Kumezawa: Fahrleitung für Zugförderung mit hohen Geschwindigkeiten. Monatsschrift der internationalen Eisenbahn-Kongress-Vereinigung. Elektrische Zugförderung bei den Eisenbahnen. Deutsche Ausgabe 13(1962)2, S. 55...79.
- [30] L. Pascucci: Elasticità et oscillazioni delle condutture di contatto delle linee ferroviarie elettrificate. Ingegneria ferroviaria 17(1962)3, S. 233...240.
- [31] L. Pascucci: Velocità critica per le condutture di contatto delle linee ferroviarie elettrificate. Scienza e Tecnica 28(1964)2, S. 103...110.
- [32] R. Holm: Die technische Physik der elektrischen Kontakte. Springer, Berlin 1941.
- [33] O. Kasperowski: Kontaktwerkstoffe für Stromabnehmer elektrischer Fahrzeuge. Elektr. Bahnen 34(1963)8, S. 170...182.
- [34] Office de Recherches et d'Essai, Fachgruppe A3: Verhalten der Stromabnehmer und Fahrleitungen bei hohen Geschwindigkeiten. Utrecht 1955—1963.

- [35] H. W. Schuler: Die 15 kV Fahrleitungen der Schweizerischen Bundesbahnen. Schweiz. Bauztg. 90(1927), S. 188...192 und S. 199...203.
- [36] Ein Jahrhundert Schweizer Bahnen 1847...1947. Huber, Frauenfeld 1949, Bd. 2, S. 264...284.
- [37] H. Merz: L'entretien des installations de caténaires des chemins de fer fédéraux suisses. Bulletin de l'association internationale du congrès des chemins de fer. Traction électrique dans les chemins de fer. Edition française 3(1952)6, S. 255...272 und 4(1953)1, S. 21...44.
- [38] Schweizerische Bundesbahnen: Zum Abschluss der Elektrifikation der SBB. Otto Walter, Olten 1960, S. 41...47.
- [39] E. Grimm: Die ortsfesten elektrischen Anlagen der BLS. Techn. Rdsch. 55(1963)27, S. 27...29.
- [40] G. Naderer: Fahr- und Speiseleitungen. Elektr. Bahnen 11(1935)4, S. 112...117.
- [41] A. Mosler: Die Fahrleitungen für elektrisch betriebene Strecken der deutschen Bundesbahn. Eisenbahn-Ingenieur 5(1954)2, S. 32...39.
- [42] R. Wagner: Die Fahrleitungsanlagen der deutschen Bundesbahnen. Bundesbahnen 28(1954)9/10, S. 503...517.
- [43] R. Wagner: Die Einheitsfahrleitung 1950 der deutschen Bundesbahn. Elektr. Bahnen 25(1954)7, S. 177...180.
- [44] L. Hausmann: Einige praktische Formeln zum Verständnis des Fahr- und Fernleitungsbaus. Elektr. Bahnen 26(1955)4, S. 79...88.
- [45] R. Wagner und A. Mosler: Umbau alter Fahrleitungen. Elektr. Bahnen 27(1956)4, S. 88...93.
- [46] L. Hausmann: Fahrleitung und Stromabnehmer. Eisenbahn-Ingenieur 11(1960)10, S. 298...307.
- [47] U. Kroll: Beitrag zur Entwicklungsgeschichte der Fahrleitungen für Einphasenwechselstrom in Europa. Elektr. Bahnen 31(1960)6, S. 121...132.
- [48] M. Vaubourdolle und W. Walter: L'équipement électrique à 20 000 volts, 50 Hz de la ligne d'Aix-les-Bains à la Roche-sur-Foron. Revue générale des chemins de fer 69(1950), S. 495...514.
- [49] L. Armand, M. Walter, A. Crépet et al.: L'électrification en courant monophasé 50 Hz de la ligne de Valenciennes à Thionville et les journées d'information de Lille (11—14 mai 1955). Revue générale des chemins de fer 74(1955), S. 429...435, 489...496, 497...520.
- [50] H. Merz: Systemwechselbahnhöfe. (Der Zusammenschluss verschiedener Eisenbahnen in den schweizerischen Grenzbahnhöfen.) NZZ Technik Nr. 2714 vom 15. 9. 1957.
- [51] H. Merz und E. Palm: Zusammentreffen zweier verschiedener Bahnstromsysteme im Personenbahnhof Basel SBB. SBB-Nachrichtenblatt 35(1958), S. 76...78.
- [52] M. Boissonnade und M. Dupont: Essais à très grande vitesse sous de contact à courant alternatif 25 kV—50 Hz. Revue générale des chemins de fer 81(1962), S. 369...389.
- [53] D. Scioli: Con l'ALE 601 a 225 km/h. Voci della rotaia 7(1964)1, S. 11.
- [54] E. Binelli und E. Taglienti: Prove di alta velocità sul tratto di linea Grosseto-Montepescali. La tecnica professionale 29(1964)8, S. 154...161.
- [55] V. Kammerer: England, Wahl des künftigen Bahnstromsystems Elektr. Bahnen 27(1956)7, S. 168...170.
- [56] M. Hill: Overhead Contact Systems for Railway Electrification. Journal of the Institution of Locomotive Engineers. 49(1959/60), S. 236...268.
- [57] Railway Electrification Progress. British Railway Electrification Conference, London, 3 to 7 Oct. 1960, Railway Gazette Spezial Publication, London 1960.
- [58] Overhead Equipment, the Catenary System. Developments in Overhead Equipment. Proceedings of the British Railway Electrification Conference, London 1960, Paper 33 and 33A.
- [59] British Railway Electrification Conference London 1960. Glasers Analen 85(1961), S. 32...35.
- [60] V. Y. Kotwal: Fahrleitungssysteme für elektrische Zugförderung. Monatsschrift der internationalen Eisenbahn-Kongress-Vereinigung. Elektrische Zugförderung bei den Eisenbahnen. Deutsche Ausgabe 14(1963)8, S. 593...609.
- [61] Considerations of Current Collection at High Speeds. International Railway Journal 4(1964)9, S. 40...43.
- [62] S. Seki: Die Elektrisierung der Japanischen Staatsbahnen mit Einphasenwechselstrom (50 und 60 Hz). Elektr. Bahnen 28(1957)11, S. 241...246.
- [63] I. Kumezawa: A Study of continuous mesh catenary. Railway Technical Research Institute JNR, Quarterly Report 1(1960)2, S. 16...18.
- [64] I. Kumezawa: Overhead Wiring System for High Speed Operation. Japanese Railway Engineering 3(1962)2, S. 14...17.
- [65] I. Kumezawa: Overhead Wire Structure for High Speed Train Operation. Railway Technical Research Institute JNR Quarterly Report. Special Issue: Researches for Super High-Speed Railway 3(1962)Nov., S. 26...31.
- [66] I. Kumezawa: Overhead Wire Structure for High Speed Operation. Railway Technical Research Institute JNR Quarterly Report. Special Issue: Researches for Super High-Speed Railway (1963)Oct., S. 36...39.
- [67] I. Kumezawa: Overhead Wire Structure for High Speed Train Operation. Railway Technical Research Institute JNR Quarterly Report. Special Issue: Researches for Super High-Speed Railway (1964)Aug., S. 34...37.
- [68] B. Boehm: Fahrzeuge und Stromversorgungsanlagen der neuen Schnellbahn in Japan. Elektr. Bahnen 35(1964)7, S. 181...194.
- [69] M. Manzo: Ad oltre 200 km/h i nuovi rotabili progettati dalle F. S. Scienza e Tecnica, Ingegneria Ferroviaria 19(1964)10, S. 797...800.

Adresse des Autors:

Hugo Merz, dipl. Elektroingenieur ETH, Sektionschef der Bauabteilung der Schweizerischen Bundesbahnen, Generaldirektion, Mittelstrasse 43, 3000 Bern.

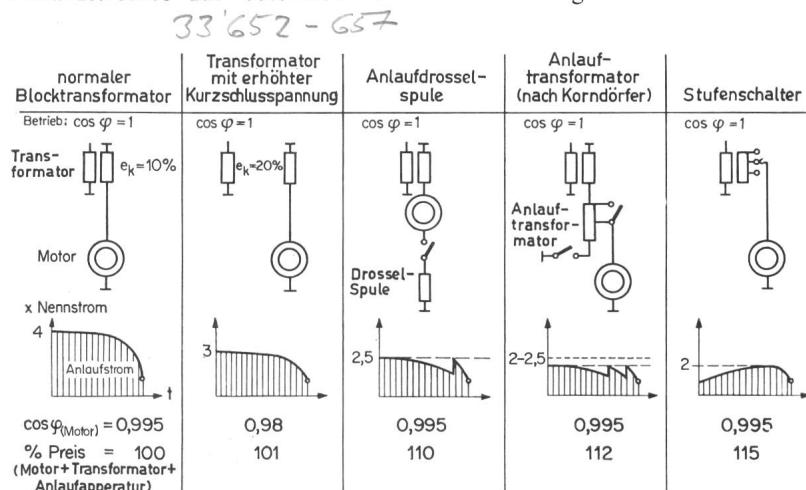
Anlauf und Laufruhe schnellaufender Pumpengruppen

Kurzvortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 11. November 1964 in Zürich
von K. Abegg, Zürich

621.313.323 : 621.6

Die Anlaufcharakteristik, d. h. der Drehmoment-Drehzahlverlauf und der zeitliche Verlauf des Anlaufstromes kann nur in beschränktem Mass durch die konstruktive Gestaltung des Motors beeinflusst werden und wird vorwiegend durch die Wahl der Anlaufapparatur bestimmt. Dies gilt ganz besonders für schnellaufende Pumpengruppen grosser Leistung, deren Synchronmotoren vorwiegend mit massiven Polen ausgerüstet sind.

Fig. 1 zeigt den grundsätzlichen Verlauf des netzseitigen Anlaufstromes für verschiedene Anlaufschaltungen einer



30-MW-Pumpengruppe in Blockschaltung für eine Betriebsdrehzahl von 1500 U./min. Der Preisvergleich in Prozenten umfasst dabei den gesamten elektrischen Teil, d. h. Motor, Blocktransformator und Anlaufapparatur. Ferner wird vorausgesetzt, dass im Betrieb oberspannungsseitig auf $\cos \varphi = 1$ reguliert wird.

Die Blockschaltung ist für den Anlauf von Synchronmotoren grosser Leistung besonders geeignet, weil sich die Kurzschlussimpedanz des Transformators in ihrer vollen Grösse zu jener des Motors addiert. Dadurch ist es möglich, den Anlaufstrom eines Motors, der am starren Netz 5...7 mal Nennstrom erreicht, durch einen normalen Blocktransformator mit üblicher Kurzschlussspannung von ca. 10 % auf Werte unter 4 zu reduzieren. Bei praktisch unverändertem Transformatorpreis kann die Kurzschlussspannung vergrössert werden, so dass mit der gleichen Schaltung bei doppelter Kurzschlussspannung Anlaufströme kleiner als 3 mal

Fig. 1
Anlauf von Synchronmotoren in Blockschaltung
(30 MW, 1500 U./min)