Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 41 (1950)
Heft: 20

Artikel: Elektrische Traktion mit Einphasenstrom von 50 Hz
Autor: Leyvras, L.H.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1058937

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: 22.08.2025

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

41e année | No 20 | Samedi, le 30 Septembre 1950

BULLETIN

DE L'ASSOCIATION SUISSE DES ELECTRICIENS

Elektrische Traktion mit Einphasenstrom von 50 Hz

Von *L. H. Leyvraz*, Zürich-Oerlikon

621.33.025.1

Die Elektrifizierung von Bahnen mit unmittelbarer Speisung aus den Landesversorgungsnetzen von 50 Hz, welche den geringsten Aufwand für die ortsfesten Anlagen ergibt, konnte sich bisher nicht durchsetzen, da für dieses Stromsystem keine geeigneten Triebfahrzeugausrüstungen, insbesondere Triebmotoren, gebaut werden konnten.

Die Maschinenfabrik Oerlikon hat nun Einphasen-Kollektor-Triebmotoren für 50 Hz entwickelt und die vollständigen elektrischen Ausrüstungen für eine CoCo-Lokomotive und für einen Motorwagen, beide für die Société Nationale des Chemins de Fer Français, gebaut, bzw. im Bau.

In der folgenden Abhandlung werden die Entwicklungsarbeiten beschrieben.

L'électrification de chemins de fer avec alimentation directe par les grands réseaux industriels à 50 pér./s qui conduit à un minimum de frais d'investissements pour les installations stationnaires ne pouvait se développer faute d'équipements électriques suffisamment au point pour les locomotives. En effet, il n'avait pas été possible jusqu'alors de construire des moteurs de traction appropriés à ce système de courant.

Les Ateliers de Construction Oerlikon ont maintenant mis au point des moteurs de traction monophasés à collecteur pour 50 pér./s. Ils ont réalisé — et ont encore en fabrication — des équipements électriques complets pour une locomotive CoCo et une automotrice, toutes deux destinées à la Société Nationale des Chemins de Fer Français.

Les exposés ci-après décrivent l'évolution des études.

1. Einleitung und Veranlassung der neuen Entwicklungsarbeiten

Zufolge des Kohlenmangels in Frankreich ist die Société Nationale des Chemins de Fer Français (SNCF) bestrebt, die Elektrifizierung ihres Netzes weiter auszudehnen, da der heutige Dampfbetrieb 20 % der nationalen Kohlenproduktion, und zwar der besten Qualität, verbraucht.

Die Ausdehnung der Elektrifikation bedingt bedeutende neue Bauaufwendungen, die bei den Triebfahrzeugen nur unwesentlich vom Traktions- und Stromsystem abhängig sind. Dagegen weisen die Aufwendungen für die ortsfesten Anlagen (Übertragungsleitungen, Unterwerke, Fahrleitungen) je nach dem verwendeten Stromsystem grosse Unterschiede auf. Diese Anlagekosten sind zum grössten Teil proportional der elektrifizierten Streckenlänge, nur zum kleinen Teil proportional dem Verkehr.

Das vorhandene elektrifizierte Netz der SNCF, umfassend eine Streckenlänge von total 4036 km, wird mit Gleichstrom von 1500 V betrieben. Es ist gekennzeichnet durch besonders hohe Kosten der ortsfesten Anlagen, umfassend Übertragungsleitungen, Umformer-, bzw. Gleichrichterstationen, die relativ nahe beieinander liegen, sowie Fahrleitungen, die zufolge der hohen Stromstärken sehr grosse Kupferquerschnitte aufweisen und folglich kräftige Tragkonstruktionen, Masten und Fundamente bedingen.

Die SNCF suchte deshalb nach billigeren Lösungen, die insbesondere mit einem wesentlich geringeren Materialaufwand auch die Elektrifizierung von Strecken mit mittlerem Verkehr erlauben. Gleichstrom von 3000 V und Einphasenstrom von 15 000 V, 16²/₃ Hz, beides Systeme, die ausserhalb Frankreichs eine weite Verbreitung gefunden haben, schieden aus, da das erste wegen der immer noch bedeutenden Leitungsquerschnitte und der teureren Triebfahrzeugausrüstungen keine genügenden Ersparnisse gegenüber Gleichstrom von 1500 V erlaubt und das zweite ein eigenes Energie-Erzeugungs- und -Verteilnetz bedingt, dessen Schaffung man mit Rücksicht auf das bereits sehr gut ausgebaute Industrienetz der Landesversorgung — für das immerhin stellenweise nicht sehr dichte Eisenbahnnetz — als nicht wirtschaftlich genug beurteilte.

Es wurde daher die Elektrifizierung mit Einphasenstrom von 50 Hz und 20...25 kV Fahrdrahtspannung geprüft, womit sowohl direkte Speisung der Fahrleitungen aus dem Landesversorgungsnetz, als auch die Anwendung einer hohen Spannung möglich ist.

Elektrische Traktion mit Einphasenstrom dieser Frequenz ist in Betrieb auf den Strecken *Budapest–Hegyeshalom* (Ungarn) und der *Höllentalbahn* (Deutschland). Die für diese Bahnen entwickelten, bereits auf über 15 Jahre zurückführenden Konstruktionen für die Lokomotiven vermochten aber den Anforderungen der SNCF nicht zu genügen. Ferner war das Problem der elektrischen Ausrüstungen für Motorwagen noch vollständig ungelöst.

Es ist das Verdienst von *L. Armand*, Generaldirektor der SNCF, die Initiative ergriffen zu haben, die Möglichkeiten der Traktion mit Einphasenstrom von 50 Hz erneut und mit dem Einsatz aller Mittel prüfen zu lassen, unter der sich als richtig erwiesenen Annahme, dass die neueste Entwicklung der Technik befriedigende Lösungen ergeben müsse. Demzufolge hat die Maschinenfabrik Oerlikon als erste Firma im Jahre 1945 die diesbezüglichen Arbeiten aufgenommen und im Sommer 1946 einen Einphasen-Kollektor-Triebmotor für 50 Hz mit sehr guten Kommutierungsverhältnissen vorgeführt.

Auf Grund weiterer eingehender Studien und Versuche wurden dann im Herbst 1947 der SNCF endgültige Vorschläge unterbreitet, die erkennen liessen, dass sich mit diesem Traktionssystem die für

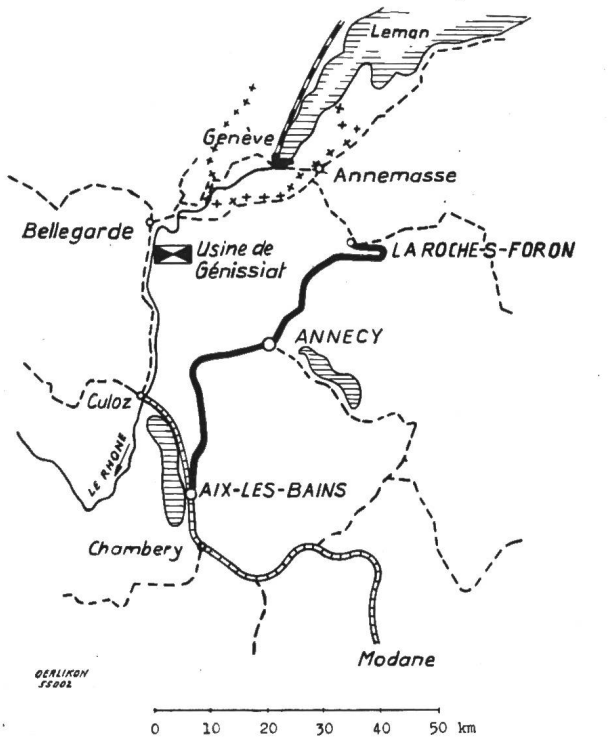


Fig. 1

Lageplan der SNCF-Probestrecke Aix-les-Bains—Annecy—La Roche-sur-Foron

für Traktion mit Einphasenstrom 50 Hz. In Aix-les-Bains schliesst sie an die mit Gleichstrom 1500 V elektrifizierte Mont-Cenis-Linie Culoz-Modane an

SNCF: Einphasenstrom 50 Hz, 20 kV
SNCF: Gleichstrom 1500 V
SNCF: Dampfbetrieb
SBB: Einphasenstrom 16⅔ Hz, 15 kV

einen Vollbahnbetrieb erforderlichen Bedingungen heute auf mehr als zufriedenstellende Art erfüllen lassen und dabei *Ersparnisse an Kosten der ortsfesten Anlagen in der Grössenordnung von rund 50 %* gegenüber Gleichstrom ermöglichen. Die SNCF entschloss sich daher zur Durchführung eines gross angelegten Probebetriebes auf der dafür neu zu elektrifizierenden Strecke *Aix-les-Bains–Annecy–La Roche-sur-Foron* (Savoyen) von 78 km Streckenlänge mit längeren Steigungen bis 20 ‰ (Fig. 1).

Dieser Entschluss hat um so grössere Bedeutung, wenn man berücksichtigt, dass der Einphasenstrom von 50 Hz als Traktionssystem, neben überzeugten Befürwortern, einer heftigen Opposition, selbst von angesehenen Firmen, begegnete, die ihn als für Vollbahnen untauglich bezeichneten.

Für die Beschaffung der nötigen Triebfahrzeuge erteilte die SNCF im Frühjahr 1948 — nebst späteren Aufträgen an französische Firmen — der Maschinenfabrik Oerlikon den Auftrag für die elektrische Ausrüstung einer *CoCo-Probelokomotive von 3160 kW Stundenleistung*, für Personen- und Güterzugsbetrieb, deren mechanischer Teil von der *Schweizerischen Lokomotiv- und Maschinenfabrik*, Winterthur, konstruiert und gebaut ist (Fig. 2). Im Herbst 1949 erweiterte die SNCF ihren Auftrag an die Maschinenfabrik Oerlikon um die elektrische Ausrüstung eines *Motorwagens von 1150 kW für Vorortsbetrieb.*

Beide Fahrzeuge sind für Einphasenstrom von 50 Hz bei einer mittleren Fahrdrahtspannung von 20 000 V, bei der Lokomotive später, bei Bedarf, auch erhöhbar auf 25 000 V, gebaut.

2. Die ortsfesten Anlagen

Mit der Elektrifizierung der Bahnen mit Einphasenstrom von 50 Hz wird im Grunde genommen die unmittelbare Verwendung der Energie der vorhandenen Landesversorgungsnetze angestrebt. Dieses Problem ist so alt wie die elektrische Traktion auf den Hauptbahnen selbst.

Die erste derartige Verwirklichung erfolgte im Jahre 1904 durch die Maschinenfabrik Oerlikon. Auf Initiative ihres damaligen Direktors, Emil Huber-Stockar, wurde die Strecke Seebach–Wettingen elektrifiziert und auf einer ersten Teilstrecke der Betrieb mit der B+B-Probe-Lokomotive Nr. 1, gespiesen durch Einphasenstrom 50 Hz bei 15 kV Fahrdrahtspannung [1]), aufgenommen. In Ermangelung brauchbarer Einphasen-Motoren wurde der Einphasenstrom auf der Lokomotive in Gleichstrom zur Speisung der Triebmotoren umgeformt. Trotz der Bewährung dieser Lokomotive wurde dieses Stromsystem jedoch nicht weiter verfolgt und zu Gunsten des in den Jahren 1905—1913 aufgekommenen Einphasenstrom-Systems mit 15...16⅔ Hz und Einphasen-Kollektormotoren verlassen, wobei allerdings ein besonderes Energie-Erzeugungs- und Verteilnetz mit niedriger Frequenz in Kauf genommen werden musste.

Die Vorteile der unmittelbaren Entnahme von Einphasenstrom 50 Hz aus dem Drehstromnetz der allgemeinen Landesversorgung, gepaart mit der Möglichkeit, für die Fahrleitung eine hohe Spannung von 15...25 kV anzuwenden, ergeben gegenüber den klassischen Stromsystemen für die ortsfesten Anlagen bedeutende Einsparungen für die Bauaufwendungen. Da die hervorstechendsten Vorteile des neuen Stromsystems in den ortsfesten Anlagen: Energieverteilung, Übertragungs- und Fahrleitungen, liegen, scheint es angezeigt, diese kurz zu streifen.

Bei den heutigen, in den meisten Ländern stark ausgebauten und sehr leistungsfähigen Industrie-Landesversorgungsnetzen mit weitgehender Verkupplung der Grosskraftwerke kann die Traktionsenergie bei Einphasenstrom von 50 Hz unbedenklich aus dem Netz der allgemeinen Versorgung bezogen werden. Selbst in der hochelektrifizierten Schweiz, wo 97 % der auf den Voll- und Nebenbahnen (Strassenbahnen nicht inbegriffen) geleisteten Bruttotonnen-Kilometer elektrisch gefördert werden, beträgt nämlich der Energieverbrauch der Bahnen keine 10 % des gesamtschweizerischen Energieverbrauches. Moderne Netze vertragen ohne merk-

[1]) s. *A. Dudler:* Seebach-Wettingen, die Wiege der Elektrifizierung der SBB. Bull. SEV Bd. 33 (1942), Nr. 6, S. 159...167.

liche Nachteile Einphasenbelastungen bis zu ca. 30 % ihrer Gesamtleistung. Einfache Transformatorstationen in Verbindung mit entsprechenden Schaltungen zur Verteilung der Einphasenleistung auf die drei Phasen des Drehstromnetzes erlauben daher die Speisung der Bahnen ohne unzulässige Unsymmetrien.

In allen Fällen wird man danach trachten, die einphasige Belastung des Drehstromnetzes so niedrig als möglich zu halten, was durch diverse Massnahmen, wie Aufteilung von langen Strecken in mehrere Abschnitte und Speisung durch verschiedene Phasen möglich ist. Selbst mehrere an geographisch auseinanderliegenden Speisepunkten auftretende Einphasenlasten können über die Drehstromleitung zu einer symmetrischen Drehstromlast zusammengefasst werden, wobei die auftretenden zusätzlichen kleinen Unsymmetrien bei den für Bahnen in Frage kommenden Speisepunkt-Abständen und Leistungen praktisch vernachlässigt werden können.

Die langjährigen Erfahrungen auf der Höllentalbahn und den Ungarischen Staatsbahnen haben erwiesen, dass die einphasige Belastung eines genügend starken Drehstromnetzes kein Problem und ohne irgendwelche schädliche Rückwirkungen möglich ist. Im gleichen Sinne haben neuere Untersuchungen und Versuche, welche die SNCF veranlasst hat und zum Teil in Frankreich, zum Teil in Deutschland durchgeführt wurden, erwiesen, dass die für die Speisung von Vollbahnen in Frage kommenden grossen Industrienetze der allgemeinen Landesversorgung die voraussichtlich auftretenden Einphasenbelastungen ohne Nachteile ertragen.

Fig. 2
Die CoCo-Lokomotive von 3160 kW für Einphasenstrom 50 Hz, der Société Nationale des Chemins de Fer Français

Um sich über den Aufwand für die ortsfesten Anlagen bei verschiedenen Stromsystemen ein Bild machen zu können, werden für die bei Vollbahnen in Frage kommenden Stromsysteme:

1. Gleichstrom 1500 V
2. Gleichstrom 3000 V
3. Einphasenstrom 16 ⅔ Hz, 15 000 V
4. Einphasenstrom 50 Hz, 20 000 oder 25 000 V

für eine doppelspurige Vollbahnstrecke von einigen hundert Kilometern die Zahl der Unterstationen, die Querschnitte der Übertragungsleitungen, die speziell für die Elektrifizierung erstellt werden müssen, wie auch die Querschnitte der Fahrleitungen in Fig. 3 einander schematisch gegenübergestellt.

Bei allen Stromsystemen wird angenommen, dass bereits eine Drehstrom-Übertragungsleitung von 100...220 kV nicht allzuweit entfernt und mehr oder weniger parallel der Bahnlinie verläuft.

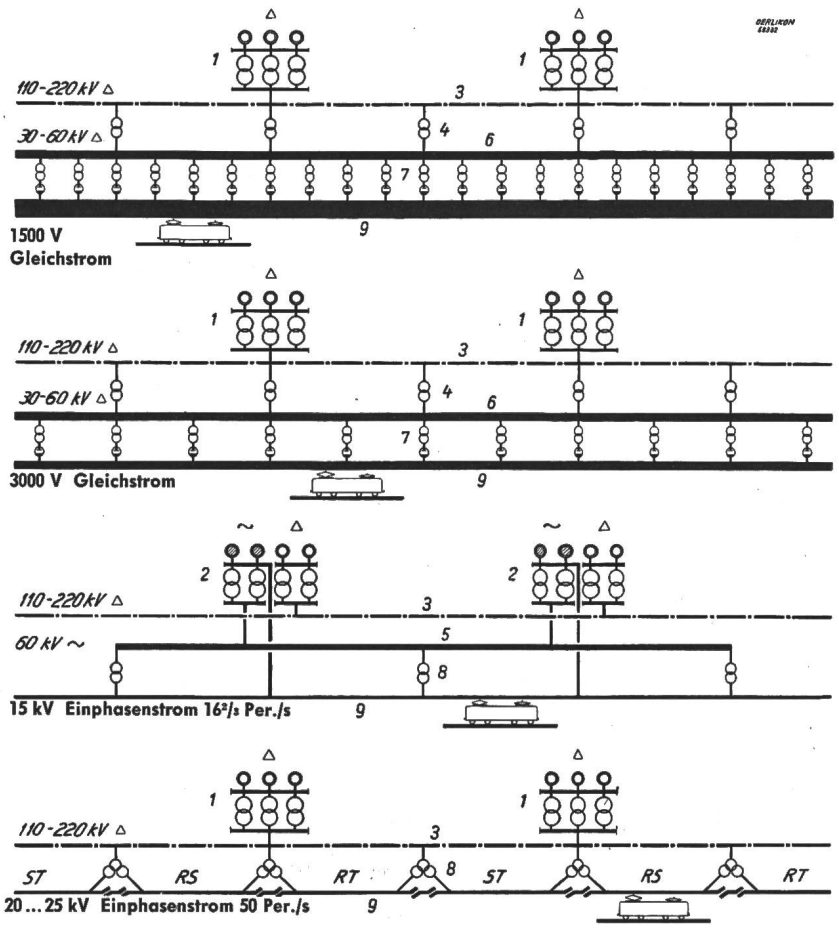


Fig. 3
Vergleich der Verteilung der Speisepunkte und der Leitungsquerschnitte für verschiedene Stromsysteme

1 Drehstrom-Kraftwerk der allgemeinen Landesversorgung
2 Kombiniertes Kraftwerk, enthaltend Drehstromgeneratoren für die allgemeine Versorgung und Einphasengeneratoren 16⅔ Hz für Bahnbetrieb
3 Drehstrom-Hochspannungsleitung des Landesversorgungsnetzes
4 Drehstromtransformatoren für das Zwischenspannungsnetz
5 Einphasen-Übertragungsleitung
6 Drehstrom-Zwischenspannungs-Übertragungsleitung
7 Gleichrichterstationen
8 Einphasentransformatoren für die Speisung der Fahrleitungen
9 Fahrleitungen

Die Strichdicke der Leitungen 5, 6 und 9 entspricht deren Querschnitt.

Bei der Elektrifikation mit *Gleichstrom* wird normalerweise längs der Bahn eine Zwischen-Übertragungsleitung von 30...60 kV, 2 × 3 Leiter, erstellt.

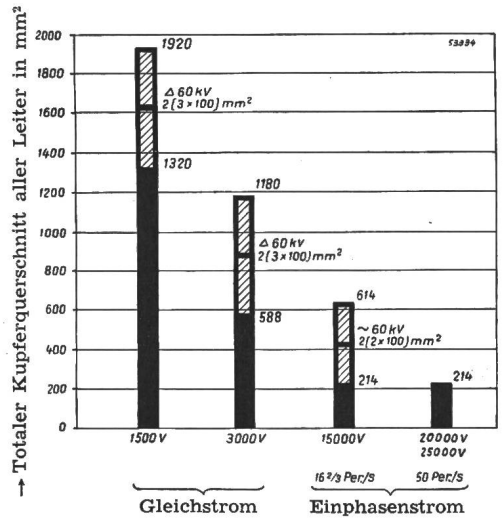


Fig. 4
Vergleich der Totalquerschnitte der Übertragungs- und Fahrleitungen einer Doppelspur-Vollbahnstrecke für verschiedene Stromsysteme

Bei *Einphasenstrom 16²/₃ Hz* ist vorausgesetzt, dass die Kraftwerke sowohl mit Maschinen für Drehstrom 50 Hz, als auch mit solchen für Einphasenstrom 16²/₃ Hz ausgerüstet werden. Das Drehstromsystem inklusive Übertragungsleitung wird für den Bahnbetrieb überhaupt nicht beansprucht. Dagegen muss eine Einphasen-Übertragungsleitung zweckmässigerweise für 60 kV, 2 × 2 Leiter, gebaut werden.

Bei der Wahl von *Einphasenstrom 50 Hz* erübrigt sich der Bau einer speziellen Übertragungsleitung.

Der Gesamtaufwand an *Leitungskupfer* ist in Fig. 4 für jedes Stromsystem dargestellt. Selbstverständlich variieren diese Vergleiche von Fall zu Fall und können sich insbesondere bei gleichzeitig stark vermaschten Landesversorgungs- und Bahnnetzen zugunsten des Gleichstroms verschieben.

Der Aufwand für die *Tragkonstruktionen*, umfassend Fundamente, Masten, Querträger und Ausleger, Montage- und Regulierungsarbeiten, steht in einem direkten Verhältnis zu den Leitungsquerschnitten, und zwar sowohl für die Übertragungs- als auch für die Fahrleitungen.

Bei *Einphasenstrom* kommen zu den Ersparnissen bei den Leitungsanlagen noch diejenigen der wesentlich *einfacheren Unterwerke*, die nur noch in geringer Zahl zu erstellen sind. *Die Einsparungen zugunsten der Traktion mit Einphasenstrom 50 Hz sind bei den ortsfesten Anlagen um so bedeutender, je länger die Strecke ist.* In technischer Beziehung sind bei diesem Stromsystem auch bei der Wahl einer Fahrdrahtspannung von 25 kV keine Schwierigkeiten zu überwinden, da für alle

konstruktiven Details über langjährig bewährte Elemente verfügt wird. Insbesondere sind Fahrleitungsisolatoren des Typs «Motor» über- und durchschlagssicher, radiostörfrei und widerstehen erstaunlich gut selbst schweren Steinschlägen.

Ein weiterer Vorteil ist der Wegfall der Korrosionsgefahr von im Boden verlegten Leitungen und Kabel aller Art durch vagabundierende Ströme.

Die augenfälligen Vorteile des hochgespannten Einphasenstromes 50 Hz in Bezug auf die *ortsfesten Anlagen*, die bereits vor 50 Jahren von *E. Huber-Stockar* bemerkenswert klar erkannt wurden[1]), und dem auch die erste Realisierung zu verdanken ist, hat trotz der inzwischen erzielten grossen Fortschritte der übrigen Stromsysteme weiterhin die Fachleute beschäftigt und veranlasst, hiefür geeignete Triebfahrzeugausrüstungen zu entwickeln.

Die auf Grund dieser Überlegungen in den Dreissigerjahren erstellten zwei Anlagen in Ungarn und Deutschland haben sich in Bezug auf die ortsfesten Anlagen in jeder Beziehung bewährt und zu keinen Schwierigkeiten Anlass gegeben. Auch die sich durch die Einphasenbelastung auf das Drehstromnetz ergebenden Unsymmetrien halten sich durchaus in annehmbaren Grenzen.

Die bisher gebauten Lokomotiven besitzen mit einer einzigen Ausnahme keine direkten Einphasen-Triebmotoren für 50 Hz, sondern Gleichstrom- oder Drehstrom-Motoren, die vom entsprechenden Umformer oder Gleichrichter gespiesen werden. Sie genügen in technischer und wirtschaftlicher Beziehung den heutigen hohen Anforderungen des Vollbahnbetriebes, die von Triebfahrzeugen für Gleichstrom oder Einphasenstrom 16²/₃ Hz anstandslos erfüllt werden, nicht.

3. Die Entwicklung eines 50-Hz-Einphasen-Bahnmotors

A. Die wegleitenden Überlegungen

In Ermangelung geeigneter Triebmotoren für direkte Verwendung von Einphasenstrom von 50 Hz bedienen sich die realisierten Lokomotiven, mit Ausnahme der Siemens-Lokomotive der Deutschen Reichsbahn (DR), der Umformung.

Wenn auch Umformerlokomotiven — im weitesten Sinne gemeint — für Spezialfälle unter Umständen eine gewisse Berechtigung haben mögen, so schien es doch klar, dass jede Umformung eine unerwünschte Komplikation und Verschlechterung des Wirkungsgrades der Lokomotive bedeutet, und dass daher die endgültige Lösung in der *Schaffung von 50-Hz-Einphasenmotoren* zu suchen war, die den heutigen schwersten Anforderungen zu genügen vermögen. Dafür müssen in der Hauptsache folgende Eigenschaften angestrebt werden:

Seriecharakteristik;
Einzelmotor für Leistungen bis mindestens 700...750 kW einstündig;
hoher Wirkungsgrad und Leistungsfaktor;
geringer Raumbedarf, um die Motoren in Drehgestelle einbauen zu können;
geringes Gewicht, mit dem Gewicht der besten im Ausland gebauten Gleichstrommotoren für 1500...3000 V vergleichbar;
einfacher Aufbau aus bewährten Elementen;
beste Kommutationsverhältnisse.

Dabei ist wesentlich, dass die Beanspruchungen aller Art in den Grenzen gehalten werden, die bei den besten Einphasenmotoren für 16²/₃ Hz angewendet und daher mit Sicherheit beherrscht werden können. Man war sich der mannigfaltigen Schwierigkeiten durchaus bewusst, die bei dieser Zielsetzung zu überwinden sind.

Betrachtet man die Stromsysteme, die am Anfang dieses Jahrhunderts für die Elektrifikation von Bahnen in Bezug auf die Triebmotoren in Konkurrenz standen, so stellt man fest:

Gleichstrom ist besonders geeignet für Strassenbahnen, kurze Strecken und sehr dichten Verkehr.

Drehstrom wurde für gewisse Spezialfälle als vorteilhaft betrachtet, z. B. für Bergbahnen, wo eine weiche Charakteristik des Triebmotors und die Anfahrten nur sekundäre Bedeutung haben.

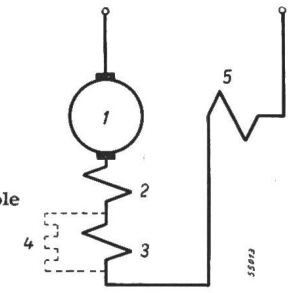
Einphasenstrom 16 ⅔ Hz erlaubt, praktisch alle Traktionsprobleme zu lösen, ausgenommen für Strassenbahnen, wofür er zu wenig wirtschaftlich wäre.

Einphasenstrom 50 Hz ist ideal in Bezug auf die Speisung der Fahrleitungen, jedoch war für die Triebmotoren noch keine befriedigende Lösung gefunden.

Sieger aus diesem interessanten Konkurrenzkampf war nicht etwa eines der vier Stromsysteme, sondern *der Serie-Kollektormotor mit direkter Speisung durch die Fahrleitung oder Speisung durch einen Transformator* (Fig. 5). In der Tat hat keines der Systeme, das Asynchron-Triebmotoren oder Umformergruppen aller Art, bzw. Gleichrichter verwendet, voll befriedigt. Von den zwei Systemen, welche Serie-Kollektormotoren benützen, ist der Gleichstrom zu einem hohen Grade der Vervollkommnung gelangt. Der *Gleichstrom-Seriemotor*

Fig. 5
Schema des Seriemotors

1 Rotor
2 Kompensationswicklung
3 Wendepolwicklung
4 Ohmscher Shunt der Wendepole
5 Erregerwicklung



weist gute, leicht zu beherrschende Kommutationsverhältnisse auf, und die Laufleistungen zwischen zwei Abdrehungen des Kollektors können bis 1 Million Lokomotiv-Kilometer und mehr erreichen, wenn nicht Überschläge und Rundfeuer eine vorzeitige Behandlung notwendig machen.

Die Entwicklung des *Einphasenmotors 16²/₃ Hz* zu analoger Vollkommenheit hat eine bedeutend längere Zeit beansprucht. Die Anfangsschwierigkeiten lagen, abgesehen von den Problemen der Erwärmung, hauptsächlich in der Kommutation. Diese muss nicht nur für den Maximalstrom, sondern auch für die Amplitude des Maximalstroms einwandfrei sein, was eine viel strengere Bedingung bedeutet als bei einem Gleichstrommotor. Ferner

[1]) siehe Fussnote auf S. 734.

verschlechtert die transformatorische EMK die Kommutation bei der Anfahrt ganz wesentlich, und zwar aus folgenden Gründen:

In einem Einphasenmotor ist der Hauptpolfluss nicht konstant wie in einem Gleichstrommotor, sondern variiert mit der Netzfrequenz. Diese Variationen induzieren in den Ankerwindungen elektromotorische Kräfte, die durch die Kohlenbürsten am Kollektor kurzgeschlossen werden. Im Stillstand ist es unmöglich, die Wirkung dieser transformatorischen EMK zu neutralisieren, was eine starke Funkenbildung zur Folge hat.

Demgegenüber ist es möglich, im Lauf die transformatorische EMK durch das Mittel des Ohmschen Wendepol-Shunts nach *Behn-Eschenburg* zu kompensieren.

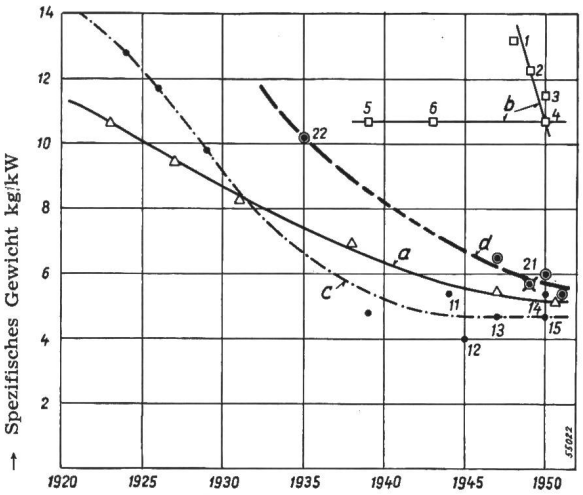


Fig. 6

Entwicklung des Verhältnisses Gewicht zu Leistung der Triebmotoren in den Jahren 1920...1950

a Motoren für Gleichstrom 1500 V

b Motoren für Gleichstrom 3000 V

1	CFM,	Lokomotive	BoBo,	1370 kW
2	SNCB,	»	BoBo,	1620 kW
3	SNCB,	»	BoBo,	1980 kW
4	SNCB,	»	BoBo,	2060 kW
5	FS,	»	BoBo,	1590 kW
6	FS,	»	BoBoBo,	2380 kW

c Motoren für Einphasenstrom 16⅔ Hz

11	BLS,	Lokomotive	BoBo,	2940 kW
12	SBB,	»	BoBo,	1770 kW
13	RhB,	»	BoBo,	1180 kW
14	SBB,	»	CoCo,	4420 kW
15	SBB,	»	BoBo,	1840 kW

d Motoren für Einphasenstrom 50 Hz

21	SNCF,	Lokomotive	CoCo,	3160 kW
22	DR,	»	BoBo,	2060 kW

Ganz allgemein ist zu sagen, dass der Einphasen-Kollektormotor nur bei wesentlich funkenfreiem Lauf bei möglichst allen Geschwindigkeiten den Anforderungen in Bezug auf geringen Unterhalt zu genügen vermag.

B. Die Entwicklung des Einphasen-Kollektormotors für 16²/₃ Hz

Nachdem einmal das Problem der Kommutation auf befriedigende Art gelöst war, machte der Einphasenmotor eine sehr bemerkenswerte Entwicklung durch. Fig. 6 zeigt die Entwicklung der spezifischen Gewichte von Triebmotoren (Gewicht pro Leistung) für den Zeitraum 1920...1950. Früher bedeutend schwerer, konnte der Einphasenmotor im Jahre 1930 mit dem gleichen spezifischen Gewicht wie der Gleichstrom-Triebmotor gebaut werden, während heute dieses Gewicht sogar wesentlich geringer ist.

Die Faktoren, die zu dieser *Gewichtsverminderung* beigetragen haben, sind die folgenden:

1. Die Umfangsgeschwindigkeiten des Rotors und des Kollektors wurden um 15...20 % erhöht, was eine Leistungssteigerung im gleichen Verhältnis ergibt.
2. Die Teilung der Kollektorlamellen wurde um etwa 10 % vermindert.
3. Die Induktion im Luftspalt wurde um etwa 10 % erhöht.
4. Die Grenzerwärmung wurde von 75 auf 120 °C und damit auf den gleichen Wert wie für Gleichstrommotoren erhöht. Die daraus resultierende Leistungssteigerung beträgt 15...20 %.
5. Die Ventilation wurde vervollkommnet und zusammen mit der Verminderung der Zusatzverluste konnte die Leistung um 25...30 % erhöht werden.

Alle diese Verbesserungen sind weitgehend voneinander unabhängig und können gleichzeitig angewendet werden, was für einen Rotor von gegebenen Abmessungen die Möglichkeit ergibt, die Leistung zu verdoppeln.

Das Konstruktionsgewicht wurde nach und nach bis auf 60 % vermindert, so dass schlussendlich das spezifische Gewicht des heutigen Einphasenmotors gegenüber 1920 nur noch ein Drittel beträgt. Der Triebmotor der $Ce^{6}/_{8}{}^{II}$-Güterzugslokomotiven der *Schweizerischen Bundesbahnen*, der im Jahre 1919 für eine Stundenleistung von 412 kW gebaut worden ist, wurde im Jahre 1943 im Aktivteil modernisiert und seine Leistung auf 706 kW erhöht. Die Vereinfachung der Statorwicklung und die Verminderung des Materialaufwandes sind bemerkenswert. Der neue aktive Teil beansprucht einen wesentlich geringeren Raum als der ursprüngliche. 1 kg Dynamoblech (roh) gibt die gleiche Leistung wie früher 3 kg, und 1 kg Kupfer sogar das Vierfache. Trotz der um 70 % erhöhten Stundenleistung ist die Kommutation des umgebauten Motors bei allen Verhältnissen — auch bei Rekuperationsbetrieb — vollkommen.

Die Schwierigkeiten der Kommutation, die vor 30 Jahren das Abdrehen der Kollektoren nach etwa 25 000 km erforderte, konnten nach und nach beseitigt werden, und seit 20 Jahren findet man Einphasen-Triebmotoren mit Kollektorlaufleistungen von 400 000...600 000 Lokomotiv-Kilometern und mehr zwischen zwei Kollektorbehandlungen. Es war vorauszusehen, dass mit einer solchen Entwicklung das Problem des Einphasen-Serie-Kollektormotors für 50 Hz früher oder später neu aufgegriffen würde.

C. Auslegung und Konstruktion des Einphasen-Triebmotors für 50 Hz

Für die Ausrüstung der Probelokomotive der SNCF bestand das Problem in der Entwicklung von Triebmotoren grosser Leistung, da ein Elektrifikationssystem, welches die Grosstraktion ausschliesst, nicht lebensfähig ist.

Die Bemessung eines Triebmotors für 50 Hz für die bei Grosstraktion in Frage kommenden Leistun-

gen und Abmessungen stellte u. a. auch die Frage, ob die Lösung in der Anwendung von zwei Kollektoren pro Triebachse zu suchen sei, ähnlich wie in der Anfangszeit der Gleichstrom- oder 16²/₃-Hz-Traktion. Hierbei können zwei Kollektoren pro Triebachse in verschiedenen Ausführungsformen auftreten, nämlich:

zwei getrennte Triebmotoren,
Zwillingsmotor mit zwei getrennten Wellen oder
Doppelankermotor.

Obschon momentan diese Lösungen beim heutigen Stand der Technik eine unbestrittene Erleichterung für den Motorkonstrukteur bedeuten, so ist doch zu bedenken, dass demgegenüber die Bahnverwaltung jahrzehntelang vermehrten Unterhalt in Kauf nehmen muss. Ausserdem treten, je nach Ausführung, weitere Nachteile mehr oder weniger in Erscheinung, wie insbesondere eine Erschwerung in der Auslegung der allgemeinen Disposition der Lokomotive und des mechanischen Teils, grösseres Gewicht und erhöhter Preis. Diese Nachteile führten mit der Zeit dazu, dass Doppelmotoren sowohl für Gleichstrom, als auch für 16²/₃ Hz heute selbst für Grosslokomotiven fast vollständig verlassen werden.

Die Maschinenfabrik Oerlikon entschied sich aus diesen Überlegungen heraus ausschliesslich für den *Bau von Einzelmotoren* bis zu Stundenleistungen von mindestens 736 kW, in der Erwägung, damit Triebfahrzeuge zu schaffen, welche nach mehreren Jahrzehnten noch modern bleiben und den jetzt für andere Stromsysteme verlassenen Umweg über den Doppelmotor vermeiden.

Die Technik der Maschinenfabrik Oerlikon unterscheidet sich hierin grundsätzlich von derjenigen anderer Firmen, die bei 50 Hz, zum Teil selbst bei kleinen Leistungen, zwei Kollektoren pro Triebachse anwenden.

Die *Entwicklungsarbeiten* umfassen in der Hauptsache:

a) Systematische Versuche ab Mitte des Jahres 1946 an einem MFO-Einphasen-Kollektor-Bahnmotor für 50 Hz.

b) Entwicklung neuer Methoden zur Beurteilung der Kommutation, die äusserst empfindlich und zuverlässig Störungen in der Kommutation qualitativ und quantitativ zu untersuchen gestatten.

c) Auswertung der gewonnenen Resultate für die Berechnung und Konstruktion von Einphasen-Kollektormotoren für 50 Hz, die für moderne Triebfahrzeuge in Frage kommen.

Für die CoCo-Lokomotive der SNCF fiel die Wahl auf einen Triebmotor von 465 kW garantierter Stundenleistung bei 60 km/h, welcher die volle Ausnützung des gegebenen Adhäsionsgewichtes von ca. 18 t pro Achse erlaubt. Er ist mit seiner tatsächlichen Leistung von 530 kW gegenwärtig bei weitem der leistungsfähigste Einphasen-Seriemotor für 50 Hz.

Die folgenden allgemeinen Formeln für die Bemessung von Einphasenmotoren zeigen, dass die Grössen, welche einigermassen frei gewählt werden können, sehr beschränkt sind.

Die Leistung ist gegeben durch die Gleichung:

$$P = 2 \cdot 10^{-3}\, \Phi\, p\, A\, v \quad \text{kW} \qquad (1)$$

wo Φ den effektiven Magnetfluss,
p die Polpaarzahl,
A den Strom pro cm Ankerumfang,
v die Ankerumfangsgeschwindigkeit

bedeuten. Φ ist begrenzt durch die von ihm induzierte transformatorische EMK, A durch die Erwärmung und Kommutation und v hauptsächlich durch die mechanische Festigkeit.

Für einen Triebmotor beträgt die Rotations-EMK:

$$E_r = \frac{E_t}{\pi} \frac{f_k}{f} \quad \text{V} \qquad (2)$$

$$\text{wo} \quad f_k = \frac{v_k}{t_k} \quad \text{Lam./s} \qquad (3)$$

Dabei bedeuten:

E_r die Rotations-EMK,
E_t die transformatorische EMK,
f die Netzfrequenz,
f_k die Lamellenfrequenz am Kollektor,
v_k die Umfangsgeschwindigkeit am Kollektor,
t_k die Lamellenteilung.

Aus Gl. (3) ist ersichtlich, dass bei einer durch die praktische Erfahrung begrenzten transformatorischen EMK E_t und bei gegebener Netzfrequenz die Rotations-EMK nur durch Erhöhung der Kollektorumfangsgeschwindigkeit und Verkleinerung der Lamellenteilung vergrössert werden kann.

Es wurde bewusst darauf verzichtet, die Kollektorumfangsgeschwindigkeiten, entgegen der bisherigen Praxis, zu erhöhen und damit die grössere Empfindlichkeit gegen unvermeidliche Unrundheiten der Kollektoroberfläche in Kauf zu nehmen.

Die Auslegung eines Motors für 50 Hz hoher Leistung bietet folgende drei hauptsächliche Schwierigkeiten konstruktiver Art:

1. Im Prinzip ist die EMK des Rotors nach Gl. (2) bei 50 Hz ein Drittel derjenigen bei 16²/₃ Hz; daher steigt der Strom auf das Dreifache. In Wirklichkeit beträgt die Rotor-EMK eines Motors für 16²/₃ Hz ca. 400 V und diejenige eines Motors für 50 Hz ca. 180 V. Der Triebmotorstrom bei 16²/₃ Hz ist ca. 2,7 A/kW gegenüber ca. 5,4 A/kW bei 50 Hz. Die daraus resultierende hohe Stromstärke ist eine der Hauptschwierigkeiten des 50periodigen Motors.

2. Die Verluste im Ohmschen Wendepol-Shunt steigen mit dem Quadrat der Netzfrequenz. Diese Verluste betragen beim heutigen Motor für 16²/₃ Hz ca. 1 % und ergeben bei 50 Hz ca. 9 %. Es ist möglich, sie von 9 auf 4 % zu reduzieren, wenn die Rotationsfrequenz von ca. 80 (bei 16²/₃ Hz) auf ca. 130 Hz (bei 50 Hz) erhöht wird.

3. Die Polteilung und damit die Bürstenteilung wird klein. Durch besonders schmale Bürstenhalter und gute Kühlung ist diese Schwierigkeit überwindbar ohne Verdoppelung der Kollektorlänge.

Bei dem für die SNCF gebauten Motor wurden keine der Beanspruchungen, insbesondere auch nicht die Umfangsgeschwindigkeiten, über die Werte erhöht, die gute Resultate bei den Triebmotoren für 16²/₃ Hz gezeitigt haben.

In Fig. 7 ist die Charakteristik dieses Motors dargestellt. Bei der garantierten Stundenleistung von 465 kW beträgt der Strom 2640 A. Um diesen für einen Triebmotor hohen Strom zu meistern, wurde eine zweigängige Rotorwicklung angewendet.

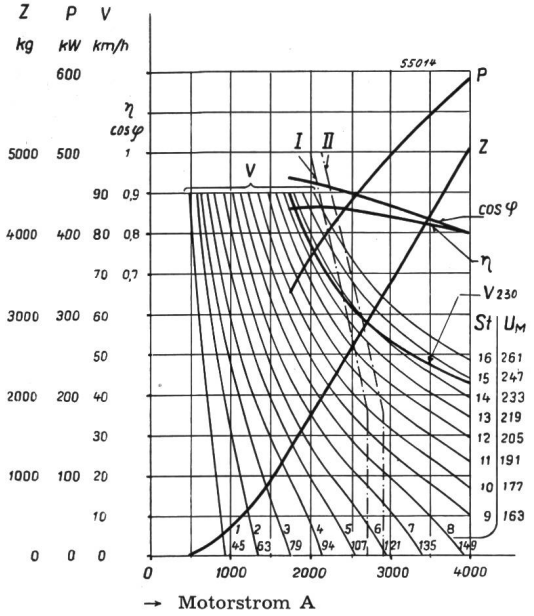


Fig. 7

Charakteristik der Triebmotoren der CoCo-Lokomotive der SNCF

Garantierte Werte

P	Leistung in kW am Radumfang
Z	Zugkraft in kg am Radumfang
V	Geschwindigkeit in km/h bei 20 000 V Fahrdrahtspannung
V_{230}	Geschwindigkeit in km/h bei 230 V an den Motorklemmen
$\cos\varphi$	Leistungsfaktor bei 230 V an den Motorklemmen
η	Wirkungsgrad in % bei 230 V an den Motorklemmen (Zahnradverluste nach AIEE)
U_M	Spannung an den Motorklemmen bei 2400 A
St	Stufe
I	Dauerbetrieb
II	Einstundenbetrieb

500 000 Lokomotiv-Kilometern zwischen zwei Kollektorbehandlungen.

Für den Kollektor eines Bahnmotors ist die Stromstärke von 2640 A ebenfalls sehr hoch. Daher wurde die Kühlung des Kollektors verstärkt, so dass seine Erwärmung die gleiche ist wie für einen Motor für 16²/₃ Hz und überdies ziemlich weit vom zulässigen Grenzwert entfernt liegt.

Fig. 8 zeigt die angewendete Lösung zur Unterbringung der vielen Bürstenhalter auf einem Kollektor von relativ kleinem Durchmesser. In Fig. 9 ist die elegante platzsparende Anordnung der Statorverbindungen ersichtlich. Hierbei wird der Strom in mehrere parallele Zweige unterteilt, so dass die Teilströme und Kupferquerschnitte nicht grösser sind als bei einem Motor für 16²/₃ Hz. Die Charakteristiken des Motors für 50 Hz verhalten sich folgendermassen zu denjenigen für 16²/₃ Hz:

Der *Wirkungsgrad beträgt*

87,5 % bei 50 Hz
90,5 % bei 16 ⅔ Hz.

Der Unterschied von ca. 3 % ist ausschliesslich auf die Verluste im Ohmschen Wendepol-Shunt zurückzuführen, so dass die Totalverluste im Motor selbst ungefähr die gleichen sind.

Der *Leistungsfaktor* beträgt:

für 50 Hz: $\cos\varphi = 0{,}89$
für 16 ⅔ Hz: $\cos\varphi = 0{,}98$.

Der niedrigere Leistungsfaktor ist auf die höheren induktiven Spannungsabfälle zurückzuführen. Sie haben den Vorteil, der Motorcharakteristik eine viel grössere Steilheit zu geben als bei 16²/₃ Hz, was erlaubt, die Zahl der Stufen um ca. 30...40 % zu vermindern. Meistens werden bei 16²/₃ Hz die induktiven Spannungsabfälle im Transformator künstlich erhöht, um die nötige Steilheit zu erhalten.

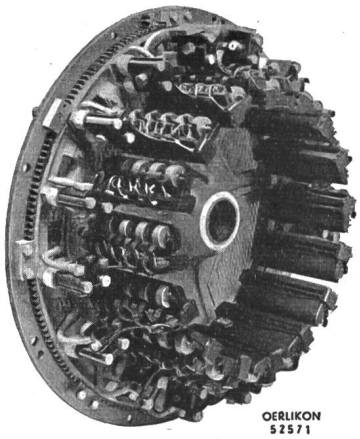
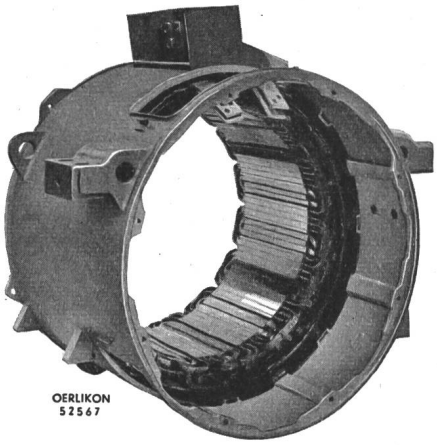


Fig. 8 (links)
Bürstenapparat

Fig. 9 (rechts)
Stator mit geschweisstem Gehäuse



Der Motor besitzt nicht mehr Kohlenbürsten als Motoren ungefähr gleicher Leistung für 16²/₃ Hz, wie sie noch vor 20...15 Jahren in grossen Serien für die *Schweizerischen Bundesbahnen* gebaut wurden und zu den besten Triebmotoren gezählt werden. Insbesondere wurde die Kohlenzahl für den Unterhalt nicht störend empfunden, und die Kollektoren erreichen laufend Laufleistungen von über

Die mit dem *Triebmotor für die SNCF* durchgeführten sehr gründlichen und strengen Versuche haben alle Berechnungen einwandfrei bestätigt, insbesondere Charakteristik, Wirkungsgrad und Leistungsfaktor. In Bezug auf die Erwärmungen ist der Motor sehr reichlich bemessen. Es konnte daher mit Erfolg ein *Stundenlauf mit 530 kW*, also mit einer Leistung, die 14 % mehr als die berechnete Stunden-

leistung beträgt, durchgeführt werden, wobei die Erwärmungsgrenze noch nicht erreicht wurde. Die Kommutation ist derjenigen der besten Triebmotoren für 16²/₃ Hz ebenbürtig, selbst bei der sehr hohen erreichten *100prozentigen Überlast von 920 kW*. Der Kollektor verträgt ohne weiteres die schwersten Anfahrten — vom völligen Stillstand aus mit dem Maximalstrom — ohne irgendwelche sichtbaren Spuren.

Diese *hervorragenden Resultate* haben gezeigt, dass das gesteckte Ziel erreicht wurde und der beschrittene Weg der richtige war. Auf Grund dieser Ergebnisse wurde bereits ein Einzeltriebmotor für eine Stundenleistung von 736 kW entwickelt, mit welchem praktisch alle Grosstraktionsprobleme gelöst werden können.

Der Vergleich von Einphasen-Triebmotoren für 16²/₃ und 50 Hz, nach Fig. 10, zeigt anschaulich, dass der Triebmotor für 50 Hz eine sehr rasche Entwicklung durchgemacht hat. Bei den in Fig. 10 skizzierten Motoren für 16²/₃ Hz handelt es sich durchwegs um Triebmotoren, die für grössere Serien für Triebfahrzeuge der *Schweizerischen Bundesbahnen* gebaut wurden oder noch im Bau sind und nicht immer die leichteste Ausführung darstellen.

Bei den Motoren für 50 Hz wurde derjenige des Jahres 1920 nicht ausgeführt; er stellt jedoch den Motor dar, der auf Grund der damaligen Technik wohl gebaut worden wäre. Der Motor 1935 ist der Motor der Siemens-Lokomotive der Höllentalbahn, der Motor 1948 derjenige, der für die SNCF-Probelokomotive ausgeführt wurde, wobei die spezifische Leistung von 6,5 kg/kW für die garantierte und der Wert von 5,7 kg/kW für die erreichte Stundenleistung gelten. Der 736-kW-Motor 1950, welcher vom obigen abgeleitet ist, zeigt mit seinem spezifischen Gewicht von 5,4 kg/kW, dass er nicht schwerer ist als der neueste im Bau befindliche Triebmotor für die Grosslokomotiven Typ CoCo der *Schweizerischen Bundesbahnen*, für die Frequenz von 16²/₃ Hz.

Die Auslegung des Triebmotors für den von der SNCF bestellten *Vorortsbetrieb-Motorwagen* stellt der sehr häufigen Anfahrten wegen wieder seine besondern Probleme. Auf Grund der mit dem Lokomotivmotor gewonnenen, sehr wertvollen Erkenntnisse wurden auch hier neue Wege beschritten.

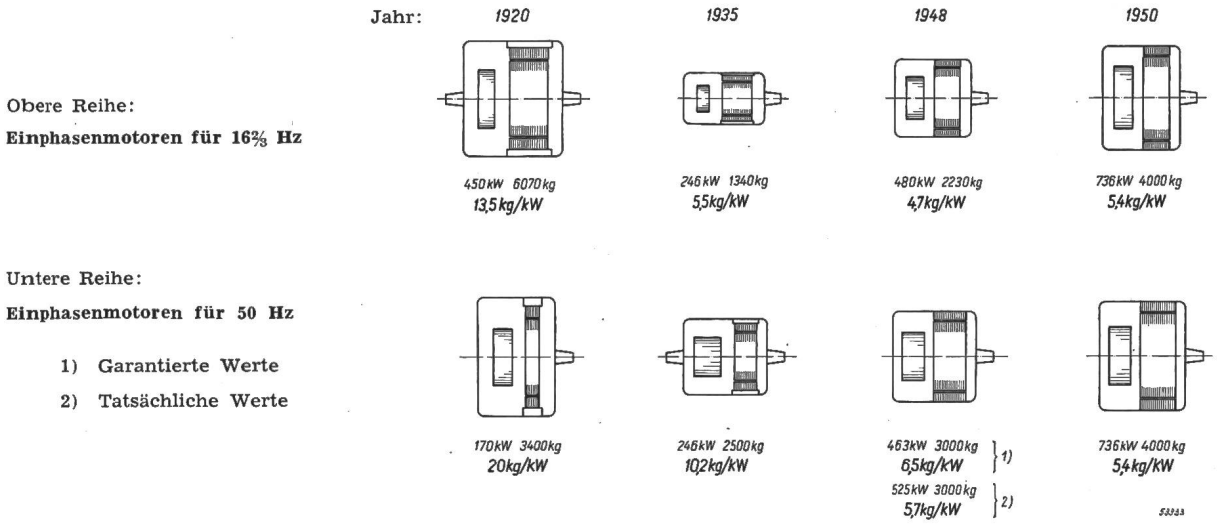


Fig. 10
Vergleich der Entwicklung von Einphasen-Triebmotoren für 16⅔ und 50 Hz im Zeitraum von 1920...1950

4. Die elektrischen Ausrüstungen der Triebfahrzeuge für Einphasenstrom 50 Hz

Nach der Lösung des Hauptproblems, der Verwirklichung der Triebmotoren, bietet die Entwicklung und Durchbildung der übrigen elektrischen Fahrzeugausrüstungen keine besondern Schwierigkeiten. In der Folge werden die verschiedenen Teile der elektrischen Ausrüstung behandelt.

A. Leistung der Triebfahrzeuge

Als wichtigste stellt sich die Frage, welche Leistungen in Triebfahrzeuge bei annehmbaren Triebraddurchmessern eingebaut werden können. Zufolge der Notwendigkeit, bei Triebmotoren für 50 Hz den Fluss und daher auch die Eisenlänge zu reduzieren, wird der Rotordurchmesser gegenüber 16²/₃ Hz grösser. Für Triebmotoren grosser Leistung erlaubt die Verwendung der zweigängigen Ankerwicklung, die Eisenlänge und damit die Leistung pro Pol zu verdoppeln.

Für die heute allgemein nur noch in Frage kommenden *Lokomotivtypen BoBo* und *CoCo*, gemäss Fig. 11, können beim heutigen Stand der Entwicklung folgende Leistungen eingebaut werden:

Bei 19 t Achsdruck:	736 kW pro Achse
Bei 17 t Achsdruck:	515 kW pro Achse
Für Schmalspur und 14 t Achsdruck:	330 kW pro Achse

Diese Leistungen sind denjenigen der modernsten Lokomotiven für Gleichstrom und Einphasenstrom praktisch ebenbürtig. In Tabelle I sind die Hauptdaten solcher Lokomotiven zusammengestellt. Selbstverständlich kann durch entsprechende Wahl

Hauptdaten von Lokomotiven BoBo und CoCo für 50 Hz Tabelle I

Spurweite	Normalspur		Normalspur		Schmalspur	
Achsdruck . . . . . t	19		17		14	
Typ	BoBo	CoCo	BoBo	CoCo	BoBo	CoCo
Stundenleistung der Lokomotive . . . . . kW	2950	4420	2060	3090	1320	1980
bei Geschwindigkeit . . . . . km/h	85	85	67	67	45	45
Maximale Geschwindigkeit . . . . . km/h	125	125	100	100	75	75
Zahl und Leistung der Triebmotoren . . . kW	4×736	6×736	4×515	6×515	4×330	6×330
Triebraddurchmesser minimal . . . . . mm	1350	1400	1250	1400	1100	1100
Gewicht der elektrischen Ausrüstung . . ca. t	34	49	27	36	22	30
Gewicht des mechanischen Teiles . . . . ca. t	44	66	39	62	34	48
Totalgewicht . . . . . ca. t	78	115	66	98	56	78

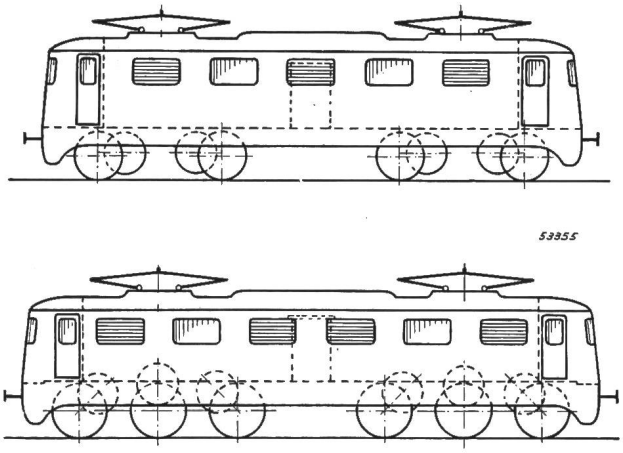


Fig. 11
Typenskizzen von BoBo- und CoCo-Lokomotiven für Einphasenstrom 50 Hz

der Zahnradübersetzung die Geschwindigkeit bei Stundenleistung und die Maximalgeschwindigkeit nach Bedarf angepasst werden.

Die *elektrischen Ausrüstungen von Motorwagen* können praktisch mit gleichen Gewichten gebaut werden wie für Einphasenstrom $16^2/_3$ Hz, wobei allerdings der Triebraddurchmesser etwas grösser gewählt werden muss.

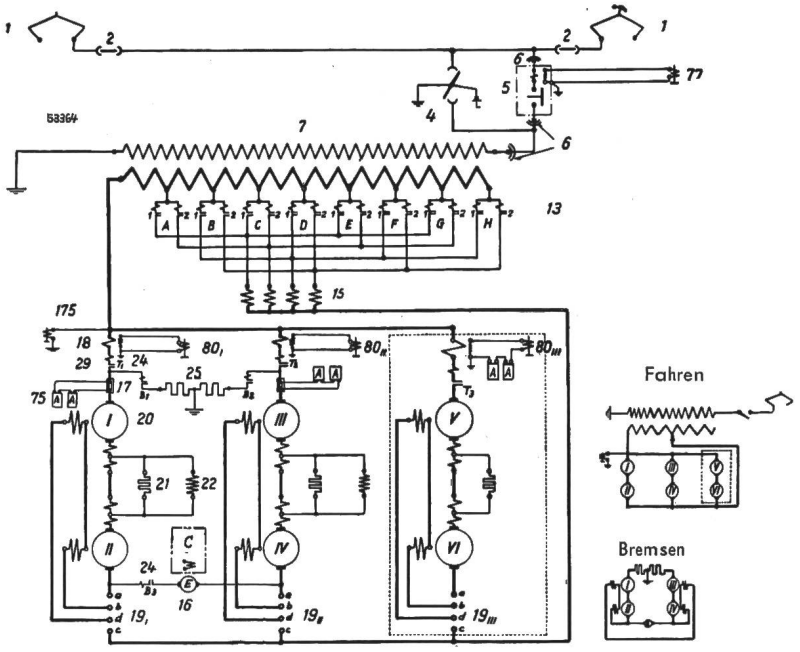
B. Hauptstromkreise

Die Hauptstromkreise unterscheiden sich praktisch nicht von denjenigen bei $16^2/_3$ Hz. Die Dachapparatur, der Hauptschalter und der Transformator müssen natürlich der gewählten Spannung von 20 oder 25 kV angepasst werden. Die Verwirklichung dieser Elemente für die normale Fahrdrahtspannung von 25 kV und mit einem Maximum von 28 kV ergibt keine Schwierigkeiten, obwohl man mit den europäischen Umgrenzungsprofilen in Bezug auf die Dimensionierung an die Grenze der Möglichkeiten gelangt.

Fig. 12 zeigt das Hauptstromschema für BoBo- bzw. CoCo-Lokomotiven. Die Regulierung der Spannung erfolgt zumindest bei kleineren und mittleren Leistungen auf der Niederspannungsseite durch elektropneumatische Einzelhüpfer, in Verbindung mit Überschaltdrosselspulen nach der klassischen Schaltung Fig. 13 b. Für hohe Leistungen und entsprechend hohe Ströme kann unter Umständen mit

Fig. 12
Hauptschema von BoBo- und CoCo-Lokomotiven für Einphasenstrom 50 Hz, mit elektrischer Widerstandsbremse

1 Stromabnehmer
2 Stromabnehmer-Trennmesser
4 Erdungsumschalter
5 Hauptschalter
6 Dachdurchführungen
7 Stufentransformator
13 Stufenhüpfer
15 4 Zweigüberschalt-Drosselspulen
16 Erreger für Widerstandsbremse
17 Shunt für Triebmotor-Ampèremeter
18 Stromwandler für Triebmotoren
19 Wendeschalter
20 Triebmotoren
21 Ohmscher Wendepol-Shunt
22 Induktiver Wendepol-Shunt
24 Bremshüpfer
25 Bremswiderstand
29 Trennhüpfer
75 Triebmotor-Ampèremeter
77 Primärstromrelais
80 Triebmotor-Überstromrelais
175 Erdschlussrelais



Vorteil die Hochspannungssteuerung (Fig. 13 c) angewendet werden. Fig. 14 zeigt einen solchen Transformator für Hochspannungssteuerung. Der Reguliertransformator, der Sekundärtransformator und die Stufenschalter sind in einem gemeinsamen Kessel in Öl untergebracht.

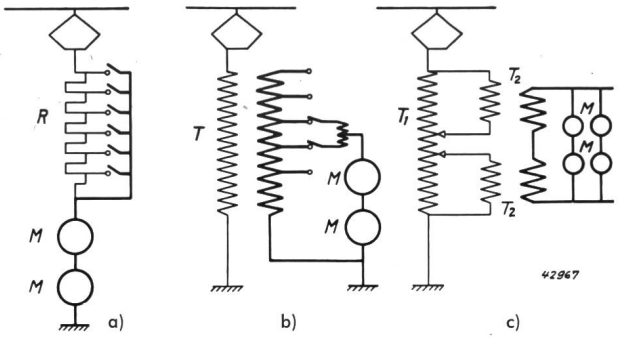


Fig. 13
Schaltungen für Geschwindigkeitsregulierung

a) Für Gleichstrom, mit Vorschaltwiderständen
b) Für Einphasenstrom, Niederspannungssteuerung mit Stufentransformator
c) Für Einphasenstrom, Hochspannungssteuerung und Spannungstransformator
M Triebmotoren
R Widerstände
T Transformator

Um die Gesamtstromstärke der Triebmotoren, die rund das Doppelte derjenigen bei $16^2/_3$ Hz beträgt, zu vermindern, können zwei Triebmotoren dauernd in Serie geschaltet werden. Mit der Hochspannungssteuerung sind die hohen Stromstärken leichter zu bewältigen. Zufolge der höheren Frequenz sind besondere Massnahmen zu treffen, um in der Installation hohe Verluste infolge Induktion zu vermeiden. Ferner ist zu berücksichtigen, dass die Verluste in den Ohmschen Wendepol-Shunts der Triebmotoren etwa dreimal grösser sind als bei $16^2/_3$ Hz. Das Gewicht der Triebmotoren, die nach genau gleichen Konstruktionsprinzipien gebaut sind, ist bei 50 Hz ca. 25...30 % höher, dagegen wird der Transformator 40...50 % leichter. Das Gesamtgewicht der Triebmotoren und des Transformators unterscheidet sich praktisch nur unwesentlich für beide Frequenzen.

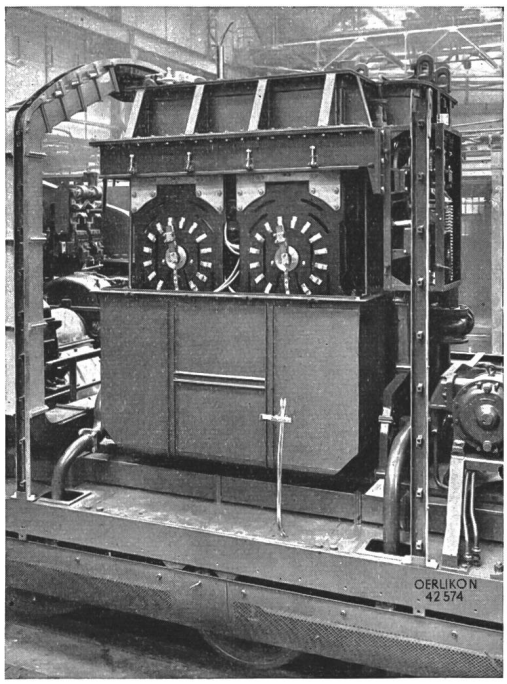


Fig. 14
Hochspannungssteuerung durch Stufenschalter der 8840-kW-Einphasenlokomotive Ae 8/14, Nr. 11852, der Schweizerischen Bundesbahnen
Die Verschalung des Stufenschalters ist abgesenkt

Bei einem Triebfahrzeug mit vier Motoren zu 300 kW ergeben sich beispielsweise folgende *Gewichte:*

		$16^2/_3$ Hz	50 Hz
Triebmotoren	kg	5 500	7 200
Transformator	kg	6 100	4 300
Total	kg	11 600	11 500

Die *Geschwindigkeitscharakteristik* eines Triebmotors für 50 Hz in Funktion der Zugkraft entspricht derjenigen eines schwachgesättigten Seriemotors, weil durch die induktiven Spannungsabfälle die Charakteristik steiler wird als bei gesättigten Motoren. Fig. 15 zeigt den Vergleich der Charakteristiken von Motoren für verschiedene Stromsysteme: für Gleichstrom, für Einphasenstrom $16^2/_3$ und 50 Hz. Daraus ist insbesondere ersichtlich, dass der Seriemotor für 50 Hz eine sehr hohe Zugkraft bei grossen Geschwindigkeiten ergibt, die praktisch doppelt so gross ist als bei Gleichstrom und Vollfeld.

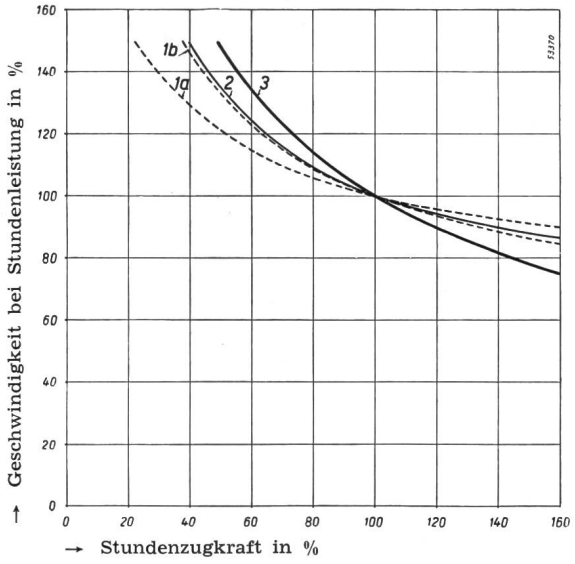


Fig. 15
Vergleich der Charakteristiken von Triebmotoren für verschiedene Stromsysteme

1a Gleichstrom-Vollfeld
1b Gleichstrom bei Feldschwächung 50 %
2 Einphasenstrom $16^2/_3$ Hz
3 Einphasenstrom 50 Hz

Die *Geschwindigkeitsregulierung* ist beim Motor für 50 Hz am leichtesten zu bewältigen. Die Sprünge von Zugkraft und Strom beim Überschalten von einer Stufe auf die nächst höhere sind bedeutend geringer als bei $16^2/_3$ Hz, was erlaubt, die Zahl der Fahrstufen wesentlich zu reduzieren, ohne die Zug-

kraftsprünge zu erhöhen. Fig. 16 erläutert diesen Unterschied sehr eindrücklich.

Demgegenüber ist zu erwähnen, dass zufolge der hohen Zugkraft bei grossen Geschwindigkeiten die Gefahr des Schleuderns der Triebmotoren sich erhöht, dass sie jedoch durch eine geeignete *Schleuderschutzvorrichtung* vermieden werden kann.

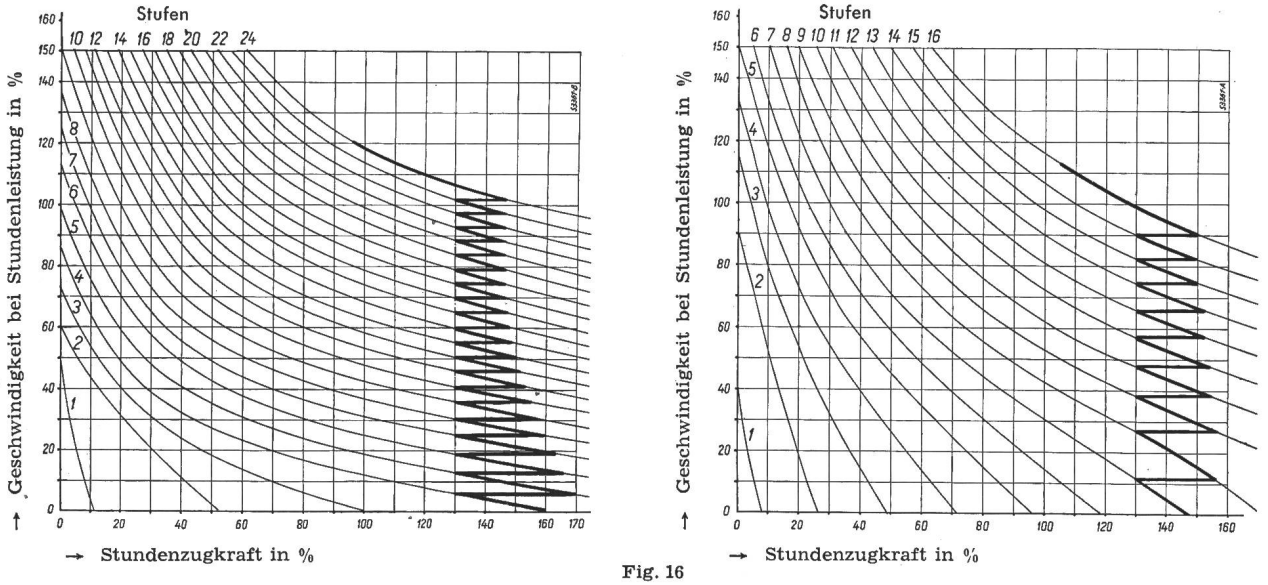


Fig. 16
Vergleich der Abstufungen für Einphasenstrom 16⅔ und 50 Hz

Lokomotive Re 4/4 der SBB für 16⅔ Hz, mit 24 Stufen. Maximaler Zugkraftsprung 40 %

CoCo-Lokomotive der SNCF für 50 Hz, mit 16 Stufen. Maximaler Zugkraftsprung 25 %

Die *elektrische Bremse* kann wie für 16²/₃ Hz ausgelegt werden, und zwar können sowohl *Widerstandsbremse* als auch *Rekuperation* angewendet werden. Für die Rekuperation werden die gleichen Schaltungen benützt, die sich bei 16²/₃ Hz bewährt haben; es sind dies insbesondere die Oerlikon-Erregerschaltung und die Oerlikon-Kompoundschaltung, nach Schema b und c in Fig. 17. Zufolge der höheren Frequenz werden die Dimensionen der Bremsdrosselspulen wesentlich kleiner als bei 16²/₃ Hz.

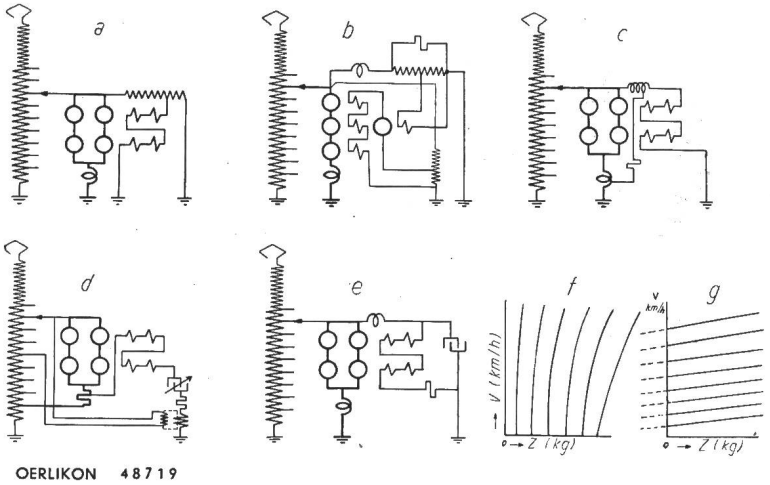


Fig. 17
Einphasen-Rekuperationsschaltungen

a Oerlikon/Behn-Eschenburg (ca. 1918)
b Oerlikon mit Erregermotor (1938)
c Oerlikon-Kompoundschaltung (1940)
d Brown-Boveri-Kondensator in Serie zu den Erregerwicklungen
e Oerlikon-Kondensator parallel zu den Erregerwicklungen (1937)
f Bremscharakteristik zu den Oerlikon-Schaltungen *a*, *b*, *c*, *e*
g Bremscharakteristik zu Brown-Boveri-Schaltung *d*

C. *Hilfsbetriebe*

Einphasenstrom 50 Hz bietet in Bezug auf die Hilfsbetriebe gegenüber allen andern Stromsystemen ganz wesentliche Vorteile. Während sich für Gleichstrom 1500 und 3000 V verhältnismässig schwere, kostspielige und doch empfindliche Motoren ergeben, kann bei 16²/₃ Hz eine niedrige Spannung von 220 oder 110 V gewählt werden. In den meisten Fällen jedoch – mit einigen Ausnahmen – ist der zweipolige Einphasen-Asynchronmotor mit seiner Drehzahl von 1000 U./min zu langsam, so dass man gezwungen wird, Einphasen-Serie-Kollektormotoren anzuwenden, die robuster sind als Gleichstrom-Hochspannungsmotoren. Bei 50 Hz können dagegen *Asynchronmotoren* mit 1500 oder 3000 U./min gewählt werden, die sehr günstige Drehzahlen für den Antrieb der Hilfsmaschinen darstellen. Für kleinere Leistungen eignen sich Einphasen-Asynchronmotoren mit Hilfsphase und Kondensator. Diese Motoren sind einfach und widerstandsfähig, dagegen sind die Kondensatoren bei höheren Leistungen umfangreich und kostspielig. Um den Anforderungen des Traktionsbetriebes zu genügen, eignen sich dafür nur bewährte, beste Spezialkonstruktionen.

Bei Verwendung einer der Hilfsbetriebe-Motoren, der als Einphasen-Drehstromumformer, sogenannter Arno-Umformer, entsprechend bemessen werden muss, erhält man ein Drehstromnetz für die Speisung der Hilfsbetriebe mit allen seinen Vorteilen,

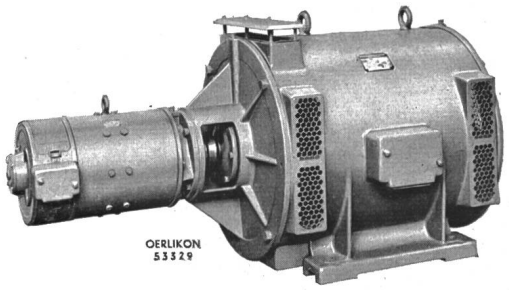


Fig. 18
Arno-Umformer 110 kVA der SNCF-Lokomotive CoCo für Einphasenstrom 50 Hz, mit Gleichstrom-Nebenschlussgenerator für Batterieladung

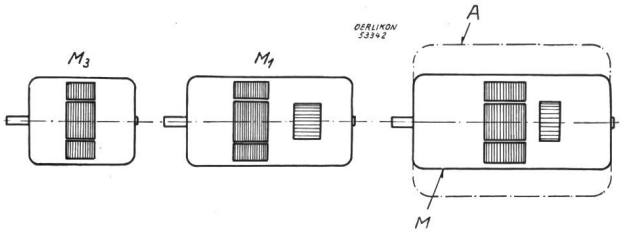


Fig. 19
Vergleich von Motoren für Hilfsbetriebe von 12,5 kW Leistung, für verschiedene Stromsysteme

M Motor für Gleichstrom 3000 V, 2500 U./min; Gewicht 460 kg, 36,7 kg/kW
M_1 Einphasen-Serie-Kollektormotor für 16⅔ Hz, 2900 U./min; Gewicht 220 kg, 17,7 kg/kW
M_3 Drehstrom-Kurzschlussankermotor für 50 Hz, 2900 U./min; Gewicht 130 kg, 10,2 kg/kW
A Arno-Umformer von 110 kVA, 1500 U./min

insbesondere sehr einfache, leichte und robuste Motoren ohne Kollektor und mit hohem Anzugsmoment. Fig. 18 zeigt einen solchen Arno-Umformer, der gleichzeitig für den Antrieb des Gleichstromgenerators zur Ladung der Batterie und gegebenenfalls auch für den Antrieb des Bremserregers bei der Widerstandsbremse benützt wird. Der Vergleich von Hilfsbetriebe-Motoren gleicher Leistung für die verschiedenen Stromsysteme nach Fig. 19 zeigt eindrücklich die grosse Überlegenheit des Drehstrommotors. In Fig. 20 ist für eine grössere Lokomotive das allgemeine Schema der Hilfsbetriebe, die über einen Arno-Umformer durch Drehstrom gespeist werden, dargestellt.

5. Die Triebfahrzeuge für Einphasenstrom von 50 Hz, 20 kV, der Société Nationale des Chemins de Fer Français (SNCF)

A. *Die CoCo-Lokomotive Nr. 6051, 3160 kW, für Einphasenstrom 50 Hz*

a) Leistungsprogramm. Die *CoCo-Probelokomotive* von 3160 kW, nach Typenskizze Fig. 21, ist bei maximal 18 t Achsdruck für einen gemischten Dienst auf Strecken mit Steigungen bis 25 ‰ zur Förderung von *Personenzügen bis 600 t* wie auch von *Güterzügen bis 1350 t* bestimmt. Sie wird normalerweise mit *Einphasenstrom 50 Hz* bei einer mittleren Fahrdrahtspannung von 20 kV betrieben, die jedoch zwischen 16 und 23 kV variieren kann. Ausserdem wurde verlangt, dass die Lokomotive auf Gemeinschaftsbahnhöfen, die mit Gleichstrom 1500 V elektrifiziert sind, mit reduzierter Leistung fahren kann, um Züge ein- und ausfahren zu kön-

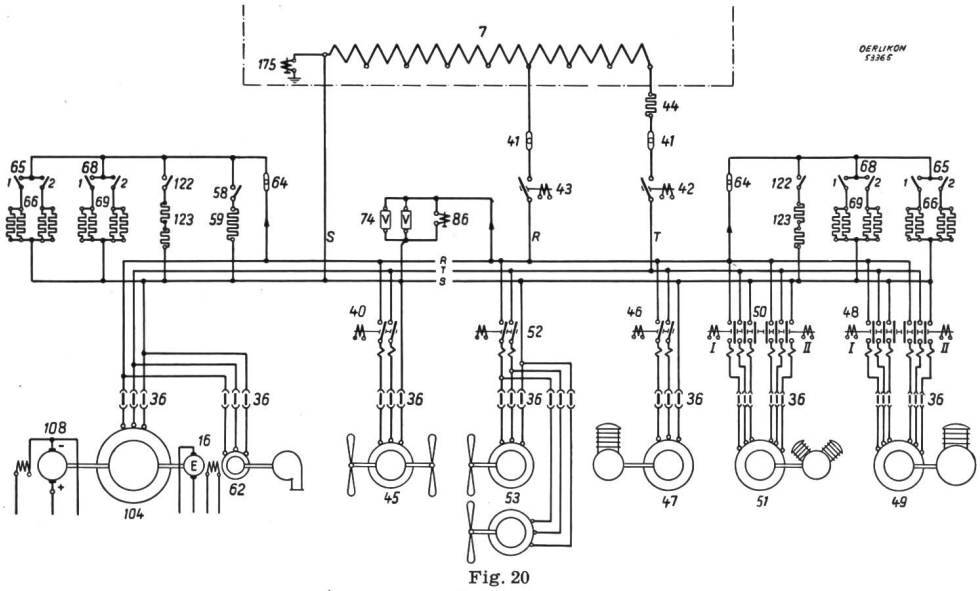


Fig. 20
Schema der Hilfsbetriebe einer grösseren Lokomotive für Einphasenstrom 50 Hz, mit Arno-Umformer und Drehstrom-Hilfsbetriebe-Motoren

7 Stufentransformator
16 Erreger für Widerstandsbremsung
36 Trennsicherungen
40, 46, 48, 50, 52 Hüpfer der Hilfsbetriebemotoren
41 Hauptsicherung der Hilfsbetriebe
42, 43 Hüpfer für Arno-Umformer
44 Anlasswiderstand für Arno-Umformer
45 Ventilator für Bremswiderstände
47 Motor-Kompressorgruppe
49 Vakuumpumpengruppe
51 Kombinierte Kompressor-Vakuumpumpengruppe
53 Ventilatoren für Triebmotoren
62 Ölumlaufpumpe des Transformators
104 Arno-Umformer
108 Nebenschlussgenerator für Batterieladung
Übrige Pos.: Ölwärmeplatte, Fenster- und Führerstandheizung

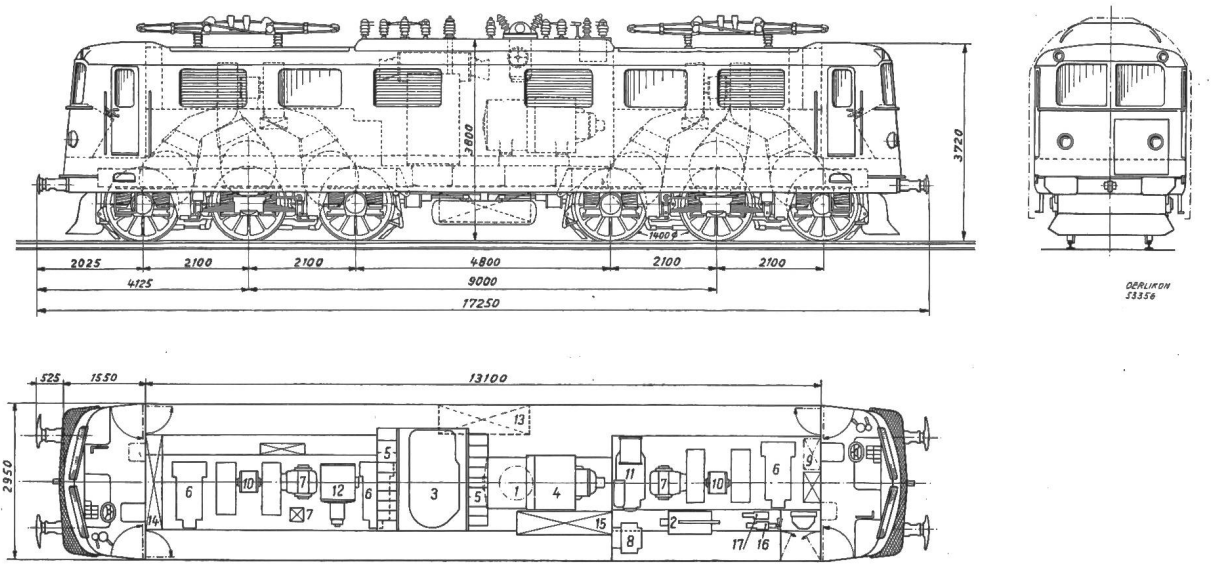


Fig. 21
Typenbild der CoCo-Lokomotive der SNCF, 3160 kW, für Einphasenstrom 50 Hz, 20 kV

1 Einphasen-Hauptschalter
2 Gleichstrom-Hauptschalter
3 Stufentransformator
4 Umformergruppe für Gleichstrom-Zusatzbetrieb
5 Stufenhüpfer
6 Wendeschalter
7 Erregertransformator, Bremsdrosselspule und induktiver Shunt für Rekuperation
8 Umschalter für Einphasen- und Gleichstrombetrieb
9 Hüpfer für Hilfsbetriebe
10 Ventilatorgruppen für Triebmotoren und Transformator-Ölkühler
11 Motor-Kompressorgruppe
12 Arno-Umformer
13 Akkumulatorenbatterie
14 Relais- und Sicherungsschalttafeln
15 Ohmsche Wendepol-Shunts der Triebmotoren
16 Hüpfer für Heizung
17 Hüpfer für Hauptumformergruppe

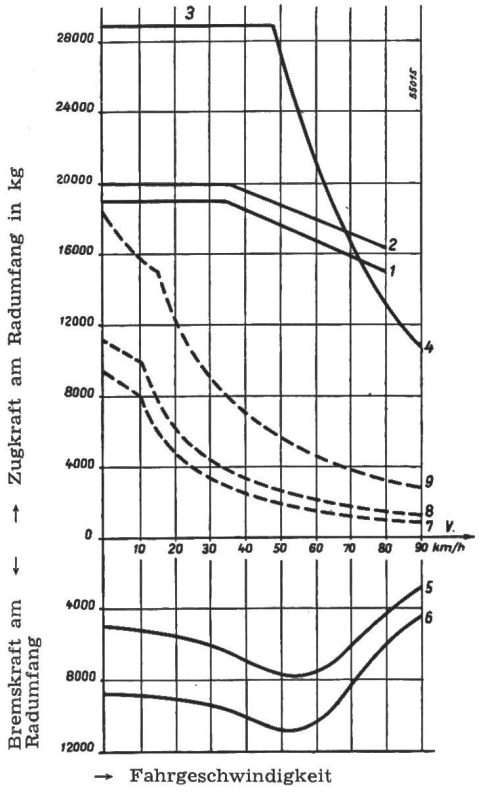


Fig. 22
Fahr- und Bremscharakteristiken der Lokomotive

Einphasenstrom 50 Hz, 20 kV:
1 Dauerzugkraft
2 Stundenzugkraft
3 Maximale Zugkraft
4 Zugkraft auf letzter Stufe
5 Dauerbremskraft der Rekuperation
6 Stundenbremskraft der Rekuperation

Gleichstrom 1500 V:
7 Dauerzugkraft
8 Stundenzugkraft
9 Maximale Zugkraft

nen, wobei eine ausreichende Zugkraft entwickelt werden muss. Selbstverständlich stellt diese Bedingung eine wesentliche Erschwerung des Problems dar und bedingt ferner ein bedeutendes Mehrgewicht.

Die *elektrische Rekuperationsbremsung* ist imstande, das Gewicht der Lokomotive und zusätzlich ca. 120 t Anhängelast auf 25 ‰ Gefälle mit Beharrungsgeschwindigkeiten zwischen 30 und 70 km/h abzubremsen. Das Diagramm Fig. 22 zeigt die Zugkraft-Geschwindigkeits-Charakteristik für Fahr- und Bremsbetrieb mit Einphasenstrom sowie für Fahrbetrieb mit Gleichstrom. Die Maximalgeschwindigkeit beträgt 90, ausnahmsweise 100 km/h.

b) Mechanischer Teil. Der mechanische Teil wurde bei der *Schweizerischen Lokomotiv- und Maschinenfabrik, Winterthur (SLM),* in Auftrag gegeben. Er umfasst einen einteiligen Kasten auf zwei vollständig symmetrischen, dreiachsigen Drehgestellen. Die Triebachsen bei 1400 mm Raddurchmesser haben Einzelachsantrieb «anneaux flottants», System SLM. Die Abstützung des Kastens auf die Drehgestelle erfolgt durch Längswiegenfedern, die in jedem Drehgestell an zwei Wiegebalken aufgehängt sind. Die Drehgestelle drehen um einen ideellen, durch Lenker bestimmten Drehpunkt. Es ist dies die erste Lokomotive Typ CoCo mit solchen von der SLM neu entwickelten Drehgestellen (Fig. 23), die sich dank ihrer Bauart auch für hohe Geschwindigkeiten eignen.

Der Kastenrahmen wird durch geschweisste Profilträger gebildet und trägt allein das Gewicht der elektrischen Ausrüstung. Der leichte Oberkasten ist nicht mittragend.

c) Elektrische Ausrüstung. Das Schema der *Hauptstromkreise* unterscheidet sich wenig vom klassischen Schema der Einphasen-Lokomotiven für 16²/₃ Hz. Die Stromabnahme erfolgt durch zwei Pantographen, wovon normalerweise nur einer in

Betrieb ist. Für den Einphasenbetrieb ist ein Ölschalter mit reduziertem Ölvolumen und für den Gleichstrombetrieb ein Gleichstrom-Schnellschalter eingebaut. Dieser ist vom Einphasensystem durch einen elektropneumatischen Umschalter getrennt. Die beiden Hauptschalter und der Umschalter sind mit den nötigen Verriegelungen versehen, um jede Fehlschaltung zu vermeiden, und werden durch einen automatischen Stromsystemwähler gesteuert. Wegen des verlangten Zusatzbetriebes mit Gleichstrom 1500 V war eine Hochspannungssteuerung nicht angebracht. Der Stufentransformator im Ölbad hat Sekundäranzapfungen für die Spannungsregulierung der Triebmotoren sowie für Zugsheizung und Hilfsbetriebe. Im Transformatorkessel ist ebenfalls die Vierzweig-Überschaltdrosselspule eingebaut. Die Steuerung erfolgt durch 16 elektropneumatische Hüpfer in 16 Stufen.

Alle Motoren der Hilfsbetriebe sind robuste *Drehstrom-Kurzschlussankermotoren.*

Die *Leistungsdaten* der Lokomotive sind:

Leistungsdaten		dauernd	1 Stunde	maximal
Leistung an der Welle	PS	4 150	4 300	—
	kW	3 050	3 160	—
bei Geschwindigkeit	km/h	68	65	90 (100)[1])
Zugkraft am Rad	kg	16 000	17 400	29 000[2])

[1]) und [2]) nicht gleichzeitig auftretend

Abgesehen von den Triebmotoren war der Zusatzbetrieb mit Gleichstrom das schwierigste Problem. Der Einphasen-Seriemotor ist auch ein sehr guter Gleichstrommotor, jedoch nur für niedrige

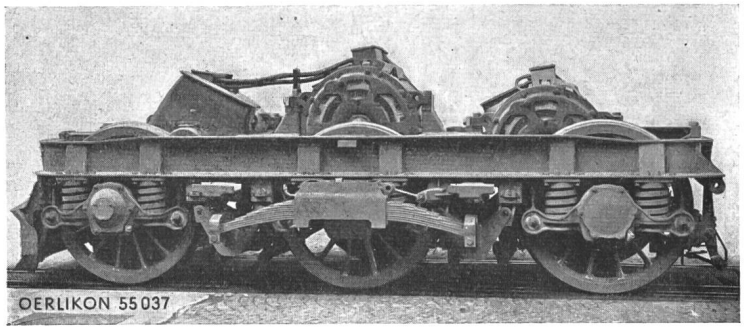


Fig. 23
Dreiachsiges SLM-Drehgestell mit den drei eingebauten Triebmotoren

Die sechs *Einphasen-Serie-Triebmotoren* von je 530 kW Stundenleistung, bei einer Geschwindigkeit von 65 km/h, bilden das Kernstück der elektrischen Ausrüstung. Die Motoren sind dauernd in drei Gruppen zu je zweien in Serie geschaltet und sind gleich und auswechselbar, trotzdem sie in jedem Drehgestell in drei verschiedenen Stellungen eingebaut werden. Sie sind lediglich über ein Erdungsrelais an Erde gelegt, so dass ein eventueller Erdschluss zwar angezeigt wird, aber keine weiteren Folgen hat.

Drei elektropneumatisch betätigte *Wendeschalter* dienen zur Herstellung der Schaltungen für beide Fahrrichtungen und die Rekuperation. Für diese wurde die *Oerlikon-Erregerschaltung* gewählt, die sich bei Einphasenlokomotiven für $16^2/_3$ Hz bewährt hat. Dabei liefert eine Motorgruppe den Erregerstrom für die beiden andern Gruppen. Diese Schaltung weist einen hohen externen Leistungsfaktor zwischen den Geschwindigkeiten von 50 und 90 km/h auf und erlaubt Bremsung bis zum Stillstand. Die Rekuperation kann bei jeder Geschwindigkeit eingeschaltet werden. Die einstündige Bremskraft beträgt 7500 kg, die maximale 11 000 kg.

Die *Hilfsbetriebe* umfassen:

1 *Arno-Umformer,* der das Hilfsbetriebe-Drehstromnetz speist und den Nebenschlussgenerator für die Batterieladung antreibt;

2 *Doppelventilatorgruppen,* je für drei Triebmotoren und einen Transformator-Ölkühler;

1 *Doppelventilator* für die Ohmschen Wendepol-Shunts;

1 *Oerlikon-Kolbenkompressorgruppe* mit einer Förderleistung von 2500 l/min bei 9 kg/cm²;

1 *Ölpumpe* für den Transformator.

Spannung. Selbst unter Vollast und bei voller Geschwindigkeit würden die sechs in Serie geschalteten Triebmotoren nur eine Spannung von 1200 V aufnehmen. Eine direkte Speisung der Motoren mit Gleichstrom hätte daher die Erhöhung ihrer Zahl bedingt. Dazu müssten die ganze Regulierungsapparatur und die Anfahrwiderstände vorgesehen werden. Endlich wäre das Problem der Hilfsbetriebe-Motoren nur mit grossen Komplikationen lösbar.

Unter den verschiedenen Möglichkeiten wurde eine Lösung gewählt, die sonderbar erscheinen mag, für den vorliegenden Fall aber sicher die geeignetste ist. Für den Betrieb mit Gleichstrom 1500 V ist die Lokomotive mit einer Umformergruppe ausgerüstet, bestehend aus einem Gleichstrom-Kompoundmotor von 1500 V, der einen Einphasengenerator antreibt, dessen Frequenz, je nach Spannung, von ca. 50 Hz bei Leerlauf bis auf ungefähr 35 Hz bei Belastung variieren kann, und die Sekundärwicklung des Stufentransformators speist. Da es sich hierbei nur um einen Betrieb mit reduzierter Leistung in den Gemeinschaftsbahnhöfen handelt, genügt eine Dauerleistung von 400 kW, so dass die Umformergruppe noch nicht zu gross ausfällt. Der Betrieb und die Bedienung der Lokomotive sind demzufolge genau gleich wie bei Einphasenstrom. Beim Übergang von einem Stromsystem auf das andere hat der Lokomotivführer lediglich den entsprechenden Hauptschalter einzuschalten, wobei der automatische Stromsystemwähler mit den zugehörigen Relais die Schaltungen überwacht und jede Fehlmanipulation ausschliesst, die sich nicht

auf das entsprechende Stromsystem bezieht. Der Gleichstrom kann daher niemals durch den Transformator und der Einphasenstrom niemals durch den Gleichstrommotor der Umformergruppe fliessen. Die Zugsheizung erfolgt bei beiden Stromsystemen mit 1500 V über einen Stromsystemumschalter und einen speziell für Gleichstrom und Einphasenstrom 50 Hz gebauten elektropneumatischen Hüpfer.

Die *Apparatur* musste durchwegs für die Frequenz von 50 Hz neu entwickelt werden. Insbesondere war die Dachapparatur für die spätere Verwendung bei Spannungen bis 25 kV, maximal 28 kV, zu konstruieren, wobei zu berücksichtigen war, dass diese neuen Elemente auch für alle späteren Fahrzeuge verwendbar sein müssen. Diese Apparate sind von der SNCF als genormt erklärt und auch bei den von andern Firmen gebauten SNCF-Prototypen vorgeschrieben. Auch in Bezug auf die Installation, Kabelkanäle, Disposition der Kabel und Kabelbriden mussten der höheren Frequenz wegen ganz besondere Massnahmen zur Vermeidung von Wirbelströmen getroffen werden.

Die *elektrische Ausrüstung* konnte sehr übersichtlich disponiert werden. Einphasenhochspannung befindet sich nur auf dem Dach. Die Ausrüstung für Gleichstrom 1500 V ist in einem verriegelten Gang konzentriert, wogegen der ganze Maschinenraum nur Niederspannung führt und frei zugänglich ist.

Das Gewicht der kompletten elektrischen Ausrüstung inklusive Kompressor beträgt 43 t, wovon 7 t auf die Gleichstrom-Zusatzeinrichtung entfallen. Das Totalgewicht der betriebsbereiten Lokomotive ist 104 t, entsprechend 17,3 t Achsdruck, was ohne Verwendung von Leichtmetall — bei durchwegs reichlicher Bemessung aller Teile — durch zweckmässige Materialausnützung erreicht worden ist.

B. *Der Vorortsbetrieb-Motorwagen Nr. Z 9051, 1150 kW, für Einphasenstrom 50 Hz*

a) Leistungsprogramm. Da die von der SNCF mit Einphasenstrom 50 Hz geplante Elektrifizierung von Netzen auch Strecken mit regem Vorortsverkehr umfasst, ist es für die SNCF von eminenter Bedeutung, auch das Verhalten von Motorwagen für dieses Stromsystem im *Vorortsbetrieb* zu beurteilen. Anerkanntermassen stellt dieser an die Triebfahrzeuge ausserordentlich hohe Anforderungen, weshalb man für diesen Betrieb bisher in weiten Kreisen allgemein nur Gleichstrom als geeignet betrachtete. Der Motorwagen ist dauernd mit einem gleich grossen Steuerwagen zu einer Einheit gekuppelt.

Als *Leistungsprogramm* wurde vorgeschrieben: Täglich 18 Stunden lang ununterbrochener Betrieb auf der Strecke *Aix-les-Bains–La Roche-sur-Foron* oder jeder andern Strecke, welche keine grösseren Steigungen aufweist, mit einem Total-Zugsgewicht von 126 t, d. h. brutto 76 t für den Motorwagen und 50 t für den Steuerwagen. Dabei sind alle 1,4 km Anfahrten nach Halten von 30 Sekunden und bei jedem zwölften Halt nach solchen von 4 Minuten Dauer bis zur Maximalgeschwindigkeit auszuführen.

b) Mechanischer Teil. Da ein solcher Motorwagen in Bezug auf den mechanischen Teil keine Probleme stellt, hat die SNCF die Verwendung von vorhandenen mechanischen Teilen, sowohl für Motorwagen als auch für Steuerwagen, angeordnet.

Dafür wurde einer der 80 Motorwagen gewählt, die im Jahre 1925 für den Vorortsverkehr auf den Strecken *Paris–Brétigny–* $\frac{\textit{Dourdan}}{\textit{Etampes}}$ eingesetzt wurden. Für den Betrieb mit Gleichstrom 1500 V sind sie mit vier Tatzlager-Triebmotoren von je 180 kW Stundenleistung ausgerüstet. Die Länge über Puffer beträgt 21,1 m. Bei einem Totalgewicht von 65 t beträgt das Gewicht der elektrischen Ausrüstung 20 t. Es sind Stahlwagen schwerer Bauart, die als solche heute noch als zeitgemäss gelten dürfen [1] [2]).

Die für den Einbau der neuen elektrischen Ausrüstung erforderlichen Änderungen werden von der SNCF selbst besorgt.

Fig. 24 zeigt das Typenbild des Wagens. Dieser hat nur einen Führerstand an einem Ende, während der andere sich im zugehörigen Steuerwagen befindet. Die bisherige Maximalgeschwindigkeit von 80 km/h wird für den Einphasenbetrieb beibehalten.

c) Elektrische Ausrüstung. Die elektrische Ausrüstung für Einphasenstrom 50 Hz musste von Anfang an im Hinblick auf deren Verwendung in den neuen *Vorortsbetrieb-Motorwagen* von 900 kW und 120 km/h Maximalgeschwindigkeit entwickelt werden, die kürzlich von der SNCF für Gleichstrom 1500 V in Auftrag gegeben wurden [2] [2]). Sie ist nur für reinen Einphasenbetrieb für die Fahrdrahtspannung von 20 kV, ohne elektrische Bremse, jedoch mit Vielfachsteuerung, zu bauen. Dabei war wegleitend, im gegebenen Raum und Gewicht die grösstmögliche Leistung einzubauen, um einerseits auch einen Streckenverkehr auf der Strecke *Aix-les-Bains–La Roche-sur-Foron* durchführen zu können und anderseits genügende Leistungsreserve für die hohen Anforderungen des Vorortsbetriebes zu erhalten. Die Stundenleistung wurde auf ca. 1100 kW festgelegt.

Die Leistungsdaten des Motorwagens Z 9051 sind:

Leistungsdaten		dauernd	1 Stunde	maximal
Leistung an der Welle				
	PS	1360	1560	—
	kW	1000	1150	—
bei Geschwindigkeit				
	km/h	57,5	50	80[1])
Zugkraft am Rad	kg	6250	8150	13 400[2])

[1]) und [2]) nicht gleichzeitig auftretend

Es wurde besonders danach getrachtet, die *elektrische Ausrüstung* möglichst zu vereinfachen. Sie umfasst auf der Hochspannungsseite einen Stromabnehmer und versuchsweise — an Stelle eines

[2]) [1, 2] siehe Literaturnachweis S. 751.

Hauptschalters — lediglich eine umschaltbare Doppel-Dachsicherung. Der Stufentransformator mit Ölumlaufkühlung befindet sich unter dem Wagenboden. Die vier Einphasen-Kollektor-Triebmotoren von je 288 kW Stundenleistung haben Fremdventilation und wurden für die Anforderungen des Vorortsbetriebes besonders bemessen und ausgelegt. Sie übertragen ihr Drehmoment über einen gefederten Oerlikon-Lamellenantrieb auf die Triebachsen von 1100 mm Raddurchmesser. Die Geschwindigkeitsregulierung erfolgt dank der sehr geschmeidigen Charakteristik der Triebmotoren in 13 Stufen mit nur schwachen Zugkraftsprüngen. Die Steuerung besorgen elektropneumatische Einzelhüpfer mit automatischer Anfahrsteuerung durch elektromotorischen Schaltapparat. Als Motoren für die Hilfsbetriebe kommen hier Einphasen-Asynchron-Kondensatormotoren zur Verwendung.

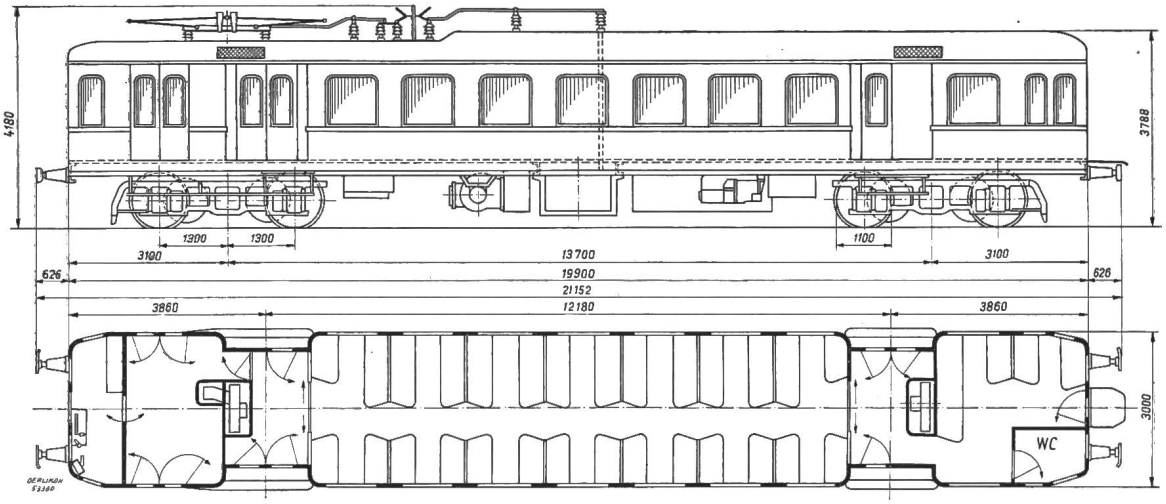


Fig. 24
Typenbild des 1150-kW-Motorwagens der SNCF für Vorortsbetrieb, für Einphasenstrom 50 Hz, 20 kV

Die *Hilfsbetriebe* umfassen:

1 *Ölkühlgruppe* für den Transformator;
2 *Triebmotorventilatoren;*
1 *Oerlikon-Kolbenkompressor* für 1000 l/min Förderleistung bei 9 kg/cm²;
1 *Umformergruppe* für Batterieladung.

In ihren Grundzügen unterscheidet sich die elektrische Ausrüstung nicht wesentlich von einer solchen für 16²/₃ Hz. Interessant ist der Gewichtsvergleich für die verschiedenen Stromsysteme. Die ursprüngliche Gleichstromausrüstung aus dem Jahre 1925 wiegt 20 t für eine Stundenleistung von 720 kW. Die neue elektrische Ausrüstung für 50 Hz wiegt bei 60 % höherer Stundenleistung ebenfalls knapp 20 t, d. h. gleich viel wie für die neuen Motorwagen für 16²/₃ Hz der Schweizerischen Bundesbahnen von 1200 kW.

Im Gegensatz zu einer allgemein verbreiteten Meinung eignet sich der Einphasen-Triebmotor für 50 Hz besonders gut für den Vorortsverkehr mit seinen hohen Anfahrbeschleunigungen, weil die Zone schwieriger Kommutation rasch durchfahren wird. Die grosse Zugkraft bei den höheren Geschwindigkeiten ergibt bis gegen Ende der Beschleunigungsperiode, im Gegensatz zu Gleichstromfahrzeugen, eine hohe Beschleunigung.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Die für die *elektrische Traktion mit Einphasenstrom 50 Hz* realisierten Konstruktionen wie auch die bisher erreichten Resultate haben zu einem weit höheren Entwicklungsstand geführt, als zu Beginn der diesbezüglichen Studien erhofft werden konnte. Die Energieversorgung und -verteilung, die Fahrleitungen und die elektrische Ausrüstung der Triebfahrzeuge, mit Ausnahme der Triebmotoren, stellen keine besondern Probleme. Auch für die Triebmotoren konnten zweckmässige Konstruktionen entwickelt werden, die gestatten, alle für die Grosstraktion erforderlichen Betriebsbedingungen zu erfüllen. Durch geeignete Wahl der Zahnrad-

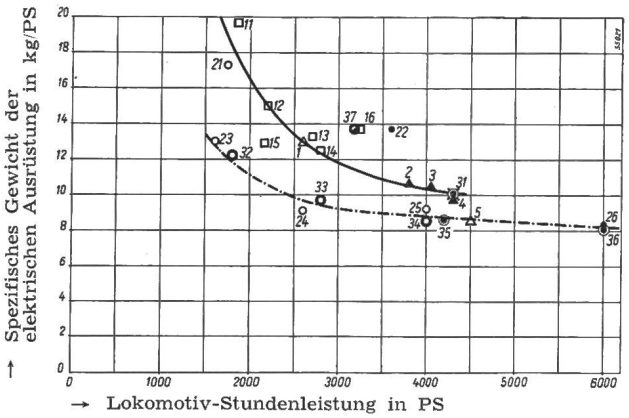


Fig. 25
Vergleich der Gewichte der elektrischen Ausrüstungen der modernsten in Betrieb gesetzten und im Bau befindlichen laufachslosen Drehgestell-Lokomotiven für verschiedene Stromsysteme

Gleichstrom 1500 V: △ Bo Bo ▲ Co Co und Bo Bo Bo
Gleichstrom 3000 V: ▭ Bo Bo
Einphasenstrom 16⅔ Hz: ○ Bo Bo ● Co Co
Einphasenstrom 50 Hz: ○ Bo Bo ◑ Bo Co ◉ Co Co
(Weitere Angaben zu den Pos. 1...37 sind in Tabelle II zusammengestellt)

übersetzung kann jeder Lokomotivtyp der gewünschten Zugkraft oder Geschwindigkeit angepasst werden. Ausserdem lassen sich leichte Triebfahrzeuge bis auf etwa 75 kW herab ohne Schwierigkeiten als Leichttriebwagen, Rangiertraktoren usw. bauen.

In Bezug auf das *Gewicht der elektrischen Ausrüstung* halten die Triebfahrzeuge für Einphasenstrom 50 Hz den Vergleich mit den andern Systemen ohne weiteres aus. In Fig. 25 sind die spezifischen Gewichte einiger der neuesten in Betrieb gesetzten oder noch im Bau befindlichen BoBo- und CoCo-Lokomotiven für verschiedene Stromsysteme zusammengestellt. Daraus geht hervor, dass für in der Schweiz gebaute Lokomotiven für Einphasenstrom $16^2/_3$ und 50 Hz die elektrische Ausrüstung praktisch das gleiche Gewicht für beide Frequenzen aufweist. Demgegenüber sind die entsprechenden Gewichte anderer Lokomotiven, gleich welchen Stromsystems, durchwegs grösser.

ausgerüstet werden, wie sie heute für 3000 V Gleichstrom gebräuchlich sind, so lassen sich bei niedrigen Beanspruchungen sehr stark überlastbare Motoren bauen. Die beim heutigen Stand nun gegebene Möglichkeit, *Einzelmotoren für 50 Hz von 736 kW pro Achse* einzubauen, erlaubt Leistungen, wie sie bisher nur von wenigen Grosslokomotiven erreicht wurden.

Dank der *Société Nationale des Chemins de Fer Français,* welche durch ihre Initiative die Möglichkeit gab, Prototyp-Fahrzeuge verschiedener Auslegung zu bauen, klären sich die Probleme im Laufe der Entwicklungsarbeiten. Heute können diese bedeutend besser beurteilt werden als vor der Ausführung der ersten Triebmotoren. Nach der Inbetriebsetzung der Prototypen werden die Betriebsergebnisse den weitern Entwicklungen und Verbesserungen zugrunde gelegt werden können. Der erste von der Maschinenfabrik Oerlikon gebaute Triebmotor

Angaben zu den Pos. 1...37 in Fig. 25 Tabelle II

Lokomotiven für Gleichstrom 1500 V:			
1 Société Nationale des Chemins de Fer Français	BoBo	8101–8236	Inbetriebsetzung 1947...1950 und im Bau
2 Société Nationale des Chemins de Fer Français	CoCo	6001	Inbetriebsetzung 1949
3 Société Nationale des Chemins de Fer Français	BoBoBo	6002	Inbetriebsetzung 1949
4 Société Nationale des Chemins de Fer Français	CoCo	7001–7002	Inbetriebsetzung 1949 und im Bau
5 Société Nationale des Chemins de Fer Français	BoBo	9001–9002	im Bau
Lokomotiven für Gleichstrom 3000 V:			
11 Chemins de Fer Marocains	BoBo		Inbetriebsetzung 1949/1950
12 Société Nationale des Chemins de Fer Belges .	BoBo	100 km/h	Inbetriebsetzung 1949/1950
13 Société Nationale des Chemins de Fer Belges .	BoBo	125 km/h	Inbetriebsetzung 1950
14 Société Nationale des Chemins de Fer Belges .	BoBo	130 km/h	Inbetriebsetzung 1950
15 Italienische Staatsbahnen	BoBo	Serie E 424	Inbetriebsetzung 1943 ff.
16 Italienische Staatsbahnen	BoBoBo	Serie E 636	Inbetriebsetzung 1939 ff.
Lokomotiven für Einphasenstrom $16^2/_3$ Hz:			
21 Schwedische Staatsbahnen	BoBo	Typ Hg	Inbetriebsetzung 1947
22 Schwedische Staatsbahnen	CoCo	Typ M	Inbetriebsetzung 1944
23 Rhätische Bahn.	BoBo	601–604	Inbetriebsetzung 1947
24 Schweizerische Bundesbahnen	BoBo, Re $^4/_4$	401–450	Inbetriebsetzung 1946...1950
25 Bern–Lötschberg–Simplon	BoBo, Ae $^4/_4$	251–256	Inbetriebsetzung 1944...1949 und im Bau
26 Schweizerische Bundesbahnen	CoCo, Ae $^6/_6$	11401–11402	im Bau
Lokomotiven für Einphasenstrom 50 Hz:			
31 Société Nationale des Chemins de Fer Français	CoCo	6051 *)	Inbetriebsetzung 1950
32...36 Ausführungsreife Projekte der Maschinenfabrik Oerlikon, gemäss Tab. I	BoBo BoBo BoBo CoCo CoCo		
37 Ungarische Staatsbahnen.	BoCo		im Bau

*) Auch für Zusatzbetrieb mit Gleichstrom 1500 V

Wenn auch zugegeben wird, dass Gleichstrom- und Einphasenstrom-Lokomotiven gleicher Nennleistung in Bezug auf ihre Ausnützung nicht ohne weiteres verglichen werden können, indem die Gleichstromlokomotiven in der Regel die Ausnützung der Stundenleistung bei kleinerer Geschwindigkeit zulassen, die Einphasenlokomotiven, insbesondere für 50 Hz, jedoch grosse Zugkräfte bei hohen Geschwindigkeiten ermöglichen, so zeigt der Vergleich trotzdem eindrücklich, dass Triebfahrzeuge für Einphasenstrom 50 Hz und Direktmotoren mit Gewichten gebaut werden können, die für modernste Lokomotiven normal sind. Wenn solche Triebfahrzeuge mit Motoren von gleichem Gewicht

erfüllt reichlich alle Erwartungen und hat sehr wertvolle Hinweise für die Weiterentwicklung der neuen Motortypen gegeben.

Wir wissen, dass ein Traktionssystem nur lebensfähig ist, wenn der Unterhalt der Triebmotoren und insbesondere der des Kollektors gering ist und dass daher das Verhalten des Triebmotors im Betrieb für den Erfolg des Systems massgebend sein wird.

Wenn sich die hervorragenden Prüffeldversuche im Betrieb bestätigen, so werden Gleichrichter- und Umformerlokomotiven niemals den gleichen Grad von Einfachheit und Robustheit aufweisen wie Lokomotiven mit Einphasen-Kollektormotoren. Trotzdem erlaubt Einphasenstrom 50 Hz — mehr als an-

dere Stromsysteme — eine grosse Anzahl von Lösungen.

Die SNCF gedenkt auf Grund der bisher erreichten Resultate das Anwendungsgebiet der Elektrifikation mit Einphasenstrom 50 Hz über ihre ursprünglichen Absichten hinaus auszudehnen.

Die Entwicklungsarbeiten der Triebmotoren für 50 Hz werden auch ihre Rückwirkungen auf die Verbesserung der Gleichstrom- und Einphasenmotoren $16^2/_3$ Hz haben. Es ist nicht zu verkennen, dass Motoren für niedrigere Frequenz stets einfacher und in Bezug auf die Abnützung der Kollektoren und Bürsten vollkommener sein werden. Demgegenüber wird der Motor für 50 Hz hinsichtlich geschmeidiger Charakteristik, Sicherheit gegen Rundfeuer, Über- und Durchschläge wesentlich vorteilhafter sein. Ferner können in Bezug auf die Hilfsbetriebe-Motoren, die besonders bei Gleichstrom eine nicht unbedeutende Quelle von Störungen darstellen und einen wesentlichen Unterhalt bedingen, ganz bedeutende Vorteile erwartet werden.

Um die Eignung und die Vor- und Nachteile eines Stromsystems zu beurteilen, muss das Ganze, also *die ortsfesten Anlagen und die Triebfahrzeuge*, in Betracht gezogen werden.

Literaturnachweis

[1] Electrification partielle du réseau de la Cie d'Orléans. Par M. Parodi. Revue générale des chemins de fer 1928. Dunod, Paris.

[2] Les futurs éléments automoteurs de banlieue de la Région du Sud-Est. Revue générale des chemins de fer, février 1948.

[3] Die elektrische Traktion mit Einphasenwechselstrom auf der SBB-Linie Seebach—Wettingen. Von Hugo Studer, Zürich. Schweiz. Bauzeitung, Band 51, Nr. 15...20 (April/Mai 1908).

[4] Seebach—Wettingen, die Wiege der Elektrifizierung der Schweiz. Bundesbahnen. Von A. Dudler. Bulletin Oerlikon Nr. 239 (September/Oktober 1942).

[5] Die Elektrisierung der Linie Budapest—Hegyeshalom. Von L. von Verebély, Budapest. Elektrische Bahnen, VIII. Jahrg., Heft 2 (Febr. 1932).

[6] Die Elektrifizierung der Eisenbahnlinie Budapest—Hegyeshalom nach dem Kandoschen Phasenumformersystem. Druck der Athenaeum-Verlags- und Druckerei-AG., Budapest (Oktober 1943).

[7] Betriebserfahrungen auf der mit Wechselstrom 50 Hz elektrisierten Linie Budapest—Hegyeshalom. Von L. von Verebély, Budapest. Elektrische Bahnen, X. Jahrgang, Heft 4 (April 1934).

[8] *Ganz:* Neuere Entwicklung des 50-Perioden-Phasenumformer-Traktionssystems. Ganz & Co., Budapest 10.

[9] Elektrisierung der Höllental- und Dreiseenbahn. Von Roser.
Die Fahr- und Speiseleitungen der Höllental- und Dreiseenbahn. Von Jakob Schmitt.
Das Unterwerk der Höllental- und Dreiseenbahn. Von Georg Naderer.
Die Stromversorgung der Höllental- und Dreiseenbahn aus dem Netz des Badenwerkes. Von Fettweis. — Aus: Elektrische Bahnen, XII. Jahrgang, Heft 9 (September 1936).

[10] Die elektrischen Lokomotiven für 50 Hz der Höllental- und Dreiseenbahn. Von Otto Michel, München. Die elektrische Ausrüstung der AEG-Stromrichter-Lokomotive für die Höllentalbahn, Reihe 244, Nr. 01. Von Hermle und Partzsch, Berlin.
Elektrische Ausrüstung der BBC-Gleichrichter-Lokomotive, Reihe E 244, Nr. 11. Von Hermann Hutt.
Die elektrische BoBo-Lokomotive, Reihe 244, Nr. 21, der Siemens-Schuckert-Werke für die Höllentalbahn. Von Paul Herrmann.
Die elektrische Krupp-Lokomotive, Reihe 244, Nr. 31, für die Höllentalbahn. Von L. Schön.
Der Messwagen für die elektrischen Triebfahrzeuge auf der Höllentalbahn. Von E. W. Curtius. — Aus: Elektrische Bahnen, XIII. Jahrgang, Heft 3/4 (März/April 1937).

[11] Ergebnisse des 50 Hz-Betriebes auf der Höllentalbahn. Von R. Fritsche und Ernst Kilb. Aus: Elektrische Bahnen, XX. Jahrgang, Heft 3/4 (März/April 1944).

Adresse des Autors:
H. Leyvraz, Oberingenieur der Maschinenfabrik Oerlikon, Zürich 50.

Einiges über die Physiologie der Blendung und das Sehen bei herabgesetzter Beleuchtung

Vortrag, gehalten an der Lichttechniker-Tagung des SBK am 24. November 1949 in Bern,

von *H. Goldmann*, Bern

612.843.615

Von der Definition der Blendung in den Schweizerischen Allgemeinen Leitsätzen für elektrische Beleuchtung ausgehend und sie ergänzend, untersucht der Autor den physiologischen und psychologischen Aspekt dieser Empfindung, sowie einige in neuerer Zeit erforschte mathematisch erfassbare Zusammenhänge. Er beschäftigt sich im besonderen mit der durch Blendung herabgesetzten Sehleistung des menschlichen Auges und deren Auswirkung auf den nächtlichen Strassenverkehr.

Partant de la définition de l'éblouissement dans les Recommandations générales sur l'éclairage électrique en Suisse, et en la complétant, l'auteur examine les aspects physiologique et psychologique de cette sensation, ainsi que quelques relations mathématiques découvertes ces derniers temps. Il s'occupe spécialement du pouvoir de visibilité de l'œil humain réduit par l'éblouissement et de l'effet de ce dernier sur la circulation routière de nuit.

«Blendung ist die vorübergehende oder dauernde Verminderung der Sehfähigkeit des Auges, welche durch zu hohe Leuchtdichte oder durch zu starke Kontraste im Gesichtsfeld verursacht wird. Sie beeinträchtigt die Sehleistung und damit die gesamte Leistungsfähigkeit des Menschen. Sie erzeugt Unbehagen und Unsicherheit und wird dadurch Ursache von Unglücksfällen.» Das ist die Definition, die die Schweizerischen Allgemeinen Leitsätze für elektrische Beleuchtung [1]) für Blendung geben. Sie ist insofern unvollständig, als sie das Blendungsgefühl, das nicht mit einer nennenswerten Herabsetzung der Sehfähigkeit einhergeht, trotzdem aber die Leistungsfähigkeit der Menschen beeinträchtigt, nicht mitberücksichtigt. Diese Art

[1]) Publikation Nr. 144 des SEV.