

# Vollbahnbetrieb mit einphasigem Wechselstrom von 50 Perioden: Vortrag

Autor(en): **Bodmer, C.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **69 (1951)**

Heft 6

PDF erstellt am: **25.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-58803>

## **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.

# Vollbahnbetrieb mit einphasigem Wechselstrom von 50 Perioden

DK 621.33.025.1

Vortrag gehalten am 15. November 1950 im Zürcher Ingenieur- und Architekten-Verein von C. BODMER, Oberingenieur der Maschinenfabrik Oerlikon, Zürich

## 1. Einleitung

Die Eisenbahn verdankt ihr Werden der Kolbendampfmaschine. Ein halbes Jahrhundert herrschte die Dampflokomotive allein. Gegen die Jahrhundertwende setzte die elektrische Traktion ein, und etwa 20 Jahre später erschien der Dieselmotor als Traktionsmaschine. Seit jüngster Zeit fahren auch Gasturbinen-Lokomotiven. Wie die elektrischen Lokomotiven benützen fast alle Diesel- und Gasturbinen-Lokomotiven den Elektromotor und zwar den Kollektormotor als Zugmaschine.

Heute scheint die Dampflokomotive ihre Vormachtstellung zu verlieren aus einem Grund, den ich am besten mit folgendem Ausspruch von Dr. Vierfuss, Vizepräsident der Studienkommission der Ruhr-Elektrifikation, angeben kann: «Wir sitzen auf der Kohle, aber wir dürfen es uns künftig nicht mehr leisten, hochwertige Kohle in Dampflokomotiven mit 2 bis 3 % Wirkungsgrad zu verbrennen». Diesel- und Elektrolokomotive arbeiten mit verhältnismässig hohem Wirkungsgrad, die Diesellokomotive mit etwa 25 %, die Elektrolokomotive mit etwa 80 %<sup>1)</sup>.

Schon seit dem Aufkommen der elektrischen Bahnen und mit dem Entstehen der Landesnetze hat man erkannt, dass die direkte Verwendung von Industriestrom, also von Drehstrom oder Einphasenstrom von 50 Hz erwünscht wäre. Im Jahre 1902 propagierte Emil Huber-Stockar, der damalige Direktor der Maschinenfabrik Oerlikon, hochgespannten 50-periodigen Wechselstrom für die Fahrleitung<sup>2)</sup> und erkannte wohl mit Dr. Hans Behn-Eschenburg, dass der Reihenschluss-Kollektormotor (Seriemotor) der beste Bahnmotor sei. Die erste Lokomotive für die Versuchsstrecke Seebach-Wettingen

war mit Wechselstrom von 15 kV und 50 Hz gespeisen, der in einem rotierenden Umformer in Gleichstrom verwandelt wurde. Als Triebmotoren dienten zwei Gleichstrom-Seriemotoren. Wie H. Behn-Eschenburg mit Zeitgenossen feststellen musste, war es ausgeschlossen, einen brauchbaren Seriemotor für 50 Hz zu konstruieren. Dagegen gelang es, für eine viel kleinere Frequenz, d. h. damals 14 1/3, später 16 2/3 Hz, nach der Idee von H. Behn brauchbare Kollektormotoren zu bauen, wie die zweite Seebach-Wettinger-Lokomotive im Jahre 1906 bewiesen hat.

In der Folge wurde die Frequenz 16 2/3 = 50/3 in Deutschland, Oesterreich, Schweden, Norwegen und der Schweiz gewählt, während man in den USA 25 Hz festsetzte. Daneben entwickelten einzelne Länder kollektorlose Systeme. So fand in Italien die Drehstrom-Traktion ziemlich grosse Verbreitung; in der Schweiz ist sie nur vereinzelt ausgeführt worden (Gornergrat, Stansstad-Engelberg, Burgdorf-Thun, Simplon, Jungfrau). In Ungarn wird seit etwa 1925 bis heute auf der Fahrleitung Einphasen-Wechselstrom von 50 Hz und 16 kV angewendet mit Phasen-Umformer auf der Lokomotive, in dem der Einphasenstrom in Drehstrom verwandelt wird. Grosse Verbreitung hat ausser Wechselstrom von 16 2/3 Hz Gleichstrom mit 600, 1500 und 3000 Volt gefunden.

## 2. Die gegenwärtigen Versuchsbetriebe in Deutschland und Frankreich mit Wechselstrom von 50 Hz

Im Jahre 1936 begann die Deutsche Reichsbahn einen Grossversuch mit Einphasen-Wechselstrom von 50 Hz, indem sie die 56 km lange Höllentalbahn Freiburg-Titisee und die Dreiseisenbahn Titisee-Seebrugg und Neustadt mit Anlagen für diese Stromart (Fahrdratspannung 20 kV) versah und vier verschiedene Lokomotiven beschaffte, nämlich eine Lokomotive mit Einphasen-Kollektormotoren von den Siemens-

<sup>1)</sup> Hierzu s. Diskussionsbeitrag von Dr. P. Moser.  
<sup>2)</sup> Vortrag im Zürcher Ingenieur- und Architekten-Verein vom 27. Februar 1902, SBZ Bd. 39, S. 107, 113 und 129 (S. 15. u. 22. März 1902).

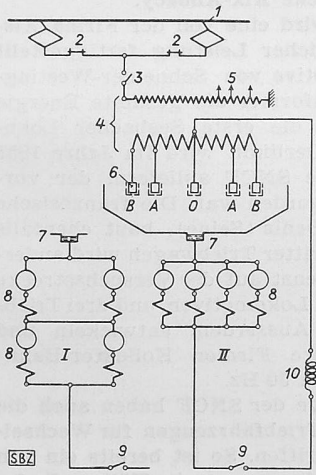


Bild 1. Prinzipschema der Schaltung der AEG-Lokomotive mit Gleichrichter, Spannungsregelung durch Gittersteuerung und Motorgruppierung. 1 Fahrdrat 20 kV, 2 Trennmesser, 3 Hauptschalter, 4 Haupttransformator, 5 Anzapfungen für 1000, 800, 220 V für Heizung u. Hilfsbetriebe, 6 Anoden mit Gitter, A für einen untern, B für einen obern Spannungsbereich, 7 Kathode, 8 Fahrmotoren, 9 Schnellwechsler, 10 Glättungsdrossel, I Reihenschaltung der Fahrmotorengruppen, II Parallelschaltung

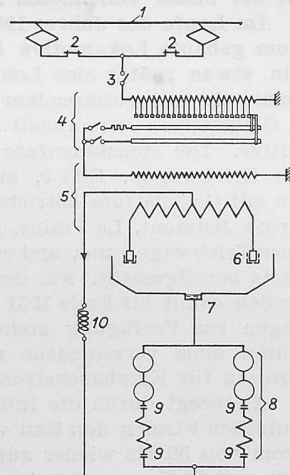


Bild 2. Prinzipschema der Schaltung der BBC-Lokomotive mit Gleichrichter, Hochspannungssteuerung. 1, 2, 3, 7, 8, 10 wie Bild 1, 4 Reguliertransformator (Hochspannungssteuerung), 5 Gleichrichtertransformator, 6 Anoden mit Schutzgittern zur Abschaltung der Motoren (normal u. bei Kurzschluss), 9 Fahrwenderschütze

Zu Bild 4: 1, 2, 3, 4 wie Bild 1, 5 Anzapfung für Heizung für 1000 und 800 V, 6 Hauptschütz und Funken-schütz, 7 Erregerumformer, 8 Gleichstrom für Steuerung, 9 Drehstrom für Hilfsmotoren, 10 Gleichstrom für das Feld der Zwischenläufer, 11 Hilfsschütz und Uberschaltwiderstand, 12 Einphasenmotor mit Zwischenläufer (Vordermotor), läuft bei der Stufe III leer und liefert Drehstrom für den Hintermotor, 13 Drehstrommotor (Hintermotor), 14 Wasserwiderstand. Stufe I 34 km/h (Kaskade), Stufe II 59 km/h (Vordermotor arbeitet allein), Stufe III 85 km/h (Hintermotor arbeitet allein)

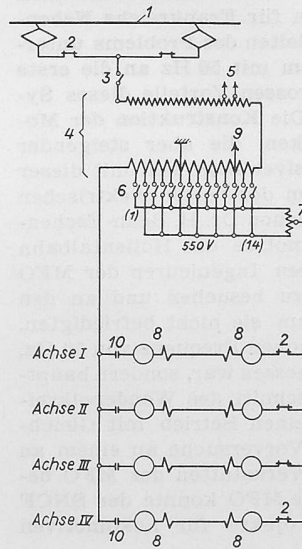


Bild 3. Prinzipschema der Schaltung der SSW-Lokomotive mit Kollektormotoren für 50 Hz. Hüpfsteuerung, 1, 2, 3, 4, 8 wie Bild 1, 5 Anzapfungen für 1000 und 800 V für Heizung, 6 Nockenschaltwerk, Stufen (1) bis (14), 7 Kollektor-Feinregler, 9 Anzapfung 220 V für Hilfsbetriebe, 10 Trennschütz

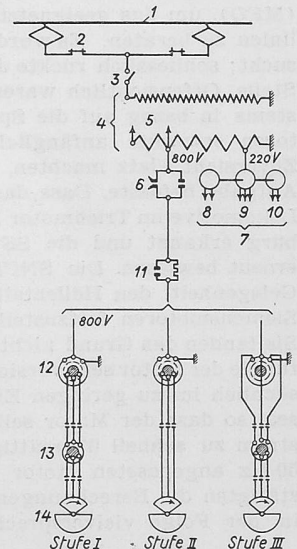


Bild 4. Prinzipschema der Schaltung der Krupp-Lokomotive mit kollektorlosen Triebmotoren (vier Einphasenmotoren mit Zwischenläufern und vier Drehstrommotoren mit Anlasswiderstand im Rotorkreis. Das Schema zeigt nur die einer Triebachse zugeordneten Motoren in den drei Gruppierungen bzw. Schaltstufen). Legende siehe unten.

Schuckert-Werken, Berlin (SSW) ähnlich den üblichen Einphasenlokomotiven für 16 2/3 Hz, jedoch mit je zwei in Reihe geschalteten Triebmotoren pro Achse; ferner zwei Lokomotiven mit Gleichstrommotoren, die über einen Transformator und einen Gleichrichter gespeist werden. Eine dieser beiden Lokomotiven wurde von Brown Boveri Mannheim geliefert und ist mit Hochspannungssteuerung und gewöhnlichem Gleichrichter ausgerüstet, die andere ist ein Erzeugnis der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft Berlin (AEG); sie weist einen Transformator mit fester Übersetzung aber gittergesteuertem Gleichrichter auf. Die vierte Lokomotive stammt von der Firma Friedrich Krupp in Essen. Jede Triebachse ist mit einem Einphasen-Asynchronmotor mit Zwischenläufer als Vormotor und einem Drehstrom-Asynchronmotor als Hintermotor ausgerüstet. Die Bilder 1 bis 4 zeigen die Prinzipschemata dieser Versuchslokomotiven.

Man sieht schon aus der Verschiedenheit der Lokomotiven, wie problematisch die gewählten Lösungen waren. Nach gründlichen Versuchen und Messungen wurde der Betrieb mit diesen vier Lokomotiven bis heute durchgehalten. In einem ausführlichen Bericht in der Zeitschrift «Elektrische Bahnen» vom März 1944 bemerken Dipl. Ing. Rudolf Fritsche und Dr. Ernst Kilb, jetzt Abteilungspräsident der Deutschen Bundesbahnen in München, «dass trotz aller Bemühungen über die Lokomotiven nach achtjährigem Betrieb kein befriedigendes Gesamturteil gefällt werden kann». Nach dem selben Bericht sind die Gleichrichter zu empfindlich, die Krupplokomotive hat eine zu geringe Regelstufenzahl (dieser Nachteil besteht bei allen kollektorlosen Triebfahrzeugen) und bietet Schwierigkeiten beim Vorspanndienst. Die SSW-Lokomotive mit Einphasen-Kollektormotoren war im Vorsprung, befriedigte aber wegen Schwierigkeiten an den Kollektoren doch nicht restlos.

In der Besetzungszeit führten die Franzosen die Versuche auf der Höllentalstrecke mit grosser Ausdauer weiter, da sie eine Möglichkeit sahen, das hier gewählte System für ihre Nebenlinien anzuwenden, das gegenüber dem ihrigen mit 1500 V Gleichstrom wirtschaftlicher erschien. Im Jahre 1945 besuchte eine Delegation der Société Nationale des Chemins de Fer Français (SNCF) im Auftrag ihres damaligen Vize-Generaldirektors Louis Armand die Maschinenfabrik Oerlikon (MFO), um das geeignetste System für Frankreichs Nebenlinien zu beraten. Es wurden alle Seiten des Problems untersucht; schliesslich rückte das System mit 50 Hz an die erste Stelle. Offensichtlich waren die grossen Vorteile dieses Systems in bezug auf die Speisung. Die Konstruktion der Motoren erweckte anfänglich Bedenken, die aber steigender Zuversicht Platz machten, je intensiver man sich mit dieser Aufgabe befasste. Dass das Problem der besten elektrischen Lokomotive im Triebmotor lag, hat schon Dr. H. Behn-Eschenburg erkannt und die SSW-Lokomotive der Höllentalbahn erneut bewiesen. Die SNCF gab den Ingenieuren der MFO Gelegenheit, den Höllentalbetrieb zu besuchen und an den Siemensmotoren festzustellen, warum sie nicht befriedigten. Sie fanden den Grund nicht in der hohen Frequenz von 50 Hz, für die der Motor sehr vorsichtig bemessen war, sondern hauptsächlich im zu geringen Eisenquerschnitt des Wendepolkreises, so dass der Motor selbst für einen Betrieb mit Gleichstrom zu schnell übersättigt war. Vorversuche an einem an 50 Hz angepassten Motor in den Werkstätten der MFO bestätigten die Berechnungen, und die MFO konnte der SNCF in der Folge vielversprechende Projekte für Lokomotiven

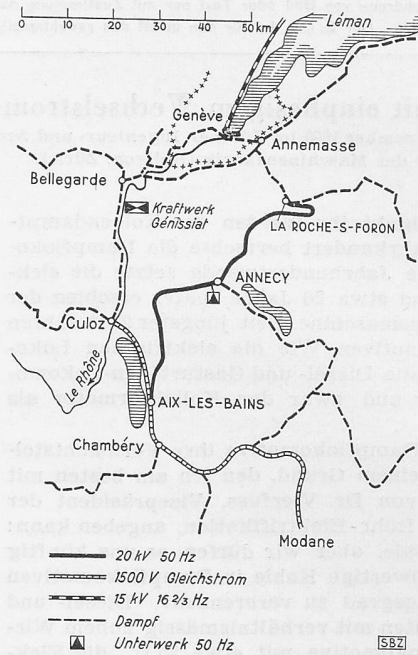


Bild 5. Die Versuchsstrecke der SNCF mit Anschlusslinien

und Triebwagen ausarbeiten, die sogar für Hauptlinien interessant erschienen. Die SNCF beschloss in der Folge, eine Versuchsanlage zu erstellen und wählte dazu die 80 km lange Strecke Aix-les-Bains-Annecy-La Roche sur Foron, Bild 5. Das Längenprofil, Bild 6, ist mit demjenigen der Linie Bern-Luzern vergleichbar. Beide Linien sind einspurig, beide weisen Steigungen bis 20 ‰ auf mit 522 m bzw. 416 m Höhendifferenz. Die SNCF bestellte der MFO eine C<sub>0</sub>-C<sub>0</sub>-Lokomotive<sup>3)</sup> und die elektrische Ausrüstung für einen Triebwagen. Gleichzeitig veranlasste sie bei französischen und deutschen Firmen Lokomotiv- und Triebwagenlieferungen. Am 9. September 1950 konnte die MFO die erste fertige Lokomotive, Bilder 7 und 8, an das Depot Chambéry abliefern. Zwei Tage nachher begannen die Probefahrten. Nach Fertigstellung der Fahrleitung fuhr der erste Zug am 16. September in Annecy ein, begleitet von Generaldirektor L. Armand, der, wie er Pressevertretern gegenüber erklärte, nicht als Leiter der SNCF, sondern als Ingenieur die Lokomotive im Betrieb kennen lernen wollte. Seither ist die Lokomotive schon vielen Versuchen auf der Strecke unterworfen worden und versieht daneben den fahrplanmässigen Dienst mit 540 km Tagesleistung auf der bisher vollendeten Strecke Aix-Annecy.

Im Laufe des Jahres 1951 wird eine von der Firma Alsthom gebaute Lokomotive ähnlicher Leistung fertiggestellt sein, etwas später eine Lokomotive von Schneider-Westinghouse, die mit rotierendem Umformer die gesamte Energie in Gleichstrom verwandelt wie die erste Seebacher Lokomotive. Die Maschinenfabrik Oerlikon wird im Jahre 1951 den Triebwagen, Bild 9, an die SNCF abliefern, der vorher mit Gleichstrom betrieben worden war. Die französische Firma Jeumont, La Plaine, St. Denis (Seine), baut ebenfalls einen Triebwagen um, und ein dritter Triebwagen wird anderwärts bereitgestellt. Für den Dienst auf der Versuchsstrecke werden somit bis Ende 1951 drei Lokomotiven und drei Triebwagen zur Verfügung stehen. Ausserdem entwickeln und prüfen auch verschiedene andere Firmen Kollektor-Bahnmotoren für Einphasenstrom von 50 Hz.

Angeregt durch die Initiative der SNCF haben auch die deutschen Firmen den Bau von Triebfahrzeugen für Wechselstrom von 50 Hz wieder aufgegriffen. So ist bereits ein von 16 2/3 auf 50 Hz umgebauter Triebwagen an die Höllentalbahn

<sup>3)</sup> Mechanischer Teil von der Schweizerischen Lokomotiv- und Maschinenfabrik Winterthur (SLM).

Bild 6. Längenprofil der Versuchsstrecke. Längen 1 : 600000, Höhen 1 : 25000

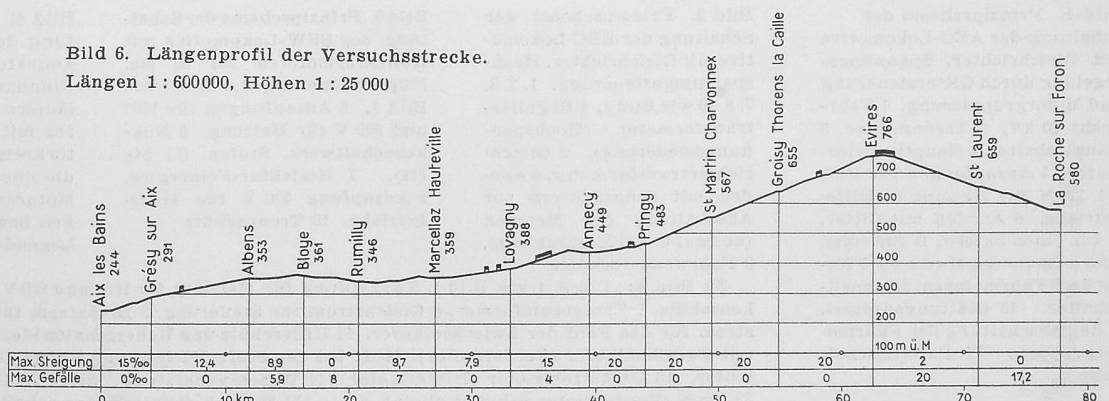
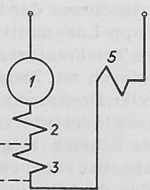


Bild 10. Prinzipschema des Serie-Kollektor-Motors. 1 Anker mit Kollektor 2 Kompensationswicklung 3 Wendepolwicklung 4 Wendepolshunt 5 Erregerwicklung



abgeliefert worden. Ferner hat eine Lokomotive mit 600 kW-Motoren (je zwei Anker zu je 300 kW auf einer Welle) Versuchsfahrten durchgeführt. Man erkennt hieraus, dass die Traktion mit Einphasenstrom von 50 Hz in die entscheidende Versuchsphase eingetreten ist.

**3. Die besonderen Schwierigkeiten des 50 Hz-Systems und ihre Ueberwindung**

Die Stromsysteme für die Vollbahntraktion sind heute noch umstritten, aber unbestritten ist die Motorart: Nur der Reihenschluss-Kollektormotor erfüllt die Forderungen, die an einen Bahn-Triebmotor gestellt werden müssen:

Er bietet die Möglichkeit feinstufiger Geschwindigkeits-Regulierung; er entwickelt eine mit dem Strom stetig zunehmende Zugkraft, er weist eine weiche Kennlinie auf, d. h. mit zunehmender Zugkraft nimmt bei ihm die Geschwindigkeit ab; er ist verhältnismässig unempfindlich gegen Spannungssprünge. Das Schema des Motors zeigt Bild 10. Für Wechselstrom ist bekanntlich ein ohmscher Widerstand (Shunt) parallel zur Wendepolwicklung nötig. Schon bei der Bemessung von Gleichstrommotoren muss man wegen dem Kollektor gewisse Einschränkungen berücksichtigen, die besonders der höchstmöglichen Spannung eine Grenze setzen. Dies geht aus den folgenden Gleichungen für die Leistung  $P$ , bzw. für die Rotorspannung  $E_r$ , hervor:

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

$$(2) \quad E_r = 2 w \frac{p}{a} \phi \frac{v_k}{t_k} \quad \text{Volt}$$

für  $w p/a = 1$  und weil  $v_k/t_k = f_k \cdot 10^{-2}$  ist, folgt:

$$(3) \quad E_r = 2 \phi f_k \cdot 10^{-2} \quad \text{Volt}$$

Hierin bedeuten:

$P$  die Leistung am Rotorumfang in kW  
 $\phi$  den Magnetfluss in Mio Maxwell (für Wechselstrom Effektivwert)

$\phi_{max}$  den Maximalwert von  $\phi$

$A$  den Strombelag am Anker in Amp/cm

$p$  die Polpaarzahl

$v$  die Rotorumfangsgeschwindigkeit in m/s

$E_r$  die Rotationsspannung (Hauptteil der Motorspannung)

$w$  die Windungszahl zwischen zwei Kollektorlamellen

$a$  die Stromzweigpaarzahl

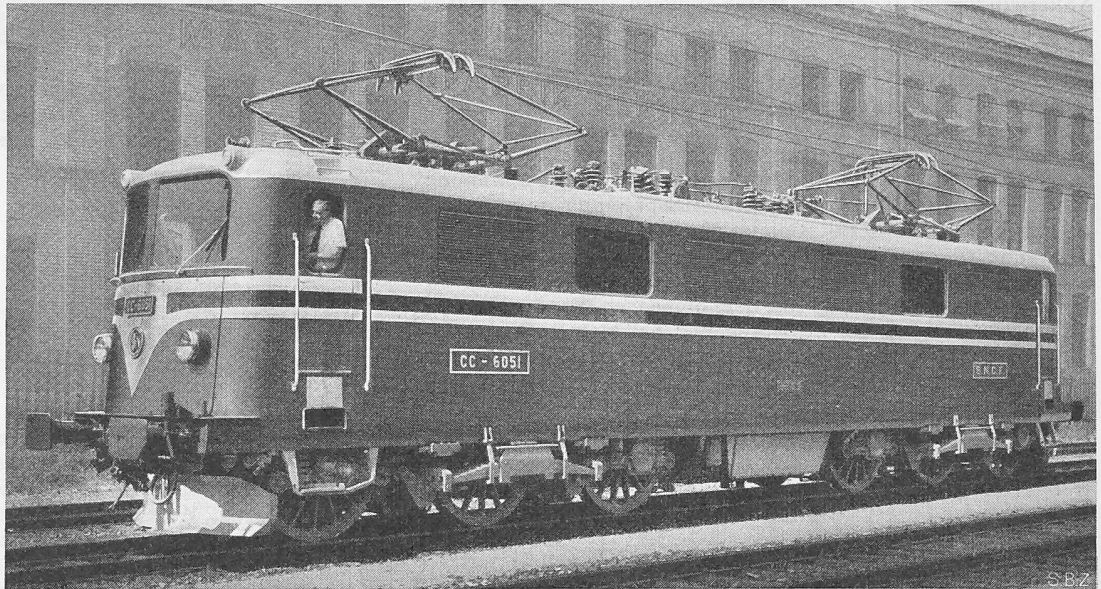


Bild 7. Die C<sub>0</sub>C<sub>0</sub>-Lokomotive Nr. 6051 verlässt die Fabrik in Oerlikon

$w p/a = 1$  für Einfachparallelwicklung

$w p/a = 1/2$  für Zweifachparallelwicklung

$f_k$  die Kollektorlamellenfrequenz in  $s^{-1}$

$f$  die Netzfrequenz

$v_k$  die Kollektorumfangsgeschwindigkeit in m/s

$t_k$  die Kollektorlamellenteilung in cm

$e_m$  die mittlere Lamellenspannung

$D$  den Rotordurchmesser in cm

Nun ist die Spannung  $E_r$  dadurch begrenzt, dass einerseits der Magnetfluss  $\phi$  nicht grösser als etwa 12 Mio Maxwell gewählt werden kann, und andererseits die grösste Kollektorlamellenfrequenz  $f_k$  durch die kleinstmögliche Lamellenteilung  $t_k$  und die grösstmögliche Kollektorumfangsgeschwindigkeit  $v_k$  gegeben ist. Man erhält für Bahnbetrieb als obere zulässige Grenze für zwei in Reihe geschaltete Kollektoren eine Spannung von etwa 3000 V.

Man kann die Gleichung für die Motorleistung  $P$  auch in der Form anschreiben:

$$(4) \quad P = \frac{\pi}{2} \cdot 10^{-3} D A e_m \quad \text{kW}$$

Da die Grösse  $A$  durch die Erwärmung und die Kommutation, die Spannung  $e_m$  durch die Kommutation und die Ueberschlagsicherheit begrenzt sind, ist die mögliche Höchstleistung durch den Durchmesser  $D$ , also durch den verfügbaren Raum begrenzt.

Bei Wechselstrom ist eine weitere Erscheinung zu berücksichtigen. Das mit der Netzfrequenz wechselnde Hauptfeld zwingt nicht nur zum Lamellieren des Stators, um die Wirbelstromverluste klein zu halten; es erzeugt neben dem Drehmoment eine elektromotorische Kraft (EMK) in den

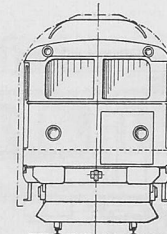
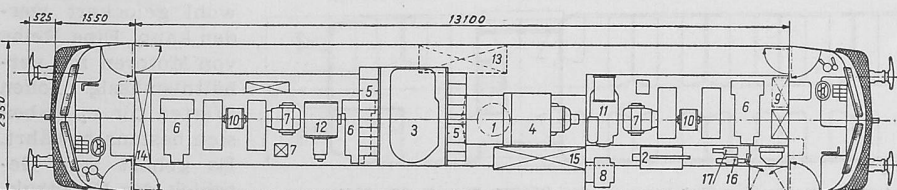
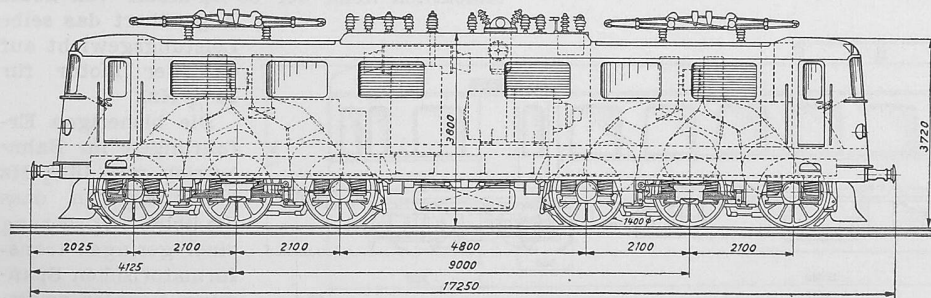


Bild 8. Elektr. Lokomotive C<sub>0</sub>C<sub>0</sub> Nr. 6051 für Einphasenstrom von 20 kV, 50 Hz und für Gleichstrom von 1600 V

- 1 Hauptschalter für Einphasenstrom
- 2 Hauptschalter für Gleichstrom
- 3 Transformator
- 4 Umformer für Gleichstrombetrieb
- 5 Haupthüfper
- 6 Wendeschalter
- 7 Rekuperationsapparate
- 8 Stromart-Umschalter
- 9 Hilfhüfper
- 10 Ventilatorgruppe
- 11 Kompressorgruppe
- 12 Umformergruppe Arno
- 13 Batterie
- 14 Schalttafel
- 15 Widerstand (Wendepolshunt usw.)
- 16 Heizhüfper
- 17 Anlasshüfper der Umformergruppe 4

Ankerwindungen, indem der Motor zugleich als Transformator wirkt. Diese EMK ist in der Polaxe, in der die Kommutation stattfindet, am grössten. Da alsdann die betreffenden Ankerwindungen durch die Bürsten kurzgeschlossen sind, entstehen in ihnen sehr starke Kurzschlussströme, die Kollektor und Bürsten schädigen und ausserdem den Magnetfluss und damit die Zugkraft schwächen.

Im Betrieb ist die transformatorisch erzeugte Spannung durch eine entgegengesetzte Rotationsspannung aufzuheben, die bekanntlich durch Rotation im phasennacheilenden Wendefeld induziert wird. Die Phasennacheilung und die nötige Grösse des Wendefeldes sind durch zweckmässige Bemessung der Wendepole, verbunden mit dem ohmschen Wendepolshunt, leicht zu erzeugen. Im Stillstand und bei kleiner Geschwindigkeit gibt es aber kein anderes Mittel, die transformatorische Spannung unschädlich zu machen, als durch Veringerung des Magnetflusses.

Die in einer Windung induzierte elektromotorische Kraft  $e_t$  ist:

$$(5) \quad e_t = \pi \sqrt{2} \Phi_{\max} f \frac{p}{a} w 10^{-2} \text{ Volt}$$

Diese EMK  $e_t$  darf nach vielseitiger Erfahrung 3 Volt nicht übersteigen.

Für grössere Leistungen kommt nur Parallelwicklung mit einer Windung in Frage; damit wird in Gleichung (5)  $p/a = 1$  und  $w = 1$ ; folglich ist  $e_t$  einzig durch den Magnetfluss  $\Phi_{\max}$  begrenzt. Gemäss Gleichung (1) wird dadurch die Leistung weiter eingeschränkt, denn als einzig freie Grösse bleibt dort die Polpaarzahl  $p$ . Die Leistung pro Pol kann ja nach Gleichung (1) nicht grösser sein, als es die Umfangsgeschwindigkeit  $v$ , der Strombelag  $A$  und der Magnetfluss  $\Phi$  erlauben.

Die Abhängigkeit der Grenzleistung pro Pol  $P_1$  von der elektromotorischen Kraft  $e_t$  und der Netzfrequenz  $f$  ist in der folgenden Gleichung (6), die aus Gleichung (1) durch Eliminierung von  $\Phi = \Phi_{\max}/\sqrt{2}$  mittels Ansatz (5) und für  $p = 1/2$  entsteht, direkt ersichtlich:

$$(6) \quad \text{Leistung pro Pol } P_1 = \frac{A}{20\pi} \frac{e_t}{f} v \text{ kW}$$

Setzt man als Beispiel  $A = 500$ ,  $e_t = 3$  Volt,  $f = 50$  Hz und  $v = 40$  m/s, so wird

$$P_1 = \frac{500}{20\pi} \frac{3}{50} \cdot 40 = 19,2 \text{ kW}$$

Aber auch die maximal mögliche Spannung ist durch die elektromotorische Kraft  $e_t$  und die Netzfrequenz  $f$  beschränkt, wie aus der nachfolgenden Gleichung (7) für die Rotationsspannung  $E_r$  zu ersehen ist, die aus den Gleichungen (3) und (5) folgt:

$$(7) \quad E_r = \frac{e_t}{\pi} \frac{f_k}{f} \text{ Volt wobei } f_k = 100 \frac{V_k}{t_k}$$

Zahlenbeispiel:

$$f_k = \frac{100 \cdot 30}{0,4} = 7500$$

$$E_r = \frac{3}{3,14} \cdot \frac{7500}{50} = 143 \text{ Volt}$$

Die Klemmenspannung des Motors ist 10 bis 30 % höher als die Rotationsspannung  $E_r$ . Die äusserst einfachen Gleichungen bestehen aus Faktoren, die praktisch weitgehend festgelegt sind; deshalb sind der Leistung wie der Spannung bestimmte Grenzen gesetzt. Wir wollen hier die wichtige Tatsache vermerken, dass sich nach den Gleichungen (6) und (7) die Leistung, insbesondere die grösstmögliche Leistung und ebenso die Spannung umgekehrt proportional der Netzfrequenz verändern. Beide sind also bei 50 Hz dreimal kleiner als bei  $16\frac{2}{3}$ . Dies ist der Grund, weshalb man bei der Einführung der Vollbahntraktion mit Wechselstrom die Frequenz von 50 Hz auf  $16\frac{2}{3}$  Hz heruntersetzt hat. Man kam damit sowohl mit der Leistung pro Pol (etwa 60 kW), als auch mit der Spannung (etwa 500 Volt) in einen günstigen Bereich. Für 50 Hz betragen die entsprechenden Werte 20 kW bzw. 170 Volt.

Der bisher praktisch nicht möglich scheinende 50 Hz-Motor konnte heute durch die Anwendung folgender Mittel geschaffen werden:

1. Konsequente Ausnützung aller Fortschritte des Bahnmotors für  $16\frac{2}{3}$  Hz unter sinngemässer Uebertragung auf den Motor für 50 Hz.
2. Wahl einer verhältnismässig hohen elektromotorischen Kraft  $e_t$ . Diese Massnahme hat sich bei Bahnmotoren für  $16\frac{2}{3}$  Hz bewährt.
3. Einführung der Zweifachparallelwicklung für hohe Leistungen.

4. Erhöhung der Anfahrbeschleunigung und Angleichung der Güterzugsgeschwindigkeit an die der Personenzüge.

5. Erziehung der Lokomotivführer zum Anfahren ohne langes Verharren im Stillstand mit hoher Zugkraft.

Zum ersten Punkt sei auf die Entwicklung der Motorgewichte, Tabelle 1, verwiesen. Die sehr beträchtliche Verringerung der Leistungsgewichte ist folgenden Massnahmen zu verdanken: Erhöhung der Erwärmungsgrenzen, Erhöhung der Umfangsgeschwindigkeiten, Vervollkommnung der Kühlung, Herabsetzung der Zusatzverluste, sorgfältigere Bemessung, Fortschritte auf dem Gebiet der Werkstoffe. Wie ersichtlich weist der 50 Hz-Motor von heute

angenähert das selbe Leistungsgewicht auf wie der Motor für  $16\frac{2}{3}$  Hz.

Die bisherigen Erfahrungen im Bahnbetrieb mit  $16\frac{2}{3}$  Hz haben ergeben, dass die übliche Forderung einer geringen transformatorischen Spannung  $e_t$  unter gewissen Umständen sehr wohl gelockert werden kann. Eine Reihe von Motoren mit verhältnismässig hohen Werten für  $e_t$  haben sich bestens bewährt. Es gehört zum Geschick des Konstruk-

Tabelle 1. Entwicklung der Leistungsgewichte von Vollbahn-Traktions-Motoren

Frequenz Hz	16 2/3				50		
	Baujahr	1920	1937	1948	1949/50	1935	1948
Bahn . . . . .	SBB	SBB	SBB	BLS und SBB	DRB*)	SNCF	
Lokomotivtyp . . . . .	Ce 6/8 II	Ae 8/14	Re 4/4	B <sub>0</sub> B <sub>0</sub> und Ae 6/6	B <sub>0</sub> B <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> C <sub>0</sub>	
Einstundenleistung kW	450	525	480	736	246	530	
Motorgewicht . . kg	6070	2900	2230	4000	2500	2940	
Leistungsgewicht kg/kW	13,5	5,5	4,6	5,4	10,2	5,6	

\*) Höllentalbahn

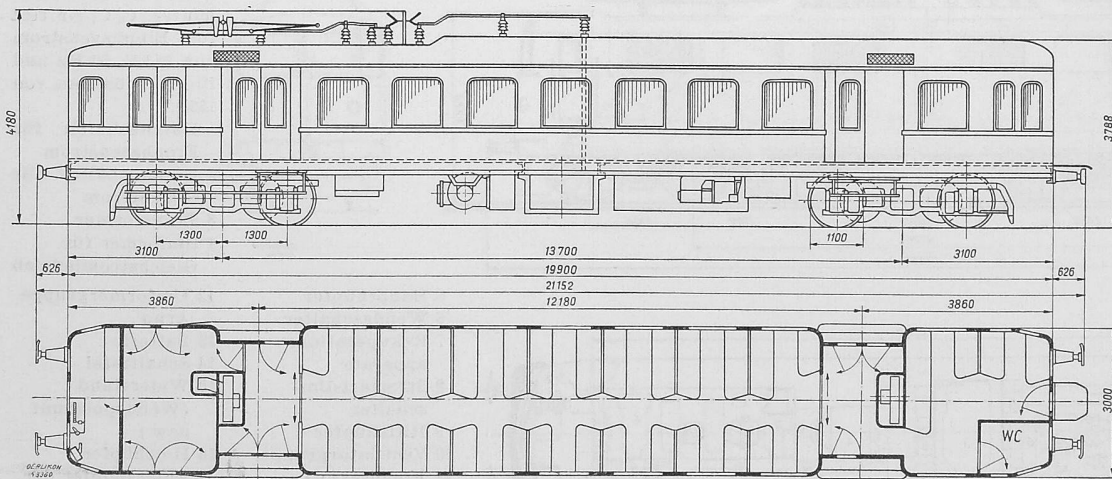


Bild 9. Von Gleichstrom auf 50 Hz Einphasenstrom umgebauter Triebwagen der SNCF, Typ Z, Nr. 9051

Tabelle 2. Erforderliche Leitungsquerschnitte und Unterwerkabstände bei verschiedenen Stromarten

	Leitungsquerschnitte				Spannungsabfall pro km %	Unterwerkabstand c)		
	Fern- und Speiseleitung mm <sup>2</sup>	Fahrleitung mm <sup>2</sup>	Total mm <sup>2</sup>	in % von (1)		Speisung		
						zweiseitig km	einseitig km	
(1) Gleichstrom 1500 V	600	1320	1920	100	4,34	9,2	2,3	a
(2) Gleichstrom 3000 V	600	588	1188	62	1,82	22,0	5,5	a
(3) Wechselstrom 15 kV 16 2/3 Hz	400	214	614	32	0,424	94,4	27,6	b
(4) Wechselstrom 20 kV 50 Hz	0	214	214	11	0,66	60,8	15,2	b

a Unterwerke mit Transformator und Gleichrichter, b Unterwerke nur mit Transformator, c Spannungsabfall 10%, übertragene Leistung 4000 kW

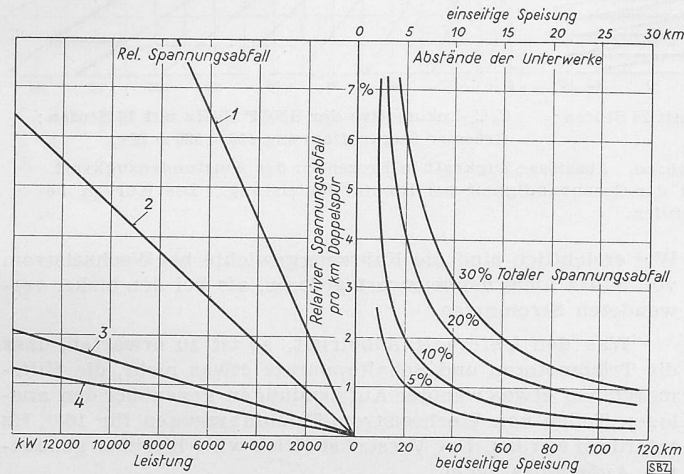


Bild 11. Spannungsabfälle in den Fahrleitungen u. Unterwerkabstand.

Prozentualer Spannungsabfall pro km Doppelspur in Abhängigkeit der Leistung. Unterwerkabstand in Abhängigkeit des links ermittelten Spannungsabfalles pro km für verschiedene Gesamtspannungsabfälle.

- 1 Gleichstrom 1500 V, 660 mm<sup>2</sup> pro Gleis; 2 Gleichstrom 3000 V 294 mm<sup>2</sup> pro Gleis; 3 Einphasenstrom 50 Hz, 20 kV, cos φ = 0,72, 107 mm<sup>2</sup> pro Gleis; 4 Einphasenstrom 16 2/3 Hz, 15 kV, cos φ = 0,80 oder Einphasenstrom 50 Hz, 25 kV, cos φ = 0,72, 107 mm<sup>2</sup> pro Gleis

teurs und des Betriebsmanns, die zahlreichen Faktoren richtig abzuschätzen, die solche höhere Werte ohne Nachteile zulassen.

Die Zweifachparallelwicklung erlaubt eine Verdoppelung der Leistung pro Pol, also eine Leistung von bis 40 kW pro Pol. Der Magnetfluss kann nämlich hierbei bei gleicher elektromotorischer Kraft  $e_t$  verdoppelt werden, weil in Gl. (5) die Stromzweigpaarzahl  $a = 2p$  eingesetzt werden kann. Mit dem doppelten Wert für  $e_t$  steigt nach Gleichung (6) auch  $P_1$  auf das Doppelte. Es gelang, diese Verdoppelung praktisch voll und einwandfrei zu verwirklichen. Die unter 4 und 5 aufgeführten betriebstechnischen Massnahmen entsprechen den heutigen Anforderungen einer beschleunigten Verkehrsabwicklung.

4. Technischer und wirtschaftlicher Vergleich mit den bisherigen Systemen

Beim Vergleich verschiedener Traktionssysteme müssen stets die gesamten Anlagen, bestehend aus den Kraftwerken, den Uebertragungsnetzen, den Unterwerken, den Fahrleitungen und den Triebfahrzeugen betrachtet werden. Die Kosten der Triebfahrzeuge allein sind nicht ausschlaggebend, da sie sogar wesentlich kleiner sind als die der Anlagen für die Energieversorgung; so fallen z. B. bei den SBB von den Gesamtkosten nur 38 % auf die Triebfahrzeuge. Der Vergleich kann nicht allgemein durchgeführt werden. Er lässt sich nur für die Gegebenheiten eines bestimmten Bahnnetzes mit den im Netzgebiet vorhandenen Versorgungsanlagen für elektrische Energie aufstellen. Aus diesem Grunde ist es auch nicht möglich, grundsätzlich zu entscheiden, ob der Anschluss an das Landesnetz oder die Erstellung eines eigenen Bahnnetzes vorteilhafter sei. Dagegen können folgende allgemeine Feststellungen gemacht werden:

Für sehr dichte Bahnnetze, wie sie bei Strassenbahnen, Stadtbahnen und Vorortbahnen vorkommen, ist und bleibt

Gleichstrom von 600 oder 750 Volt die zweckmässigste Stromart. Für längere Strecken müssen höhere Spannungen angewendet werden; normal sind Gleichstrom von 1500 V oder 3000 V. Man muss dabei wohl erschwerende Bedingungen für die Triebmotoren in Kauf nehmen, dagegen können die Zahl der Unterwerke und die Spannungsabfälle in erträglichem Rahmen gehalten werden. Je länger die Strecken und je geringer

die Verkehrsdichte, desto wirtschaftlicher erweist sich hochgespannter Wechselstrom gegenüber Gleichstrom von 3000 V.

Wo ausgebaute Bahnstromnetze vorhanden sind, ist auch heute noch die Verwendung von Wechselstrom mit niedriger Frequenz (16 2/3 Hz) vorteilhaft, da die Triebmotoren einfacher gebaut werden können als bei Wechselstrom von höherer Frequenz (50 Hz). Wo aber kein solches Netz besteht, kann der Anschluss an das Netz der allgemeinen Versorgung, das eine Frequenz von 50 Hz aufweist, in vielen Fällen bedeutende wirtschaftliche Vorteile bieten. Die Ausnützung dieser Vorteile war bisher nicht möglich, weil kein geeigneter Triebmotor zur Verfügung stand.

Die Erstellungskosten der Stromverteilungsanlagen werden weitgehend durch die erforderlichen Leitungsquerschnitte gekennzeichnet. Tabelle 2 zeigt diese Querschnitte für eine zweiseitige Bahnstrecke von einigen 100 km Länge bei verschiedenen Stromarten. Der Spannungsabfall, der sich dabei pro km ergibt, ist dem linken Teil des Bildes 11 zu entnehmen; während im rechten Teil die Distanz zwischen zwei Unterstationen für einen bestimmten Spannungsabfall abgelesen werden kann. So ergeben sich beispielsweise für eine Leistung von 4000 kW und einen Spannungsabfall von 10% die auf Tabelle 2 rechts angegebenen Werte für den Unterwerkabstand. Hierbei ist weiter zu beachten, dass bei Gleichstrom in jeder Unterstation neben einem Transformator noch eine Gleichrichteranlage aufzustellen ist, während bei Wechselstrom ein Transformator genügt. Wie ersichtlich ergeben sich bei Gleichstrom trotz sehr grossen Kupferquerschnitten kleine Unterwerkabstände, also eine grosse Zahl von Unterwerken. Der Spannungsabfall ist bei Wechselstrom von 50 Hz

Tabelle 3. Gewichte moderner Bahnmotoren (Baujahr 1950)

Stromart	W	W	G	G	G
Frequenz	50	16 2/3	0	0	0
Motorspannung	250	450	1500/2	1500	3000/2
Motorgewicht	5,7	4,4	4,4	5,7	6,2
Verhältnis	1,3	1	1	1,3	1,4

Tabelle 4. Vergleich der Gewichte von C<sub>0</sub>C<sub>0</sub>-Lokomotiven verschiedener Stromart

Die Gewichte beziehen sich auf schweizerische Ausführungen bzw. neueste Projekte und sind auf eine Einstundenleistung von 3000 kW bei 2/3 der Höchstgeschwindigkeit umgerechnet

Stromart	W (G) <sup>1)</sup>	W <sup>2)</sup>	W	G	G
Frequenz	50 (0)	50	16 2/3	0	0
Spannung	20 (1,5)	20	15	1,5	3

Gewichte	W (G) <sup>1)</sup>	W <sup>2)</sup>	W	G	G
Triebmotoren	17,9	17,9	13,2	14	18,6
Transformatoren	7,3	7,3	10,4	—	—
Uebriges	17	8,0	8,4	14	15,4
Elektrischer Teil	42,2	33,2	32,0	28	34,0
Mechanischer Teil	61,8	60,8	60	60	60
Lokomotiv-Gewicht	104	94,0	93	88	94,0
Spezifisches Leistungsgewicht des elektrischen Teils	14,1	11,1	10,7	9,4	11,4

1) Für die SNCF ausgeführte Lokomotive mit Einrichtung für Gleichstrom-Betrieb und Rekuperation.

2) Wie 1), jedoch ohne vorerwähnte Einrichtungen.

grösser als bei solchem von  $16\frac{2}{3}$  Hz; um einen gleich geringen Abfall zu erzielen, müsste die Spannung von 15 kV bei  $16\frac{2}{3}$  Hz auf etwa 25 kV bei 50 Hz erhöht werden. Eine Spannungssteigerung über 25 kV hinaus ist mit Rücksicht auf die normalen Lichtraumprofile und Fahrzeug-Begrenzungslinien nicht empfehlenswert.

Beim Fahrzeug ergibt die Verwendung von Wechselstrom von  $16\frac{2}{3}$  Hz gegenüber Gleichstrom bekanntlich folgende Veränderungen: Höhere Spannungen und geringere Stromstärken über dem Dach, niedrigere Spannungen im Motorenstromkreis, Ersatz der Anfahr-Widerstände

durch einen Stufentransformator, schwierigere Kollektorverhältnisse beim Anfahren, grössere Sicherheit gegen Ueberschläge am Kollektor als bei hohen Gleichspannungen.

Ueber die heutigen Leistungsgewichte der Triebmotoren gibt Tabelle 3 Anhaltspunkte. Die angeführten Zahlen sind Bestwerte von Ausführungen schweizerischer Firmen. Wie sehr diese Zahlen schwanken, zeigt z. B. ein neuer französischer Gleichstrommotor für 1500/2 Volt, der 10,0 kg/kW wiegt. Das höhere Leistungsgewicht des Einphasenmotors für 50 Hz gegenüber demjenigen für  $16\frac{2}{3}$  Hz wird durch das geringere Transformatorgewicht teilweise ausgeglichen, das nur etwa 60% desjenigen für  $16\frac{2}{3}$  Hz beträgt. Hinzu kommt eine bedeutende Gewichtsersparnis bei den Hilfsmotoren. So wiegt z. B. ein Motor, der bei 2500 bis 2900 U/min 12,5 kW leistet, als Gleichstrommotor für 3000 V 460 kg oder 37 kg/kW, als Wechselstrommotor für  $16\frac{2}{3}$  Hz 220 kg oder 17,5 kg/kW und als Wechselstrommotor für 50 Hz nur 130 kg oder 10,3 kg/kW.

Tabelle 4 zeigt die ungefähren Gesamtgewichte elektrischer Lokomotiven von 3000 kW Einstundenleistung (bei einer Geschwindigkeit, die 67% der Höchstgeschwindigkeit beträgt). Die Zahlen sind durch Umrechnen der Gewichte ausgeführter Lokomotiven von ähnlicher Leistung auf die genannte Leistung erhalten worden. Die Dauerleistungen neuzeitlicher Vollbahnmotoren betragen 85 bis 97% der Einstundenleistung.

## Arbeitstechnik

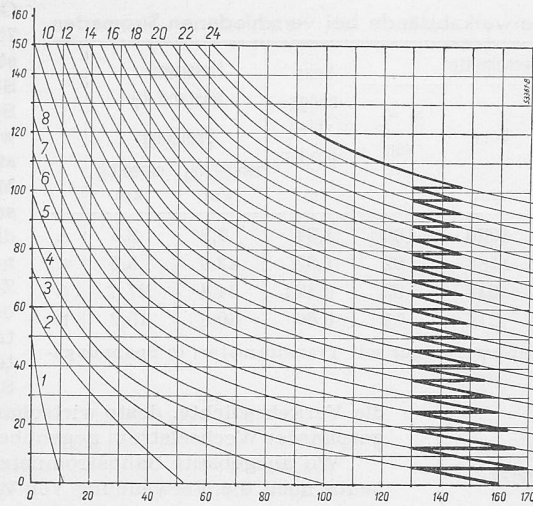
DK 658.51

Von Prof. Dr. W. MOEDE, Berlin<sup>1)</sup>

Unter Arbeitstechnik verstehen wir die Lehre von der Gestaltung der menschlichen Arbeit mit dem Ziele grösstmöglicher Sicherheit, Wirtschaftlichkeit und Wohlfahrt der Arbeitskraft. Die menschliche Arbeit, die es zu gestalten gilt, ist teils einfache manuelle Tätigkeit, kann aber auch schöpferische intellektuelle Leistung betreffen, der Seltenheitswert zukommt.

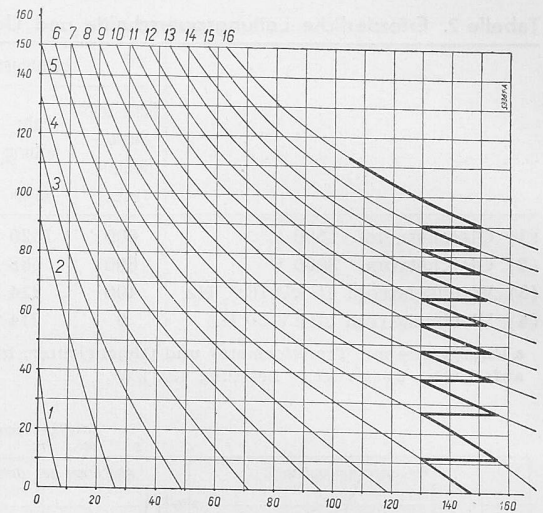
Grundlage der Arbeitstechnik ist die Arbeitswissenschaft, welche die Gesetze der menschlichen Arbeit erforscht, auf denen die Arbeitstechnik als angewandte Arbeitswissenschaft ruht und aufbaut. Auf Grund jahrzehntelanger Forschung und Praxis wurden Normen der Bestgestaltung theoretisch begründet und praktisch erprobt, die eine Steigerung des Wirkungsgrades der Arbeit bestimmt in Aussicht stellen. Grundlage von Arbeitswissenschaft und Arbeitstechnik sind universelle Arbeitsstudien, die alle an der Arbeitsausführung und am Arbeitsablauf beteiligten Faktoren, die körperlichen, geistig-seelischen und charakterlichen bewusst machen und analysieren. Als Leistungsstudie beziehen sie sich auf Zeit, Intensität und Schwierigkeitsbewertung der Arbeit. Dazu gesellen

<sup>1)</sup> Prof. Moede hat seine jahrzehntelangen, wissenschaftlichen und praktischen Erfahrungen in seinem Buch: Arbeitstechnik, Stuttgart 1935, niedergelegt, wo Grundlegung und Anwendung der Arbeitsnormen bei einer Vielzahl industrieller Gebiete in Wort und Bild dargelegt sind. Wir verweisen im übrigen auf die Tagung über Arbeitstechnik, die auf S. 82 dieses Heftes angezeigt wird.  
Die Red.



Lokomotive Re 4/4 der SBB für  $16\frac{2}{3}$  Hz mit 24 Stufen; Grösster Zugkraftsprung  $170 - 130 = 40\%$

Bild 12. Verlauf der Zugkraft beim Anfahren. Abszisse: Zugkraft in Prozenten der Einstundenzugkraft. Ordinate: Geschwindigkeit in Prozenten der Geschwindigkeit bei Einstundenleistung. Die Kurven beziehen sich auf die verschiedenen Fahrstufen.



C<sub>0</sub> C<sub>0</sub>-Lokomotive der SNCF 50 Hz mit 16 Stufen; Grösster Zugkraftsprung  $156 - 130 = 26\%$

Wie ersichtlich sind die Fahrzeuggewichte bei Wechselstrom von 50 Hz nicht nennenswert grösser, als bei den bisher verwendeten Stromarten.

Was den *Unterhalt* anbetrifft, so ist zu erwarten, dass die Triebmotoren und Schaltapparate etwas mehr, die Hilfsmaschinen etwas weniger Aufwendungen gegenüber den analogen Teilen von Wechselstrom-Triebfahrzeugen für  $16\frac{2}{3}$  Hz erfordern werden. Der Versuchsbetrieb wird hierüber genaueren Aufschluss geben.

Zwei weitere Umstände verdienen Beachtung: Infolge der geringeren Motorspannungen treten höhere Stromstärken auf. Neben den bekannten Nachteilen sind damit auch Vorteile verbunden, nämlich: Die Isolierung ist einfacher, der Kollektor ist in höherem Masse überschlagsicher, vor allem aber wird der Motor vollständig unempfindlich gegen die plötzlichen Fahrspannungsunterbrüche infolge Abspringen des Stromabnehmers. Motoren für höhere Spannungen (1500 und 3000 V) sind durch solche Unterbrüche viel mehr gefährdet.

Der zweite Umstand betrifft den induktiven Spannungsabfall im Transformator und im Motor. Dieser Abfall bewirkt einerseits eine Verschlechterung des Leistungsfaktors, gibt aber andererseits dem Motor eine weichere Kennlinie, die betriebliche Vorteile bietet, Bild 12. (Schluss folgt)

sich betriebstechnische, betriebsorganisatorische, personalwirtschaftliche und betriebswirtschaftliche Analysen. Auch die kleinste Arbeitsleistung darf nicht isoliert betrachtet werden, sondern in ihrer Einbettung in die Totalität der Betriebsbedingungen und der menschlichen Belange, die die Gesamtperson und die Gesamtstruktur des Arbeitsablaufes im Betriebe in sich einbeziehen.

Die einzelnen Arbeitsfelder werden nach bewährten Normen neu geordnet und verbessert. Das gilt für die Wahrnehmungsfelder, das Sehen, Hören, das Aufmerksamkeitsfeld, die Bewegungen einer oder der Doppelhand, die zu einfachen Verrichtungen oder schwieriger Gestaltungsarbeit eingesetzt werden, auch für den intellektuellen Sektor, der in sich Auffassen, Gedächtnis, Kombinieren, Urteilen und Schliessen umfasst sowie schliesslich auch für die charakterologischen Felder bei Betätigung des Menschen an verantwortlicher Stelle.

So selbstverständlich die Zeitstudien geworden sind, die die einzelnen Abschnitte des Arbeitsablaufes zeitlich ausgliedern, so bedeutsam die Entwicklung der Intensitäts- und der Arbeitsbewertungsstudien wurden, um optimale Intensität sowie der Schwierigkeit angepasste Leistungsbezahlung richtig eingesetzter Arbeitskräfte zu gewährleisten, so keimhaft ist erst die bewusste und planmässige Arbeitstechnik im Sinne normativer Bestgestaltung in Betrieb und Wirtschaft. Die Intensität kann naturgemäss nur innerhalb gewisser Grenzen geändert, gegebenenfalls gesteigert werden, während die Ausschaltung aller arbeitserschwerenden und hemmenden Griffe,