

Die verschiedenen Arten der elektrischen Zugförderung bei den Schweizerischen Bundesbahnen seit ihren Anfängen

Autor(en): **Degen, A.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins : gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)**

Band (Jahr): **51 (1960)**

Heft 12

PDF erstellt am: **09.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-917037>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Literatur

- [1] Harris, A. J. und A. W. Christie: Research on Two Aspects of Street Lighting: Accidents and Road Surface Characteristics. Publ. Lighting Bd. 19(1954), S. 553.
- [2] Ruff, H. R. und G. K. Lambert: Relative Importance of the Variables Controlling Street Lighting Performance. Publ. Lighting Bd. 22(1957), Nr. 97, S. 177.
- [3] Boer, J. B. de, V. Onate und A. Oostri'ck: Practical Methods for Measuring and Calculating the Luminance of Road Surfaces. Philips Res. Rep. Bd. 7(1952), Nr. 1, S. 54...76.
- [4] Boer, J. B. de und A. Oostri'ck: Reflection Properties of Dry and Wet Road Surfaces and a Simple Method for Their Measurement. Philips Res. Rep. Bd. 9(1954), Nr. 3, S. 209...224.
- [5] Boer, J. B. de, F. Burghout und J. F. T. van Heemskerck Veeckens: Appraisal of the Quality of Public Lighting Based on Road Surface Luminance and Glare. C. I. E.-Brüssel 1959, Nr. P-59.23.
- [6] Boer, J. B. de: Ein Leuchtdichtemesser für Strassenbeleuchtung. Lichttechnik Bd. 7(1955), Nr. 7, S. 273...275; Nr. 8, S. 307...309.
Un luminancemètre pour l'éclairage public. Rev. gén. Routes et Aérodrômes Bd. -(1955), Nr. 280.

Adresse des Autors:

J. B. de Boer, Lichttechnisches Laboratorium, N. V. Philips' Gloeilampenfabrieken, Eindhoven (Niederlande).

Die verschiedenen Arten der elektrischen Zugförderung bei den Schweizerischen Bundesbahnen seit ihren Anfängen

Von A. Degen, Bern

621.331 : 625.1(494)

Die Entwicklung der SBB wird in grossen Zügen in der Hauptsache vom Standpunkt der Energiewirtschaft aus geschildert. Neben dem Einphasensystem mit 15 kV Fahrleitungsspannung und 16²/₃ Hz, dem weitaus die wichtigste Rolle zukommt, werden auch weitere Anwendungsarten behandelt. Die betreffenden Anlagen und Triebfahrzeuge sind zum Teil heute noch im Betrieb, zum Teil besitzen sie historischen Charakter. Zum Schluss wird auf die Verhältnisse in den Grenzbahnhöfen hingewiesen, in denen ausländische Bahnen einmünden.

Le développement des CFF est exposé d'une manière générale, principalement du point de vue de l'économie énergétique. Outre le système monophasé à 16²/₃ Hz avec tension de 15 kV au fil de contact, le plus important, il existe d'autres systèmes, qui sont indiqués. Les installations et les véhicules de traction correspondants sont en partie encore utilisés, tandis que d'autres n'ont plus qu'un caractère historique. Pour terminer, l'auteur mentionne les conditions aux gares frontalières, où aboutissent des lignes de chemins de fer de l'étranger.

1. Einleitung

Der 29. Mai 1960 war ein bedeutungsvoller Tag für die Elektrifizierung der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB). Der Sommerfahrplan trat in Kraft. Gleichzeitig wurde auf den Strecken Cadenazzo-Luino und Oberglatt-Niederweningen das Dampfross endgültig pensioniert. An seiner Stelle werden nun auch hier in Zukunft leistungsfähige elektrische Triebfahrzeuge den Verkehr bewältigen und als «Betriebsstoff» einheimische weisse Kohle konsumieren. Mit diesen beiden Umstellungen ist die Elektrifikation des Staatsbahnnetzes praktisch beendet. Mehr als 55 Jahre sind vergangen, seit sich zum ersten Mal, am 16. Januar 1905, ein elektrisches normalspuriges Triebfahrzeug mit eigener Kraft und mit oberirdischer Stromzuführung auf dem Netze der SBB in Bewegung gesetzt hat. Das damals noch sehr zarte und allerhand Kinderkrankheiten aufweisende Bäumlein hat sich jedoch in überaus erfreulicher Weise weiterentwickelt. Heute steht es, bildlich gesprochen, als grosser, sich über das ganze Land erstreckender Wald da.

Die Anstrengungen der Pioniere der elektrischen Zugförderung in unserem Lande waren nicht umsonst. Sie mussten sich zum Teil gegen grössere Widerstände mit dem Gewicht ihrer ganzen Persönlichkeit für die Durchführung der Gedankengänge einsetzen, die von ihnen als richtig angesehen wurden. Ihre Bemühungen haben sich aber gelohnt. Dank der vollständigen Elektrifizierung besitzen die SBB heute ein sehr leistungsfähiges Netz. Die Vorteile der weissen Kohle wirken sich gegenüber dem früheren Dampftrieb in einer starken Vermehrung der Fahrleistungen sowie in einer Verkürzung der Fahrzeiten, besonders auf Bergstrecken, aus. Dankbar sei hier aller Pioniere aus der Frühzeit der Elektrifikation der SBB gedacht. Ihr nie erlahmender Eifer ist auch heute noch der Wegweiser für alle, die an diesem grossen Werk von nationaler Bedeutung mitarbeiten dürfen.

Bei der Umstellung des Dampfbetriebes wurde die weisse Kohle in verschiedenen Formen für die elektrische Zugförderung nutzbar gemacht. Es bestehen Unterschiede in der Erzeugung der Energie, in der Zuleitung zum Triebfahrzeug, in der Fahrleitungsspannung sowie in der Stromart, um nur die wichtigsten Punkte zu nennen. In den folgenden Ausführungen soll nun in einzelnen auf die verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten von elektrischer Energie für Traktionszwecke eingegangen werden.

2. Der Akkumulatorenbetrieb

Das Triebfahrzeug mit eingebauten Akkumulatoren ist in seinem Aufbau einfach. Es kann sowohl als Motorwagen als auch als Lokomotive ausgebildet sein. Der erforderliche Betriebsstoff «Elektrizität» wird in den Akkumulatoren mitgeführt. Die gesamten Aufwendungen für die ortsfesten Einrichtungen der elektrischen Zugförderung (Fahr- und Speiseleitungen sowie Unterwerke und Umformerstationen) fallen gänzlich weg. Ausser den Triebfahrzeugen werden nur noch ortsfeste Ladeeinrichtungen für die Batterien benötigt. Die erforderliche Energie wird in der Regel in Form von Drehstrom von den örtlichen Elektrizitätswerken bezogen und für das Laden der Batterien in Gleichstrom umgewandelt. Die ortsfesten Installationen fallen somit sehr einfach aus. Sie können je nach den Betriebsverhältnissen auf einen oder mehrere Punkte des Bahnnetzes konzentriert werden. Diesen Vorteilen des Akkumulatorenbetriebes steht jedoch seine beschränkte Leistungsfähigkeit gegenüber, die sich besonders stark bei Strecken mit grösseren Steigungen bemerkbar macht. Ausserdem ergeben sich hohe Kosten, bedingt durch den Betrieb und den Unterhalt der Batterie.

Die ersten Anfänge des Einsatzes von Akkumulatoren-Triebfahrzeugen lassen sich bei den SBB sehr weit zurückverfolgen. Im Gegensatz zu ausländi-

Unabhängigkeit von der Fahrleitung und den übrigen ortsfesten Anlagen eine ideale Ergänzung des elektrischen Betriebes mit oberirdischer Energiezufuhr für bestimmte Sonderfälle dar.

4. Zweikraft-Traktoren

Ausser den dieselektrischen Triebfahrzeugen besitzen die SBB für den Rangierdienst eine Anzahl Zweikraft-Traktoren. Diese verkehren normalerweise auf Geleisen, die mit Fahrleitungen für 15 kV, $16\frac{2}{3}$ Hz, ausgerüstet sind. Sie werden aber innerhalb eines Bahnhofes auch dort eingesetzt, wo die Fahrleitungen aus betrieblichen oder aus wirtschaftlichen Gründen fehlen. Muss der Traktor nun auf einem derartigen Geleise verkehren, so wird sein Stromabnehmer gesenkt und gleichzeitig der vorhandene Dieselmotor in Betrieb gesetzt. Dieser treibt einen Generator an, der dann an Stelle der fehlenden Fahrleitung die Energielieferung an die Traktionsmotoren übernimmt. Der Brennstoffbehälter enthält einen bestimmten Vorrat Heizöl zum Betriebe des Dieselmotors. Auch hier besitzt somit wiederum jedes Triebfahrzeug sein eigenes thermisches Kleinkraftwerk. Die Leistungen im Falle des Betriebes auf Geleisen ohne Fahrleitungen mit Hilfe des Dieselmotors sind kleiner als bei oberirdischer Energiezufuhr, wie dies Tabelle I für die beiden heute im Betriebe stehenden Traktortypen der Serie Tem zeigt.

Leistungen der Zweikraft-Traktoren der Serie Tem
Tabelle I

	Leistung bei Fahrleitungsbetrieb kW	Leistung bei Dieselmotorbetrieb kW
Leichter Typ . .	88,5	66
Schwerer Typ . .	258	129

Ausserdem besitzen die SBB noch 3 Zweikraft-Traktoren der Serie Tea. Beim Befahren von Geleisen ohne Fahrleitungen liefert die eingebaute Akkumulatorenatterie den erforderlichen Traktionsstrom. Die Batterie muss natürlich in gewissen Zeitabständen aufgeladen werden, was die Aufstellung einer besonderen, ortsfesten Ladeeinrichtung bedingt.

5. Elektrifizierte Dampflokomotiven

Im Jahre 1917, zu Beginn der Kohlenkrise des ersten Weltkrieges, machte Prof. Dr. W. Kummer den Vorschlag, elektrisch geheizte Dampflokomotiven in Betrieb zu nehmen. Es hätte dies den Bau besonderer Fahrleitungen und Speiseeinrichtungen erfordert. Die damals vorhandenen Lokomotiven wären mit den zum Verdampfen von Wasser erforderlichen elektrischen Einrichtungen auszurüsten gewesen. Bei diesem Vorschlag handelte es sich — im Gegensatz zur Vollelektrifizierung, wie man sie heute kennt — um einen «halbelektrischen Betrieb». Nach Auffassung von Prof. Kummer hätte die elektrochemische Industrie auf Grund einer staatlichen Intervention die erforderliche Energie liefern müssen²⁾. Zu einer praktischen Anwendung dieses Vorschlages kam es allerdings nicht.

Die von Prof. Kummer entwickelten Gedanken-gänge sind offenbar in Anlehnung an die Elektro-

kessel von ortsfesten Anlagen entstanden, wie sie heute in grösserem Ausmass im ganzen Land zur Verwertung von Überschussenergie anzutreffen sind. Der Elektrokessel ist seiner Herkunft nach ein typisches Kind des ersten Weltkrieges.

In den Jahren 1942 und 1943 wurden die beiden Rangierlokomotiven der Serie E 3/3, Nr. 8521 und 8522, elektrifiziert. Es handelt sich hierbei um eine Massnahme zur Einsparung von Steinkohle im Rangierdienst. Der Dampf wurde mit Hilfe einer Widerstandsheizung erzeugt, die über zwei an die Fahrleitung (15 kV, $16\frac{2}{3}$ Hz) angeschlossene Transformatoren von 2×240 kVA mit 20 V gespeist wurde. Das Akkumuliervermögen des Lokomotivkessels gestattete im Betrieb auch das Befahren von Geleisen ohne Fahrleitungen bei gesenktem Stromabnehmer. Der Kessel der Lokomotive arbeitete in diesem Falle wie ein Dampf-Gefällespeicher³⁾.

Die elektrischen Heizeinrichtungen der beiden Lokomotiven, in denen man hydraulische Energieüberschüsse des Bahnnetzes verwertete, wurden in den Jahren 1951 und 1952 entfernt. Seither arbeiten die beiden Triebfahrzeuge wiederum als Dampflokomotiven mit reiner Kohlenfeuerung.

Im weiteren muss noch auf die Verwendung von elektrisch erzeugtem Dampf für die Zugheizung hingewiesen werden. Der frühere zweiachsige Gepäckwagen F^ü 17 501 aus dem Jahre 1899 wurde 1921 zum Heizwagen X^{dü} 99 099 umgebaut. Hierbei wurde er mit einem liegenden Elektrokessel für eine Leistung von 800...1000 kW, entsprechend einer Satttdampfmenge von ca. 1...1,3 t/h ausgerüstet. Die erforderliche Energie wurde über einen Stromabnehmer der Fahrleitung entnommen und direkt dem Kessel zugeführt. Zur Regulierung der Dampfproduktion waren zwei Elektroden vorhanden, die einzeln ein- und ausgeschaltet werden konnten.

Im Jahre 1921 wurden mit diesem Wagen zwischen Bern und Thun Versuche durchgeführt. Bei einem Personenzug mit insgesamt 45 Achsen mussten bei einer Aussentemperatur von -5 °C innerhalb von 80 min rund 1000 kWh aufgewendet werden. Der Wasserverbrauch betrug ca. 1,35 m³.

Die Idee der Zugheizung mit Hilfe eines derartigen fahrbaren Elektrokessels in einem Heizwagen, unter Weiterverwendung der vom Dampftrieb her vorhandenen Heizeinrichtungen, wurde später nicht weiter verfolgt. Alle andern auf dem Netz der SBB in Betrieb gesetzten Heizwagen besaßen Kessel für die Verfeuerung von Steinkohle.

Die Inbetriebnahme von Heizwagen war zu Beginn der Elektrifikation besonders in den Zügen mit ausländischen Kurswagen nötig, da diese oft noch keine elektrischen Heizeinrichtungen besaßen. Die Heizwagen waren deshalb früher in den Schnellzügen anzutreffen, in denen Wagen fremder Provenienz verkehrten. In den Personen-, Gepäck-, Post- und Speisewagen für den inländischen Reiseverkehr wurden allmählich elektrische Heizkörper eingebaut, die vom Triebfahrzeug aus über eine besondere Anzapfung des Transformators mit Hilfe einer durchgehenden Heizleitung mit der erforderlichen Energie versorgt wurden. Die normale Heiz-

²⁾ Schweiz. Bauztg. Bd. 70(1917), Nr. 1, S. 5...6; Nr. 3, S. 33...34; 34...36.

³⁾ Bull. SEV Bd. 34(1943), Nr. 8, S. 210...214.
Brown Boveri Mitt. Bd. 30(1943), Nr. 1/4, S. 55.

spannung beträgt im inländischen Verkehr 1000 V. Die nach dem Ausland verkehrenden Wagen können je nach den Verhältnissen auch auf 1500 V oder auf 3000 V umgeschaltet werden. Dabei handelt es sich zum Teil um Gleich- und zum Teil um Wechselstrom.

In wirtschaftlicher Hinsicht ist zu erwähnen, dass die direkte elektrische Heizung, wie wir sie heute kennen, günstiger ist als der Umweg über die Verdampfung von Wasser. Die Art der Energieübertragung bis zum einzelnen Heizkörper spielt hier eben-

Der im Jahre 1921 in Betrieb gesetzte Heizwagen mit einem eingebauten Elektrodampfkessel ist zu Beginn der Dreissiger Jahre aus dem Betrieb genommen worden.

6. Der frühere Drehstrombetrieb im Simplontunnel

Der Simplontunnel wurde am 1. Juni 1906 nach einer Bauzeit von 7 $\frac{1}{2}$ Jahren eröffnet. Ursprünglich war er einspurig, bei einer Länge von ca. 20 km. Die Frage der Belästigung durch die Rauchgase bei Dampftrieb wurde schon sehr früh eifrig untersucht, ohne dass eindeutige Schlüsse auf die Verhältnisse nach der Aufnahme des Verkehrs gezogen werden konnten. Von Brown Boveri wurde nun der Generaldirektion der SBB der Vorschlag unterbreitet, den Simplontunnel nach dem Drehstromsystem auf eigene Kosten zu elektrifizieren und gegen eine bestimmte Entschädigung zu betreiben. Dieser Vorschlag wurde auch angenommen. Das Drehstromsystem erforderte den Bau einer zweipoligen Oberleitung. Die Fahrleitungsspannung war mit 3000 V bei 16 Hz relativ hoch. Bei der 7 Jahre vorher elektrifizierten Burgdorf—Thun-Bahn hatte man sich mit dem vierten Teil dieses Wertes begnügt. Da geeignete elektrische Triebfahrzeuge rasch greifbar waren, konnte die Elektrifizierung des Simplontunnels in relativ kurzer Zeit durchgeführt werden. Die erforderliche Traktionsenergie wurde aus dem Kraftwerk Massaboden der SBB

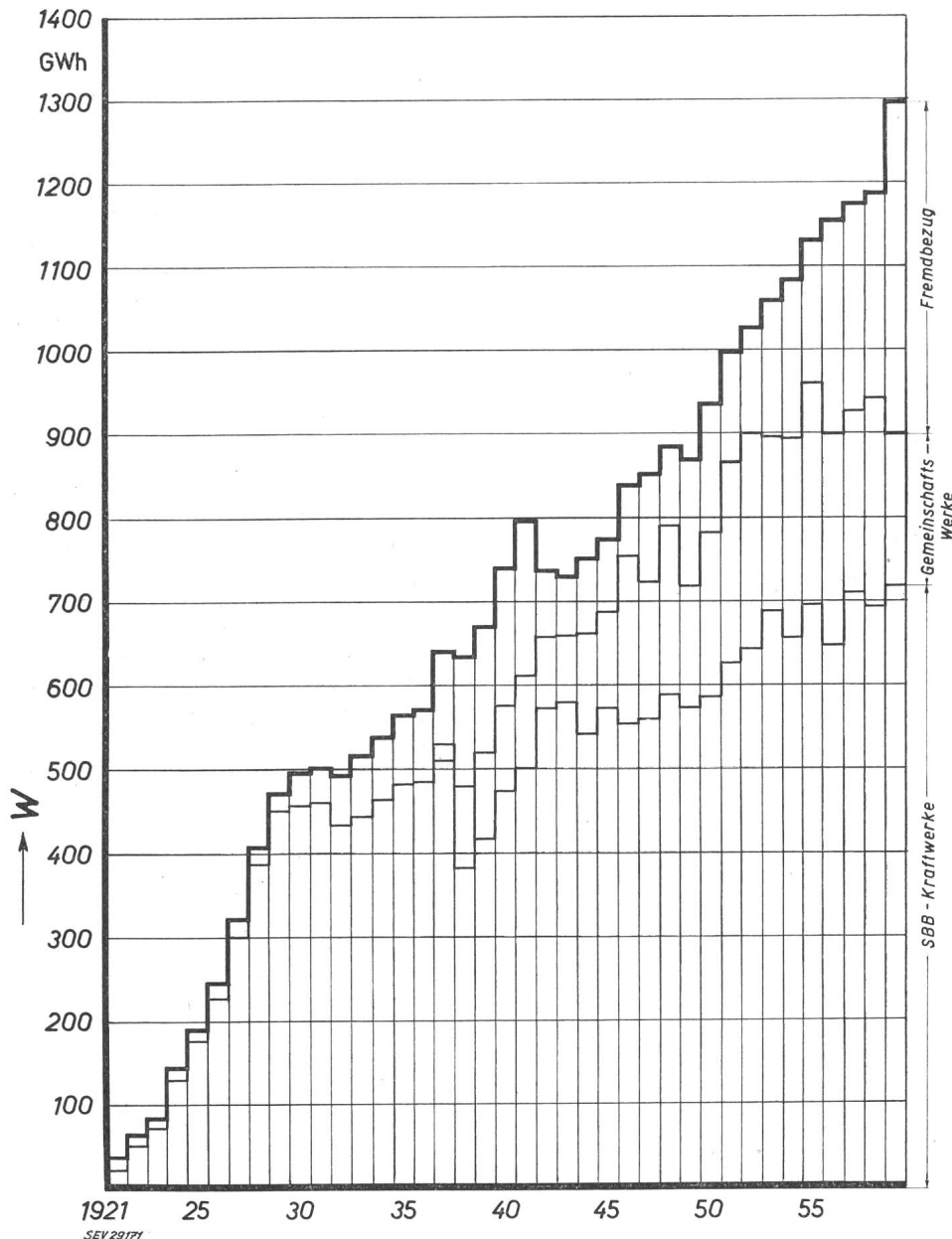


Fig. 2
Entwicklungs des Energiebedarfs
der SBB
(ohne Überschussenergie)
W Energie

falls eine wesentliche Rolle. Die elektrische Übertragung steht in dieser Beziehung sehr günstig da. Zusätzliche Verluste durch Undichtheiten usw., wie bei einem Dampfnetz, sind nicht möglich. Diese lassen sich bei einem Dampftrieb, auch bei sorgfältigster Überwachung, nie vollständig vermeiden. Auch geht im abfließenden Kondensat bei der Dampfheizung immer eine bestimmte Wärmemenge verloren, während der elektrische Heizkörper seine ganze Produktion an die umgebende Raumluft abgibt.

bei Brig sowie aus einem italienischen Kraftwerk in Iselle, auf der Südseite des Simplontunnels, bezogen.

Die Elektrifizierung des Simplontunnels ist ein bemerkenswerter Meilenstein in der Geschichte der elektrischen Zugförderung. Die Betriebserfahrungen zeigten deutlich, dass es durchaus möglich war, auch Linien mit internationalem Durchgangsverkehr elektrisch einwandfrei zu betreiben. In den massgebenden Kreisen der Bahnverwaltungen waren nämlich damals noch andere Auffassungen vorherrschend; man nahm gegenüber der elektrischen

Traktion auf Vollbahnen eine abwartende, ja sogar ablehnende Stellung ein.

Im Zuge der gemachten guten Erfahrungen wurde der elektrische Betrieb mit Drehstrom am Ende des ersten Weltkrieges, als die Kohlennot eine starke Drosselung des Verkehrs auf dem Netz der SBB zur Folge hatte, auf rund weiteren 50 km bis nach Sitten eingeführt. Das Drehstromsystem wurde dann später gänzlich aufgegeben und durch das normale Einphasensystem ersetzt, nämlich

Sitten—Brig am 15. Januar 1927

Brig—Iselle am 2. März 1930

Ferner wurde am 15. Mai 1930 das Teilstück Iselle—Domodossola der Simplonzufahrt ebenfalls auf das normale Einphasensystem der SBB umgestellt. Die Strecke ist Eigentum der Italienischen Staatsbahnen, doch wird sie von den SBB betrieben (Traktionsdienst). Im Zusammenhang mit dieser Umstellung wurde das Kraftwerk Massaboden bei Brig für die Abgabe von Einphasenenergie mit $16\frac{2}{3}$ Hz umgebaut. Ferner wurde im Kraftwerk Varzo, das Eigentum einer privaten Gesellschaft ist, eine hydroelektrische Gruppe zur Speisung der Fahrleitung der Strecke Iselle—Domodossola mit Einphasenenergie, $16\frac{2}{3}$ Hz, aufgestellt.

Die gesamten Anlagen für die Elektrifikation mit Drehstrom, die seinerzeit von Brown Boveri erstellt und temporär gegen eine gewisse Entschädigung auch betrieben wurden, gingen nach Ablauf von 2 Jahren käuflich in den Besitz der SBB über.

Für den Betrieb des Simplontunnels sowie der Fortsetzung bis Sitten standen den SBB anfänglich 2 und später insgesamt 7 Drehstromlokomotiven der Serien Ae 3/5, Ae 4/4 und Ce 4/6 zur Verfügung.

7. Der elektrische Betrieb der Seetalinie

Die ehemalige Seetalbahn mit den Strecken Emmenbrücke—Wildegg und Beinwil—Beromünster wurde in vier Etappen zwischen 1883 und 1906 als Dampfbahn allmählich ausgebaut. Im Jahre 1910 erfolgte die Elektrifizierung nach dem Einphasensystem mit einer Fahrleitungsspannung von 5,5 kV, 25 Hz. Die Seetalbahn mit einer gesamten Betriebslänge von ca. 54 km wurde auf den 1. Januar 1922 verstaatlicht. Während rund 8 Jahren blieben die anfänglich erstellten elektrischen Einrichtungen für die Zugförderung auch unter den SBB weiterhin im Betrieb, bis am 1. Oktober 1930 die Umstellung auf das Einphasensystem von $16\frac{2}{3}$ Hz erfolgte.

Das Problem «Einführung des elektrischen Betriebes» lässt sich bei der ehemaligen Seetalbahn bis ins Jahr 1904 zurückverfolgen, wobei verschiedene Projekte ausgearbeitet wurden. Von Seiten der Bahnverwaltung wurde hierbei immer wieder betont, dass es für die Gesellschaft von grosser Bedeutung sei, sich die erforderliche elektrische Energie zu günstigen Bedingungen beschaffen zu können. Am 6. Juni 1906 fand in Hochdorf eine ausserordentliche Generalversammlung der Seetalbahn statt, in der der Verwaltungsrat zur Einführung des elektrischen Betriebes und zur Erstellung eines eigenen Kraftwerkes ermächtigt wurde. In Anlehnung an den am 1. Juni 1906 eröffneten elektrischen Betrieb des Simplontunnels wurde ursprünglich die Einführung des Drehstromsystems ins Auge gefasst.

Das eingehende Studium der Systemfrage ergab jedoch, dass das Einphasensystem sich für die Verhältnisse im Seetal besser eignen werde als das Drehstromsystem, und zwar sowohl aus technischen als auch aus finanziellen Erwägungen heraus. Doch waren noch längere Verhandlungen nötig, bis die Fahrleitungsspannung von 5,5 kV endgültig festgelegt werden konnte. Die Frequenz wurde mit 25 Hz in Anlehnung an amerikanische Vorbilder gewählt. Dieser Wert sowie die heute üblichen $16\frac{2}{3}$ Hz stehen beide in einem ganzahligen Verhältnis zur Frequenz der Allgemeinversorgung von 50 Hz, was den Bau rotierender Umformeranlagen mit direkter Kupplung zwischen Motor und Generator ohne Einbezug eines Übersetzungsgetriebes gestattete. In Beinwil wurde eine Umformerstation errichtet, da sich der Bau eines eigenen Kraftwerkes nicht realisieren liess. Ein Gesuch an die SBB, die Fahrleitung für 5,5 kV, 25 Hz, von Emmenbrücke bis nach Luzern verlängern zu dürfen, um die Züge der Seetalbahn bis und ab Luzern elektrisch führen zu können, wurde abgelehnt. Die Züge der Seetalbahn konnten somit vor dem Systemwechsel zwischen Luzern und Emmenbrücke nicht mit eigener Kraft verkehren, sondern mussten mit Dampflokomotiven und später mit elektrischen Triebfahrzeugen von $16\frac{2}{3}$ Hz befördert werden.

Die für den Bahnbetrieb erforderliche Energie wurde als 50-Hz-Drehstrom anfänglich mit einer Spannung von 25 kV und später von 8 kV bezogen. Die Umformerstation Beinwil verfügte über 2 Motor-Generatoren von je 736 kW Leistung zur Erzeugung des erforderlichen Einphasenstromes von 25 Hz. Die ortsfesten Einrichtungen für die elektrische Zugförderung waren in ihrem Aufbau sehr einfach. Mit der Zunahme des Verkehrs zeigte es sich, dass sie den auftretenden Anforderungen nicht mehr voll gewachsen waren, was dann zum Umbau auf das normale Einphasensystem der SBB führte.

Als Triebfahrzeuge wurden 8 Motorwagen für Personenverkehr (gemäss heutiger Bezeichnung ABe 4/4) und 2 Gepäckmotorwagen (Fe 4/4) beschafft, die erst beim Wechsel des Stromsystems aus dem Verkehr verschwanden. Von den SBB wurden im Jahre 1926, noch vor dem Umbau auf das $16\frac{2}{3}$ -Hz-System, 3 Lokomotiven der Serie De 6/6 mit je zwei Triebmotoren von 405 kW Dauer- und 480 kW Stundenleistung eingesetzt, um die zunehmenden Verkehrsbedürfnisse befriedigen zu können. Diese 3 Lokomotiven sind heute noch im Betrieb. Sie wurden von Anfang an so gebaut, dass ein späterer Übergang von 5,5 kV, 25 Hz, auf 15 kV, $16\frac{2}{3}$ Hz, möglich war.

Die Elektrifikation der Seetalbahn wurde seinerzeit durch Brown Boveri ausgeführt. Die gleiche Firma hat auch die neuen Lokomotiven der Bauart De 6/6 im Jahre 1926 zusammen mit der Schweizerischen Lokomotivfabrik Winterthur geliefert.

8. Der Einphasenbetrieb mit $16\frac{2}{3}$ Hz

Heute wird das Netz der SBB nahezu vollständig nach dem Einphasensystem mit tiefer Frequenz betrieben, wie es auch in Deutschland, Österreich, Schweden und Norwegen mit Erfolg angewendet wird. Für die Wahl der Fahrleitungsspannung von 15 kV und der Frequenz von $16\frac{2}{3}$ Hz waren sowohl

die verschiedenen Arbeiten der im Jahre 1904 gegründeten «Schweizerischen Studienkommission für elektrischen Bahnbetrieb» als auch die von der Maschinenfabrik Oerlikon auf der Strecke Seebach-Wettingen durchgeführten Versuche massgebend. Nach längerem Hin und Her wurde dann am 18. Februar 1916 vom Verwaltungsrat der SBB der endgültige Beschluss gefasst, es sei für die Gotthardlinie entsprechend den Empfehlungen der Studienkommission das Einphasensystem mit niedriger Frequenz einzuführen⁴⁾.

Das Einphasensystem von $16\frac{2}{3}$ Hz hat sich auf der Gotthardlinie wie auch im Ausland ausgezeichnet bewährt. Nach beendigter Elektrifizierung zwischen Luzern und Chiasso wurde es später auch auf dem übrigen Teil des Netzes der SBB sowie bei zahlreichen Privatbahnen eingeführt. Der springende Punkt jedes Einphasensystems ist der Kommutatormotor der Triebfahrzeuge mit Serie-Charakteristik. Dank den langjährigen Erfahrungen im praktischen Betrieb ist er heute dem Gleichstrommotor bei einer Frequenz von $16\frac{2}{3}$ Hz ebenbürtig.

Die Elektrifikation wurde dank den guten Erfahrungen und dank ihren verschiedenen Vorteilen allmählich über das ganze Land ausgedehnt. Mit der Umstellung der Strecken Cadenazzo-Luino und Oberglatt-Niederweningen hat sie praktisch ihren Abschluss gefunden. Insbesondere hat der zweite Weltkrieg der Elektrifikation unseres Staatsbahnnetzes einen weiteren bedeutenden Auftrieb verliehen, als sich Schwierigkeiten in der Beschaffung der aus dem Ausland importierten Steinkohle zeigten.

Die ganze Elektrifizierung des Netzes der SBB erfolgte in 6 Etappen, beginnend am 1. Juni 1906 (Aufnahme des Drehstrombetriebes durch den Simplontunnel) und endigend am 1. Juni 1960 (Umstellung von Cadenazzo-Luino). Die ganze Umstellung benötigte somit 54 Jahre. In der gleichen Zeit wurde auch der grösste Teil der schweizerischen Privatbahnen elektrifiziert. Soweit sie Normalspur besitzen, haben sie im Hinblick auf die Gemeinschaftsbahnhöfe mit den SBB mit wenigen Ausnahmen ebenfalls das Einphasensystem übernommen. Auf diese Weise können die Triebfahrzeuge der Privatbahnen wie früher beim Dampftrieb freizügig auf den elektrifizierten Geleisen eines Gemeinschaftsbahnhofes verkehren. Tabelle II enthält angenähert die Längen der während der sechs Etappen elektrifizierten Linien der SBB einschl. gepachtete und verpachtete Strecken. Ferner sind auch die im Inland und im Ausland von den SBB auf Rechnung der betreffenden Eigentümer betriebenen Linien enthalten. Jede Linie wurde dabei in derjenigen Etappe eingereicht, in der sie zum ersten Mal vom Dampftrieb auf elektrische Traktion umgestellt wurde. Spätere Änderungen des Stromsystems, z. B. beim Simplontunnel mit dem Übergang von Drehstrom- auf Einphasensystem, wurden hinsichtlich der Länge, die ja damit keine Änderung erfahren hat, unberücksichtigt gelassen. In der letzten Kolonne sind schliesslich noch Angaben über die elektrifizierten Privatbahnen zu finden, deren Umstellung auf Einphasenstrom von $16\frac{2}{3}$ Hz wäh-

Approximative Längen der elektrifizierten Strecken der SBB und der Schweizerischen Privatbahnen

Tabelle II

Etappe der Elektrifikation	Jahre	Schweizerische Bundesbahnen					Schweizerische Privatbahnen
		Streckenlänge km	Stromsysteme				
			Stromart	Phasen-zahl	Frequenz Hz	Fahr-leitungs-span-nung kV	
1	1906—1929	1688	~ ~ ~ —	1 1 3	$16\frac{2}{3}$ 25 16	15 5,5 ¹⁾ 3,0 ²⁾ 0,9 ³⁾	265
2	1930—1936	470	~ —	1	$16\frac{2}{3}$	15 0,9 ³⁾	181
3	1937—1939	47	~ —	1	$16\frac{2}{3}$	15 0,9 ³⁾	73
4	1940—1943	186	~ —	1	$14\frac{2}{3}$	15 0,9 ³⁾	142
5	1944—1946	369	~ —	1	$16\frac{2}{3}$	15 0,9 ³⁾	124
6	1947—1960	220 ⁶⁾	~ ~ ~ —	1 1	$16\frac{2}{3}$ 50	15 25 ⁴⁾ 1,5 ⁵⁾ 0,9 ³⁾	69
Total		2980					854

¹⁾ Ehemalige Seetalbahn

²⁾ Simplontunnel

³⁾ Wohlen-Bremgarten, verpachtet an die Bremgarten-Dietikon-Bahn

⁴⁾ Basel SBB - St. Johann Landesgrenze

⁵⁾ Genf-La Plaine

⁶⁾ Mit Basler Verbindungsbahn

rend der gleichen Zeitperiode erfolgte. Es wurden jedoch nur Betriebe berücksichtigt, die von den SBB Traktionsenergie innerhalb von Gemeinschaftsbahnhöfen oder für eigene Linien beziehen. Von allen nach dem Einphasensystem elektrifizierten Linien wurden nur die Spiez-Erlenbach-Zweisimmen-Bahn sowie das Stammnetz der Rhätischen Bahn ausser acht gelassen, da ihre Energieversorgungen normalerweise gänzlich unabhängig von den SBB erfolgen. Zudem besitzen sie entweder keinen Gemeinschaftsbahnhof, oder ein freizügiger Verkehr elektrischer Triebfahrzeuge ist wegen verschiedener Spurweiten gar nicht möglich.

Die fortwährende Zunahme des elektrischen Betriebes bei den SBB hatte zur Folge, dass im Laufe der Jahre sowohl die ortsfesten Anlagen als auch der Triebfahrzeugpark starke Vergrösserungen erfuhren.

Für den Energiebezug standen den Schweizerischen Bundesbahnen anfänglich nur die beiden Kraftwerke Ritom und Amsteg im Gotthardgebiet zur Verfügung. Dazu kam noch das umgebaute Nebenkraftwerk Göschenen, dessen Energie beim Dampftrieb dem Betrieb der Ventilationsanlagen des Gotthardtunnels diente. Später gesellten sich dazu die Kraftwerke Vernayaz, Barberine und Masaboden sowie das Nebenkraftwerk Trient. In Amsteg und in Vernayaz wurde je eine Gruppe zur Erzeugung von Drehstromenergie 50 Hz eingebaut, um im Sommer überschüssiges Wasser ausnützen zu können. Seit dem Sommer 1958 ist Amsteg jedoch ein reines Bahnkraftwerk, da die Drehstromgruppe ausgebaut und durch eine Einphasengruppe von $16\frac{2}{3}$ Hz ersetzt wurde.

⁴⁾ Bull. SEV Bd. 34(1943), Nr. 20, S. 587...612.
Bull. SEV Bd. 48(1957), Nr. 12, S. 550...555.

Im weiteren sind die SBB an drei Gemeinschaftskraftwerken beteiligt. Die erste Anlage dieser Art war das Etzelwerk, das gemeinsam mit den Nordostschweizerischen Kraftwerken gebaut wurde. Die SBB sind am Etzelwerk mit 55 % beteiligt, dementsprechend ist auch ihr Energiebezugsrecht festgelegt. Nach einer Zeitperiode von 8 Jahren folgte — wiederum mit dem gleichen Partner — das Flusskraftwerk Rapperswil-Auenstein bei einer hälftigen Beteiligung. Ein drittes Gemeinschaftswerk befindet sich zusammen mit den Central-schweizerischen Kraftwerken gegenwärtig in Göschenen im Bau. Die Inbetriebnahme wird voraussichtlich Ende 1960 möglich sein. Das Kraftwerk Göschenen besteht in hydraulischer Hinsicht aus zwei Teilen. Die Stufe Göschenalp-Göschenen mit einem Stausee von $75 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ Inhalt wird als Speicherwerk betrieben, die Stufe Andermatt-Göschenen als Flusskraftwerk.

In der Schweiz ist neben dem allgemeinen Drehstromnetz der Landesversorgung mit 50 Hz noch ein besonderes einphasiges Hochspannungsnetz der SBB für $16\frac{2}{3}$ Hz vorhanden. Die Zusammenarbeit dieser beiden Netze, d. h. der gegenseitige Energieaustausch, ist nun technisch auf verschiedene Arten möglich. Man kann rotierende Umformergruppen, z. B. als sog. Schlupfumformer, aufstellen, um Energie zwischen den beiden Netzen auszutauschen. Weitere Möglichkeiten bietet der sog. Umrichter, der sich in seiner Bauart an diejenige der Gleichrichter anlehnt. Er besitzt, im Gegensatz zum Umformer, keine rotierenden Anlageteile. Vor dem zweiten Weltkrieg spielte der Umrichter in Deutschland eine gewisse Rolle. Die Erfahrungen haben jedoch gezeigt, dass er sich für den Bahnbetrieb aus verschiedenen Gründen wenig eignet, weshalb er in den Nachkriegsjahren wieder verschwunden ist. Eine viel elegantere und keine besonderen Anlagekosten erfordernde Lösung konnte in den Gemeinschaftskraftwerken der SBB verwirklicht werden. Da diese verschiedene Maschinengruppen für die Erzeugung von Einphasenenergie, $16\frac{2}{3}$ Hz, und von Drehstromenergie, 50 Hz, besitzen, kann der Abtausch durch eine einfache Änderung des Wasserzuflusses zu den in Betracht kommenden Turbinen erfolgen.

Tabelle III enthält die wichtigsten Daten der eigenen Werke und der Gemeinschaftswerke der SBB.

Im weiteren haben die SBB mit verschiedenen grösseren Elektrizitätswerken der Allgemeinversorgung Energielieferungsverträge abgeschlossen. Die Erzeugung der Einphasenenergie erfolgt hier zum Teil in Primärmaschinen (Wasserturbinen und zugehörige Generatoren) und zum Teil in Umformeranlagen. Die Energiebezugsrechte sind, auf Grund der abgeschlossenen Verträge, ihrer Grösse nach genau festgelegt. Im Gegensatz dazu sind die Produktionen der eigenen Kraftwerke und der Gemeinschaftsanlagen von der Wasserführung der Flüsse oder von den Zuflüssen zu den Stauseen abhängig. Dies bedingt in Zeiten mit schlechter Wasserführung den Ankauf weiterer Energiemengen bei den Kraftwerken der Allgemeinversorgung ausserhalb der bestehenden Energielieferungsverträge.

Seit dem 1. November 1957 kann auch von der Deutschen Bundesbahn, über die beiden 66-kV-Lei-

Kraftwerk	Betriebseröffnung	Anzahl Maschinengruppen	Leistung pro Generator MVA
Massaboden	3. Mai 1930 ¹⁾	2	4,25
Ritom	13. September 1920	4	9,0
Göschenen (Nebenkraftwerk)	19. Februar 1922	1	1,4
Amsteg	25. Januar 1923	6	$5 \times 10,0$ $1 \times 12,0$
Barberine	14. Dezember 1923	4	10,0
Vernayaz	25. Februar 1927	4	$2 \times 11,0$ $2 \times 12,5$
Trient (Nebenkraftwerk)	17. Januar 1929	1	2,8
Etzel ²⁾	12. Oktober 1937	3	18,0
Rapperswil-Auenstein ²⁾	28. November 1945	1	25,0
Göschenen ²⁾	im Bau	3	$1 \times 20,0$ $2 \times 50,0$

¹⁾ Beginn der Lieferung von Einphasenenergie, $16\frac{2}{3}$ Hz.

²⁾ Gemeinschaftskraftwerk.

tungen Muttentz-Haltungen, Einphasenenergie von $16\frac{2}{3}$ Hz importiert werden. Diese stammt aus Dampfkraftwerken und aus grossen Umformeranlagen. In ihrer Erzeugung ist sie somit im Gegensatz zur Schweiz von den Witterungsverhältnissen unabhängig. Der Bezug von thermischer Energie spielt im Winter eine Rolle, er stellt eine sehr wertvolle Ergänzung der rein hydraulischen Produktion der SBB dar.

Innerhalb der Schweiz existiert, wie bereits erwähnt, ein eigenes Hochspannungsnetz der SBB, über das die für Traktionszwecke erforderliche Einphasenenergie von $16\frac{2}{3}$ Hz von den Kraftwerken nach den Unterwerken transportiert wird. Die Übertragungsspannungen betragen 132, 66 und 33 kV. Heute sind die beiden Kraftwerkgruppen im Gotthard und im Wallis durch zwei Leitungen von 132 kV verbunden. Mit der Inbetriebnahme des Kraftwerkes Göschenen wird das 132-kV-Netz eine Erweiterung erfahren.

Die gesamten Längen aller Übertragungsleitungen mit Betriebsspannungen von 33, 66 und 132 kV betragen heute rund 1300 km. Hiebei handelt es sich zum grössten Teil um Freileitungen (ca. 95 %). Der Anteil der Kabelleitungen ist mit ca. 5 % gering.

Die Unterwerke geben die ihnen zugeführte Energie an die Fahrleitungen ab. Sämtliche Unterwerke der Gotthardlinie zwischen Steinen und Melide wurden als Gebäudestationen erstellt. Aus wirtschaftlichen Gründen gingen die SBB später zur Freiluftbauweise über. Mit Ausnahme des Unterwerkes Vieux-Bureau zwischen Genf und La Plaine handelt es sich durchwegs um Anlagen, die hochgespannte Einphasenenergie von $16\frac{2}{3}$ Hz aufnehmen und bei herabgesetzter Spannung von 15 kV an die Fahrleitung weiterleiten. In verschiedenen Unterwerken sind auch Transformatoren zur Energieübertragung zwischen 66 und 132 kV aufgestellt. Einzig das Unterwerk Vieux-Bureau bei Genf dient

der Versorgung der mit 1,5 kV Gleichstrom betriebenen Strecke Genf–La Plaine, deren Fortsetzung in Frankreich ebenfalls mit dieser Energie betrieben wird. Die erforderliche Energie wird als Drehstrom von 50 Hz geliefert, durch Gleichrichter umgeformt und dann den Fahrleitungen zugeführt.

Neben den ortsfesten Anlagen für die elektrische Zugförderung haben die SBB seit der Aufnahme des Einphasenbetriebes auch den Triebfahrzeugpark ständig weiter entwickelt. Während Ende 1920 nach der Aufnahme des elektrischen Betriebes auf einzelnen Teilstrecken der Gotthardlinie nur wenig Einphasenlokomotiven von $16\frac{2}{3}$ Hz, dafür aber eine beträchtliche Zahl von Dampflokomotiven vorhanden waren, hat sich das Bild seither gewaltig geändert. In Tabelle IV ist die Zahl der verfügbaren Triebfahrzeuge Ende 1920 sowie Ende 1959 angegeben. Bei den elektrischen Lokomotiven und Motorwagen wird dabei nach Stromarten, Energieerzeugung bzw. Energiezufuhr sowie Stromsystem unterschieden.

Bestand an Triebfahrzeugen zu Beginn und am Ende der Elektrifizierung der SBB

Tabelle IV

Art der Triebfahrzeuge	Bestand	
	Ende 1920	Ende 1959
Dampflokomotiven	1082	148
Diesellokomotiven	—	12
Elektrische Lokomotiven		
1 ~, $16\frac{2}{3}$ Hz, 15 kV	28	664
3 ~, 16 Hz, 3,0 kV	7	—
—, 1,5 kV	—	—
Zweifrequenz-Lokomotiven	—	6
Total	35	670
Akkumulatoren-Triebfahrzeuge für den Stationsdienst	11 ¹⁾	— ²⁾
Dieseltriebwagen	—	4
Elektrische Triebwagen		
1 ~, $16\frac{2}{3}$ Hz, 15 kV	—	95
—, 1,5 kV	—	2
Total	—	97
Elektrische Traktoren für den Stationsdienst		
1 ~, $16\frac{2}{3}$ Hz, 15 kV	—	113
1 ~, $16\frac{2}{3}$ Hz, 15 kV, + Batterie	—	3
1 ~, $16\frac{2}{3}$ Hz, 15 kV, + Dieselmotor	—	48
Total	—	164
Gesamttotal	1128	1095

¹⁾ Gesamter vorhandener Bestand

²⁾ Keine Verwendung mehr im Stationsdienst

9. Grenzbahnhöfe

Die Schweiz hat mit vier Ländern Europas gemeinsame Grenzen. In diesen Ländern sind teilweise bei der Elektrifizierung andere Wege beschritten worden als bei den SBB, so dass in gewissen Grenzbahnhöfen zwei Stromsysteme zusammentreffen. In den vier an die Schweiz anstossenden Ländern werden folgende Stromsysteme angewendet:

Deutschland	Einphasenwechselstrom von
Österreich	$16\frac{2}{3}$ Hz, 15 kV

Frankreich	Einphasenwechselstrom von
	50 Hz, 25 kV
	Gleichstrom, 1,5 kV
Italien	Gleichstrom, 3,0 kV

Die elektrifizierten Grenzbahnhöfe zwischen der Schweiz einerseits und Deutschland oder Österreich andererseits (Basel, Buchs und St. Margrethen) bieten in dieser Hinsicht die wenigsten Schwierigkeiten. Die beiden Fahrleitungsnetze werden durch spannungslose Schutzstrecken elektrisch voneinander getrennt; sie müssen von den Triebfahrzeugen im Schwung bei offenem Hauptschalter befahren werden. Die beiden Fahrleitungsnetze können synchron oder unsynchron sein, je nachdem die beiden Netzbetriebe auf der Oberspannungsseite über Leitungen und Transformatoren gekuppelt sind. Da die Stromabnehmer der Triebfahrzeuge der SBB schmaler sind als diejenigen der Deutschen oder der Österreichischen Bundesbahnen, so muss bei dem Bau der Fahrleitungen darauf geachtet werden, dass die Abweichungen des Fahrdrahtes von der Geleisemitte ein bestimmtes Mass nicht überschreiten. Diese Forderung muss auf gemeinschaftlich befahrenen Strecken sowie in Gemeinschaftsbahnhöfen eingehalten werden, um Entgleisungen der schmaleren Stromabnehmer der SBB und damit Beschädigungen der Fahrleitung mit Sicherheit zu vermeiden. Im weiteren ist es wichtig, dass überall dort, wo deutsche oder österreichische Lokomotiven mit ihren breiten Stromabnehmern zirkulieren, der erforderliche lichte Raum (Profil) zur Verfügung steht.

Mit Frankreich besitzen die SBB Grenzbahnhöfe, in denen sowohl das Einphasenwechselstromsystem von 25 kV und 50 Hz (Basel und Vallorbe) als auch das Gleichstromsystem von 1,5 kV (Genf) anzutreffen sind. Für Basel haben die französischen Staatsbahnen Zweifrequenz-Lokomotiven beschafft, die im Reisezugverkehr eingesetzt werden. Weitaus der grösste Teil dieser Züge wird jedoch mit reinen 50-Hz-Lokomotiven geführt. Die entsprechenden Anlagen mit den zugehörigen Perrons liegen auf der Westseite des Basler Personenbahnhofes, sie sind von denjenigen für den Verkehr nach der Innerschweiz vollständig getrennt. Das 50-Hz- und das $16\frac{2}{3}$ -Hz-Gebiet stellen je für sich geschlossene Zonen dar. An den Nahtstellen der beiden Systeme können gewisse Geleise und Geleisegruppen wahlweise von einer Stromart auf die andere umgeschaltet werden. Die 50-Hz-Lokomotiven der ein- und ausfahrenden Züge müssen beim Umstellen ihr Stromgebiet praktisch nicht verlassen, so dass sie hierzu keines fremden Triebfahrzeuges bedürfen.

Der Rangierdienst in Basel wird von den SBB besorgt. Es stehen dafür 6 Zweifrequenz-Lokomotiven mit je 3 Triebachsen zur Verfügung, die wahlweise unter $16\frac{2}{3}$ -Hz- oder unter 50-Hz-Fahrleitungen verkehren können. Der Güterverkehr vom Elsass her wird gegenwärtig noch von französischen Diesellokomotiven besorgt. Diese Züge verkehren bis nach Muttenz, d. h. weit ins $16\frac{2}{3}$ -Hz-Gebiet. Die Französischen Staatsbahnen haben nun vor einiger Zeit ebenfalls eine Anzahl Zweifrequenz-Lokomotiven für die Bewältigung des Güterzugsverkehrs nach Muttenz in Auftrag gegeben, die die heute zirkulierenden Diesellokomotiven ersetzen sollen. Um

dies zu ermöglichen, müssen vorher die für die Ein- und die Ausfahrt der Güterzüge benutzten Geleise mit Fahrleitungen ausgerüstet werden. Zwischen dem $16\frac{2}{3}$ -Hz- und dem 50-Hz-System wird eine Schutzstrecke eingebaut werden.

In Genf zirkulieren bis heute neben Diesel- oder Dampflokomotiven nur elektrische Triebfahrzeuge für Einphasenwechselstrom, $16\frac{2}{3}$ Hz, oder für Gleichstrom, 1,5 kV. Auch hier besteht, wie in Basel, die Möglichkeit zur Umschaltung einzelner Geleise auf die eine oder die andere Stromart. Von den SBB sind nun 4-Strom-Rangierlokomotiven in Auftrag gegeben worden, die bei allen vier am Anfang dieses Abschnittes erwähnten und in Grenzbahnhöfen der Schweiz vorkommenden Stromsystemen eingesetzt werden können. Ebenso wurden auch für den TEE-Verkehr Einheiten bestellt, die im Ausland mit jedem der bereits erwähnten 4 Stromsysteme betrieben werden können.

Für die Strecke Genf-La Plaine besitzen die SBB zwei Gleichstrom-Triebwagen für eine Fahrleitungs-

spannung von 1,5 kV, die dem Lokalverkehr dienen. Der Verkehr von und nach Frankreich wird von Lokomotiven der Französischen Staatsbahnen besorgt.

Gegenüber Italien sind die drei Bahnhöfe Chiasso, Domodossola und Luino zu erwähnen, in denen sich das Einphasensystem, $16\frac{2}{3}$ Hz, und das Gleichstromsystem, 3,0 kV, gegenüberstehen. Bis heute wurden hier nur Fahrzeuge eingesetzt, die entweder gänzlich unabhängig von der Fahrleitung sind (Dampf- und Diesellokomotiven) oder als elektrische Triebfahrzeuge nur für ein Stromsystem gebaut sind. Auch hier wird mit umschaltbaren Geleisen gearbeitet; oder die Einfahrt der Züge erfolgt im Schwung mit gesenkten Stromabnehmern⁵⁾. In Chiasso, wo der Rangierdienst von den SBB besorgt wird, ist für später ebenfalls der Einsatz von 4-Strom-Rangierlokomotiven vorgesehen.

Adresse des Autors:

A. Degen, Sektionschef der Abteilung Kraftwerke der Generaldirektion der SBB, Bern.

⁵⁾ Bull. SEV Bd. 46(1955), Nr. 14, S. 648...650.

Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

Le réglage de torsion pour les grands réseaux

621.311.1 : 621.316.726 + .728

[D'après H. Graner: Die Verwindungs- oder Torsionsregelung für grosse Netze und Netzverbände. ETZ-A t. 79(1959), n° 2, p. 52...57]

Le réglage de torsion (Torsionsregelung) est un procédé, qui, par son principe de fonctionnement se situe entre le mode de réglage fréquence-puissance (Fréquence-Leistungsregelung) et le mode de réglage horaire (Dehnungsregelung) employés tous deux pour le réglage des réseaux. Le principe d'un tel réglage de torsion peut être exposé brièvement en considérant son application la plus simple sur un réseau isolé comprenant par exemple une ligne principale à 220 kV sur laquelle sont raccordés des usines génératrices et des réseaux consommateurs.

Un ou plusieurs groupes producteurs $A_1, A_2...A_n$ de ce réseau, situés par exemple à l'une des extrémités de la ligne 220 kV sont chargés par un équipement approprié du réglage de la fréquence du réseau isolé. Par ailleurs, un ou plusieurs groupes producteurs $B_1, B_2...B_n$ situés en un autre point de la dite ligne 220 kV ont leur puissance de production P_g asservie par un régulateur de torsion, à la différence de phase $\tau_A - \tau_B$ existant entre les vecteurs tension U_A et U_B , mesurés d'une part aux barres 220 kV des groupes producteurs A et d'autre part aux barres 220 kV des groupes producteurs B . Le régulateur de torsion, équipé d'un système de mesure sensible à l'écart de phase $\tau_A - \tau_B$ précisé plus haut commande par action secondaire le vannage des groupes B de manière à maintenir constant, à une valeur déterminée par les conditions d'exploitation, le décalage des vecteurs tension existant entre les points considérés A et B de la ligne 220 kV.

Si par suite d'une augmentation de puissance ΔP_t , transmise par la ligne 220 kV du point A (réglage de la fréquence) au point B (réglage de torsion) le décalage des vecteurs tension $\tau_A - \tau_B$ augmente de $\Delta\tau$, le régulateur de torsion provoque immédiatement par un équipement approprié l'ouverture du vannage des groupes B de manière à augmenter la puissance débitée par ces groupes et à réduire ainsi à zéro l'écart momentané de phase $\Delta\tau$. Il s'agit bien ici d'un réglage sensible à la torsion des vecteurs tension, d'où le nom de réglage de torsion. Il est indiqué de soumettre un tel réglage à l'influence également de l'écart de fréquence et de sa dérivée en vue d'obtenir, par un tel équipement PDI, et à l'exemple du réglage fréquence-puissance une loi mixte de réglage liant linéairement le décalage de phase $\tau_A - \tau_B$ à l'écart de fréquence.

Il est facile de se rendre compte du processus d'un tel réglage en examinant la courbe de la puissance transmise par une ligne établie en fonction des écarts de phase existant entre les vecteurs tension à l'entrée et à la sortie de la dite ligne. Jusqu'à une certaine puissance, on peut admettre que le déphasage croît proportionnellement avec la puissance transmise. On est en mesure de définir ainsi pour une ligne donnée une grandeur caractéristique du réglage de torsion $N = \lambda (\tau_A - \tau_B)$ appelée potentiel de puissance active (Wirkleistungspotential) liant la puissance transmise entre les points A et B de la ligne au décalage des vecteurs tension mesurés entre ces deux points et aux caractéristiques λ de la ligne considérée. Il est aisé de connaître par là le processus d'un tel réglage de torsion dans différents cas d'application, suivant l'emplacement des points de mesure A et B et suivant la nature du réseau.

Les différences essentielles existant entre le réglage fréquence-puissance, le réglage de torsion et le réglage horaire ressortent de l'examen des 3 relations suivantes, définissant dans l'ordre les 3 modes de réglage mentionnés ci-dessus:

$$\begin{aligned} C_1 f' + C_2 (f - f_s) + C_3 (N - N_s) &= -L' \\ C_4 f' + C_5 (f - f_s) + C_6 (\tau - \tau_s) &= -L' \\ C_7 f' + C_8 (f - f_s) + C_9 (\delta - \delta_s) &= -L' \end{aligned}$$

Le terme f' est la dérivée de la fréquence nécessaire à la stabilisation du réglage, alors que $(f - f_s)$ représente l'écart de fréquence, par rapport à sa valeur de consigne. Les 3 derniers termes de ces relations sont différents. C'est précisément là que réside la distinction essentielle entre les 3 modes de réglage. Le terme $(N - N_s)$ est l'écart de la puissance d'échange entre réseau mesuré par le réglage fréquence-puissance, alors que le terme $(\tau - \tau_s)$ représente comme on l'a vu l'écart de phase des vecteurs tension entre deux points A et B . Enfin, $(\delta - \delta_s)$ est l'écart de phase existant entre la tension d'une fréquence étalon et la tension du réseau. Il est important de remarquer ici que ces 3 modes de réglage assurent en régime établi le maintien de la fréquence tout en réglant à une valeur constante respectivement la puissance d'échange, la torsion des vecteurs tension et enfin avec le dernier mode de réglage ci-dessus l'heure synchrone. Le réglage de torsion, comme tout système de réglage, présente des avantages et des inconvénients. Il convient particulièrement au réglage de réseaux partiels inclus dans un grand réseau. Par un choix judicieux des points de mesure A et B , il offre l'avantage de faire participer aux variations de charge les groupes producteurs réglés situés aux abords des lieux où se produisent des variations de consommation.

R. Comtat