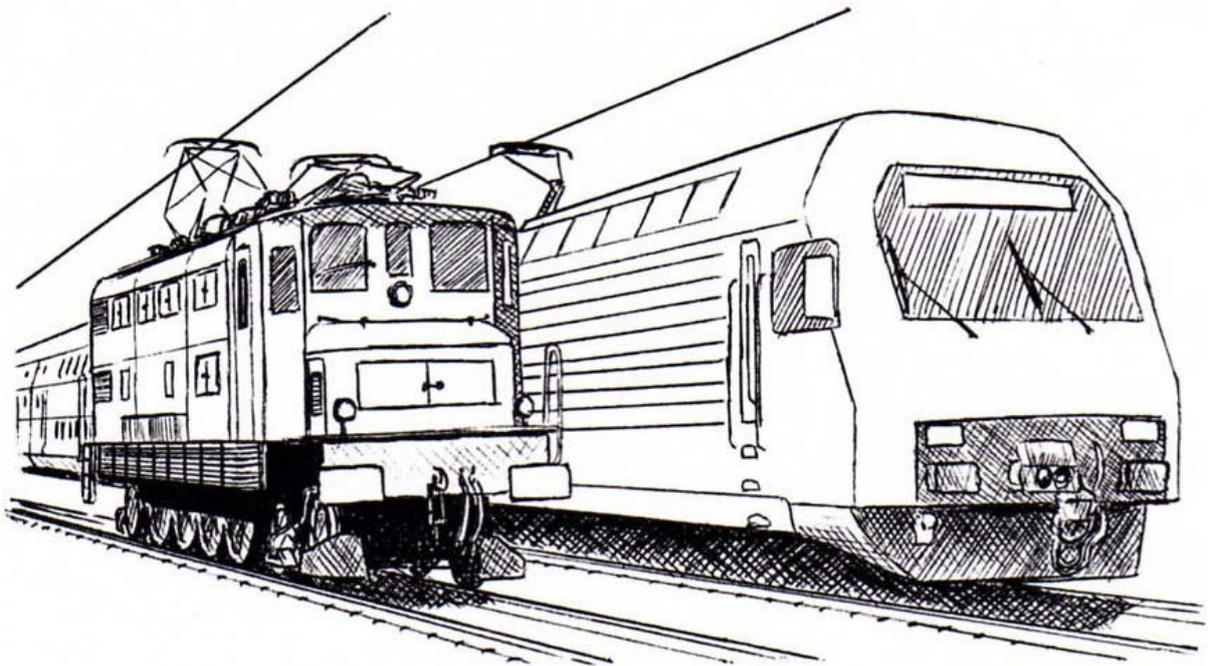


Eisenbahntechnik



Jean-Marc Allenbach



Laboratoire de Machines Electriques

Auflage 2014

1.1 Einführung

Die Bahn existierte schon seit langem wenn die elektrische Zugförderung eingeführt wird. Diese erlaubte die Bahnentwicklung die man heute kennt:

- Zuggewicht Erhöhung.
- Geschwindigkeit und Beschleunigung Erhöhungen, die zur Fahrzeitverkürzung führen.

Wenn man die elektrische Lokomotive mit Dampflokomotive und jetzt Diesellokomotive vergleicht, findet man eine höhere spezifische Leistung, die dazu noch von 50 % bis 100 % überschritten werden darf. Diese Eigenschaft der elektrischen Lokomotive rechtfertigt die hohen Elektrifizierungskosten wenn der Verkehr auf einer Linie bedeutend wird. Der Diesel – Dampfnachfolger – bleibt auf schwach frequentierten Linien.

1.2 Einführung zur zweiten Auflage.

Während der letzten Jahrzehnte hat man grosse Fortschritte beobachtet und eine neue Ära öffnet sich für elektrische Zugförderung. Wenn einige Technologien fast verschwunden wurden sind andere als unvermeidbar kennengelernt.

Gegen das Ende des letzten Jahrhunderts haben jenen Leuten das Verschwinden des Eisenbahn als berechenbar gemeldet. Das ist wahr, der ungeordnete Wettbewerb der Strasse und der Luftfahrt hat einen schweren Schlag an die Bahn gegeben. Die Eisenbahn hat nicht nur gekämpft, sie hat ein neues Gesicht dieses Transportmittel in verschiedenen Richtungen gebracht: die *Hochgeschwindigkeit*, die *Fracht* (oder Gütertransport wie es früher benannt wurde) und die *Stadtverkehr*.

Für Personentransport (die Mode nennt sie heute Passagiere – *passengers*) soll man erstens die ausserordentliche Maturität der sehr hohen Geschwindigkeit in Fernverkehr (äquivalent in der Eisenbahnsprache an der Mitteldistanz in der Luftfahrt). Das ist nicht mehr bescheidenen Teststrecken sondern neue Netze wie japanische *Shinkansen* oder europäische *TGV*, *AVE* und *ICE* in voller Wachstum, in vollem Fortschritt und – hauptsächlich – in vollem Erfolg.

In gleichem Zeit zeigt Sachtransport (Materialien, Güter, Post,...) eine neue Vitalität, trotz dem rasenden Wettbewerb der Strasse, die schlecht betreibt und unüberschaubar ist. Die Bahn kämpft mit der Einführung sehr schweren Zügen, ein Art als leistungsfähigen Cargo auf Schienen, im Länder wo bis jetzt fast nichts oder gar nicht gemacht wurde. Wir denken an neuen Mineralienlinien in Brasil, Südafrika, Australien und anderswo. Sogar in Europa – auf Strecken mit sehr strengen Profilen – sieht man Zügen mit Doppel-, Dreifach- oder Vierfachtraktion, aus Tausenden von Tonnen.

Endlich nennt man den riesigen Potential des Stadtverkehr, mit der grosse Kapazität der lokalen U-Bahn oder Vorortsbahn (S-Bahn Netze) ohne die Wiedergeburt der moderner Strassenbahn zu vergessen. Die Strassenbahn die vor nur einigen Jahren viel beklagt und kritisiert wurde ist heute gut beherrscht und akzeptiert.

Diese spektakuläre Fortschritten wurden ohne neuen Technologie basiert auf Leistungselektronik und Steuerelektronik, mit innovativen mechanischen Getriebe nicht gestalten. Alle diese neuen Technologien haben erlaubt Hochgeschwindigkeit, sehr schwere Lasten und Wartungseinsparungen (neu die *maintenance*) zu beherrschen. Mit Technik hat man neuen Mehrsystem-Fahrzeugen gebaut, die wenigen Zusatzkosten gegen Einsystem-Fahrzeugen nützen: man geht zu universale Motorfahrzeugen, undenkbar vor einigen Jahren,

die internationalen Tausch erleichtern werden. In Gegenteil wird die Funktion spezialisiert: Vorort, Fracht, Hochgeschwindigkeit. Diese Technik erlaubt auch Niederflurfahrzeugen die den Reisenden-Austausch an die Haltepunkte beschleunigt.

Die Zugförderung auf Einphasen-Wechselstrom mit industrieller Frequenz wird unaufhaltsam erweitert werden, überall wo die Entscheidungsträger die sinnvoll benützen möchten. Die Gleichstromsysteme werden noch in Stadt und Vorstadt benützt. Wenn Netze auf Gleichstrom-Mittelspannung oder Hochspannung, auf Niederfrequenz übrigbleiben werden – Umbau wurde viel zu teuer – man kann keine grosse Verbreitung bieten. Sogar „fehlenden Verbindungen“ werden wahrscheinlich auf *Einphasen* elektrifiziert, in der Mitte einer Netz mit anderen Strom: Mehrstrom-Triebfahrzeugen werden benutzt.

Unser Buch zeigt auch diesel-elektrische Zugförderung. Man konnte nicht die thermo-elektrische Traktion schweigen, sie ist ein Hauptakteur in Schwertransport, wo die Elektrifizierungskosten wegen schwachem Verkehr, auf oft isolierten Linien, keine Rechtfertigung finden. In diesem Gebiet überfielen auch logischerweise die Elektronike.

In einem Jahrzehnten hat man grosse Änderungen in Eisenbahn-Industrie beobachtet: nicht nur Mittelgesellschaft sondern auch berühmten und erfahrenen Industrie sind verschwunden, Gruppierungen wurden verfolgt, manchmal brutal. Man soll deswegen viele Kenntnisverluste (das berühmte *know-how*) beklagen; Kenntnis ist mit der Abfahrt guten Spezialisten und feinen Kenner verschwunden. Das ist keine Polemik, nur Beachtung. Wir können auch beachten dass – trotz schlechten Versuche – einige Manager Bahngesellschaft oder Verkehrsbetriebe zur Misserfolg geführt hatten. Wir glauben noch, trotz einigen wahrscheinlich Wanderschaft, an der hohen Potential für moderne elektrische Zugförderung, besonders auf Schienen, mit seinen wichtigen sozio-geographischen Auswirkungen, als Ergänzung zum verwirrten Automobilverkehr.

Ein Kurs für elektrische Zugförderung kann noch, und soll, in Hochschulen unterrichtet werden. Diese Hochschulen sollen technischen Gesellschaftsführer für morgen vorbereiten. Diese sollen das Leben des modernen Menschen mit einer ordnungsgemäße Verwaltung begleiten.

(~2007 geschrieben)

1.3 Einführung zur Internet-Auflage.

Auf die Internet-Dokumente, das Gewicht ist auf innovativen Lösungen, die erlauben die weite Entwicklung der öffentlicher Verkehr, Stadtverkehr, Regionalverkehr und Fernverkehr. Ältere Lösungen werden trotzdem kürzlich beschreibt:

- Die Lebensdauer der Eisenbahnfahrzeugen erlaubt alte Lösungen noch heute in regelmässigen Betrieb.
- Die historische und technische Kenntnis hilft den dynamischen – mechanischen und elektrischen – Verhalten zu verstehen. Es erklärt auch einigen heutigen technischen Wahlen.

Man hat die gleiche Bildnummer wie bei der gedruckter Auflage gewählt. Die Vorführung ist ein wenig verschieden, um besser die Fahren-Bremsen Umschaltung zu zeigen. Diese Zusammenfassung lädt ein, die gedruckte Version bei PPUR zu kaufen.

1.4 Die Lokomotive : ein Energie-Wandler.

Die Funktion einer elektrischen Lokomotive ist elektrische Energie in mechanische Energie zu konvertieren. Weil diese Umwandlung während die Zeit ändert spricht man lieber von Leistungswandlung.

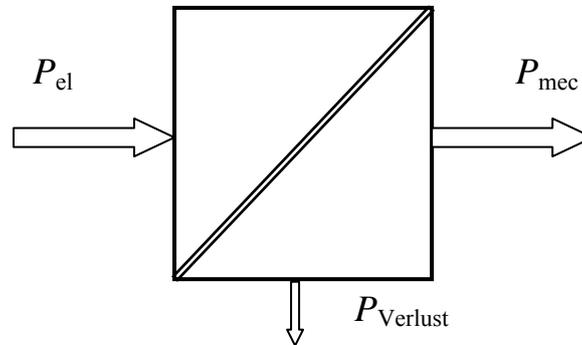


Fig. 1.1 Leistungswandlung.

Die Wandlung wird in drei Stufen geteilt.

$$U_{lc} \cong cte ; f_{lc} = cte ; I_{lc} \neq cte$$

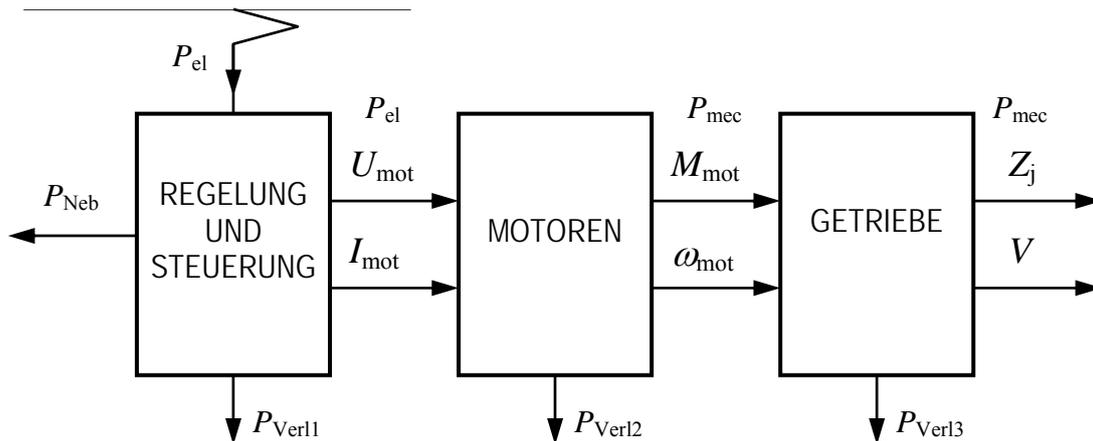


Fig. 1.2 Leistungsflüsse und -typen in einer Lokomotive in Traktion.

Bei elektrischer Bremse läuft die Konversion in anderer Richtung.

1.5 Lokomotivbau : eine Mehrfacharbeit.

Das Design, die Bau und der Betrieb für eine elektrische Lokomotive brauchen mehreren Wissenschaften und Techniken (Fig. 1.3). Es ist nötig ab Anfang Mehrfachüberlegung zu führen, um das Fahrzeug zu optimieren.

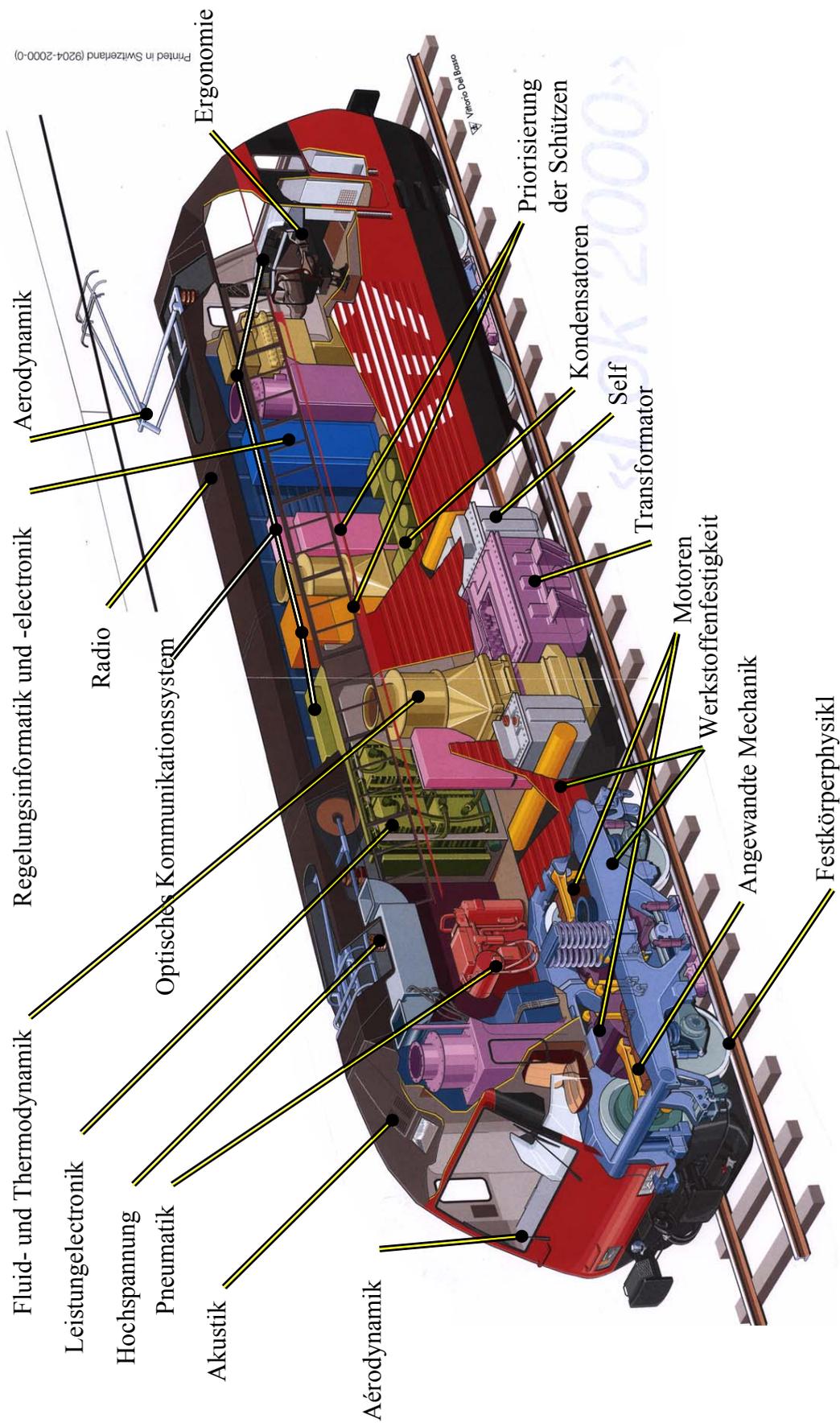


Fig. 1.3 Eine Lokomotive und die benutzten Techniken.

2.1 Interdependenz der Entwicklung

Die Geschichte der Eisenbahn und der elektrische Zugförderung ist mit dem Tempo des Elektrotechnik-Entwicklung stark verbunden; besonders das Bau des Transformator, der Traktionsmotoren und der Halbleitern. Die Mode, und politische oder strategische Wahlen haben auch die Evolution der elektrischen Zugförderung beeinflusst.

Bei der Elektrifizierung hat man feste Lösungen gebaut. Später wurden günstigeren Lösungen zuverlässig genug geworden, um die bisherigen zu ersetzen, wie das Bild 2.1 schaut.

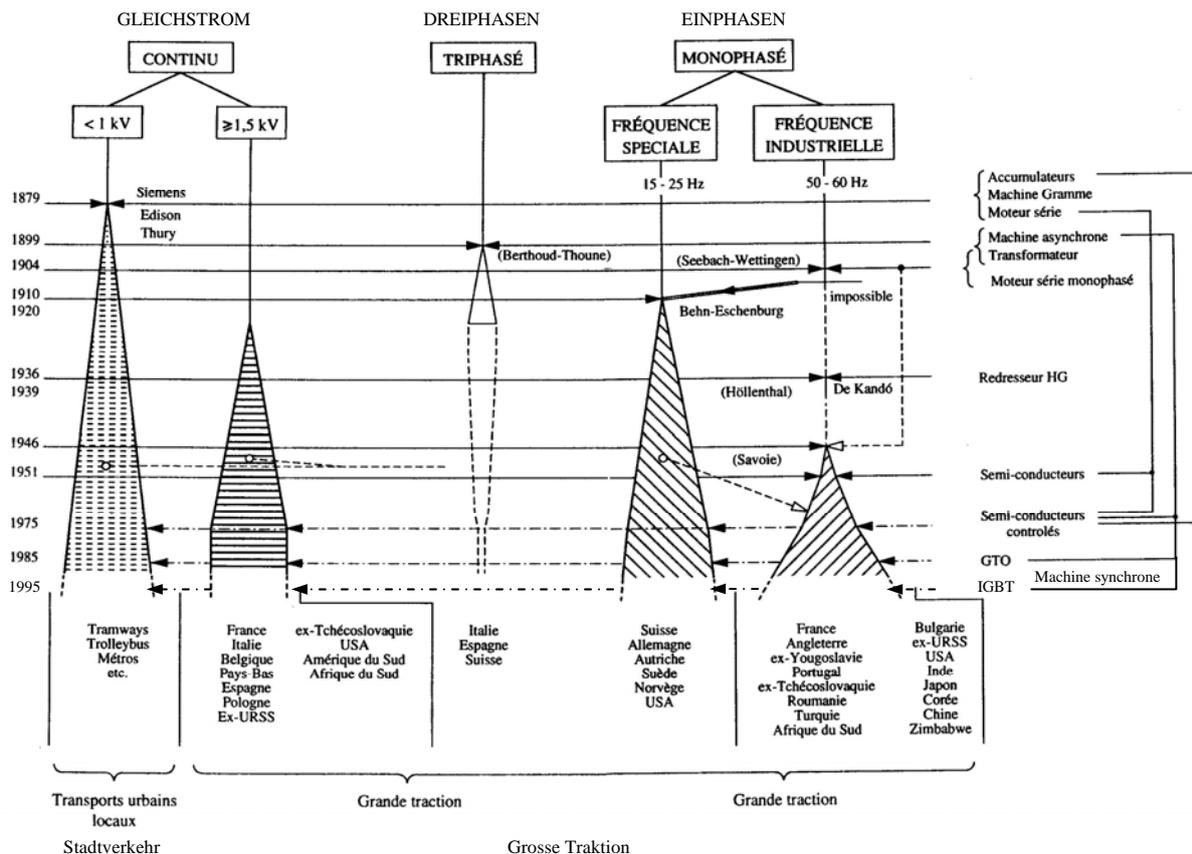


Fig. 2.1 Evolution der Systeme.

2.2 Heutigen Zeiten

Heutzutage bleiben nur zwei Systeme in Fortschritt: das Einphasenwechselstrom für die « Grosse Traktion » und das Gleichstrom für das Stadtverkehr. Die alten Anlagen sind noch mehr einem Halben Jahrhundert später benutzt, obwohl man heute verschieden bauen würde. Gleichstrom oder Niederfrequenz haben keinen anderen Grund zu überleben als die ungeheuren Kosten eines Ersatz.

Für die Entwicklung der Triebfahrzeuge hat man eine merkwürdige Drehung beobachtet. Während drei Viertel Jahrhunderts hat der Elektriker das Gewicht des elektrischen Teils schnell aus den gewünschten Leistungen geschätzt. Der Mechaniker sollte

nachher die Lösungen finden, um den erlaubten Achslast nicht zu überschreiten. Die elektrischen und mechanischen Teile wurden oft durch zwei verschiedene Industrien gebaut, oder am besten bei zwei verschiedenen Divisionen der gleichen Industrie. Jeder Partner sollte nachher die Entwicklung ins Detail führen, ohne die Gewichtgrenze zu überschreiten. Während der Jahren 70 ist die Elektronik für die Führungshilfe Schritt nach Schritt neben den beiden anderen Teilen eingetreten.

Um der Millenniumswende ereignete eine Entwicklungsrevolution. Die Lokomotiven, Triebwagen und Triebzügen sind jetzt global entwickelt: der Endprodukt ist bei Interaktion Informatik – Elektrotechnik – Mechanik optimiert. Die Entwicklungen sind bei einem Federführer überwacht; er definiert die technischen Daten für jeden Teillieferer und die Schnittstellen zwischen Teillieferungen. Während der Entwicklung sind auch die Stromversorgung und die Gleisgeometrie des Netzt sorgfältig studiert. So kann man Gewicht und Kosten (Bau- und Betriebskosten) optimieren, in Vergleich mit kaum älteren Fahrzeugen. (Beispiele: *185* aus Bombardier, *Citadis* aus Alstom, *Flirt* aus Stadler, *ICE3* aus Siemens).

3.1 Generellgleichungen

Zugsbewegung ist grundsätzlich ein Mobile mit Masse m mit einem einzigen Freiheitsgrad. Man kann es durch eine Newton- Skalggleichung beschreiben.

$$\sum_{i=1}^n F_i = m \cdot a \quad (3.1)$$

Man unterscheidet die Kräfte die im Zug erzeugt werden (aus den Motoren und aus den mechanischen Bremsen) und die Kräfte die beim Zug erfahren werden (eigenes Reibungskraft und lokalen Kräften: Neigung, zusätzlichen Kräften in Tunnel oder Kurven).

Die eigenen Reibungskräfte besitzen ein konstantes Teil, ein Teil proportional an der Geschwindigkeit und ein Teil proportional an dem Geschwindigkeitsquadrat.

$$F_f = A + Bv + Cv^2 \quad [\text{N}] \quad (3.5)$$

Man soll die numerische Werte prüfen: sind sie für Geschwindigkeit in [m/s] oder in [km/h]. Auf die Bilder 3.3 bis 3.5, sind die Kurven in relativen Werten zur Masse gegeben. Für Zügen mit einer Lokomotive soll man 2 verschiedenen Kurven lesen: eine für die Lokomotive – das Weg im Luft öffnet - und die anderer für dem Zug der folgt.

- 1 UIC-Personenwagen um 1960 (SNCF, SBB, DB, FS)
- 2 Corail-Personenwagen 1975 (SNCF), Eurofima- 1980 (DB, FS, ÖBB,...) oder EWIV 1985 (SBB)
- 3 Leichstahlwagen 1940 (SBB)
- 3 plus 20 [N/t]: BOB-Personenwagen auf einem Zahnstangenabschnitt

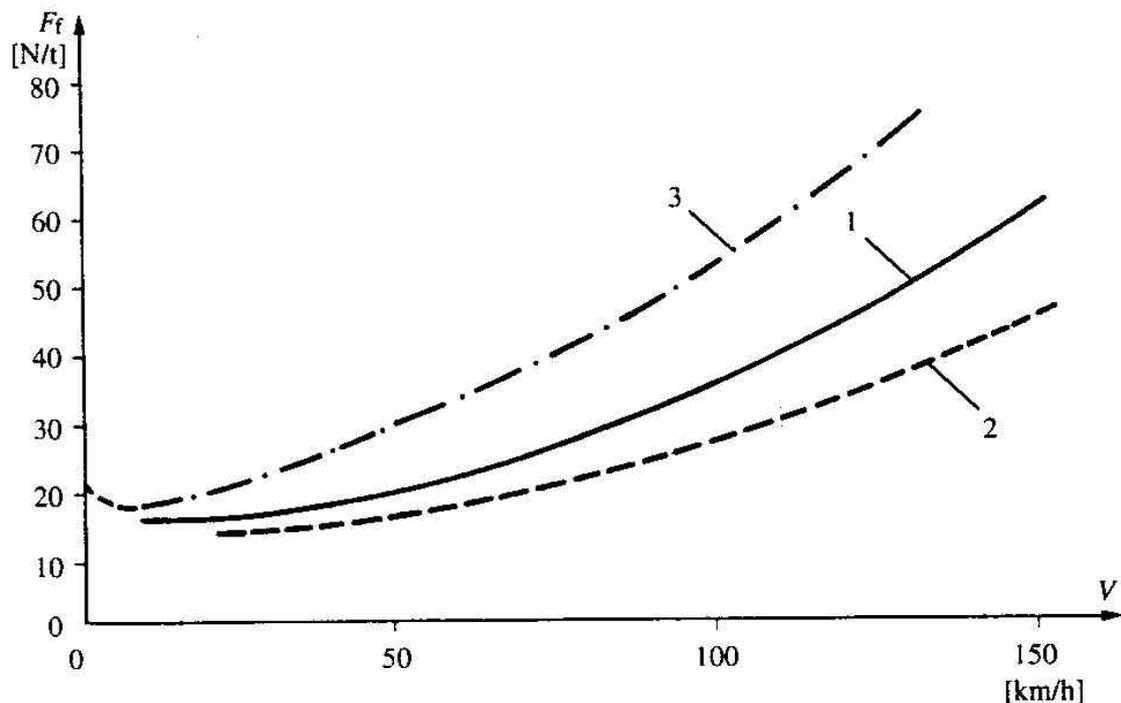


Fig. 3.4 Reibungskräfte für Personenzüge.

- 1 Lokomotive Ae 6/6 (CFF): CoCo, 120 t
- 2 Lokomotive 9001 (SNCF): BB, 80t
- 3 Lokomotive 6001 (SNCF): CC, 120 t
- 4 Lokomotives Am 4/6 (CFF) : 1BoBo1, 93 t, Re 460 (CFF) : BoBo, 84 t (—)
- 5 Lokomotive 2D2 (PO)
- 6 Lokomotive BBB (FS)
- 7 Lokomotive Re 4/4 II (CFF) : BoBo, 80 t
- 8 Lokomotive Re 6/6 (CFF) : BoBoBo, 120 t
- 9 Triebwagen BOB, Zahnstange
- 10 Triebwagen BOB, Adhäsion
- 11 Gelenktriebwagen TSOL oder Stadtbahn B

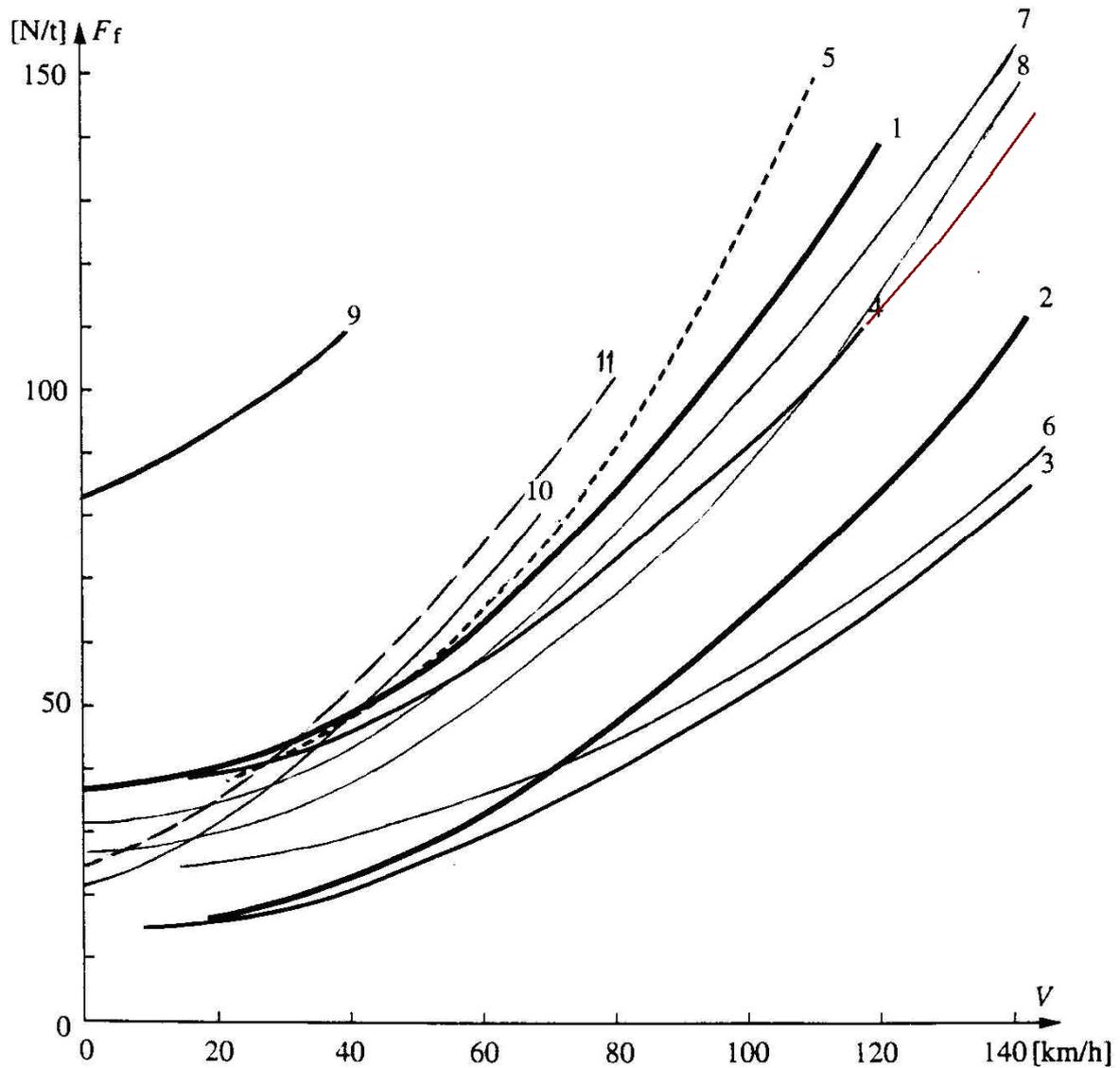


Fig. 3.3 Reibungskräfte für Triebfahrzeuge.

Die Güterzüge haben verschiedene Kurven. Die Güterwagen besitzen nicht glatten Wände und die Formen ändern von einem Wagen zu dem nächsten: die aerodynamischen Reibungskräfte sind also grösser.

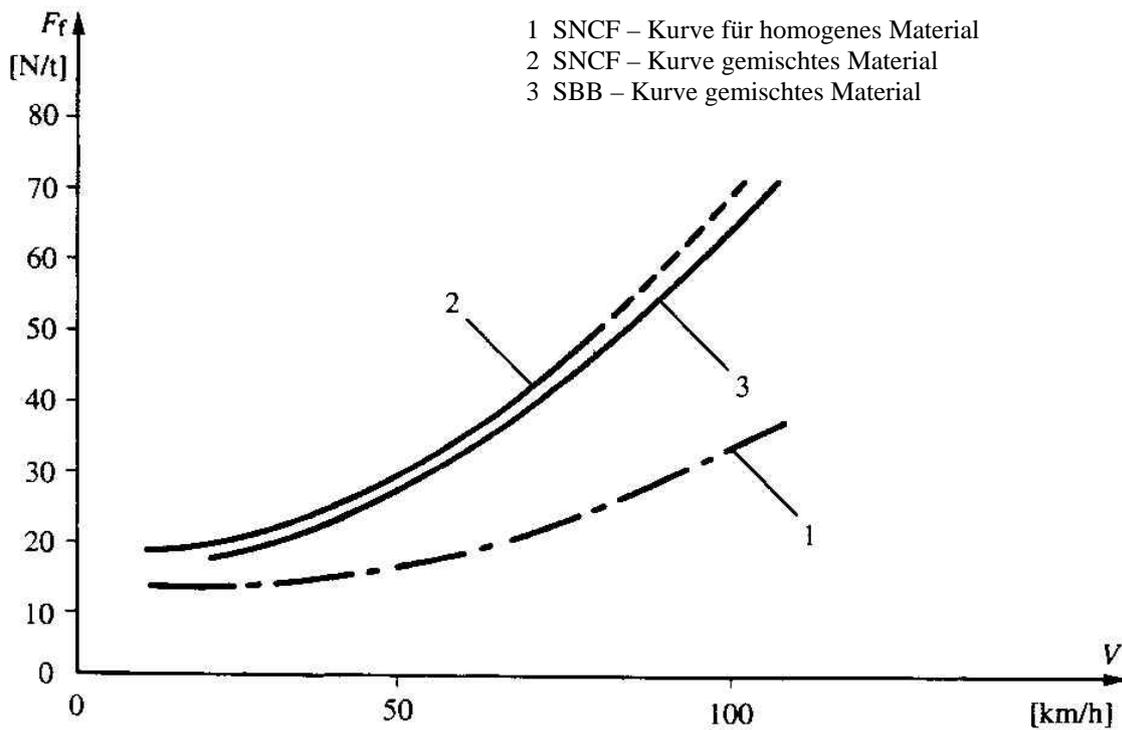


Fig. 3.5 Reibungskräfte für Güterzüge.

Auf einer Neigung erhält man die Fahrwiderstand beim Produkt des Zugsgewichts mit der Gleisneigung i , in pro-Tausend auf den Tabellen. Hier ist Sinus bei Tangente annähert, was bis circa 120 ‰ akzeptabel ist.

$$F_d = m g i 10^{-3} \quad [\text{kN}] \tag{3.12}$$

Wenn die Masse in Kilogramm bemessen wird erhält man eine Kraft in [N].

In die Kurven erhält man eine zusätzliche Kraft F_c , an jenen Punkten wo der Kurvenradius eng ist.

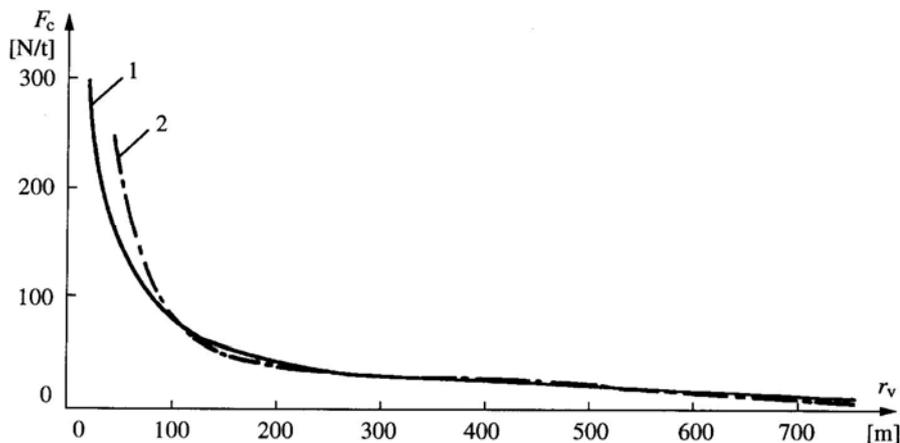


Fig. 3.10 Fahrwiderstand wegen Kurven: Normalspur.

Für die zusätzliche Kraft in einem Tunnel F_g , nimmt man « Cv^2 » der Gleichung (3.5) für einen Doppelspurtunnel und zweimal dieses Wert für einen Einzelspurtunnel. Dieser Wert übernimmt den Kolbeneffekt im Tunnelrohr. Das aerodynamische Teil der Reibungskraft ist so verdoppelt oder verdreifacht.

Für die Zugsbeschleunigung (3.1) soll man nicht nur die gewogene Masse benützen, aber auch die Schwungräder – Räder, Zahnräder, Motorenrotor – halten. Man hat ein Faktor ξ zu hinzufügen.

$$m^* = \xi m \tag{3.22b}$$

Fahrzeugen		ξ
Vollzug	Adhäsion	1,06 à 1,10
Wagen		1,02 à 1,04
Leere Wagen		1,05 à 1,12
Triebwagen		1,08 à 1,14
Lokomotiven		1,15 à 1,30
Wagen	Zahnstange	1,05 à 1,10
Triebwagen		1,30 à 2,50
Lokomotiven		1,50 à 3,50

Fig. 3.13 Faktor der rotierenden Massen.

Die Zugkraft $Z = F_{in}$ ist aus dem Drehmoment M_m an der Motorwelle, aus dem Übertragungsfaktor k_G aus dem Radradius r_e und aus Wirkungsgrad η_G der Getriebe berechnet (Kap. 5).

$$Z = \eta_G \frac{M_m}{k_G r_e} 10^{-3} \text{ [kN]} \tag{3.17}$$

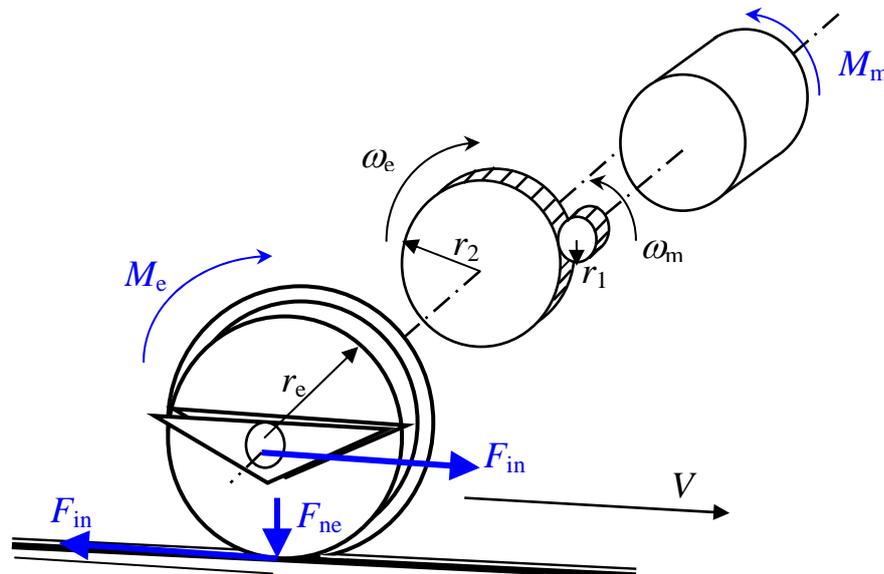


Fig. 3.12 & 3.14 Von einer Drehbewegung zu einer lineare Bewegung, Adhäsion.

Wegen der Adhäsionsbedingungen zwischen einem Stahlrad und einer Stahlschiene darf man weder Zugkraft noch Bremskraft über einer Grenzwert übertragen. Dieser Grenzwert ist aus dem Adhäsionsfaktor μ_r und der Adhäsionsgewicht F_{ne} abhängig. Für eine

vierachsige Lokomotive kann man in eine erste Annäherung das Adhäsionsgewicht auf einer Triebachse als ein Viertel des Totalgewichts halten. Dieser Wert ist leider nicht Konstant, er wird beim Dynamik der Kaste und den Drehgestellen bestimmt. Der Adhäsionsfaktor ist aus der Zugsgeschwindigkeit und der Gleitgeschwindigkeit abhängig, gemäss empirischen Gesetze die auf die Bilder 3.15 und 3.17 beschreibt werden.

$$Z < \mu_r F_{ne} \quad [\text{kN}] \tag{3.24b}$$

Wenn die Bedingung (3.24b) nicht behalten wird, kann man ein Schlupf an diesem Achse beobachten. Der Schlupf wird grösser wenn der Drehmoment nicht schnell bei dem Fahrpersonal oder bei einem Schleuderschutz reduziert wird.

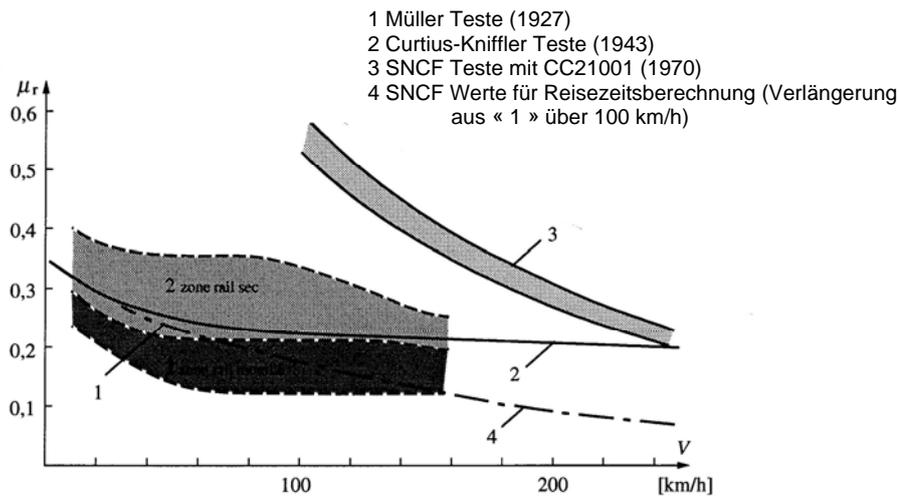


Fig. 3.15 Adhäsionsfaktor aus der Geschwindigkeit.

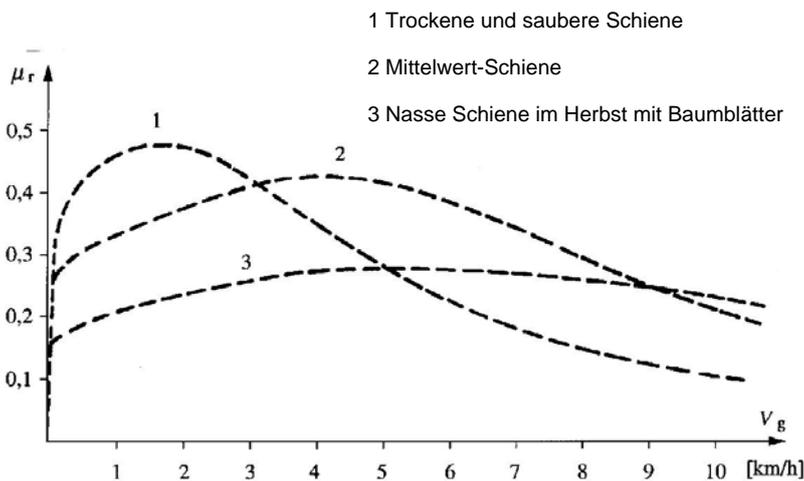


Fig. 3.17 Adhäsionsfaktor aus der Gleitgeschwindigkeit.

Der Adhäsionsfaktor eines Reifen auf einem Fahrbahn– U Bahn oder Obus – ist fast Doppel als ein Stahlrad auf einer Stahlschiene, zwischen 0,55 und 0,62 abhängig von der Art der Beschichtung.

Bei einer Anfahrt ist die nötige Zugkraft am grössten.

$$Z = m * a + F_d + F_f \quad (3.1b)$$

Die SNCF für die Anfahrzugkraft eine empirische Formel mit einer korrigierte Steigung i_{corr} .

$$Z = m g i_{\text{corr}} 10^{-3} \quad [\text{kN}] \quad (3.12b)$$

Für Güterzügen hofft man an einer Beschleunigung $0,03 \text{ [m/s}^2\text{]}$:

$$\begin{aligned} i_{\text{corr}} &= 1,225 (i + 2,2) && \text{wenn } i \geq 7 [\text{\%}] \\ i_{\text{corr}} &= 4,35 + i && \text{wenn } i < 7 [\text{\%}] \end{aligned} \quad (3.14b)$$

Die Zugkraft am Zughacken ist die Zugkraft am Rad wo man die nötige Kraft für die Triebfahrzeugbewegung subtrahiert.

$$F_{\text{att}} = Z - (m_{\text{loc}} * a + F_{d_loc} + F_{f_loc}) \quad (3.44)$$

Der « UIC »-Kupplung ist für eine Bruch-Zugkraft an minimal 850 kN gebaut. Die Eisenbahnbetriebe zwingen dazu eine Sicherheitsmarge, die eine Betriebsgrenze gibt (SNCF: 360 kN, SBB: 650 kN). Es gibt verstärkten Schraubenkupplungen mit der gleichen Geometrie wie Standardkupplung (Bruch-Zugkraft an 1350kN). Mit einer automatischen Kupplung liegt die Grenze an circa 1500 kN.

Bei einer Anfahrt sollen die Grenzen für Adhäsion oder Kupplung sorgfältig beobachtet werden.

4.1 Gleichstrom-Motor

Die Entwicklung der Elektrische Zugsförderung steht auf dem Kollektormotor, ab Anfang bis am Ende des 20. Jahrhundert. Der Motor ist aus der Fahrleitung gespeist. Sein Arbeitspunkt ist steuerbar durch eine Stellwiderstand R_{rh} – die auf der Klemmenspannung handelt – und ein Shunt R_{sh} – der auf die Erregung handelt. Meistens liegt die Erregung in Serie mit dem Anker.

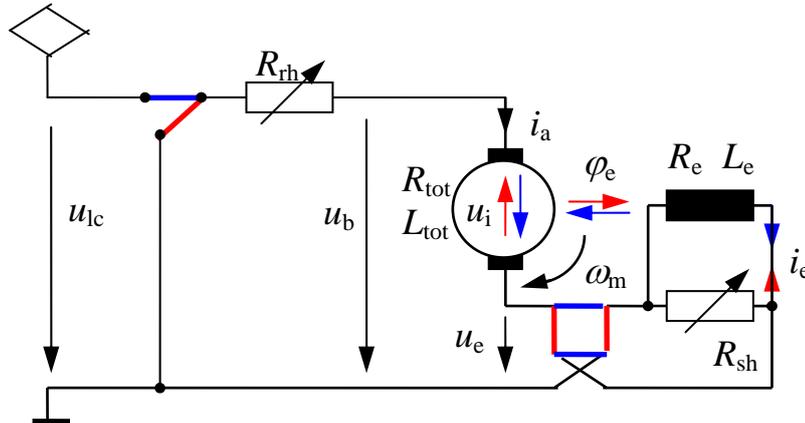


Fig. 4.4 Serie-Motor in Fahren.

Fig. 4.9 Kollektormotor: Widerstandsbremse mit Reihenschlusserregung.

Wenn man die Streuinduktanzen vernachlässigt sind die Motorgleichungen die folgenden. La Die Motorkonstante ist C_m , N_p ist der Anzahl Spule pro Pol und p der Anzahl Polpaare. Der Fluss ist Ψ_e und der Luftspaltfluss ϕ_e .

$$\Psi_e = 2pN_p\phi_e \quad (4.3)$$

$$u_i = C_m\phi_e\omega_m \quad (4.4)$$

$$M_m = C_m\phi_e i_a \quad (4.5)$$

Man schreibt die dynamische Gleichung des Motors, mit Inertie J , und der Gegendrehmoment M_{ex} . Die Drehgeschwindigkeit ist ω_m .

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J}(M_m - M_{ex}) \quad (4.7)$$

Man hat noch die elektrischen Gleichungen in Traktion.

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{L_{tot}}(u_{lc} - R_{rh}i_a - R_{tot}i_a - u_i - R_{sh}(i_a - i_e)) \quad (4.8)$$

$$\frac{d\Psi_e}{dt} = R_{sh}i_a - (R_{sh} + R_e)i_e \quad (4.9)$$

Im Bremsbetrieb soll nur (4.8) angepasst werden: u_{lc} ist null und Zeichen aus u_i soll geändert werden. Drei Schützen erlauben die Schaltungswahl in Fahren (blau) oder in Bremsen (rot) für eine bestimmte Fahrriichtung. In der andere Fahrriichtung sind beiden Erregungsschütze getaucht: Bremsen (blau) und Fahren (rot). Die Schütze bei der Fahrleitung bleibt mit ungeänderter Funktion (AOMC: BDeh 4/4).

Aus den Gleichungen kann man die Kennlinien für jedes ohmsches Wert zeichnen. Wegen des geringes Wertenzahl ändert das Arbeitspunkt nur stufenweise..

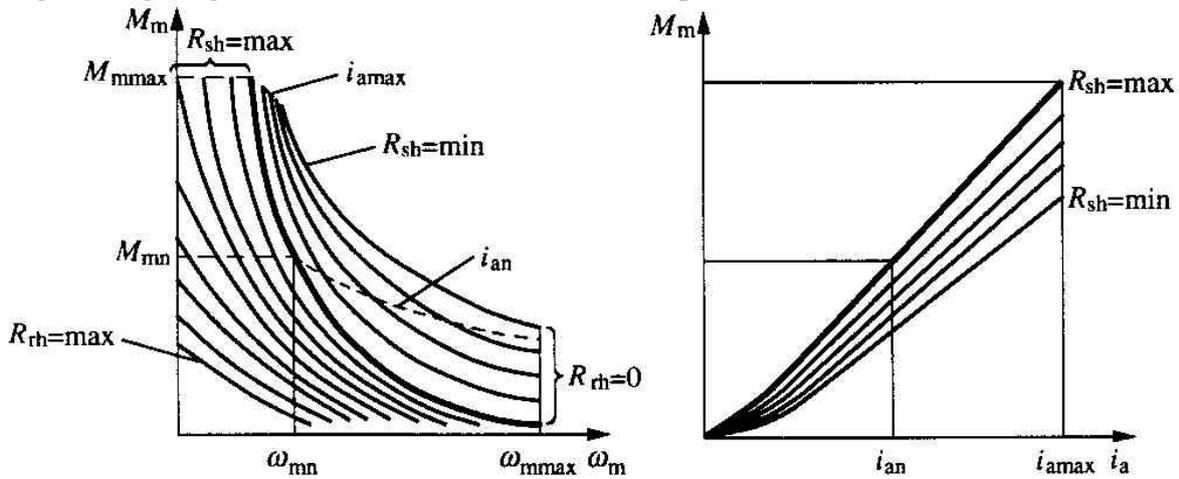


Fig. 4.6 Serie-Motor in Fahren: Kennlinien aus Strom und Geschwindigkeit.

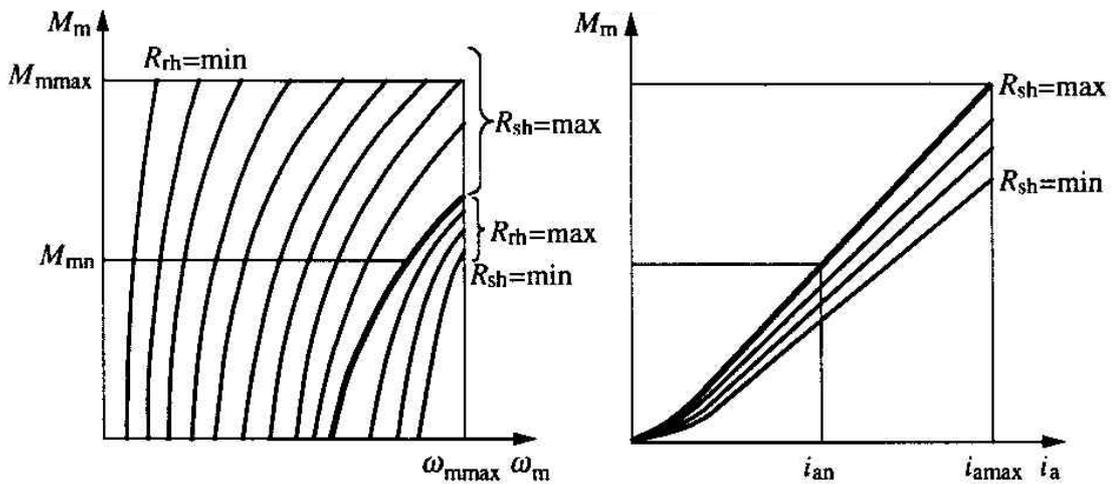


Fig. 4.11 Serie-Motor in Bremsen: Kennlinien aus Strom und Geschwindigkeit.

In Widerstandsbremse kann man auch Fremderregung u_e wählen, aus einer Batterie (SNCF: CC 6500), oder aus einem Generator durch einem Motor angetrieben. Dieses Motor ist aus der Fahrleitung gespeist. (CFF: RAe TEE II).

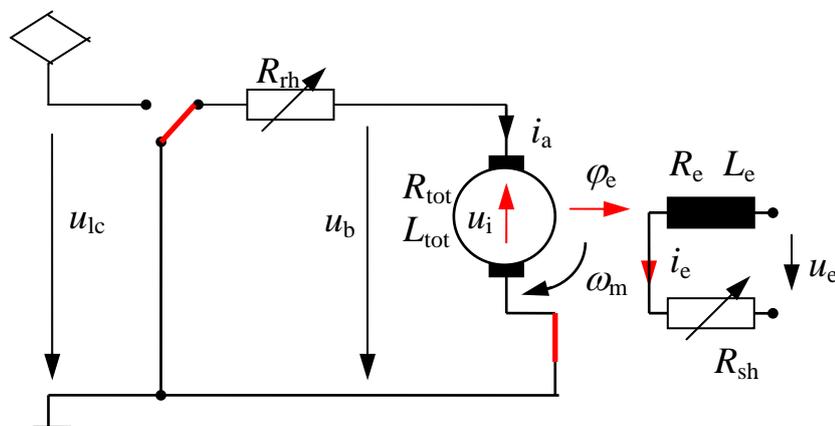


Fig. 4.13 Kollektormotor: Widerstandsbremse mit Fremderregung.

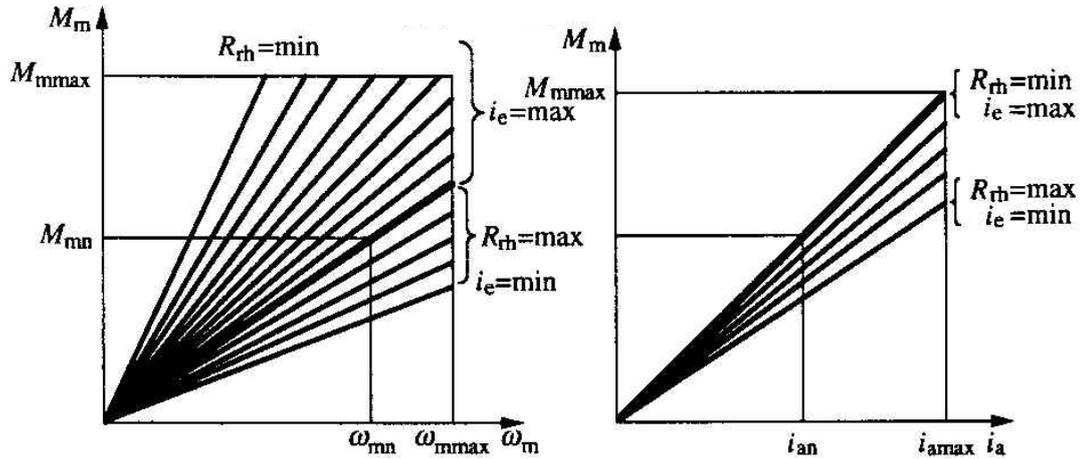


Fig. 4.15 Widerstandsbremse mit Fremderregung: Kennlinien aus Strom und Geschwindigkeit.

. Anstatt die (kinetische oder potentielle) Bremsenergie in einem Widerstand zu zerstören kann man die in die Fahrleitung injizieren: das ist Nutzbremse.

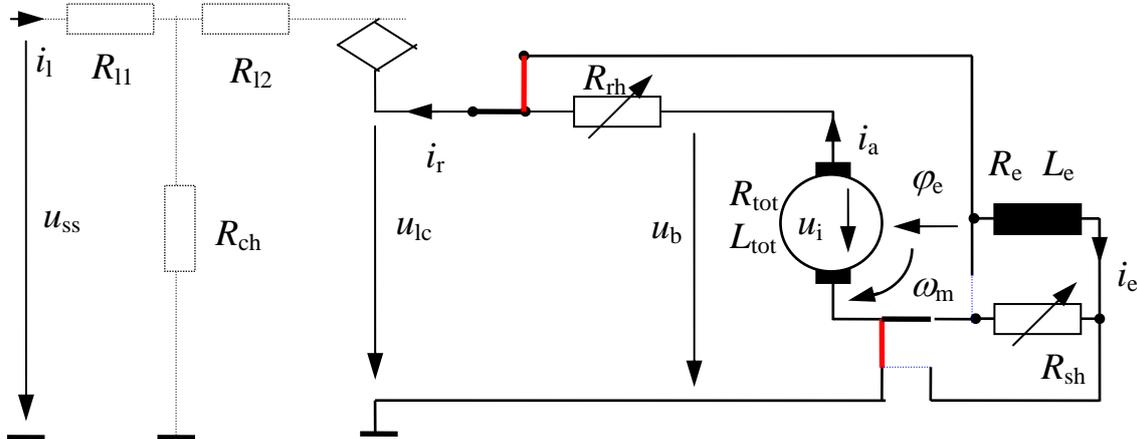


Fig. 4.17 Nutzbremse mit Fremderregung: Prinzip.

In fahren sind die roten Schütze geöffnet und die blauen geschlossen.

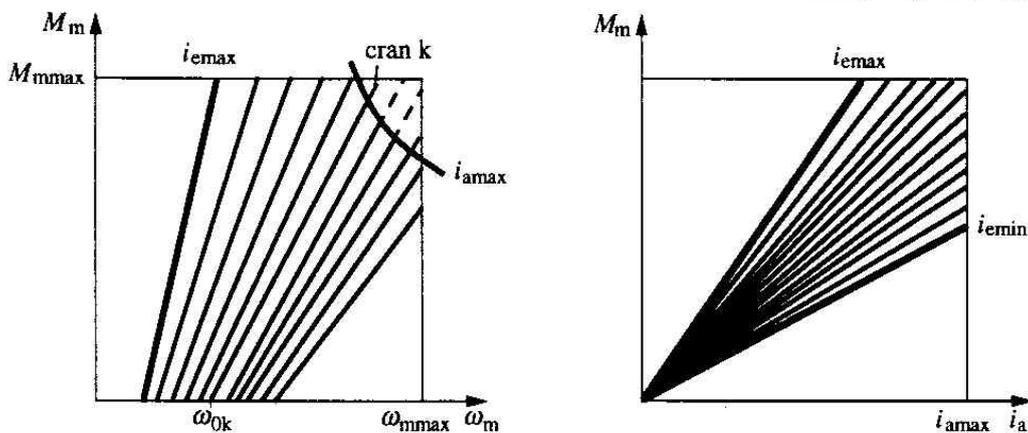


Fig. 4.19 Nutzbremse mit Fremderregung: Kennlinien aus Strom und Geschwindigkeit.

In Fahren, für alle Arbeitspunkte wo das ohmsche Wert nicht null ist, ein Teil des Energie aus Fahrleitung nützt nicht und geht als Hitze.

Um die Arbeitspunkte wo das ohmscher Wert ist zu verbreiten (100 % Wirkungsgrad für Steuerungssystem), nützt man Schütze um die Motorengruppen in Parallel oder in Serie zu schalten. Man kann die Schütze organisieren, um kein Zugkraftverringering während der Umschaltung zu beklagen.

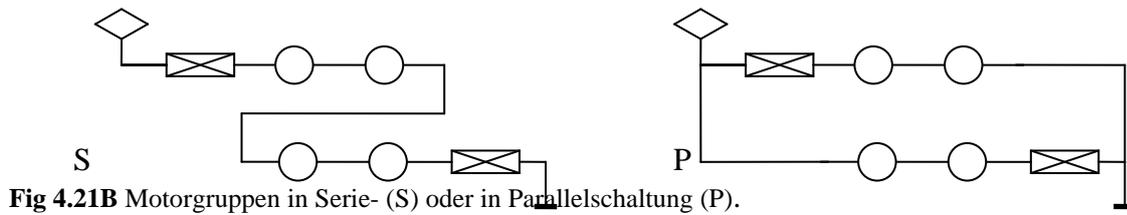


Fig 4.21B Motorgruppen in Serie- (S) oder in Parallelschaltung (P).

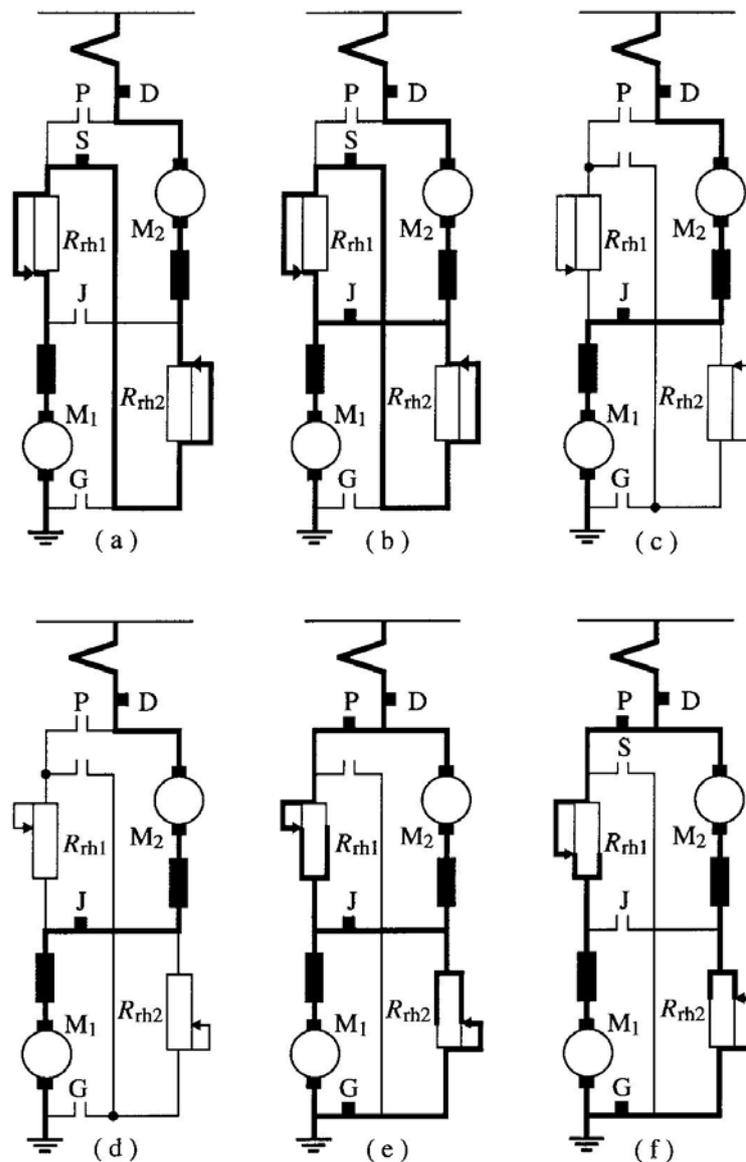


Fig. 4.22 Sequenzen für eine Brücken-Umschaltung (BOB : ABeh 4/4 II).

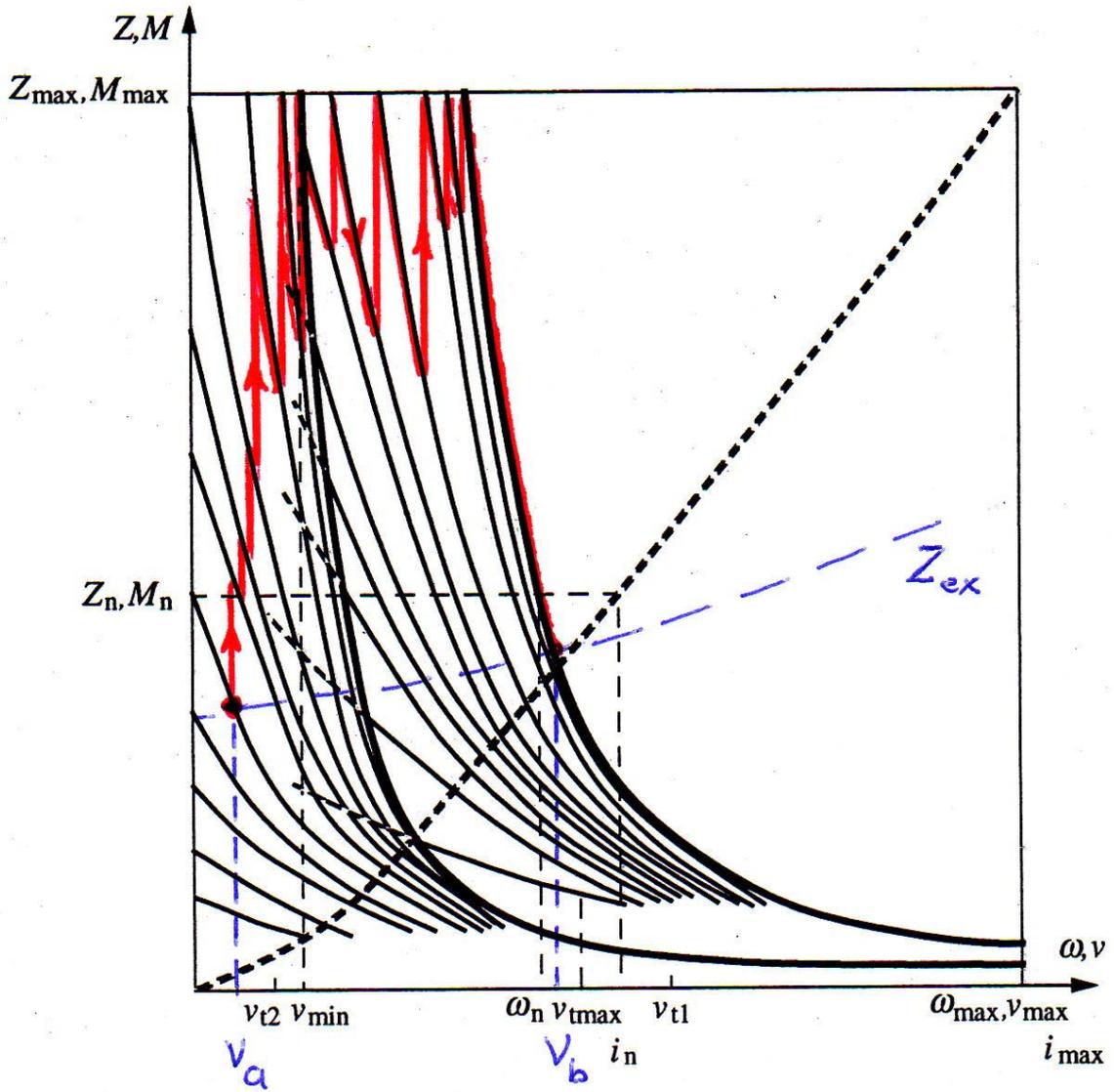


Fig. 4.21 Kennlinien für Reihenschlussmotoren in Serie (S) oder in Parallel (P).

Fig. 4.27 Beschleunigung von V_a bis V_b , mit grosser Zugkraft : Weg der Betriebspunkte.

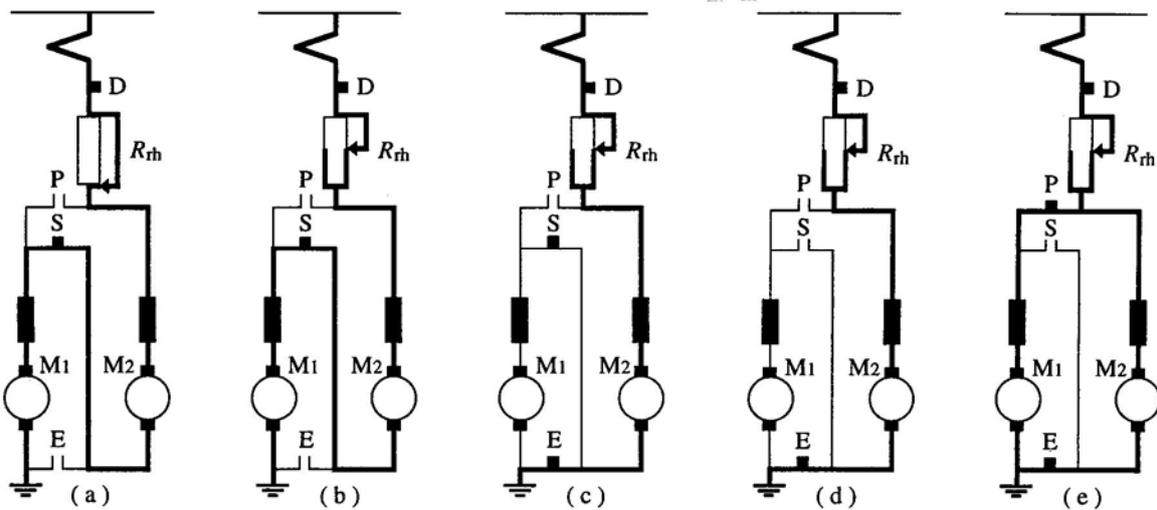


Fig. 4.23 Umgruppierung mit Shuntschaltung (R_{rh} : ABe 4/4).

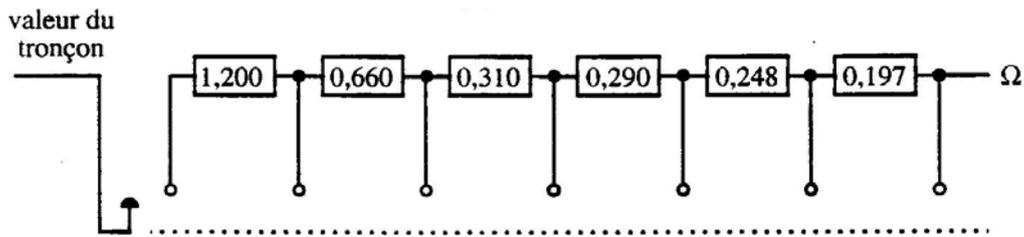


Fig. 4.34 Gleichstrom Nockenschaltwerk, Beispiel. (SNCF : Z2, rhéostat N° 1).

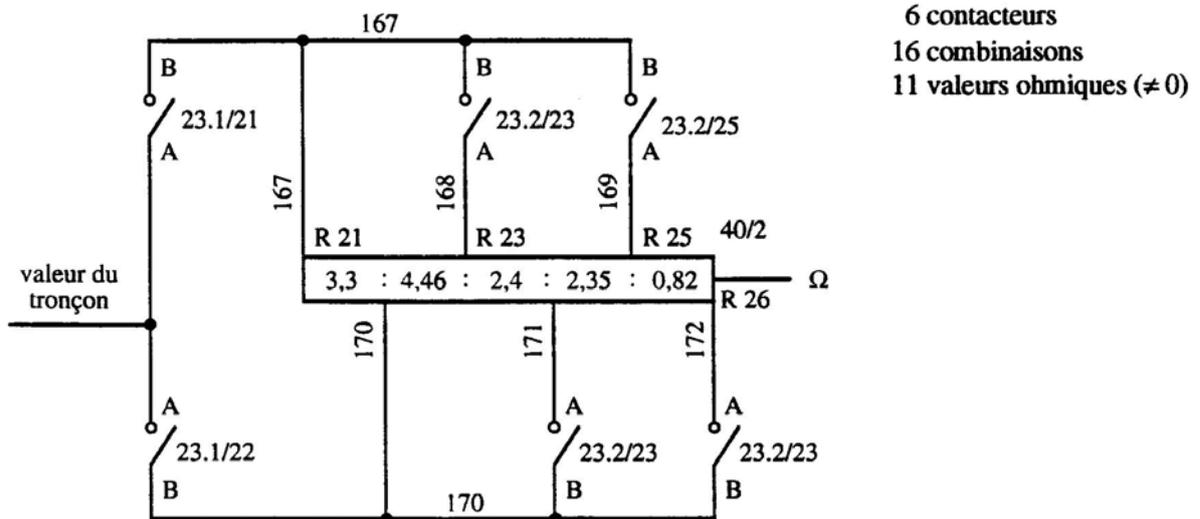


Fig. 4.35 Widerstand mit Schützen, Beispiel. (BOB : ABeh 4/4 III, rhéostat N° 2).

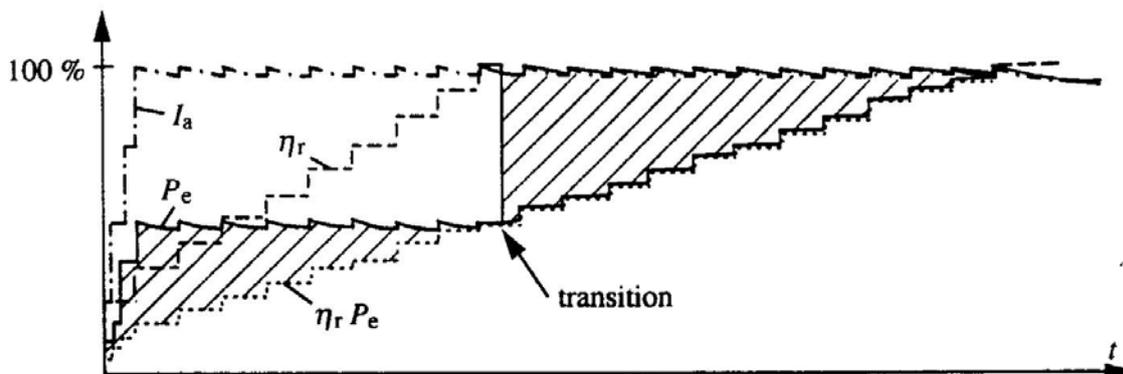
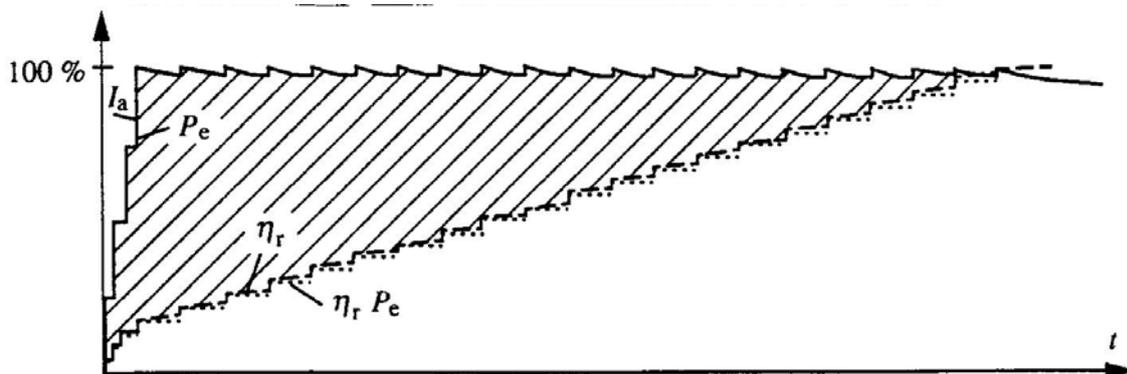


Fig. 4.36 Zugsanfahrt : Widerstandsverlusten : einzige Gruppierung (oben) und mit Umgruppierung (unten)

4.2 Direktmotor

Der Kollektormotor war typisch der elektrischen Zugförderung bis am Ende des 20. Jahrhunderts. Der Motor ist aus der Einphasen-Fahrleitung gespeist. Der Betriebspunkt ist mit einem Stufentransformator gesteuert, der die Klemmenspannung erzeugt. Am häufigsten wird die Erregerwicklung in Serie mit dem Anker geschaltet, das ist ein Reihenschlussmotor. Der Motor ist direkt mit einer Sinus-Spannung gespeist: so *Direktmotor* benannt. Man wird ferner die speziellen Baumassnahmen, durch Behn-Eschenburg um 1905 entwickelt worden, beschreiben.

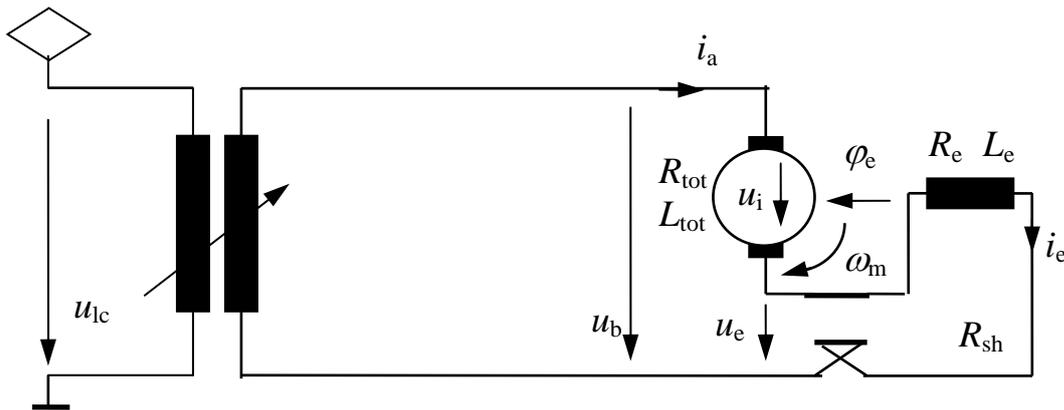


Fig. 4.42 Reihenschlussmotor in Fahren.

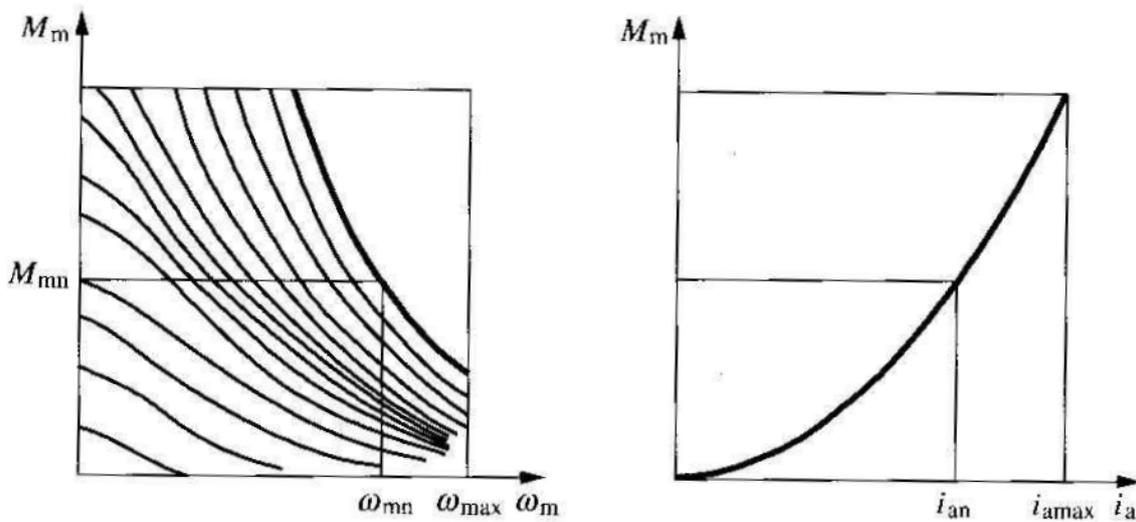


Fig. 4.44 Direktmotor : Kennlinien in Fahren.

Auf der Sektion 4.1 hat man nicht die Wendepolwicklung benannt, die die Kommutationsspannung u_k zwischen Kollektorlamellen kompensiert. (Traité d'Electricité, vol. X, § 8.6.4), diese Wicklung hilft den Strom in der verlassenen Spule des Rotor schneller zu Null zu gehen. Am Anfang der Motorentwicklung existierte diese Wicklung nicht.

$$u_k = L_\sigma \frac{di_a}{dt} \tag{4.19}$$

In Einphasen-Reihenschlussmotor findet man noch Transformationspannung u_{tm} .

$$u_{tm} = 4,44 \phi_e f_{ic} N \tag{4.18}$$

Um diesen beiden Spannungen zu kompensieren schaltet man ein ohmscher Shunt R_c in Parallel mit der Wendepolwicklung. Dazu hat man eine Kompensationswicklung L_{comp} , um den induktiven Spannungsabfall teilweise zu verringern.

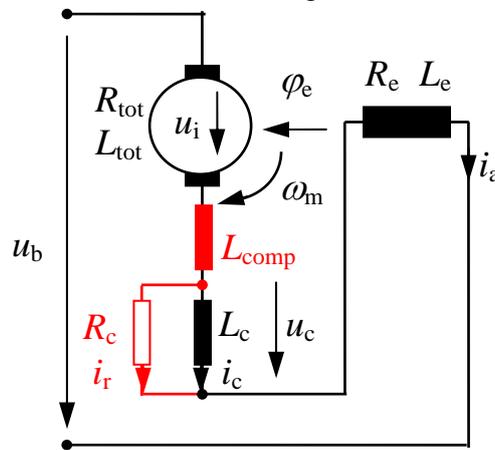


Fig. 4.37 Wicklungen in einem Einphasen-Reihenschlussmotor.

Ein Vektordiagramm schaut den Einfluss des Shunts mit den Spannungen u_c an der Wendepolwicklung, u_k und u_{tm} .

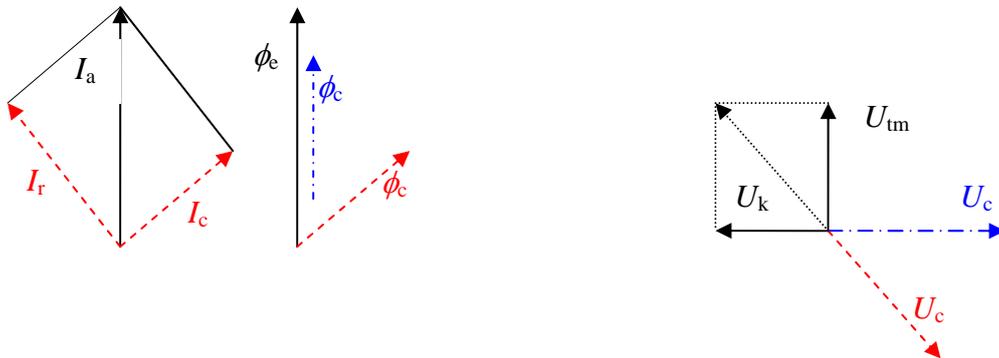


Fig. 4.38 et 4.39 Kommutation in einem Einphasen-Reihenschlussmotor ohne und mit Shunt.

Nur eine Komponente – u_k – ist in Abwesenheit des Shunts kompensiert. Wenn die Ableitungsfunktion des Rotorstromes aus der Geschwindigkeit abhängig ist, ist die Kompensation gut nur für die Geschwindigkeit wofür den Shunt berechnet wurde. Sonst bleibt eine *Funkspannung* u_f übrig.



Fig. 4.40 Kommutation in einem Einphasen-Reihenschlussmotor für kleine und Nenngeschwindigkeit.

Für Bremsbetrieb werden nur einigen Schaltungen vorgestellt: eine für Widerstandsbremse und eine für Nutzbremse. Man kann die Erregerleistung durch einen rotierenden Umformergruppe erzeugen (BLS: Ae 4/4).

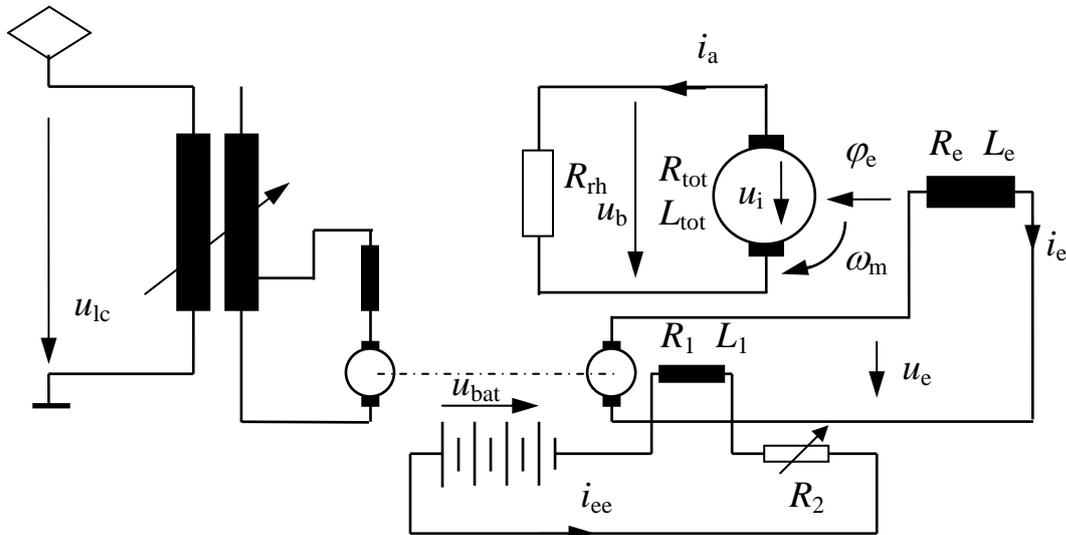


Fig. 4.46 & 4.48 Widerstandsbremse mit Gleichstromerregung: Schaltung mit Generatorgruppe.

Der Erregerstrom i_{ee} für die Erregermaschine ist niedrig, man kann eine stufenlose Widerstand R_2 einbauen.

Man kann auch ein aus der Motoren als Erregermaschine benützen (DB:150). Die Schaltung ist gleich, aber die Erregermaschine ist durch der Achse angetrieben.

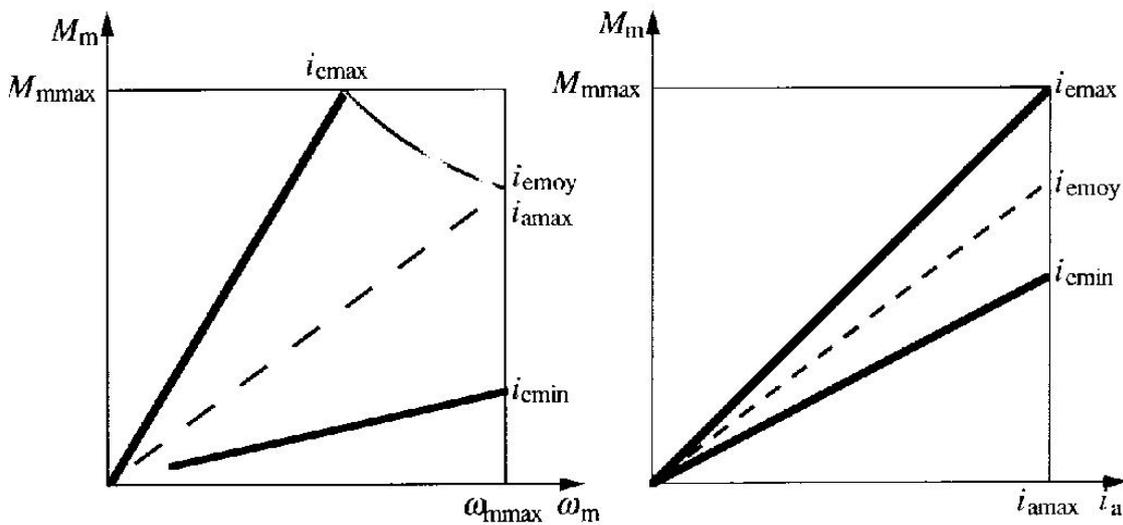


Fig. 4.50 Widerstandsbremse mit Gleichstromerregung: Kennlinien mit Generatorgruppe

Anstatt die Bremsenergie ein einer Widerstand zu vernichten kann man sie im Netz injizieren. Die jüngste Variante des Behn-Eschenburg-Prinzip ist die Schaltung mit Erregermotor (CFF: Re 4/4 II).

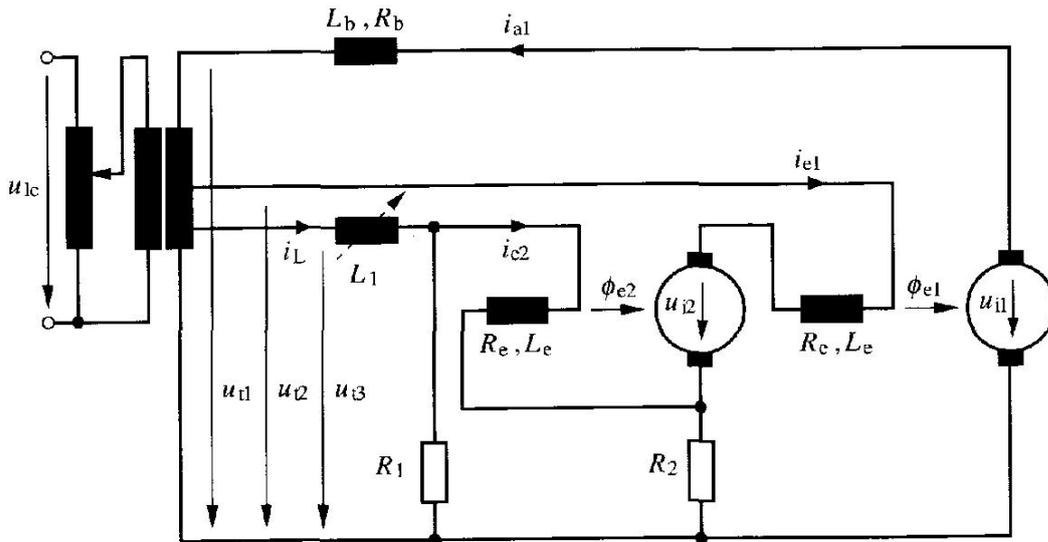


Fig. 4.59 Nutzbremse mit Fremderregung: Schaltung mit Erregermotor.

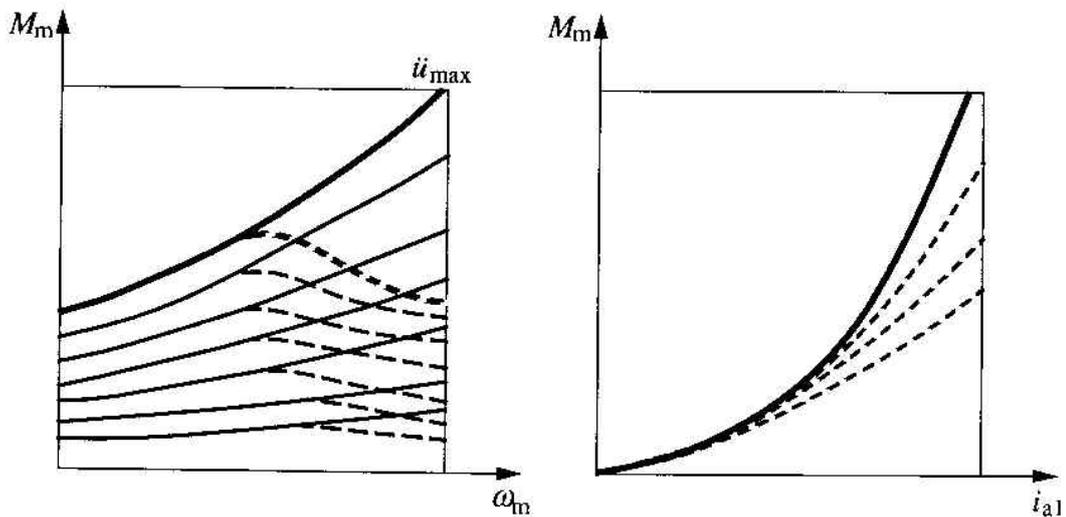


Fig. 4.61 Nutzbremse mit Fremderregung: Kennlinien mit Erregermotor.

Der Leistungsfaktor ist ziemlich arm.

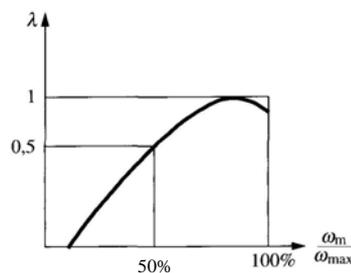


Fig. 4.62 Nutzbremse mit Fremderregung: Leistungsfaktor mit Erregermotor.

Die beiden letztentwickelten Serien mit Direktmotoren wurden ab 1972 (CFF: Re 6/6) und 1974 (DB: 155) geliefert. Die letzten gebauten Triebfahrzeugen wurden in Jahren '80 (CFF: Re 4/4 II und DB: 155) erzeugt.

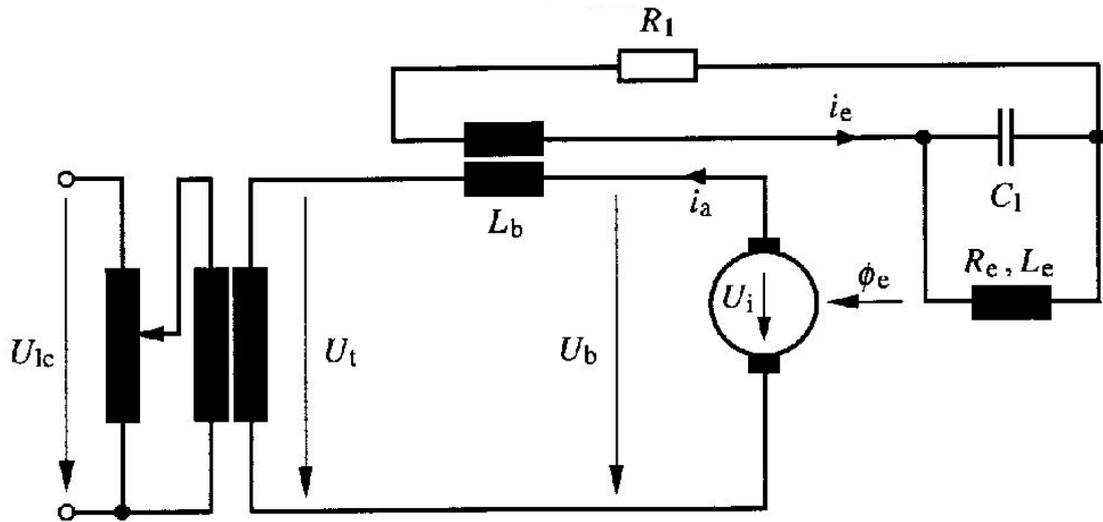


Fig. 4.63 Bremschaltbild mit R sonanzschaltung.

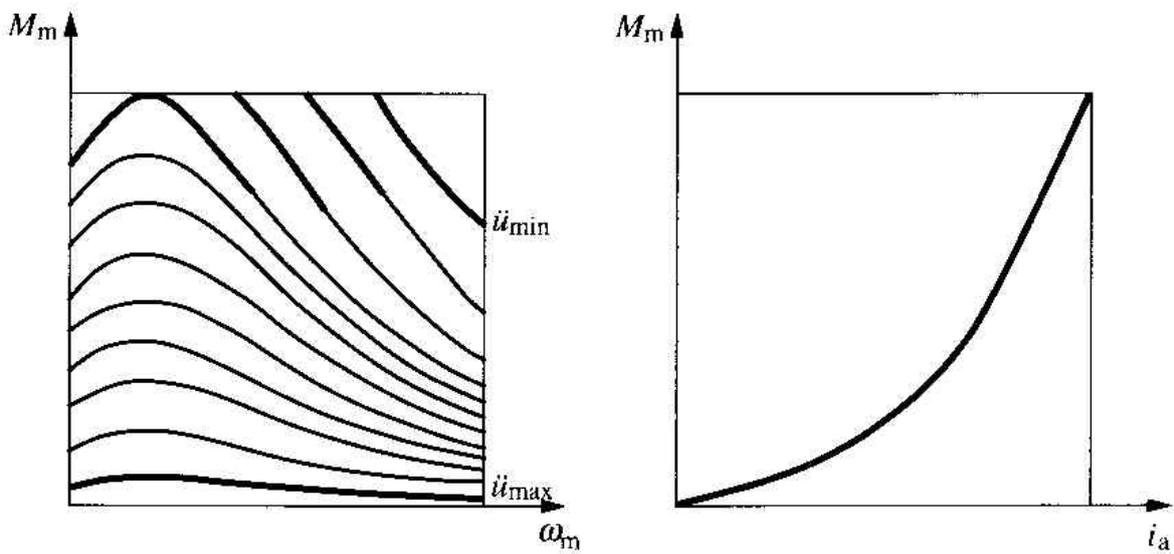


Fig. 4.65 Bremse mit R sonanzschaltung : Kennlinien.

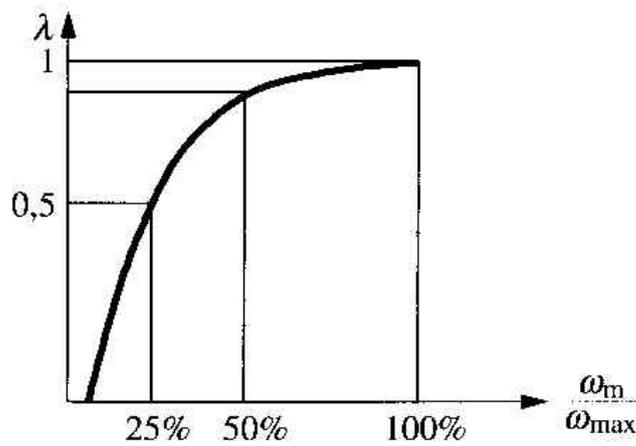


Fig. 4.66 Bremse mit R sonanzschaltung : Leistungsfaktor.

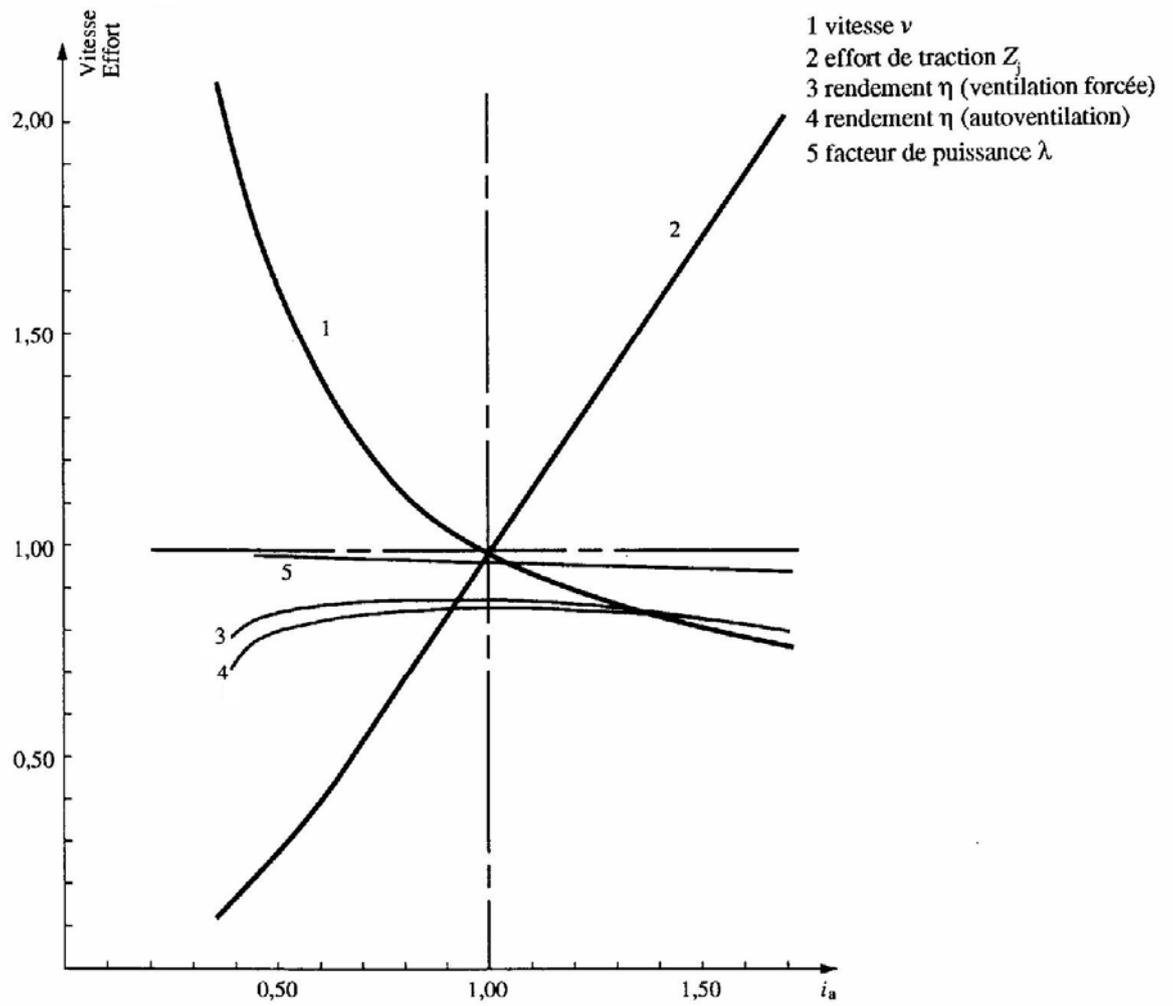


Fig. 4.67 Typische Kurven eines Direktmotor an der Versuchsanlage.

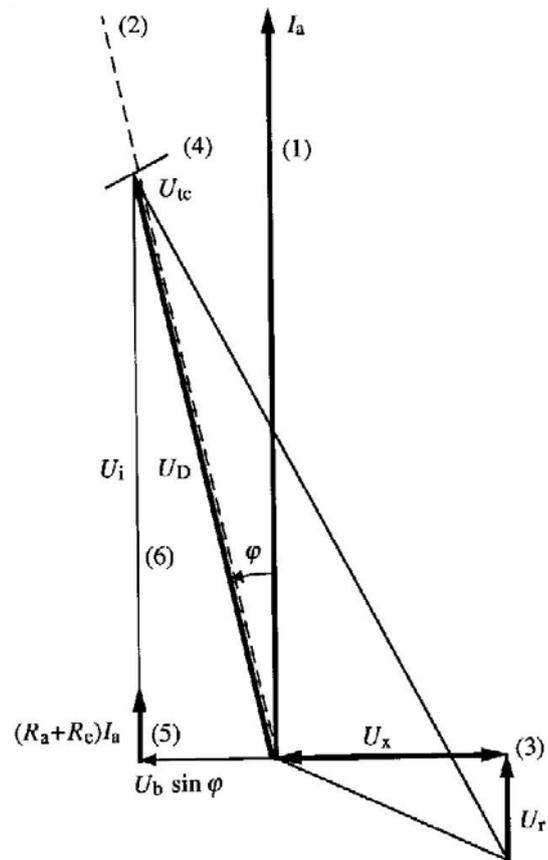


Fig. 4.71 Vektordiagramm eines Direktmotor im Dauerdienst.

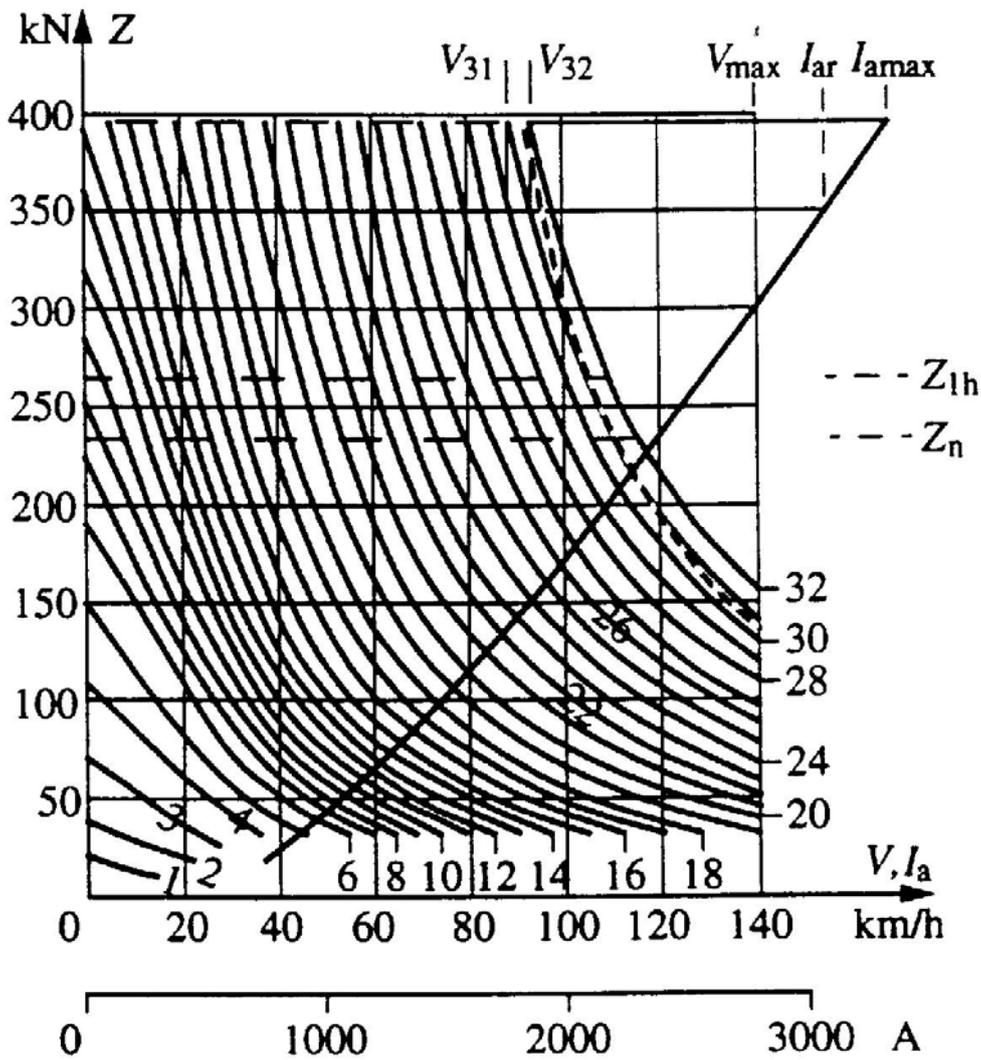


Fig. 4.72 Kennlinien mit Direktmotoren.

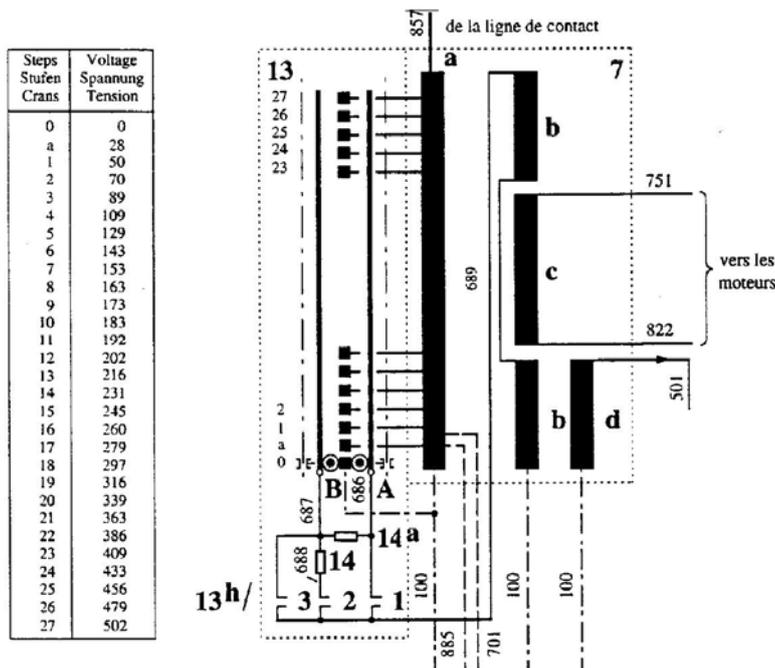


Fig. 4.74 Hochspannung-Stufenschalter: Lokomotive CFF Ae 6/6: 6 Motoren in Parallel mit 4300 kW.

Steps Stufen Crans	Voltage Spannung Tension	Switches Schützen									Contacteurs					
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	27	28	29	30	31	32
0	0															
1	100	●	●													
2	140	●	●	●	●	●										
3	140	●	●	●	●	●	●									
4	167	●	●	●	●	●	●	●								
5	193		●	●	●	●	●	●	●							
6	220			●	●	●	●	●	●	●						
7	247				●	●	●	●	●	●						
8	273					●	●	●	●	●						
9	300						●	●	●	●						
10	330							●	●	●						
11	360								●	●						
12	390									●						
13	427															
14	463															
15	500															
16	543															
17	587															
18	630															
19	677															
20	723															
21	770											●				
22	817											●	●			
23	863											●	●	●		
24	910											●	●	●	●	
25	957											●	●	●	●	●
26	1003											●	●	●	●	●
27	1050											●	●	●	●	●

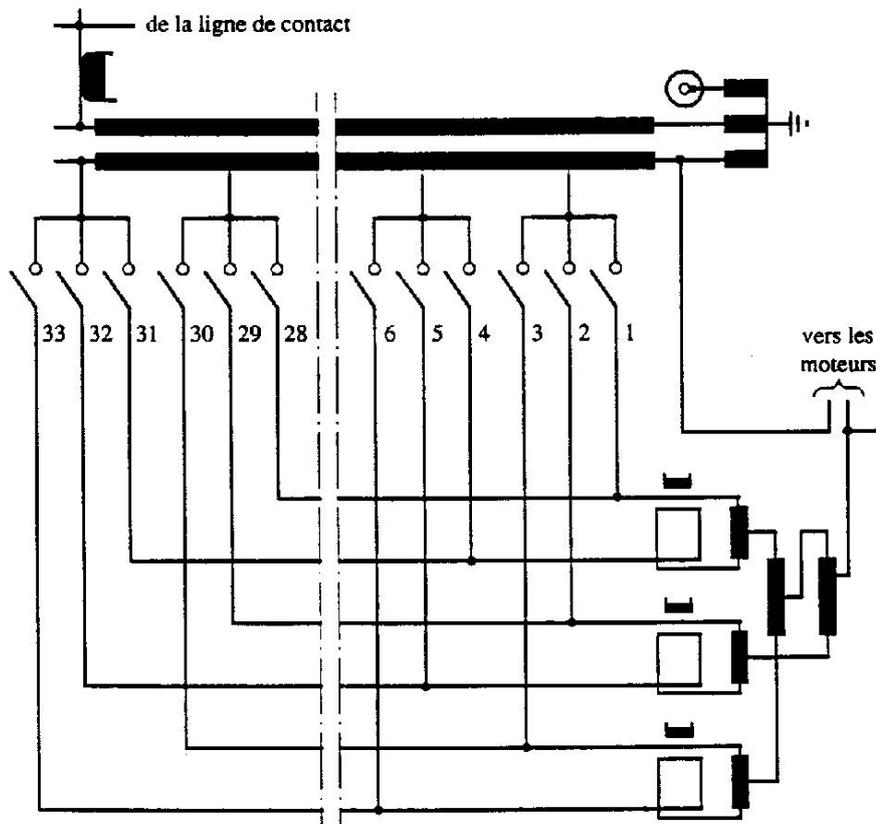


Fig. 4.75 Niederspannungsschütze: 1/3 aus Lokomotive SJ Dm3: 2 Motoren in Serie mit 2400 kW.

4.3 Kollektormotor: Steuerung mit Gleichstromsteller

Auf einer induktiven Last kann man eine pulsierte Spannung u_d mit einem Kommutator CS führen. Die mittlere Spannung u_b an Lastklemmen ist das Produkt der Taktverhältnis und der Speisespannung u_{lc} . Die Diode D_r , benannt "Freilaufdiode" erlaubt das induktives Strom zu fließen, wenn der Kommutator geöffnet wird. Ein EingangsfILTER ist bei der Frequenz des Gleichstromstellers dimensioniert, um die Stromwellen Im Speisungsnetz zu begrenzen.

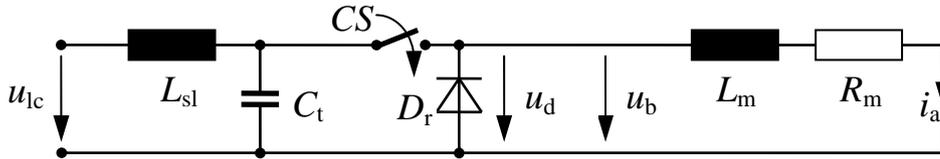


Fig. 4.77 Gleichstromsteller : Prinzip.

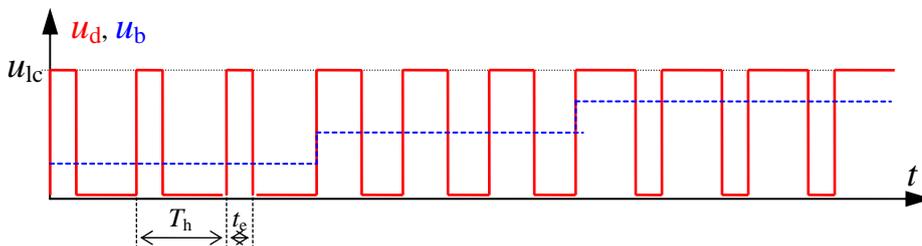


Fig 4.78 Momentane Spannung u_d und mittlere Spannung u_b an der Gleichstromstellerausgang.

$$u_b = u_{lc} \frac{t_e}{T_h} \tag{4.43}$$

Der Kollektormotor kann aus Der Fahrleitung durch einen Gleichstromsteller gespeist werden. Der Arbeitspunkt des Motors wird mit dem Taktverhältnis des Gleichstromstellers stufenlos eingestellt. Das Kommutator ist eine statischer Hüpfen: eine Thyristor-Schaltung, ein GTO oder ein IGBT, nach der Entwicklung zwischen 1970 und 2000, mit Taktfrequenzen von 400 Hz zu 2 kHz. Man schaut hier eine heutige Schaltung (TL: M1). Die Inversion des Leistungsflusses ist durch den Richtungswechsel des Stroms erreicht. Bei den ersten Realisierungen wurde der Gleichstromsteller in Fahren und Bremsen benützt: die Schaltungstopologie war durch elektromechanischen Schützen bei Nullstrom geändert.

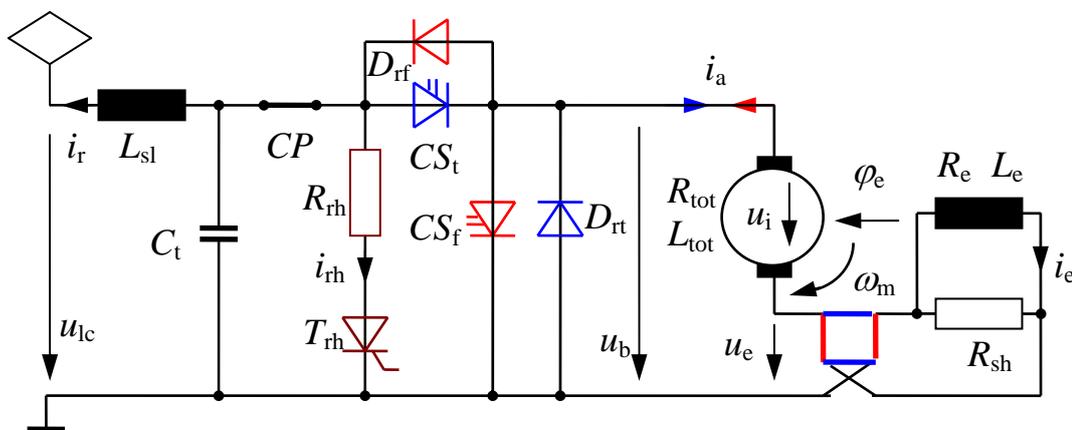


Fig. 4.76 Gleichstrommotor und Gleichstromsteller: Fahren.

Fig. 4.82 Gleichstrommotor und Gleichstromsteller: Nutzbremse mit Serie-Erregung.

Fig. 4.88A Gleichstrommotor und Gleichstromsteller: Widerstandsbremse mit Serie-Erregung.

Die Widerstand R_{sh} erlaubt eine Umleitung aus 2 % des mittleren Ankerstrom, und fast des ganzen Wellenstroms weil dieser Weg keine Induktivität hat. Die Wellenkomponente des Drehmoments ist in diesem Fall begrenzt. Die Nutzbremse erfolgt durch den Schütz CS_f und die Erholungsdiode D_f . Wenn das Netz nicht fähig ist, die ganze Bremsleistung zu empfangen, die Differenz ist in dem festen Widerstand R_{rh} durch den Bremsth Thyristor T_{rh} zerstört. Man spricht von Mischbremse.

In reiner Widerstandsbremse (Charakteristik 4.90A), ist der Hauptschütz CP offen und der Bremsschütz CS_f taktet auf den Bremswiderstand um ein äquivalentes Wert zu steuern. In diesem Fall wird oft der T_{rh} mit einer Schütze oder einer Gegendiode ersetzt.

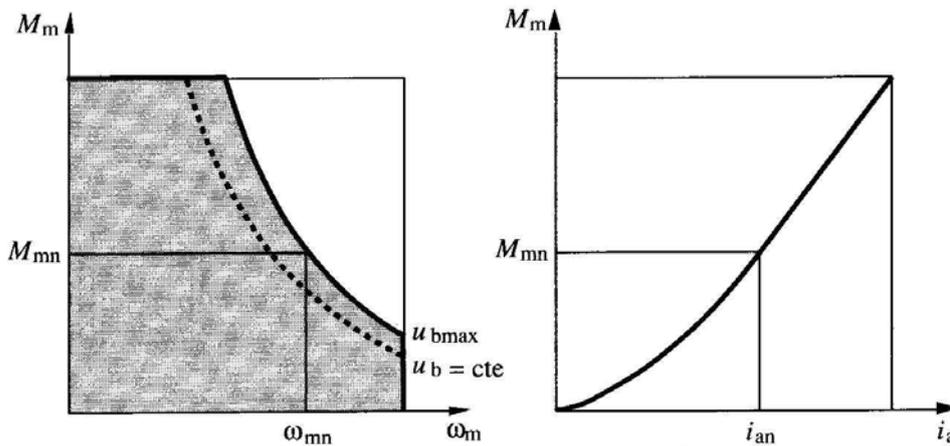


Fig. 4.79 Gleichstrommotor und Gleichstromsteller: Kennlinien in Fahren.

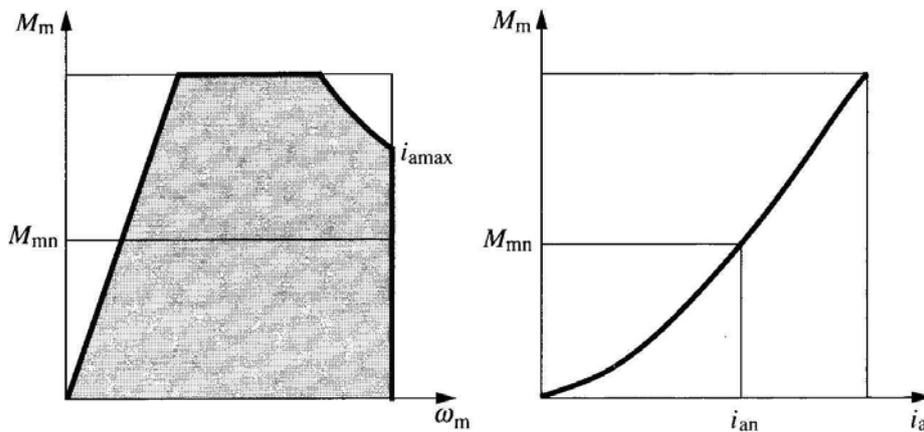


Fig. 4.85 Gleichstrommotor und Gleichstromsteller: Kennlinien in Nutzbremse mit Serie-Erregung.

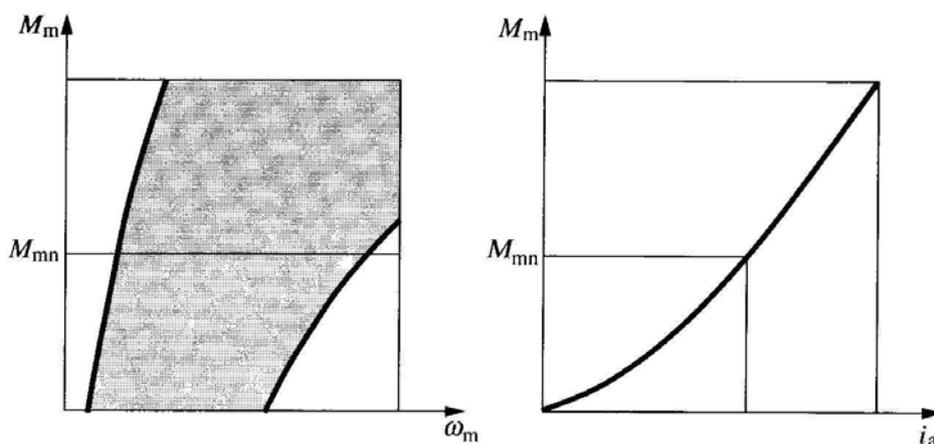


Fig. 4.90A Gleichstrommotor und Gleichstromsteller: Kennlinien in Widerstandsbremse mit Serie-Erregung.

Die Inversion des Leistungsflusses kann auch durch den Richtungswechsel der Klemmenspannung erreicht. In diesem Fall braucht man ein einziger Gleichstromsteller CS . Der Schütz CF ist in Bremsbetrieb offen (Semaly : Metro A, Üstra : 6000, SZU : Be 4/4). In diesem Fall auch steuert der Bremsthyristor T_{rh} nur den Anteil Energie der nicht gewonnen werden kann.

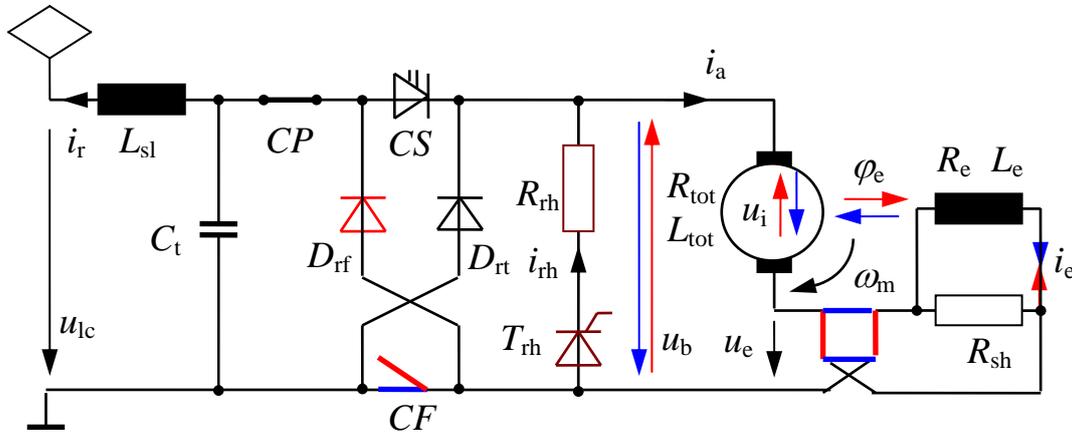


Fig. 4.87A Gleichstrommotor und Gleichstromsteller: Fahren.

Fig. 4.87B Gleichstrommotor und Gleichstromsteller: Nutzbremse mit Serie-Erregung.

Fig. 4.88B Gleichstrommotor und Gleichstromsteller: Widerstandsbremse mit Serie-Erregung.

Die Charakteristiken sind gleich (fig. 4.79, 4.85 et 4.90A).

Man kann auch eine Fremderregung wählen, mit einem spezifischem Gleichstromsteller CS_e . Wenn dieser ist in Fahren gesteuert, sodass der Erregerstrom den Ankerstrom bis voll Öffnung des Hauptgleichstromstellers CS_t folgt, man spricht von *fremderregtem Motor mit Reihenschlusscharakteristik*. Wenn CS_t voll offen ist, kann man den Erregerstrom reduzieren um den Feld zu schwächen und die Betriebsebene des Motors zu erweitern (MOB: GDe 4/4). In Mischbremse steuert der Bremsthyristor T_{rh} nur den Anteil Energie der nicht bei Netz gewonnen werden kann. In reiner Widerstandsbremse ist der Gleichstromsteller CS_f inaktiv (oder abwesend), CP ist offen und ein Schütz ersetzt oft T_{rh} .

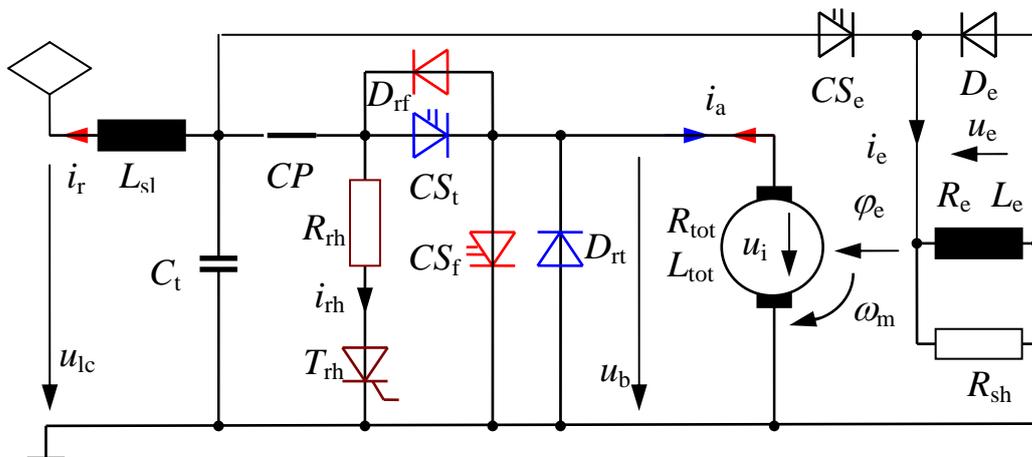


Fig. 4.95 Gleichstrommotor und Gleichstromsteller: Fahren mit Fremderregung.

Fig. 4.86A Gleichstrommotor und Gleichstromsteller: Nutzbremse mit Fremderregung.

Fig. 4.88C Gleichstrommotor und Gleichstromsteller: Widerstandsbremse mit Fremderregung.

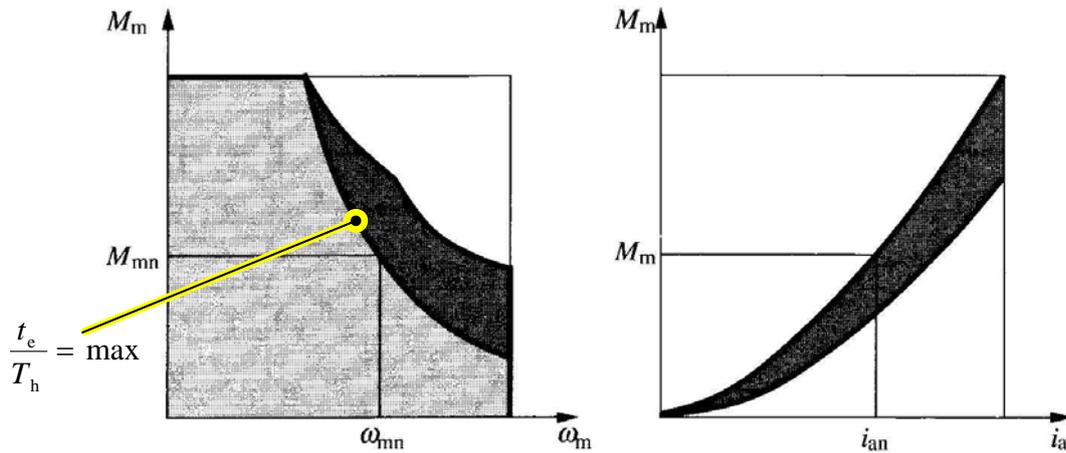


Fig. 4.97 Gleichstrommotor und Gleichstromsteller: Kennlinien in Fahren mit Fremderregung : « Reihen-schlusscharakteristik ».

Es gibt andere Steuerung, die einen konstanten Erregerstrom bis voll Öffnung des Hauptgleichstromstellers CS_t zwingen. Wenn CS_t voll offen ist, kann man den Erregerstrom reduzieren um den Feld zu schwächen und die Betriebsebene des Motors zu erweitern (SL : C10)

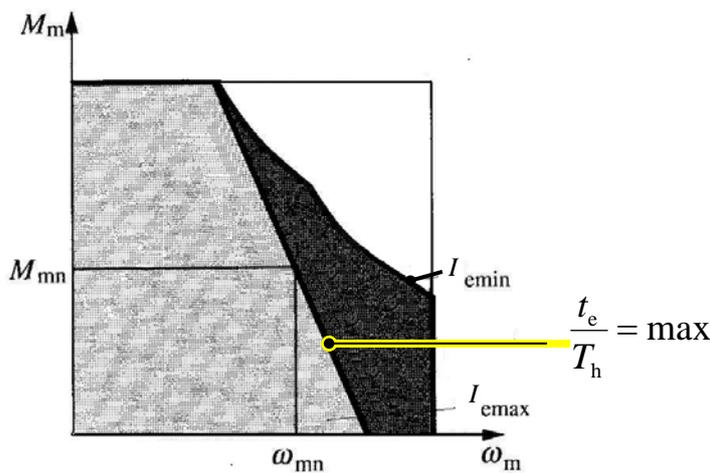


Fig. 4.97A Gleichstrommotor und Gleichstromsteller: Kennlinien in Fahren mit konstanter Fremderregung

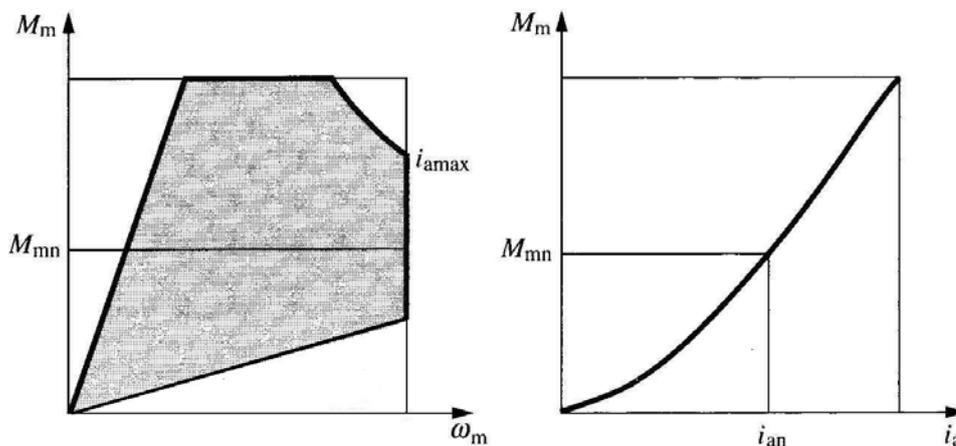


Fig. 4.90C Gleichstrommotor und Gleichstromsteller: Kennlinien in Widerstandsbremse mit Fremderregung.

In Nutzbremse ist die Charakteristik auf Bild 4.85 geschaut.

Bei Serie-Erregung kann man auch die Feldschwächung durchführen: Thyristor T_{sh} und Diode D_{sh} (SNCF: BB 7200). Der Thyristor T_{sh} ist eingeschaltet während der Hauptgleichstromsteller CS_t den Strom führt, der Ankerstrom ist so ausser der Erregungsspule umgeleitet. Bei Ausschaltung von CS_t , T_{sh} natürlich ausgeht.

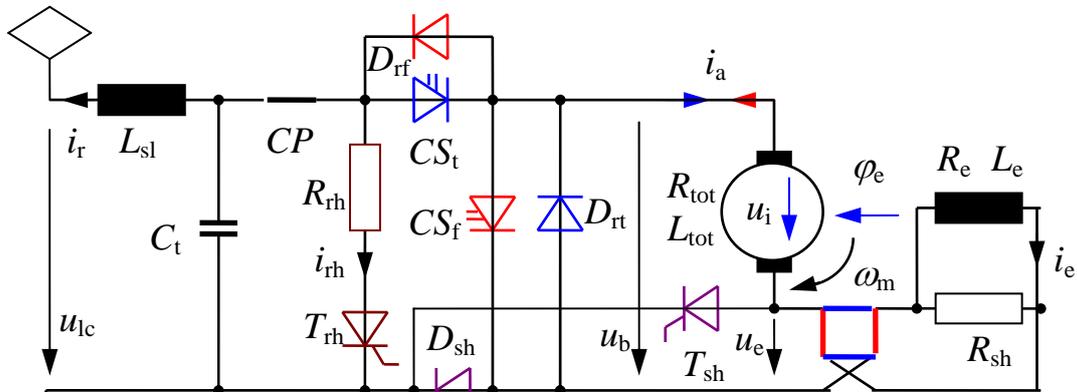


Fig. 4.93 Gleichstrommotor und Gleichstromsteller: Fahren mit Feldschwächung.

Die Charakteristik steht auf Bild 4.97.

In Gegenteil zur Widerstand-Steuerung zerstreut die Gleichstromsteller-Steuerung keine Energie in einem Widerstand. Der Wirkungsgrad des Antriebs ist viel besser bei Anfahrt. Man soll trotzdem den Wirkungsgrad des Gleichstromstellers nicht vergessen: Kommutationsverluste und Leitungsverluste in Halbleiter. Die letzten Gleichstromstellern haben euer Wirkungsgrad an 98 % in der ganzen Betriebsebene, inbegriffen bei Vollöffnung. Der Wirkungsgrad der ersten Gleichstromstellern (1970 – 1980) war unter 95 %. Man weiss dass ein Motor, für eine bestimmte Nennleistung berechnet, kann kürzlich ein höhere Leistung führen. Diese Möglichkeit ist viel bei Widerstand-Steuerung benützt. Die Halbleiter haben sehr kurze thermische Konstante und eine momentane Überlast – schon eine Fraktion einer Millisekunde – bringt eine zu hohe Temperatur und das Zerstören des Halbleiters. Die Berechnung des Gleichstromstellers hängt an der **maximalen** Leistung des Triebfahrzeuges und nicht der Nennleistung der Triebmotoren.

Bei Widerstandsbremse nützt man auch Shunt-Erregung: die Erregungsenergie ist zuerst aus der Batterie bekommen, und dann in Ausschlag der Bremswiderstand. (CSD : 363).

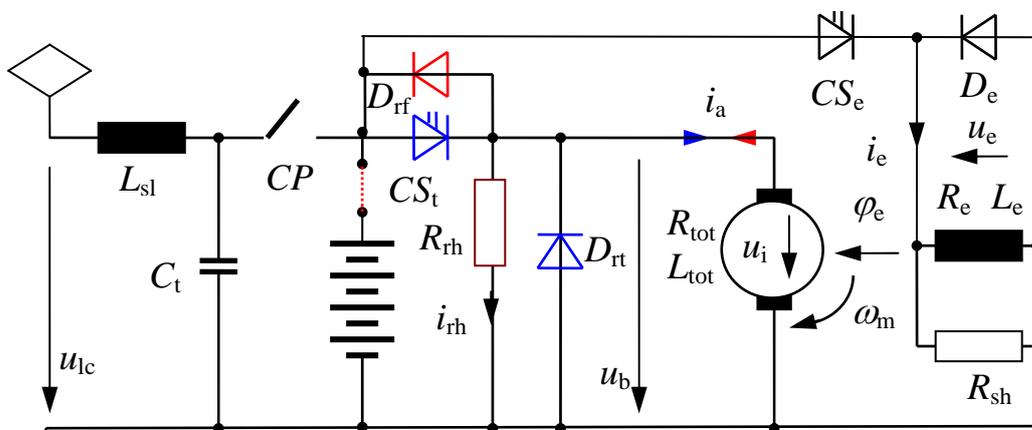


Fig. 4.95 Gleichstrommotor und Gleichstromsteller: Fahren mit Fremderregung.

Fig. 4.88B Gleichstrommotor und Gleichstromsteller: Widerstandsbremse mit Shunt-Erregung.

Die Charakteristik ist gleich wie bei Fremderregung (fig. 4.90C).

Die Schaltung mit automatischer Feldschwächung wurde auch benützt. Die Steuerung ist so vereinfacht: nur der Hauptgleichstromsteller soll gesteuert werden. Die Erregung erfolgt durch den Ankerstrom sofern der Hauptgleichstromsteller blockiert ist. Wenn diese Zeitdauer sehr kurz ist nützt es nicht für eine volle Erregung. Die Schaltung geht zur Feldschwächung.

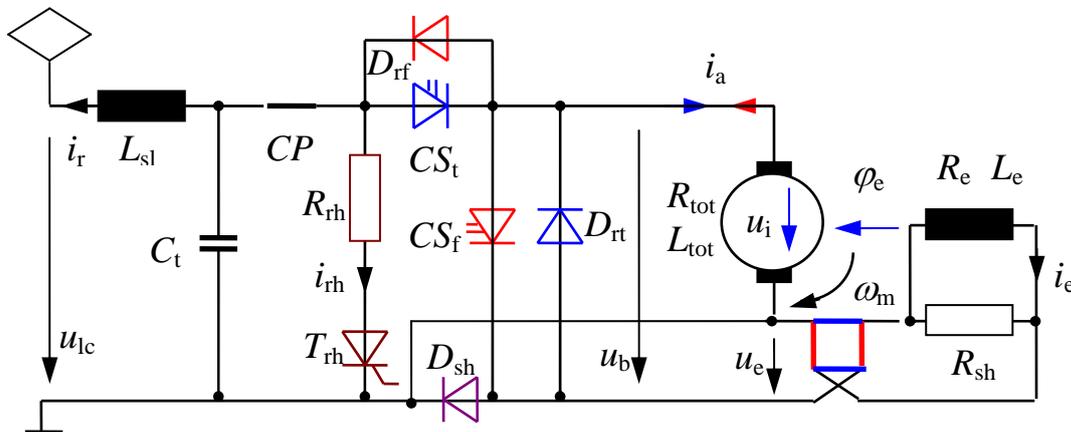


Fig. 4.98 Gleichstrommotor und Gleichstromsteller: Fahren mit automatischer Feldschwächung..

Die Charakteristik ist gleich wie Bild 4.97, aber die Grenze zwischen Vollfeld und Feldschwächung ist sehr unscharf. (NStCM: Be 4/4). Die Vollöffnung liegt hier an der äusseren Kurve der Charakteristik.

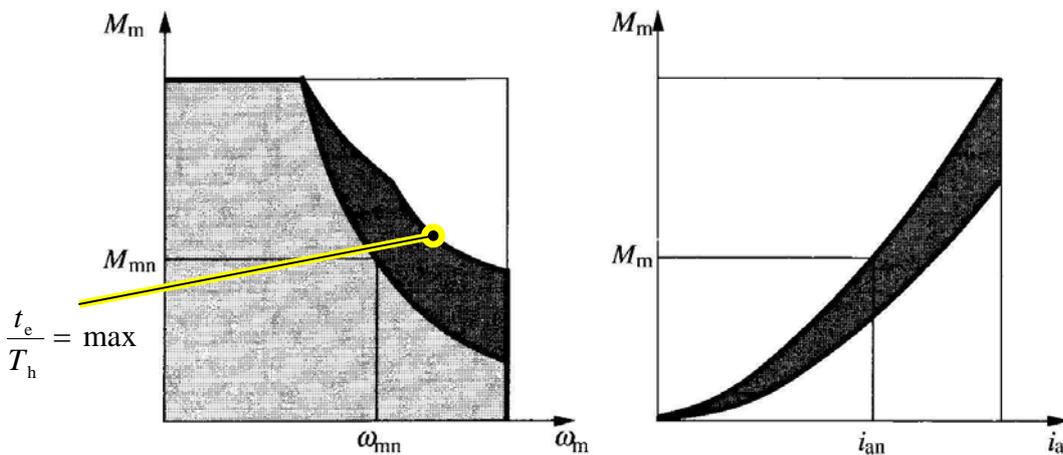


Fig. 4.97C Gleichstrommotor und Gleichstromsteller: Charakteristik in Fahren mit automatischer Feldschwächung..

Um die Stromüberschwingungen zu begrenzen, the Gleichstromstellerelemente sind nicht einfach in Parallel geschaltet, sondern in Raster.(SNCF: BB 7200).

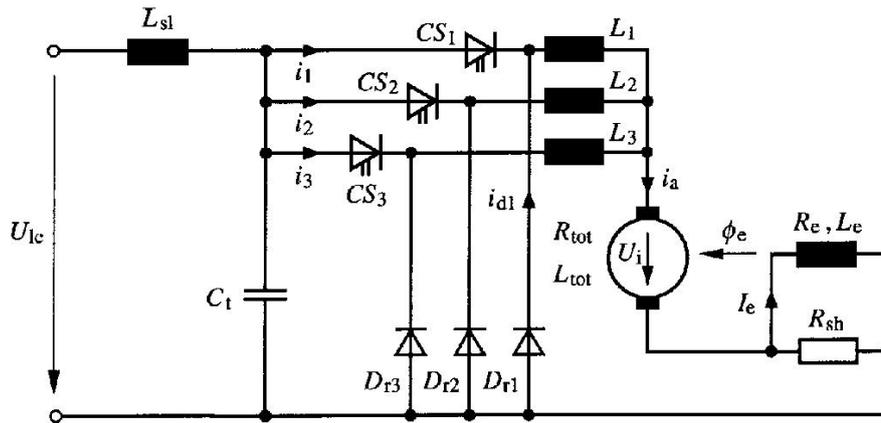


Fig. 4.102 Prinzip eines Raster-Gleichstromsteller.

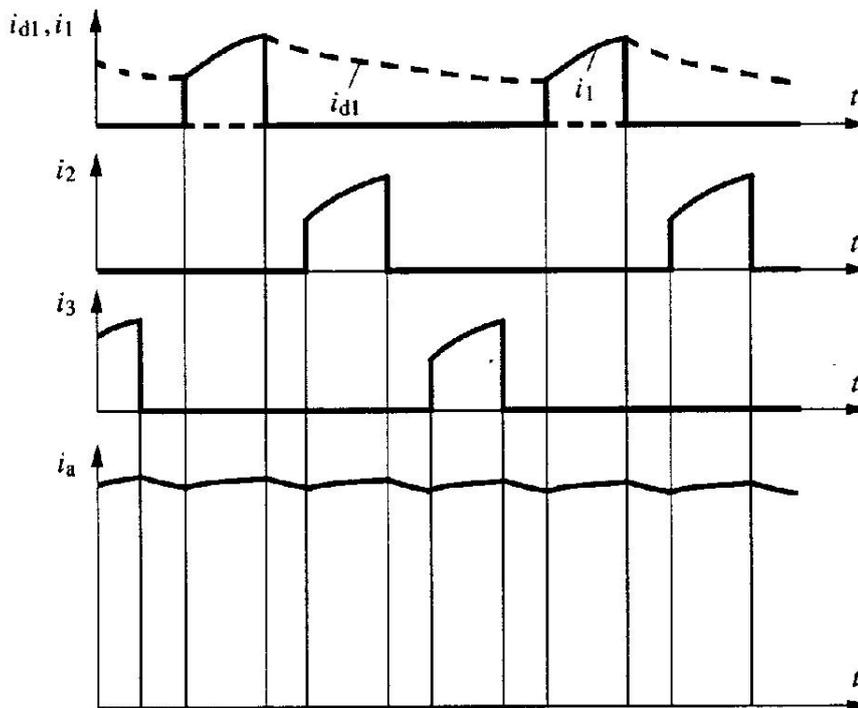


Fig. 4.103 Ströme in Motor und in Gleichstromstellern.

Der Vernier-Gleichstromsteller begrenzt die Zugkraftstufe beim Anfahr. (SNCB: 27).

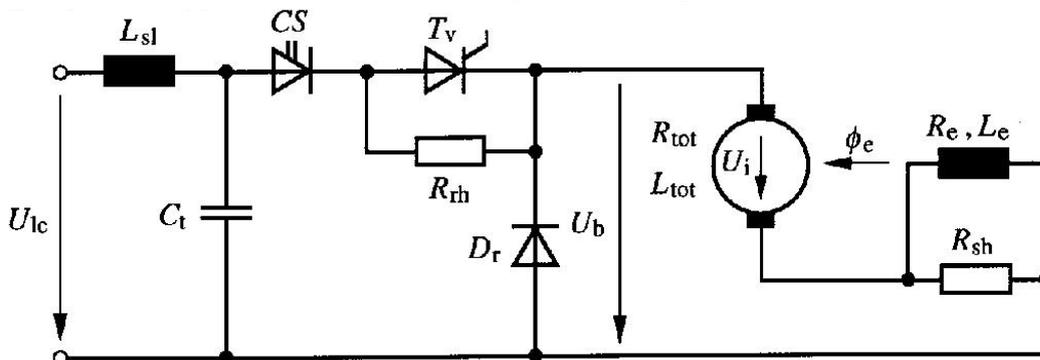


Fig. 4.104 Prinzip eines Vernier-Gleichstromsteller.

Wenn ein Triebfahrzeug meistens in Feldschwächungsebene fährt, kann eine Hybridsteuerung benutzt werden: Widerstandsteuerung für den Anker und Gleichstromsteller für die *Fremderregung mit Reihenschlusscharakteristik*.

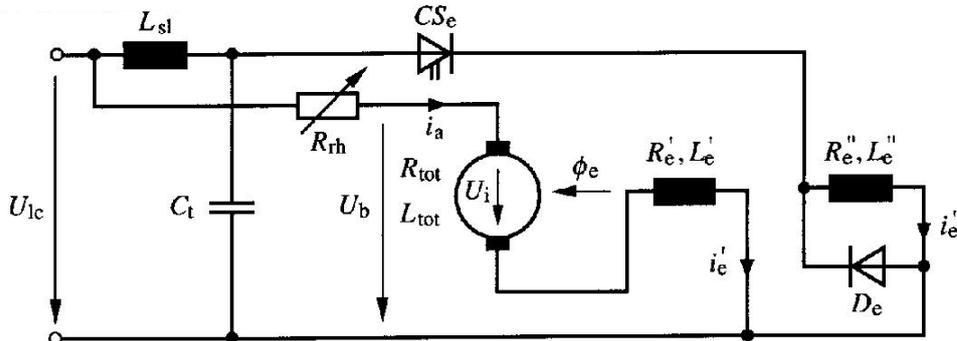


Fig. 4.105 Hybridsteuerung: Prinzip in Fahrbetrieb (JNR : 215).

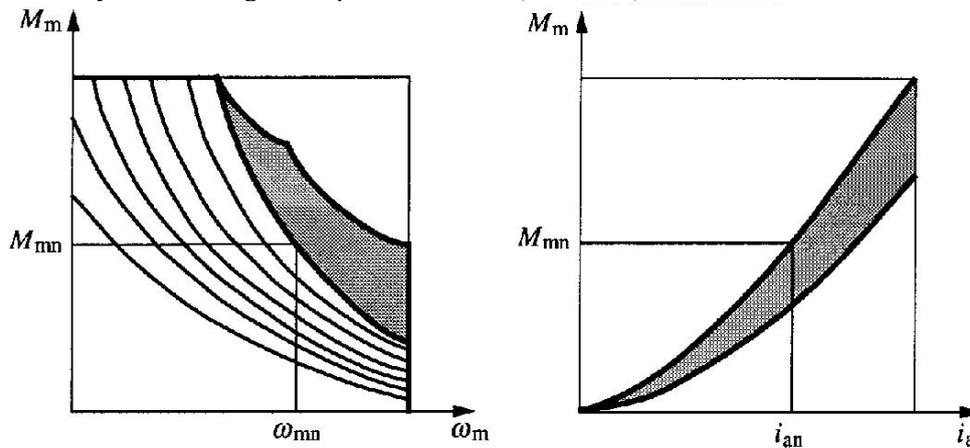


Fig. 4.106 Hybridsteuerung: Kennlinien in Fahrbetrieb.

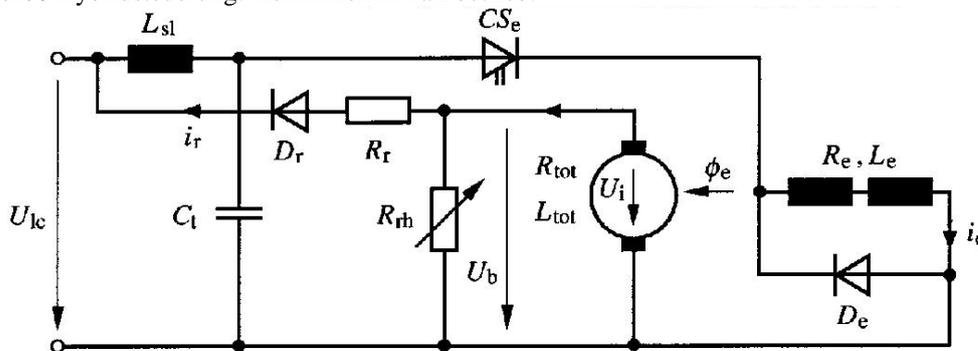


Fig. 4.108 Hybridsteuerung: Prinzip in Bremsbetrieb (BOB: ABeh 4/4 II).

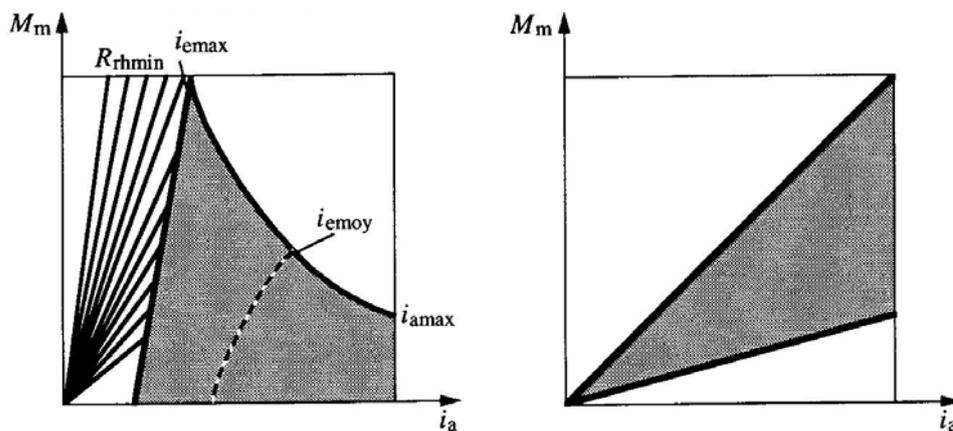


Fig. 4.111 Hybridsteuerung: Kennlinien in Bremsbetrieb.

Antriebsberechnung

Die Traktionmotoren sind für eine Dauerleistung oder Nennleistung (●, blaue Strich-Punkt-Linie). Die Motoren dürfen während einer kurzer Zeit überlastet werden. Mit der thermischer Inertie der Metalteile hat man kein Überhitzungsrisiko (rote Schraffierung). Je fern der Arbeitpunkt weit von dem Dauerdienst sich befindet, je kürzer der Betriebszeit sein soll.

Nach der Vergrößerung des Taktverhältnis läuft der Motorgruppe auf Vollfeldgrenze (- - -). Die Klemmenspannung ist gleich wie Fahrdrantspannung. Sie ist ungefähr konstant. Man kann vereinfachten Gleichungen für etablierten Betrieb:

$$U_{lc} = k_m I_a V - R_a I_a \qquad Z = k_t I_a - I_0$$

$$Z = k_t \frac{U_{lc}}{k_m V - R_a} - I_0$$

Bei Feldschwächung liegt die Zugkraftkennlinie ein wenig niedriger (in grün auf Cherktristik).

Bei Gleichstromstellerantrieben entspricht die Vollfeldgrenze (- - -) an maximaler Taktverhältnis (~100%) des Hauptgleichstromstellers. Für Halbleitergeräte, und für Gleichstromsteller, gibt es keine thermische Inertie. Der Gleichstromsteller soll für die höhere Leistung berechnet werden. (◆ - - ◆).

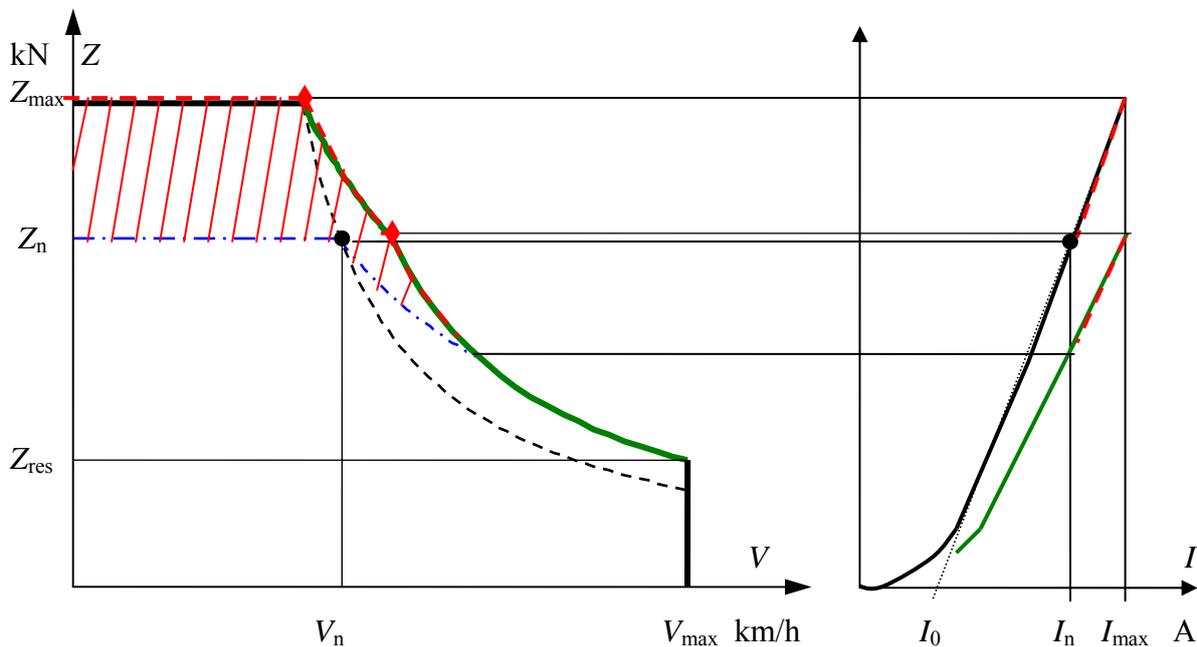


Fig. 4.97B Kennlinien Reihenschlussmotor mit Gleichstromsteller.

4.4 Kollektormotor: Steuerung mit Gleichrichter

Der Kollektormotor kann aus einer Wechselstrom-Fahrleitung durch einen Gleichrichter gespeist werden. Der Gleichrichter war mit einfacher Mittelpunktschaltung, und dann mit Dioden-Brückenschaltung. In diesem Fall ist der Motorbau gleich wie jene eines Motors der durch Gleichstromsteller gespeist wird, einfacher als jene des Direktmotors. Die Klemmenspannung ist durch einen Stufentransformator gesteuert (BLS: Re 4/4, SNCF: BB 16500). In Bremsbetrieb ist der Erregerstrom aus dem Gleichrichter gesteuert. Der Ankerstrom fließt in einem festen Widerstand. (CFR: 060-EA).

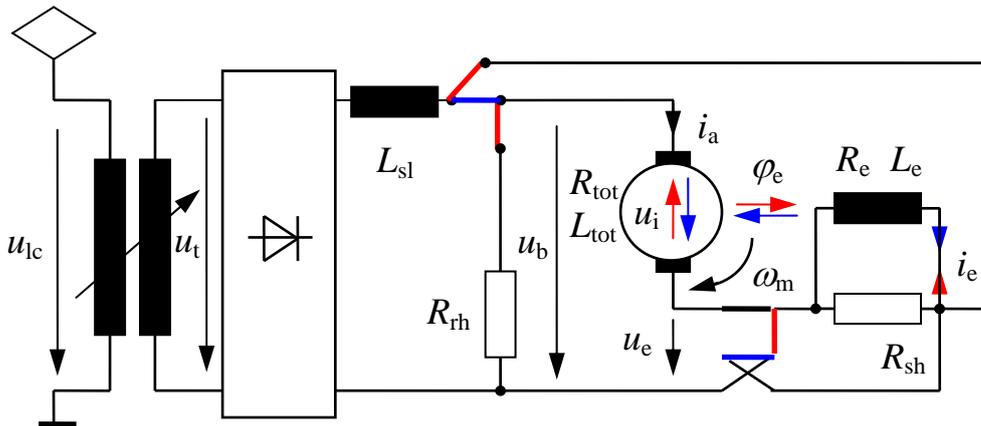


Fig. 4.112 Gleichstrommotor und Gleichrichter: Fahren.

Fig. 4.119 Gleichstrommotor und Gleichrichter: Widerstandsbremse mit Fremderregung.

Der Strom im Transformator in Phase mit der Spannung. Seine ist ungefähr rechteckig wenn die Motorinduktivität hoch ist. Die Kennlinien bei niedriger Geschwindigkeit sind nicht geneigt.

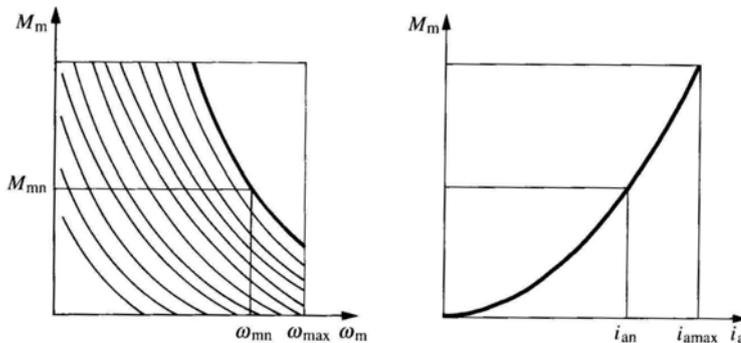


Fig. 4.118 Gleichstrommotor und Gleichrichter: Fahren-Kennlinien.

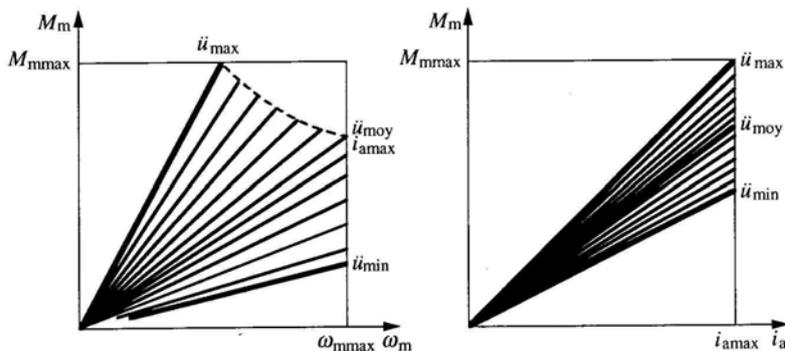


Fig. 4.121 Gleichstrommotor und Gleichrichter: Widerstandsbremse mit Fremderregung: Kennlinien.

Mit der Entwicklung der Halbleiter kann man steuerbaren Gleichrichter bauen, deren Ausgangsspannung ist durch den Stromverzögerungswinkel. So kann der Arbeitspunkt ohne Stufe gesteuert werden. Der Gleichrichter kann eine vollgesteuerte Brücke (CFF: Ee 3/3 16502) oder halbgesteuerte Brücke (SNCF CC 21000) sein. Der Transformatorübersetzung bleibt fest. In Bremsbetrieb steuert der Gleichrichter den Erregerstrom (RAG: EA1000).

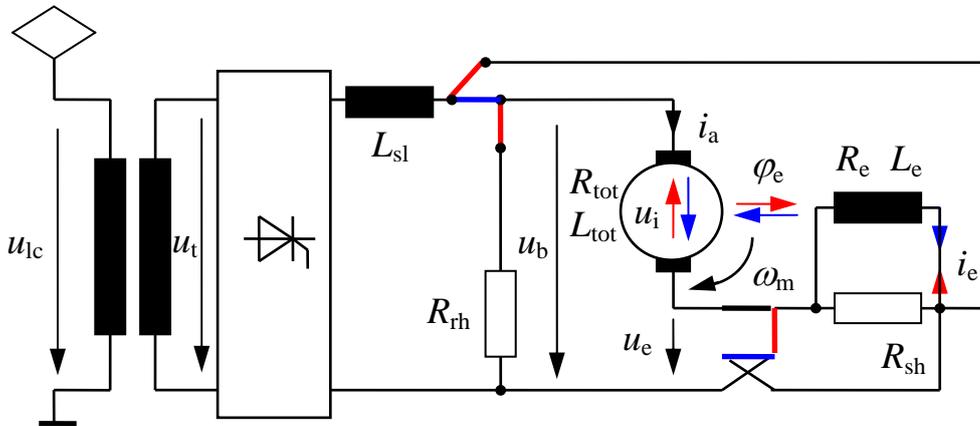


Fig. 4.122 Gleichstrommotor und gesteuerter Gleichrichter: Fahren.

Fig. 4.133 Gleichstrommotor und gesteuerter Gleichrichter: Widerstandsbremse mit Fremderregung.

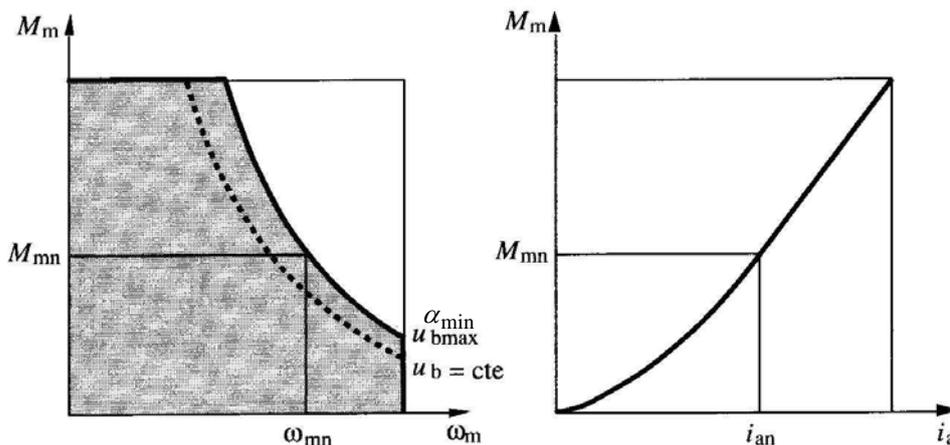


Fig. 4.129 Gleichstrommotor und gesteuerter Gleichrichter: Fahren-Kennlinien.

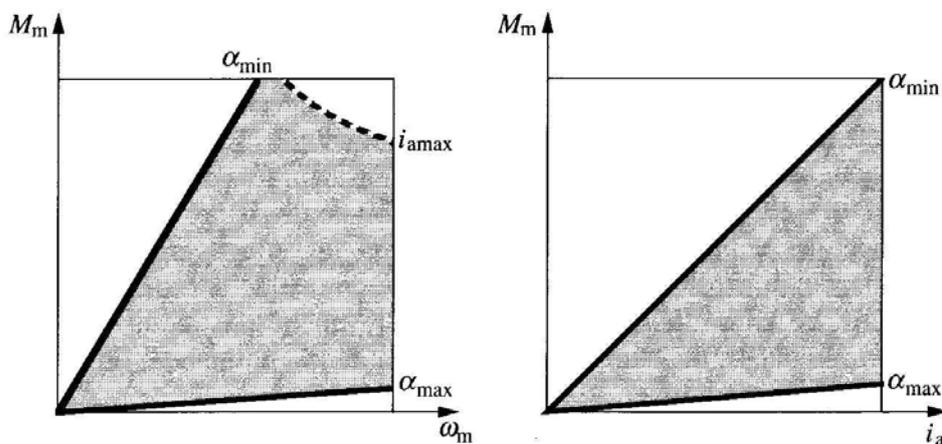


Fig. 4.136 Gleichstrommotor und gesteuerter Gleichrichter: Widerstandsbremse mit Fremderregung: Kennlinien.

Da unten sind Pionierschaltungen der Gleichrichter vorgestellt. Weiter werden komplizierten Thyristorschaltungen studieren, die Blindleistung und die Oberschwingungen in der Fahrleitung verringern werden.

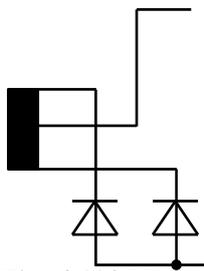


Fig. 4.114 Mittelpunkt.

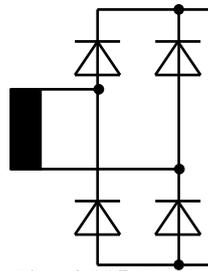


Fig. 4.115 Diodenbrücke.

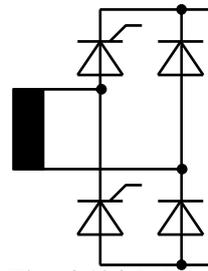


Fig. 4.124 halbe Brücke.

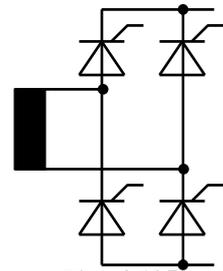


Fig. 4.125 vollgesteuerte Brücke.

Mit einer vollgesteuerter Brücke kann man Nutzbremse benützen. (CFF: Ee 3/3 II).

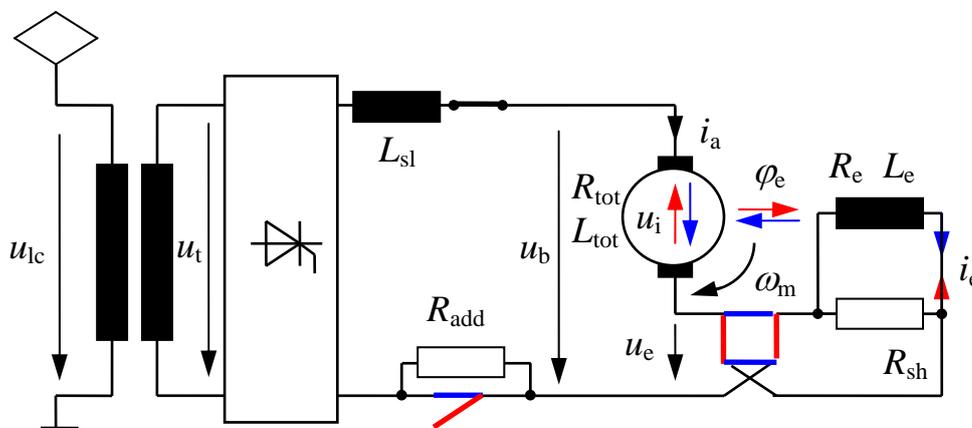


Fig. 4.122 Gleichstrommotor und gesteuerter Gleichrichter: Fahren

Fig. 4.130 Gleichstrommotor und gesteuerter Gleichrichter: Nutzbremse mit Serie-Erregung.

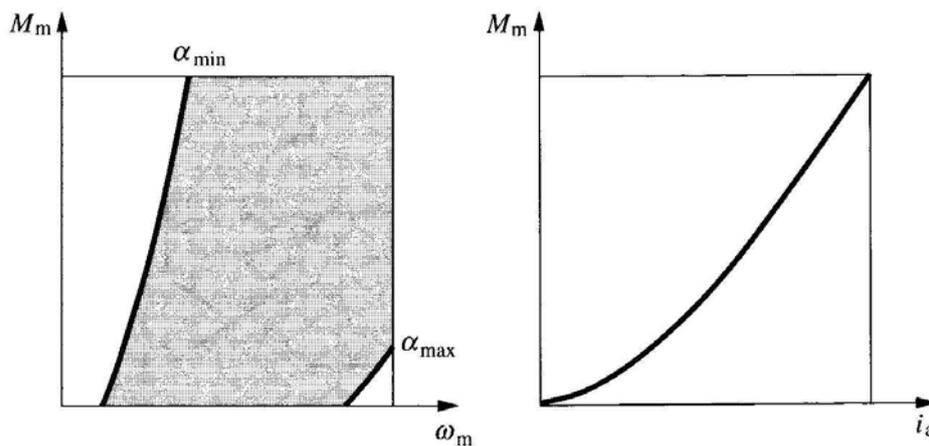


Fig. 4.132 Gleichstrommotor und gesteuerter Gleichrichter: Nutzbremse: Kennlinien.

Um die Wirkungen auf dem Netz zu begrenzen wählt man die Folgeschaltung mit zwei Brücken (Fig. 4.139), mit 3 Brücken (Fig. 4.139A) oder 4 Brücken (Fig. 4.140). Die Steuerung mit Stromverzögerungswinkel läuft nur auf einer Brücke (I), die anderen sind entweder voll stromführend oder gesperrt. Die Feldschwächung ist auch unter Wechselspannung benützt, um die Betriebsebene zu vergrößern (Fig. 4.142). Die Lösung

genützt Nebenthyratoren T_{sh} die während stromführende Phase des Hauptgleichrichter eingeschaltet werden.

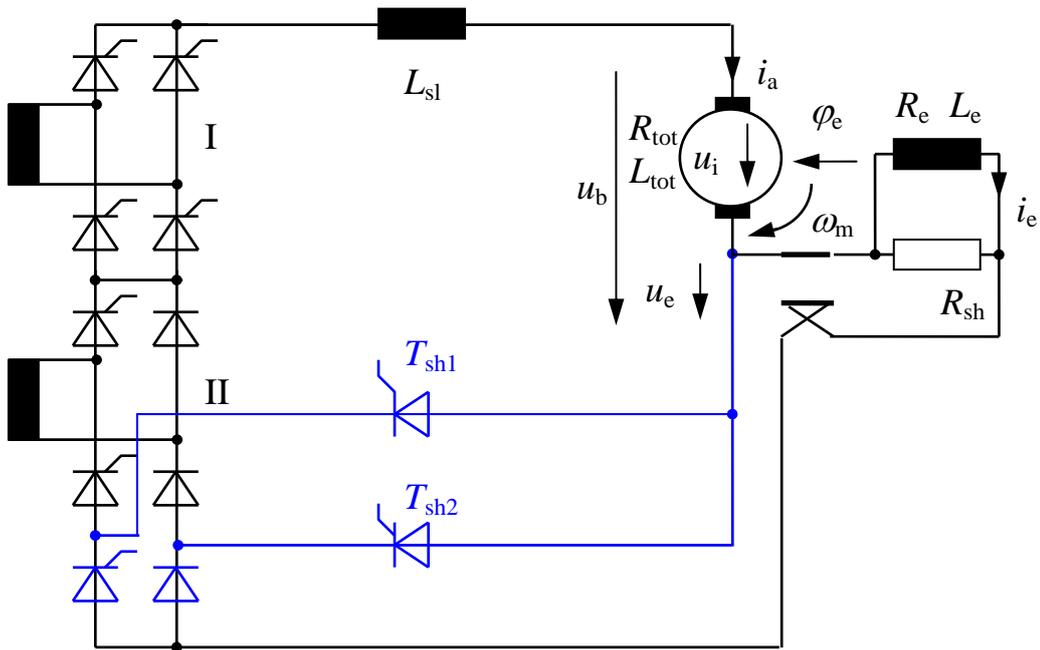


Fig. 4.139 Folgeschaltung mit zwei Brücken.

Fig. 4.142 Folgeschaltung mit zwei Brücken mit Feldschwächung (SNCF : BB 15000).

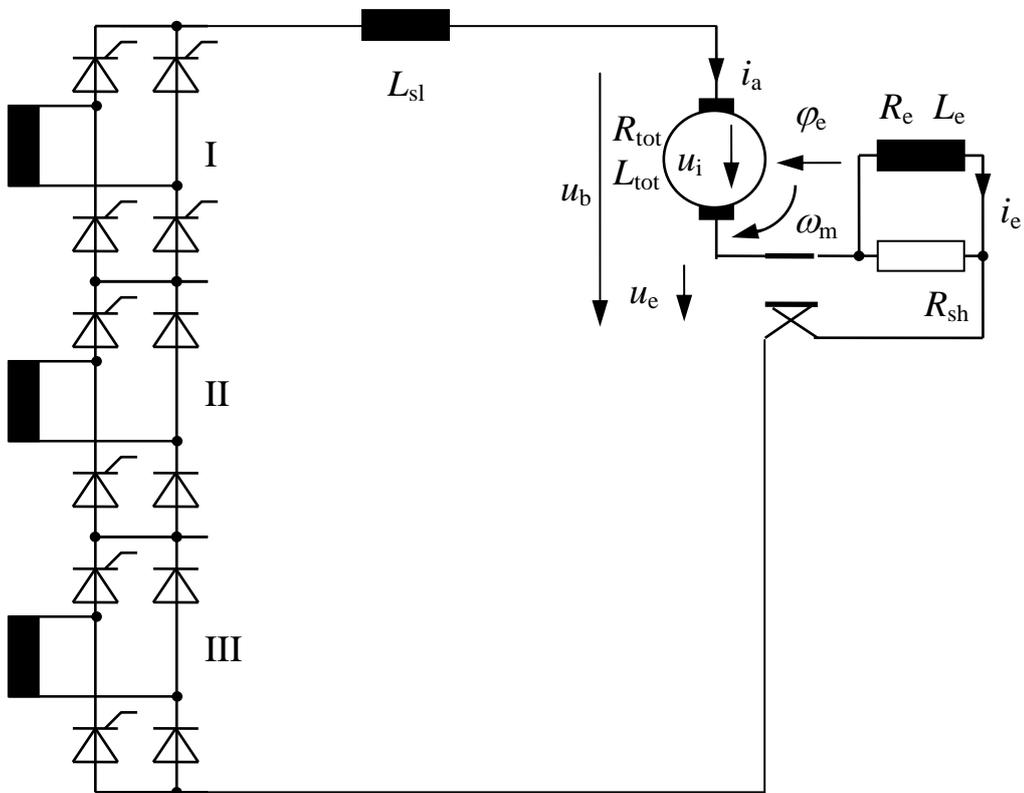


Fig. 4.139 A Folgeschaltung mit drei Brücken. (SJ : Rc 1).

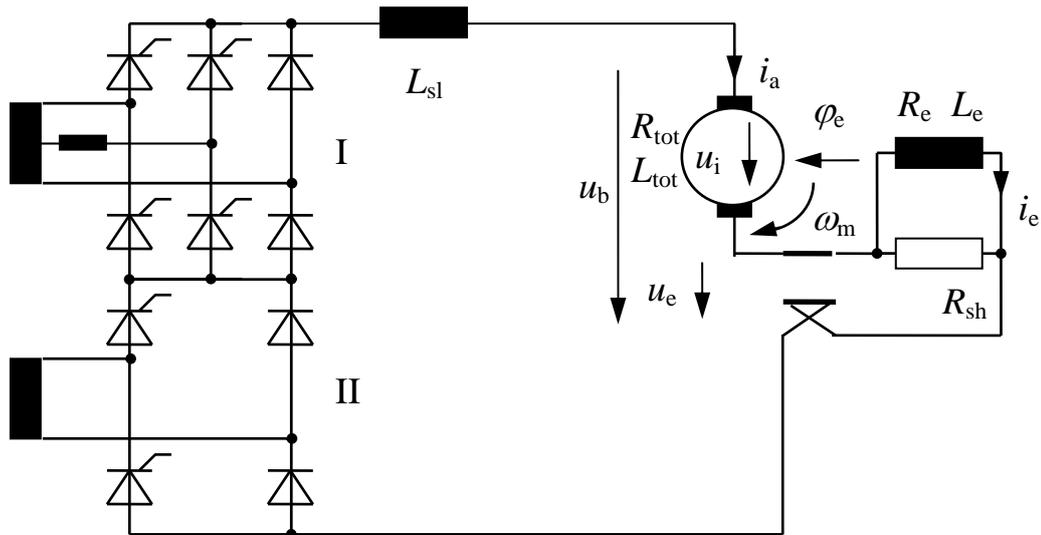


Fig. 4.140 Vierstufige Sparschaltung der Brücken (ÖBB : 1044).

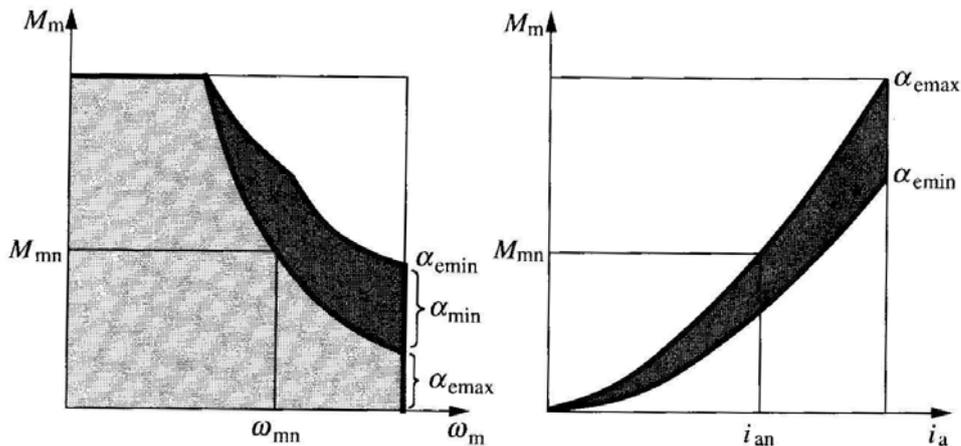


Fig. 4.143 Kennlinien in Fahren, mit Feldschwächung.

So in Fahren als in Bremsen kann man Fremderregung benutzen, mit einem anderen Transformatorsekundär und einem weiteren Gleichrichter (Fig. 4.145). Der Erregergleichrichter (II) kann so gesteuert werden, dass der Erregerstrom i_e den Ankerstrom i_a bis voll Öffnung des Hauptgleichrichter (I) folgt. Man heisst diese Schaltung fremderregter Motor mit Reihenschlusscharakteristik (RhB: Be 4/4). Die Kennlinie findet man auf Bild 4.143. Der Erregerstrom kann auch konstant bis voll Öffnung des Hauptgleichrichter gesteuert (SJ: X1). Die Kennlinie findet man auf Bild 4.143A. In beiden Fälle wird die Feldschwächung durch die Vergrößerung des Stromverzögerungswinkels in Brücke II erreicht. In Bremsbetrieb ist die Brücke I als Wechselrichter gesteuert und die Brücke II steuert den Erregerstrom um genug Induktionsspannung auch bei niedriger Geschwindigkeit zu erhalten.

Ein Motor kann auch mit zwei Erregerspule gebaut werden: eine Serie-Erregung und eine Fremderregung. Man spricht von einer gemischter Erregung (CFF: RBDe 4/4). Bei minimalem Feld ist nur die Serie-Spule mit Strom durchgeflossen, die Brücke II ist gesperrt (Fig. 4.148).

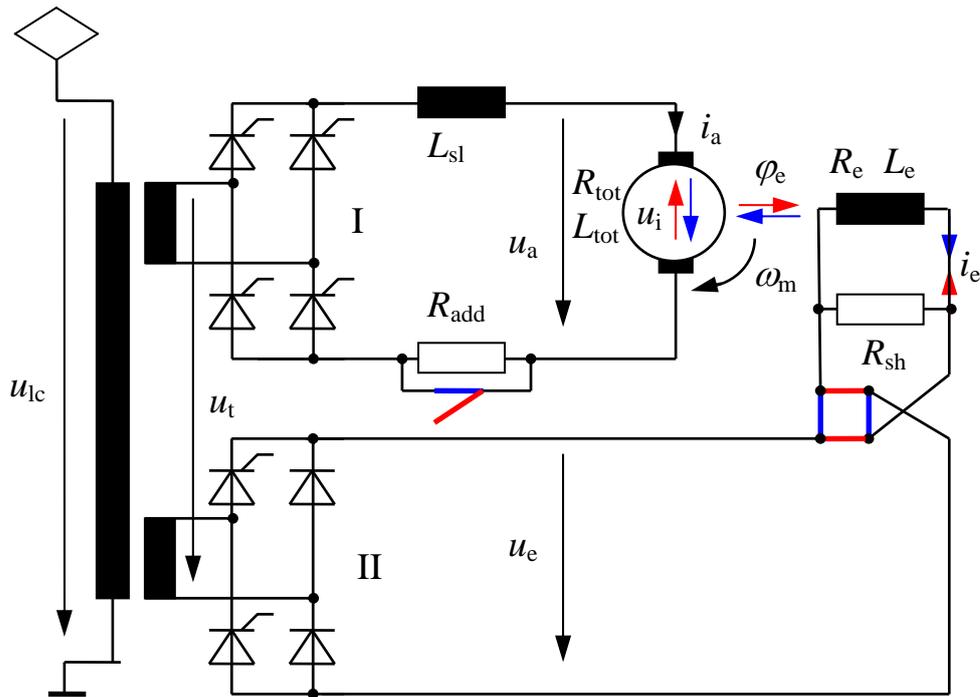


Fig. 4.145 Gleichstrommotor und Fremderregung: in **Fahren** und in **Nutzbremse**.

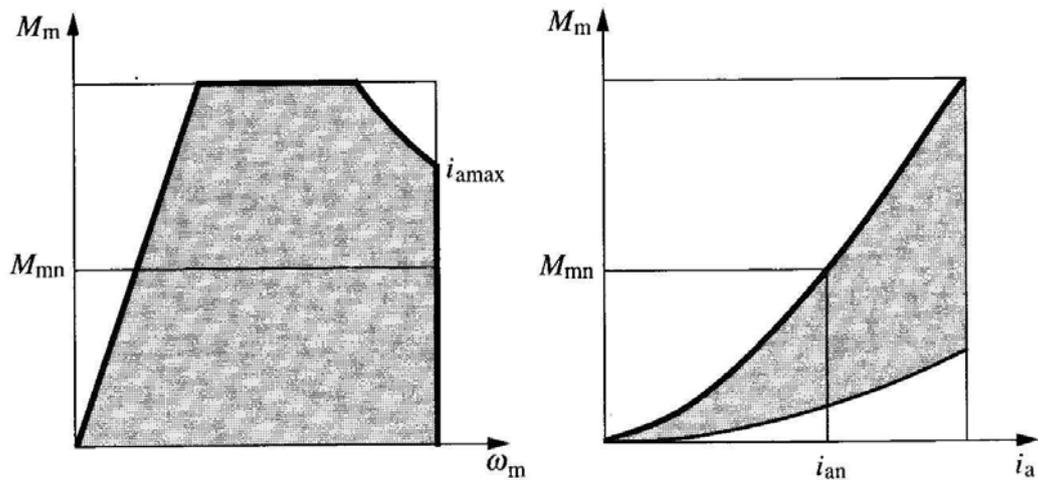


Fig. 4.147 Gleichstrommotor und gesteuerter Gleichrichter Nutzbremse mit Fremderregung.

Der Gleichrichter, wie der Gleichstromsteller auf der Sektion 4.3, soll für die maximale Leistung berechnet werden.

Wenn der Erregerstrom in einer grossen Ebene konstant ist hat man leicht geänderte Kennlinien. (SJ: Rc4)

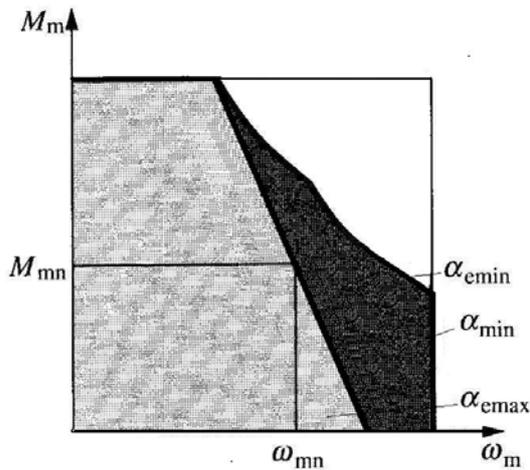


Fig. 4.143A Kennlinien in Fahren mit konstantem Erregerstrom, und mit Feldschwächung in hohen Geschwindigkeiten.

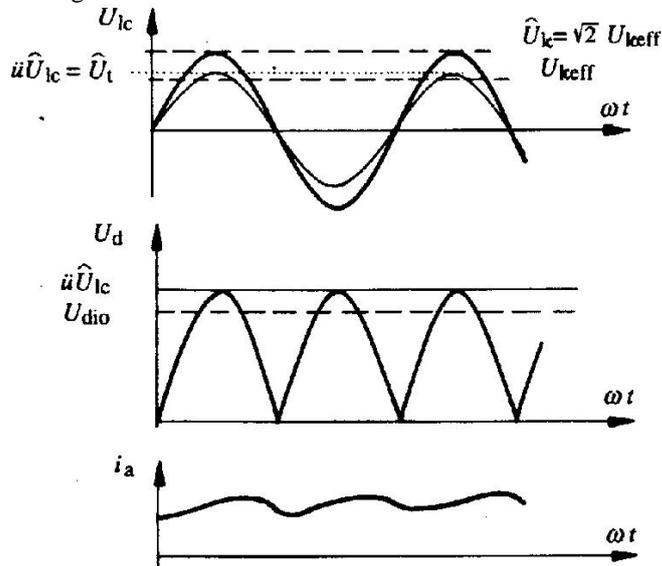


Fig. 4.113 Gleichstrommotor und Dioden-Gleichrichter: Motorstrom und Spannungen.

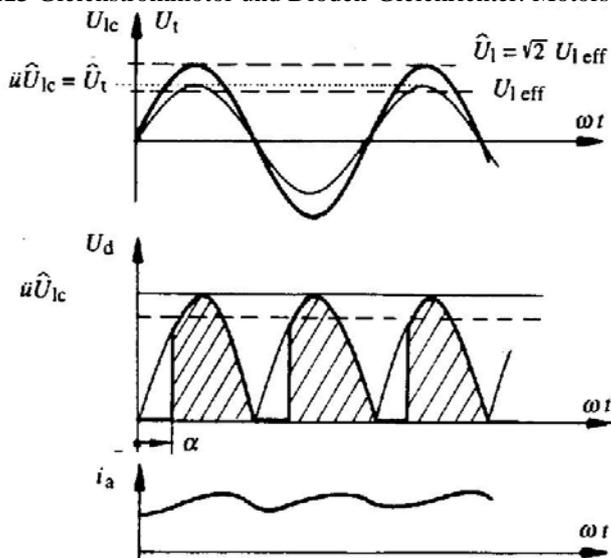


Fig. 4.123 Gleichstrommotor und Thyristoren-Gleichrichter: Motorstrom und Spannungen.

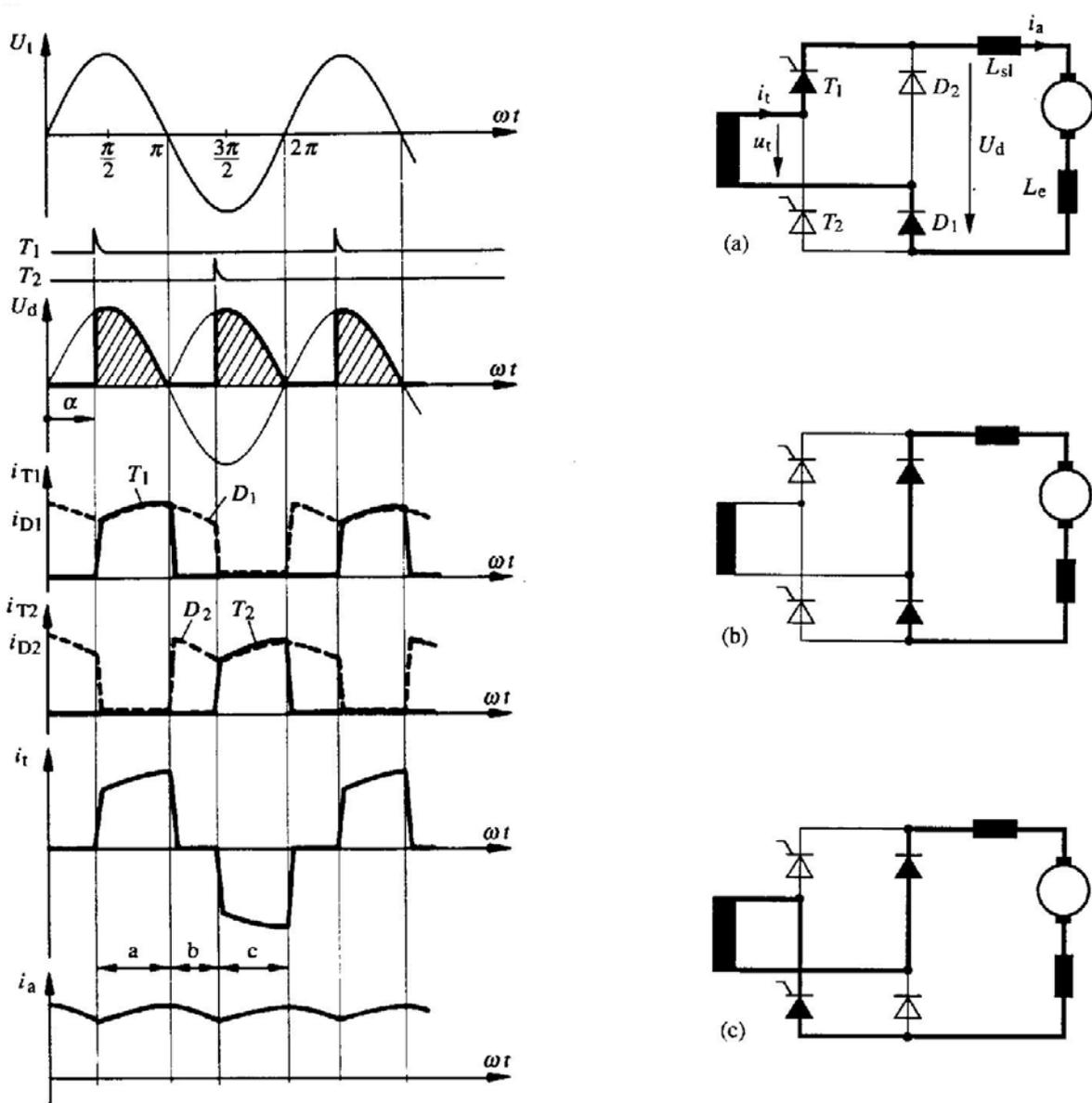


Fig. 4.126 Gleichstrommotor und halbgesteuerter Gleichrichter: Ströme und Spannungen.

Man sieht gut die Phasenverschiebung zwischen der Spannung u_t am Sekundärwicklung des Transformators und dem Strom i_t der in dieser Wicklung fließt. Das bringt eine Blindleistung in der Fahrleitung und in die Transportlinien, mit Verlusten und Erwärmungen. Um diesen Nachteile zu begrenzen nutzt man Komplexe Schaltungen (fig.4.140) die die Blindleistung 4 Mal für eine gleiche aktive Leistung reduzieren (fig. 4.141).

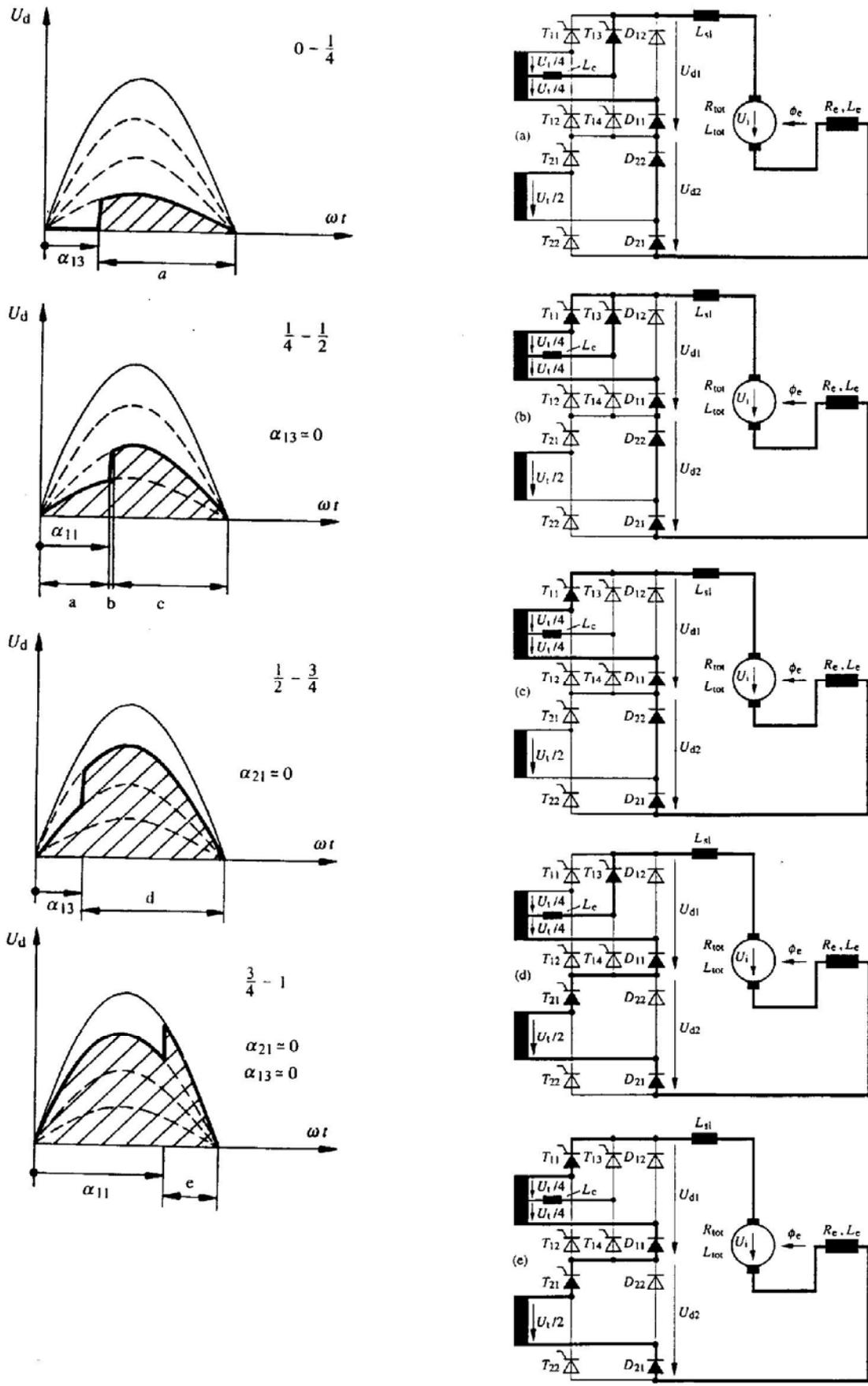


Fig. 4.141 Gleichstrommotor und vierstufige Sparschaltung der Brücken: Ströme und Spannungen.

4.4.4 Antriebsberechnung.

Die Traktionmotoren sind für eine Dauerleistung oder Nennleistung (●, blaue Strich-Punkt-Linie). Die Motoren dürfen während einer kurzer Zeit überlastet werden. Mit der thermischer Inertie der Metalteile hat man kein Überhitzungsrisiko (rote Schraffierung). Je fern der Arbeitspunkt weit von dem Dauerdienst sich befindet, je kürzer der Betriebszeit sein soll.

Fester Gleichrichter. Bei der oberen Stufe des Transformators befinden sich die Motoren an der Vollfeldgrenze (----). Die Motorklemmenspannung wird bei der Spannung am Sekundär und bei dem Gleichrichter definiert: U_d . Sie bleibt ungefähr Konstant, aber nicht genau. Der Transformator ist keine ideale Spannungsquelle und hat sein eigenen Verluste. Als Vergleich hat man die Kennlinie mit konstanter Spannung (— · — · — · —) gezeichnet, wie man am Prüffeld des Erbauers findet. Man schreibt die vereinfachten Gleichungen:

$$U_d = k_m I_a V - R_a I_a \qquad Z = k_t I_a - I_0 \qquad Z = k_t \frac{U_d}{k_m V - R_a} - I_0$$

Fester Transformator. Bei Gleichrichterantrieben entspricht die Vollfeldgrenze (----) an der Minimalwert des Stromverzögerungswinkels ($\sim 0^\circ$) am Stromrichter. Für Halbleitergeräte, und für Stromrichter, gibt es keine thermische Inertie. Der Stromrichter soll für die höhere Leistung berechnet werden. (◆ - - ◆). Bei Feldschwächung liegt die Zugkraftkennlinie ein wenig niedriger (in grün auf Charakteristik).

Seht oft laufen die Triebfahrzeugen unter dem Dauerdienst. In diesem Fall darf der Transformator für eine niedrigere Nennleistung als Addition der Motorennennleistungen berechnet werden, weil seine thermische Inertie grösser ist. Gegenbeispiel : S-Bahn Betrieb.

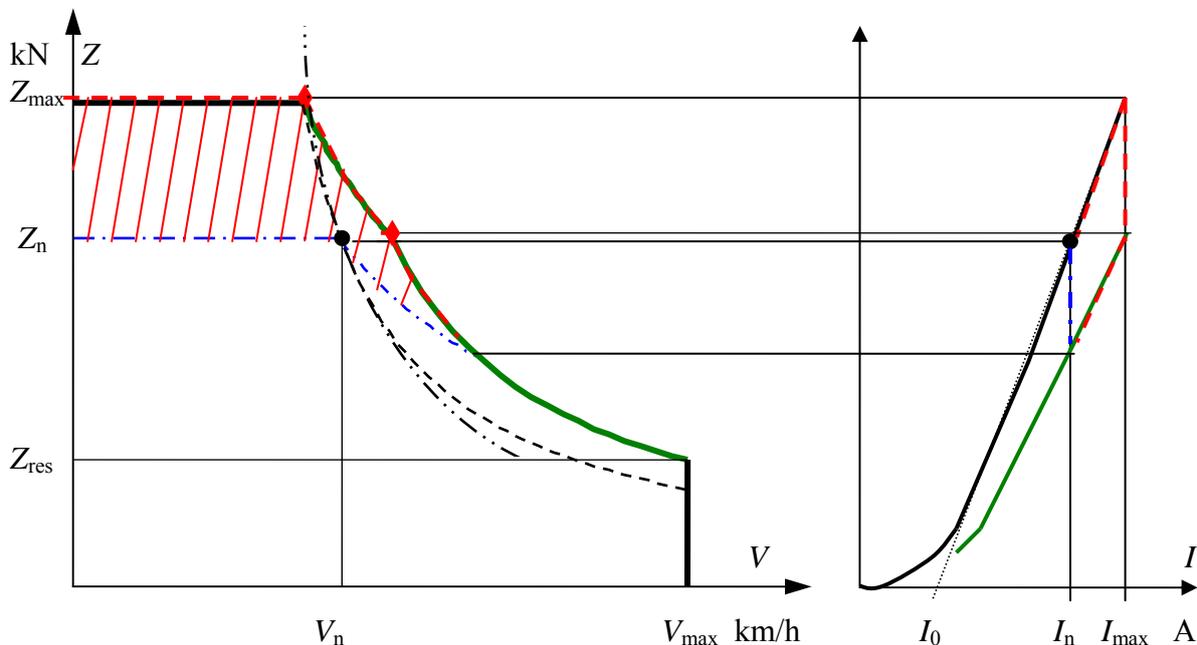


Fig. 4.143B Kennlinien Reihenschlussmotor mit Stromrichter.

4.5 Asynchronmotor

Trotz seiner einfachen Herstellung kam spät in grosser Anwendung in die Zugförderung. Die Leistungselektronik hat erlaubt ein dreiphasiges Spannungssystem mit variabler Frequenz aus Gleichstrom – in der Fahrleitung oder dem Zwischenkreis – zu erzeugen. Auf Bild 4.164 hat man ein Prinzipschaltbild gezeigt, mit Gleichspannungszwischenkreis, wie es ab 1990 benutzt wird. Jeder Zweig enthält zwei statische Schütze, die die u_d Spannung taktet, um eine Sinus-Welle zu erzeugen. Um die Oberschwingung zu begrenzen soll die Taktfrequenz mindestens 20 Mal grösser als die höchste Frequenz des dreiphasigen Systems gewählt werden. Früher hatte man auch Antriebe mit Gleichstromzwischenkreis gewählt. Die Wechselrichter, mit alten Halbleitern, benützten Phasefolgesteuerung. Ein Gleichstromsteller war nötig zwischen der Fahrleitung und dem Zwischenkreis. Weiter wird die Entwicklung eines Zweigs – mit Punkt-Strich-Linie auf Bild 4.164 gerahmt – geschaut.

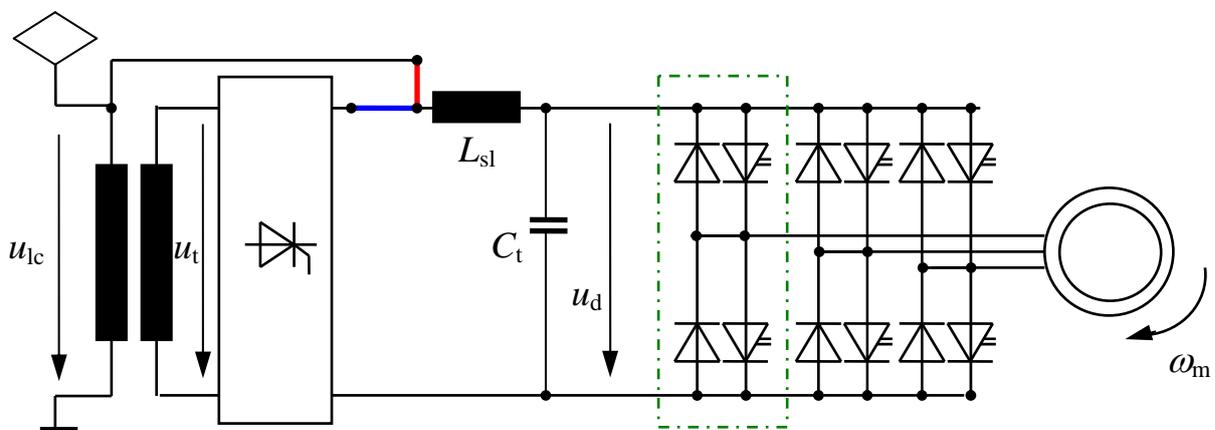


Fig. 4.164A Asynchronmotor und dreiphasiger Wechselrichter für Gleichstrom- oder Wechselstromfahrleitung: Prinzipschaltbild.

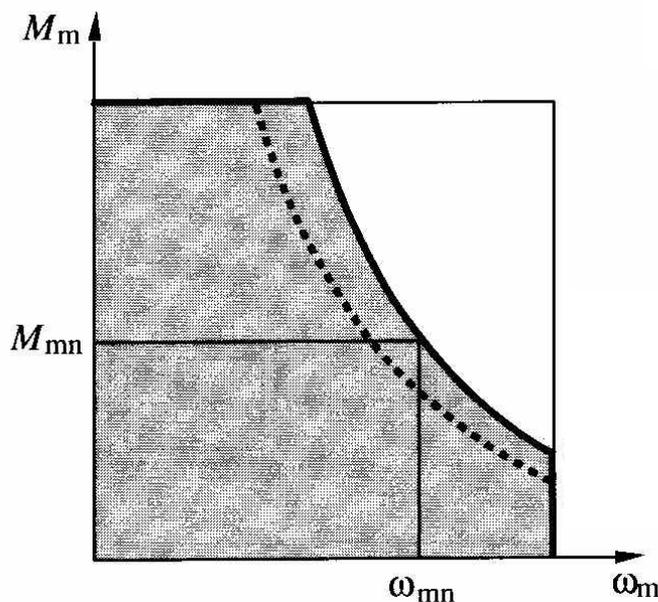


Fig. 4.164B Asynchronmotor und dreiphasiger Wechselrichter: Kennlinien in Fahren und Bremsen.

Asynchronmotor ist nicht nur einfacher als Gleichstrommotor – kein Kollektor – sondern auch seine Leistungsdichte ist höher. Dazu, es braucht kein Schütze um von Fahren zu Bremsen umzuschalten:

- Wenn die Umrichterfrequenz höher als der Drehzahl der Asynchronmaschine ist, diese läuft als Motor und der Umrichter als Wechselrichter. Das ist Fahrbetrieb.
- Wenn die Umrichterfrequenz kleiner als der Drehzahl der Asynchronmaschine ist, diese läuft als Generator und der Umrichter als Gleichrichter. Das ist Bremsbetrieb.

Unter Einphasen-Wechselstrom soll der Einphasen-Brücke fähig sein, als Wechselrichter zu betreiben. Für die Widerstandsbremse soll die Schaltung mit einer Widerstand und einer statischen Schütze ergänzt, um die Bremsenergie in Hitze zu transformieren.

Mit klassischen Thyristoren sollte man für Ventilbauelement-Kommutierung ein Kommutierungskreis mit Thyristoren, Kondensatoren und Induktorspulen einbauen. Die GTO, mit eurer Fähigkeit mit negativem Puls auf dem Steueranschluss entzündet zu werden, erlaubten eine gute Vereinfachung des Zweigskreis. Die Erhöhung der Sperrspannung und der Stromleitung erlaubte weiteren Vereinfachungen. Die IGBT haben später mit weiteren Fortschritten verfolgt. Sie werden für hohen Leistungen nur ab ~2000 benutzt. Euere Steuerungsleistung ist niedriger als jener den GTO. Dazu sind die Kommutierungs- und Leitungsverluste niedriger. In Gegenteil zu GO dürfen die IGBT ohne Schwierigkeiten in Parallel geschaltet werden.

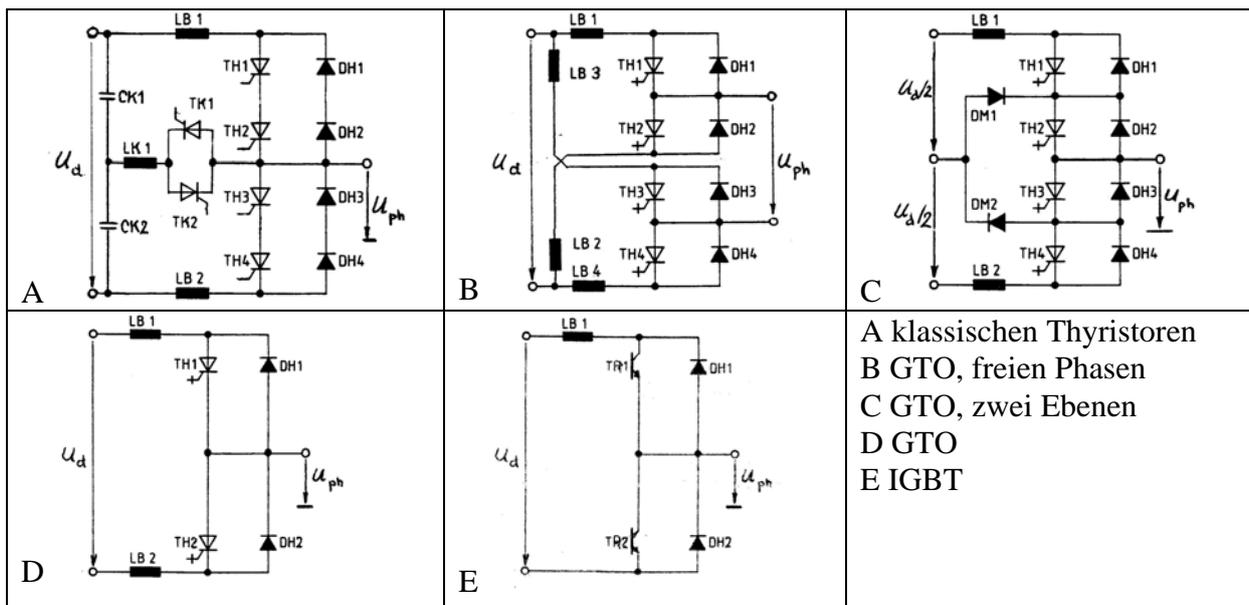


Fig. 4.167 Architekturen der Umrichterzweige.

Die Zweigsteuerung hat auch vorgerückt, wegen den Halbleitereigenschaften und bleibt jetzt an Unipolar-Steuerung.

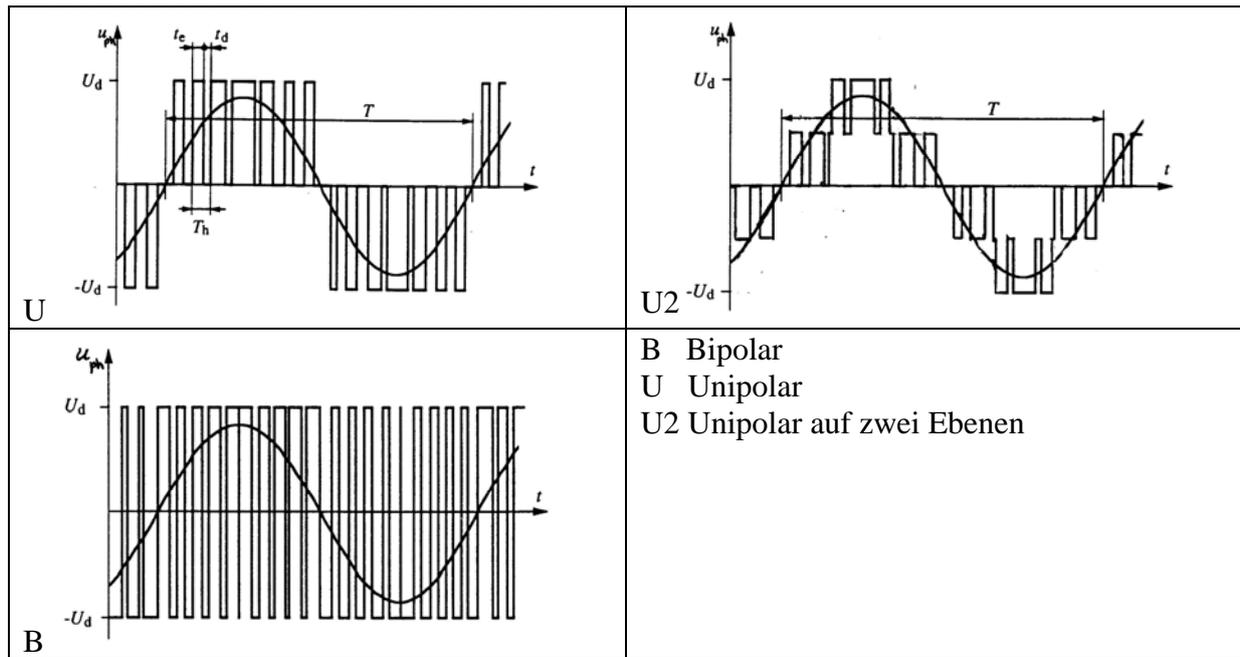


Fig. 4.168 Steuerungen der Umrichterzweige.

Zweig	A	B	C	D	E
Dioden	8	4	6	2	2
Halbleitern	18 Thy	4 GTO	4 GTO	2 GTO	2 IGBT
Selbs	4	4	2	1	1
Kondensatoren	2	0	0	0	0
Steuerung	B	B	U2	U	U
Leistung [MW]	0,3 – 0,5	0,5	0,4 – 1	0,3 – 0,9	0,5 – 0,9
Anfangsjahr	1979	1987	1990	1992	(1997) 2004
Beispiele	DB : 120 NSB: E117 DSB: EA3000	BT: Re 456 CFF: Re 450	CFF: Re 460 ÖBB : 1822 FS: ETR500	BLS: Re 465 SNCF : BB 36000 DB : 185	(ABB: 12X) DB : 185.2 SNCF : BB 447000

Fig. 4.168 & 4.167 Umrichterzweige : Beispiele.

Am Anfang hat man Wechselrichter mit Phasefolgesteuerung benutzt. In diesem Fall brauchten Thyristoren kein Ventilbauelement-Kommutierung.

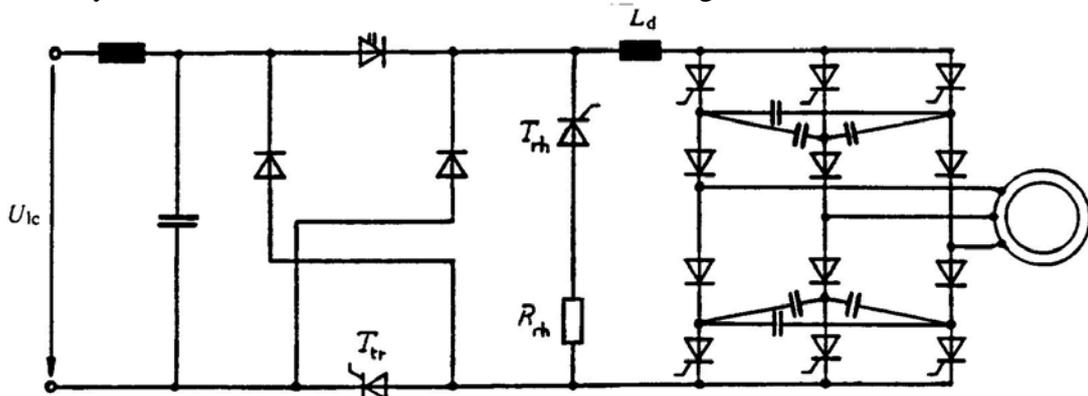


Fig. 4.165 Zweirichtung I-Umrichter für Gleichstromspannung an der Fahrleitung. (SNCF : Z20500).

Die übliche Form heute (ab 2005) ist der U-Umrichter. Unter Gleichstrom darf der Umrichter direkt an der Fahrleitung durch ein LC-Filter gespeist werden. Unter Wechselspannung sind die Zweige der einphasigen Brücke sehr einfach (Fig. 4.167D), identisch wie jenen der dreiphasigen Brücke.

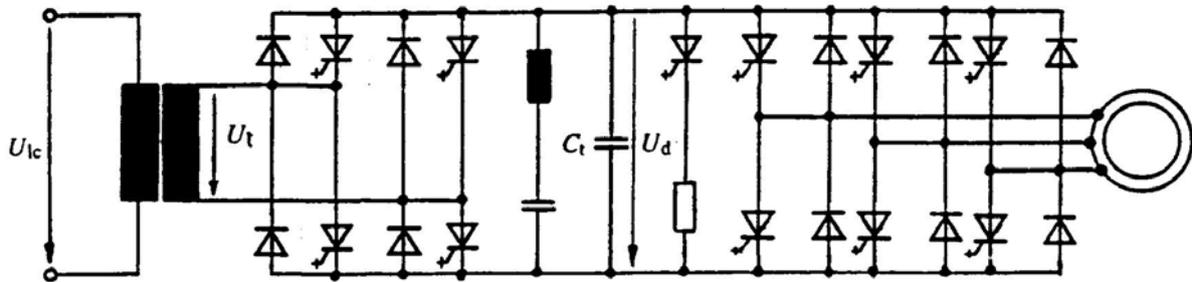


Fig. 4.166A Zweirichtung U-Umrichter für Wechselstromspannung an der Fahrleitung (BLS : Re 465).

Während der Entwicklung hat man auch ein Zwischenkreis mit Mittelpunkt benützt, um eine hohe Sperrspannung zu garantieren.

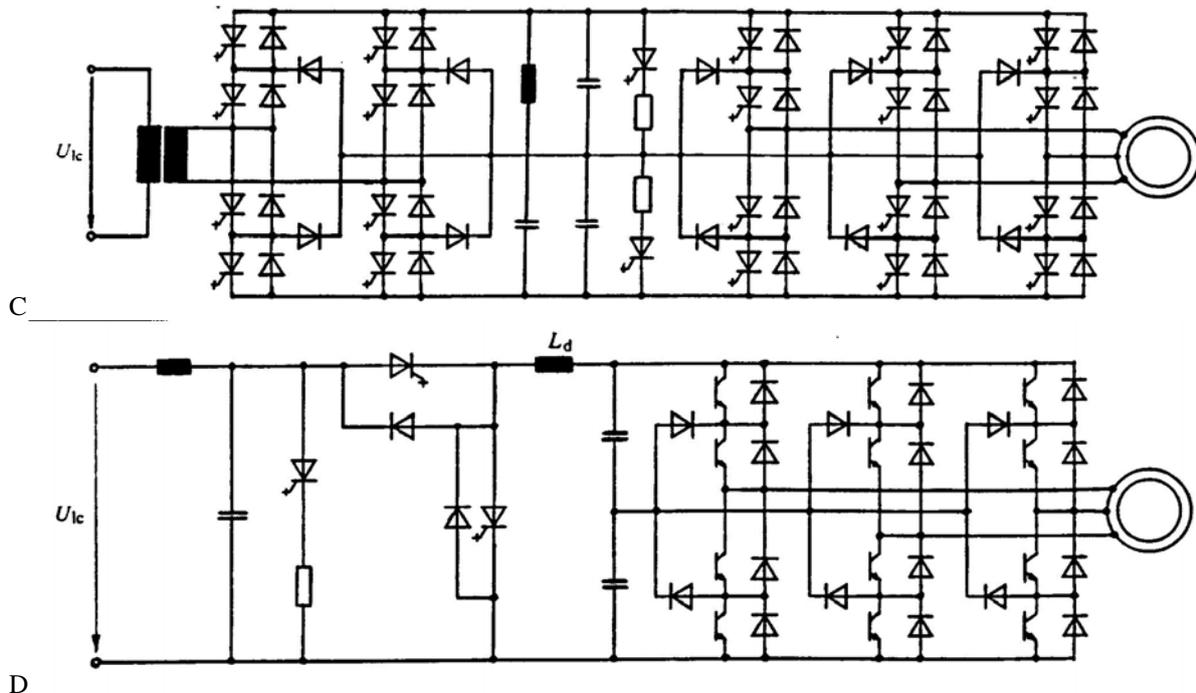


Fig. 4.166 C GTO Zweirichtung U-Umrichter für Wechselstromspannung an der Fahrleitung (CFF : Re 460).

D IGBT Zweirichtung U-Umrichter für Gleichstromspannung an der Fahrleitung (JNR : 207).

Man kann jetzt sagen dass die Schaltungen jetzt mit IGBT, gemäss Bild 4.166A, gebaut würden. Man kann somit so hohe Leistung wie GTO, mit niedrigeren Verlusten und niedrigem Gewicht führen.

An frühen Anfang hat man Einphasen-Umrichter benutzt die gleich wie jenen für Gleichstrommotor gebaut wurden. Seit langem sind sie auch pulsierenden Umrichter (Taktfrequenz 20 Mal die Netzfrequenz) mit Zweigen die mit jenen der Motor-Umrichter umtauschbar sind. Unter 3 kV kann man den 3,8kV-Zwischenkreis direkt speisen (SNCF: BB 447000) oder durch einen Gleichstromsteller der aus rekonfigurierten Umrichterzweigen gebaut wird (CFF: Re 484: Zweistromvariante der DB 185.2).

Antriebberechnung

Die Traktionmotoren sind für eine Dauerleistung oder Nennleistung (blaue Strich-Punkt-Linie). Die Motoren dürfen während einer kurzer Zeit überlastet werden. Mit der thermischer Inertie der Metalteilen hat man kein Überhitzungsrisiko (rote Schraffierung). Je fern der Arbeitspunkt weit von dem Duerdienst sich befindet, je kürzer der Betriebszeit sein soll.

Der Arbeitspunkt ist durch die Spannung des dreiphasigen System und seine Frequenz. Die Frequenz kann die Geschwindigkeit einstellen und die Zugkraft hängt and die Spannungsänderungen des dreiphasigen Sytem und des Schlupfes

Für Halbleitergeräte, und für Dreiphasen-Umrichter,gibt es keine thermische Inertie. Der Umrichter soll für die höhere Leistung berechnet werden. (♦---♦).

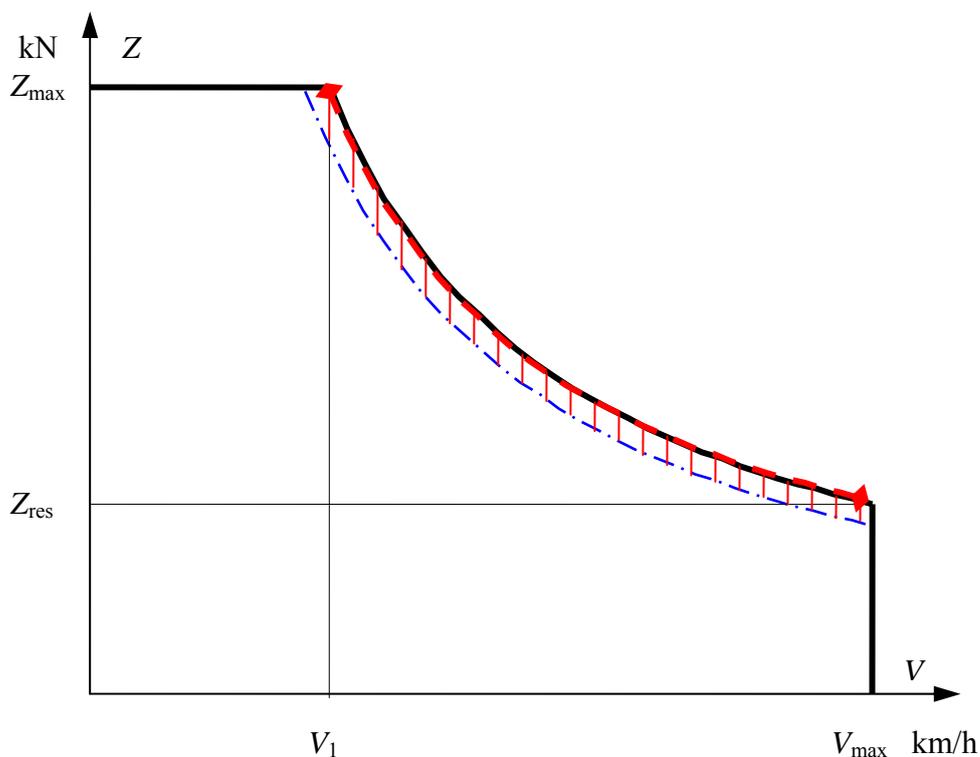


Fig. 4.164C Kennlinien für Asynchronmotor mit Wechselrichter gespeist.

4.6 Synchronmotor

Am Anfang des 21. Jahrhunderts scheint der Synchronmotor einen grossen Zukunft zu bekommen. Wegen Permanentmagneten, die eine hohe magnetische Dichte erzeugen, kann man Synchronmotoren bauen, die kompakter und leichter als Asynchronmotoren gleicher Leistung sind. Die Anwendung in elektrischer Zugförderung ist eine Folge der Entwicklung gesinterten Seltenerd-Magneten, die mit Fasern konsolidiert werden. Euer Kaufpreis bleibt höher als jener Asynchronmotoren. Heute präsentieren euren Umrichter keine grosse Unterschiede mit Asynchronmotoren-Umrichtern (Transpôle: VAL 208, BCT : H40LF). Dieser Zugförderungsantrieb hat sich schon in Stadtbahnen bewährt. Es ist jetzt auch auf Hochgeschwindigkeit angewendet (Japan, Italien, Schweiz).

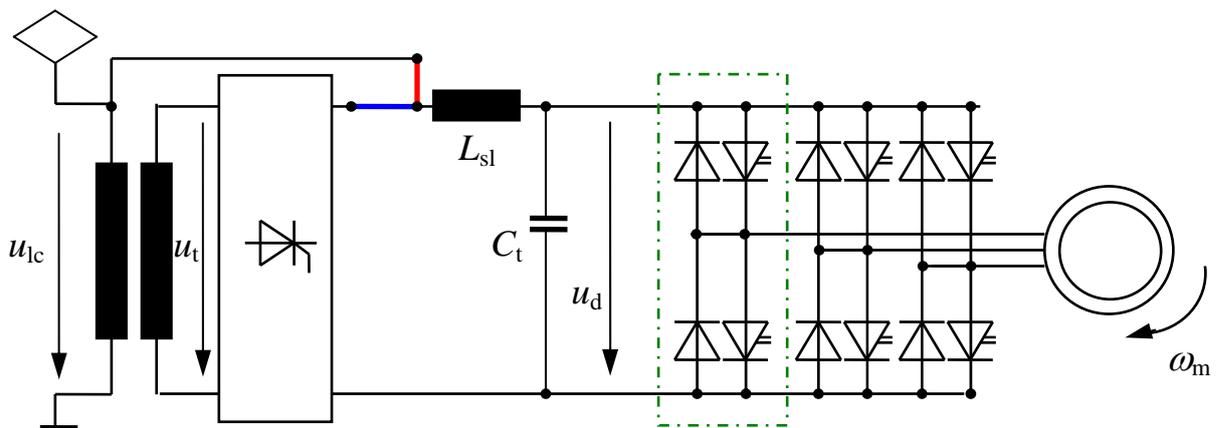


Fig. 4.178A Synchronmotor und dreiphasiger Wechselrichter für Gleichstrom- oder Wechselstromfahrleitung: Prinzipschaltbild.

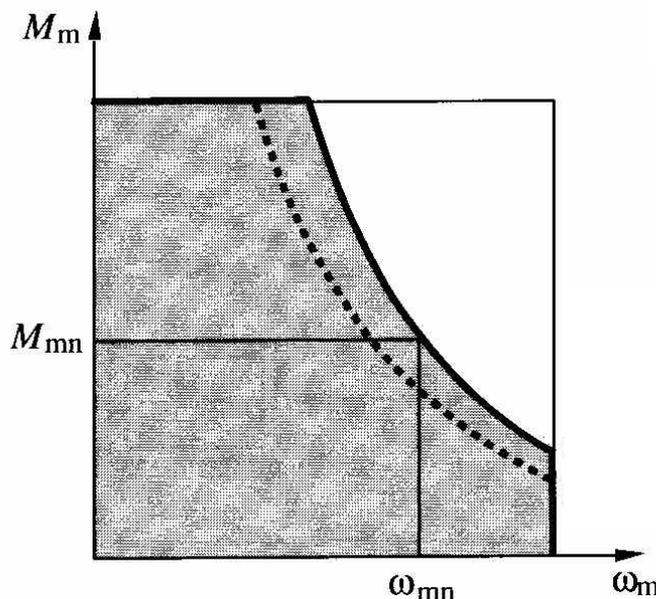


Fig. 4.180A Synchronmotor und dreiphasiger Wechselrichter: Kennlinien in Fahren und Bremsen.

Früher hatte man Synchronmotoren mit gewickeltem Rotor benutzt. Sie nutzten Schleifringe um den Rotor aus Gleichrichter oder Gleichstromsteller zu speisen. In diesen Fall wurden dreiphasigen Umrichtern mit naturelle Kommutierung benutzt, die durch die Rotorposition gesteuert wurden. Sie wurden deswegen *selbstgesteuerten Synchronmotoren*

benannt. Aus der Fahrleitung wurde die Gruppe Umrichter-Synchronmotor gleich wie ein Gleichstrommotor durch einen Gleichrichter oder Gleichstromsteller gespeist (SNCF: BB 26000 oder TGV-A). Deswegen wurden auch andere Bezeichnungen benutzt: *Gleichstrommotor mit statischem Kollektor* oder *brushless DC-motor*.

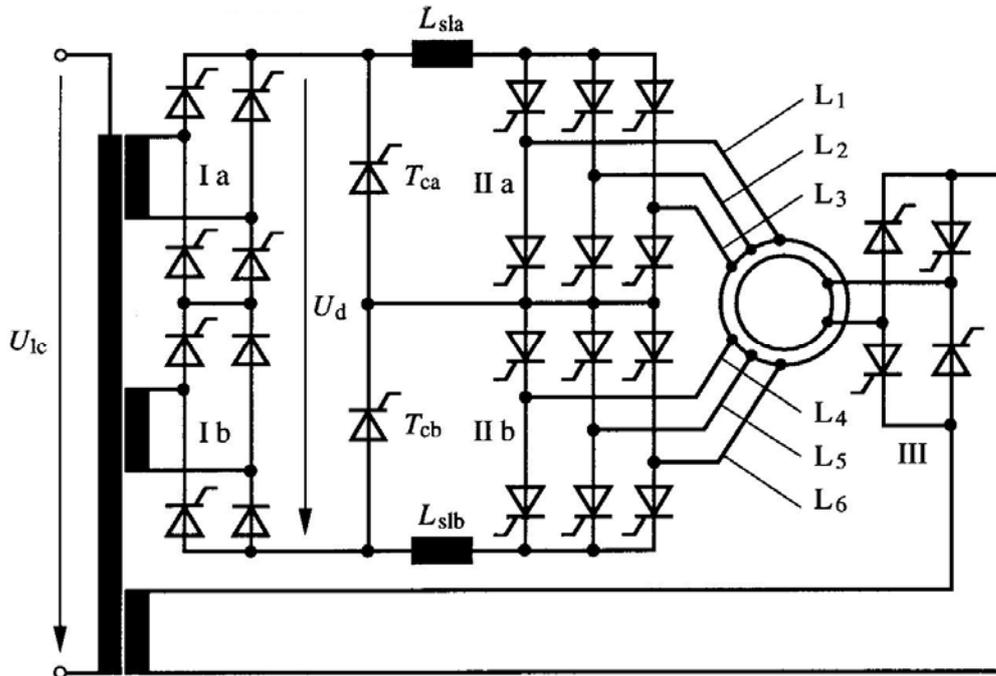


Fig. 4.179 Selbstgesteuerter Synchronmotor und dreiphasiger Wechselrichter: Prinzipschaltbild in Fahren und Nutzbremse (SNCF: BB 10004).

Die B-Zone ist durch den Zündwinkel des Brücke I gesteuert, die C-Zone durch Feldschwächung auf dem Brücke III. An sehr niedriger Geschwindigkeit, in A-Zone, wird die Zweigsentzündung in Brücke II durch Thyristoren T_c gesichert, wo die Induktionspannung in Motor zu schwach ist.

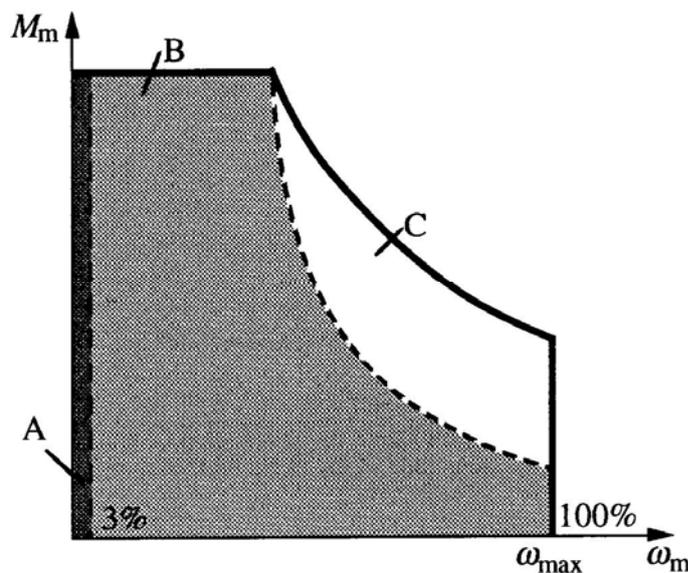


Fig. 4.180 Selbstgesteuerter Synchronmotor und dreiphasiger Wechselrichter: Kennlinien in Fahren (SNCF: BB 10004).

4.9 Thermoelektrische Antriebe

4.9.1 Prinzip

Die elektrischen Motoren erhalten nicht die Energie aus einer Fahrleitung, aber aus einem Bordgenerator. Dieser verwandelt die chemische Energie des Brennstoffs in elektrische Energie.

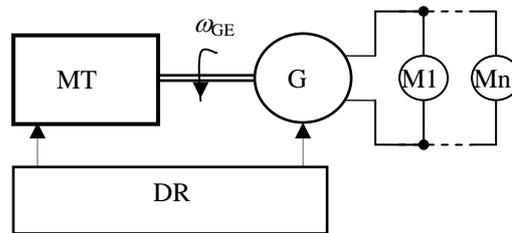


Fig. 4.203A Thermoelektrisches Antrieb: Prinzip.

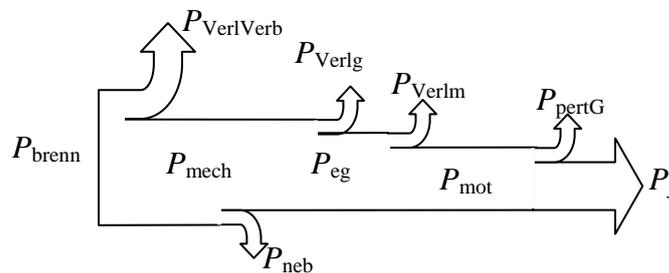


Fig. 4.203B Thermoelektrisches Antrieb: Leistungsflüsse (Pfeilenbreite sind nicht genau maßstäblich).

Der Antrieb enthält vier Stufen:

- Eine Thermomaschine MT erhält eine Leistung mit dem Brennstofffluss q und wandelt sie in einer mechanische Leistung mit dem Wirkungsgrad η_{MT} .
- Ein Generator G wandelt die mechanische Leistung in einer elektrischen Leistung mit dem Wirkungsgrad η_g . Die mechanische Leistung der Thermomaschine soll noch die Nebenbetriebe speisen, besonders den Regelgerät DR und die Generatorerregung.
- Die Antriebmotoren wandeln die elektrische Leistung in einer rotierenden mechanischen Leistung mit dem Wirkungsgrad η_{mot} .
- Die Getriebe und die Räder wandeln die rotierende Leistung in einer Fahrleistung P_j am Radumfang mit dem Wirkungsgrad η_G .

Jedes Wandeln hat sein Wirkungsgrad sodass die Leistung am Radumfang nicht grösser als 30 % der Brennstoffleistung ist.

$$P_{\text{mech}} = \omega_{GE} M_{MT} \quad (4.100)$$

$$P_{\text{mech}} = \eta_{MT} e_{\text{carb}} q \quad (4.101)$$

$$P_{\text{eg}} = \eta_g (P_{\text{mech}} - P_{\text{aux}}) \quad (4.102)$$

$$P_{\text{mot}} = \eta_{\text{mot}} P_{\text{eg}} \quad (4.103)$$

$$P_j = \eta_G P_{\text{mot}} \quad (4.104)$$

Die Thermomaschine MT ist oft ein Dieselmotor (z. B. GTW 2/6 aus Stadler) oder eine Gasturbine (Amtrak: JetTrain, SNCF: TGV001). Der Wirkungsgrad des Dieselmotor hängt seinem Betriebspunkt ab. Ein Regelgerät steuert den Betriebspunkt des Motor um die Leistung an der Fahrleistung und Nebenbetriebe zu optimieren (AC-Kurve auf dem Bild

4.205). In den Triebfahrzeugen für Personenzügen soll noch der Bordgenerator die Leistung für die Wagen geben (Heizung oder Klimaanlage, Beleuchtung,...).

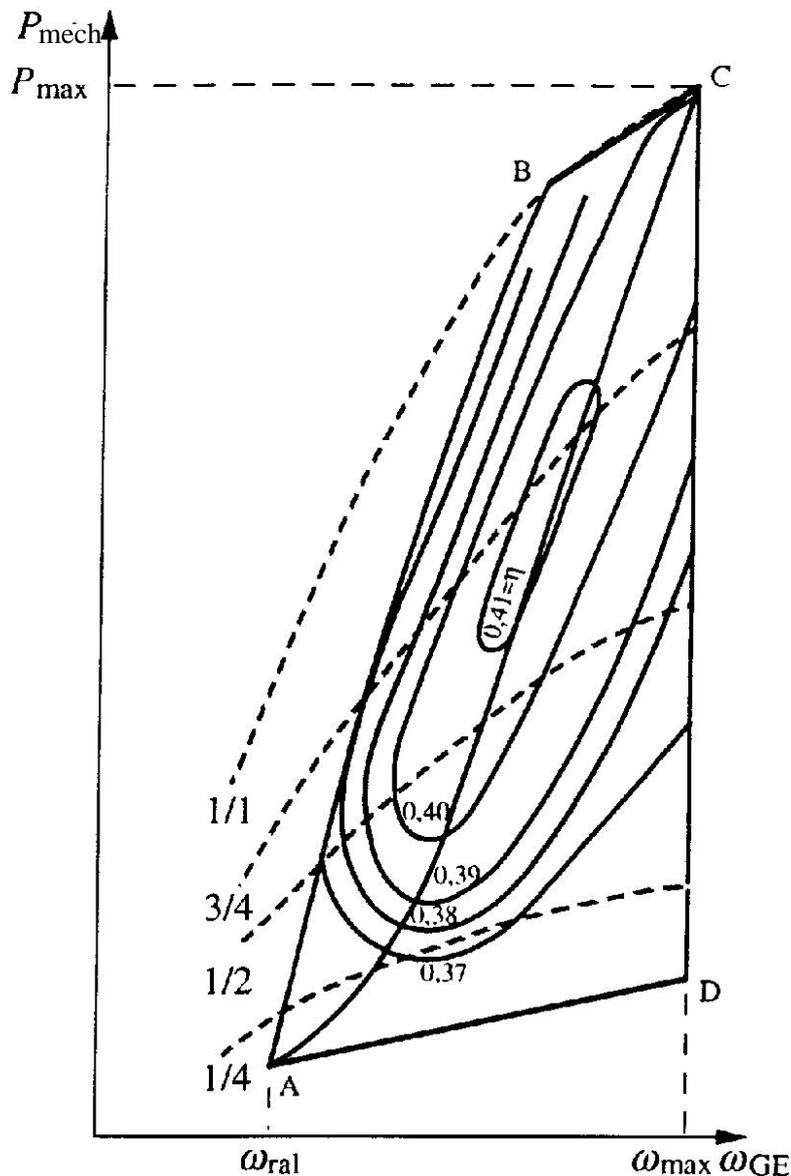


Fig. 4. 205 Wirkungsgrad eines Dieselmotor auf der Drehzahl – Leistung Ebene.

Die Kurve AD ist die untere Grenze gegen die Motorverschmutzung, die Kurve AB ist die obere Grenze gegen grossen Auspuffverbrauch und die Kurve BC ist bei der maximalen Öffnung der Injektoren definiert. Der Wirkungsgrad des Dieselmotors ist wenig höher als 40 %, und nur für Leistungen zwischen der Hälfte und drei Viertel der Maximalleistung.

Als Gegenteil der reinen elektrischen Triebfahrzeugen kann man die Triebmotoren nicht über ihrer Nennleistung nützen, weil die Leistung der Bordgenerator begrenzt ist. Die Zugkraftkennlinie einer Diesellokomotive ist sehr gestreckt (fig.4.215). Schon bei einer geringen Geschwindigkeit beginnt die Zugkraft zu senken, und die Restzugkraft bei der maximalen Geschwindigkeit ist sehr begrenzt.

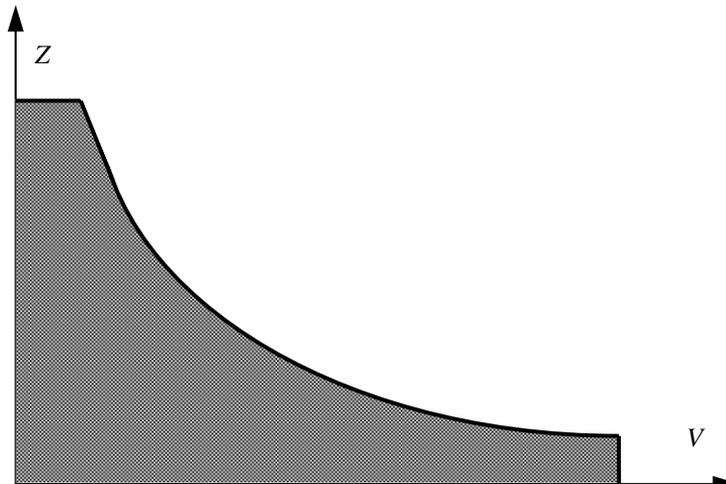


Fig. 4.215 Dieselelektrischer Antrieb: Zugkraftkennlinie, abhängig der Geschwindigkeit.

Für den Generator findet man 3 Entwicklungsstufen:

1. Am Anfang war eine Kollektormaschine benutzt, mit 3 Wicklungen: die Serie- Shunt- und Fremderregung. Der Betriebspunkt war durch den Erregerstrom gesteuert. Der Strom aus der Batterie war mit einer speziellen Maschine verstärkt. Sie ist auf der gleichen Welle befestigt. (Notiz 8.10.1). Man hat auch anderen Varianten mit DC-Generatoren gebaut.
2. Ab dem Ende der '60-Jahren wurde ein Synchrongenerator benutzt, mit einem dreiphasigen Dioden-Gleichrichter. Der Betriebspunkt ist durch den Rotorstrom gesteuert, an seiner Erregermaschine (Notiz 8.10.5).
3. Ab ungefähr 2000 werden auch Asynchrongenerator benutzt. Es arbeitet mit einem gesteuerten Gleichrichter. Der Betriebspunkt ist durch den Frequenzunterschied zwischen den Generator und den Umrichter gesteuert. Mit dieser Struktur kann man die Brennstoffinjektion im Diesel-Motor in Bremsbetrieb stoppen. Die Asynchronmaschine läuft als Motor und der Umrichter als Wechselrichter. Die Nebenbetriebe dürfen in diesem Fall ohne Brennstoff gespeist werden.

Die Fahrmotoren waren am Anfang Kollektormotoren mit Serie-Erregung, wie bei reinen elektrischen Fahrzeugen. Sie waren direkt an den Generatorklemmen verdrahtet: Kollektor-Generator oder Asynchron mit Gleichrichter. Ab dem Anfang der '80-Jahren wurden Asynchronmotoren benutzt, die durch einen Wechselrichter mit wechselbarer Frequenz gespeist wurden. (Notiz 8.10.3).

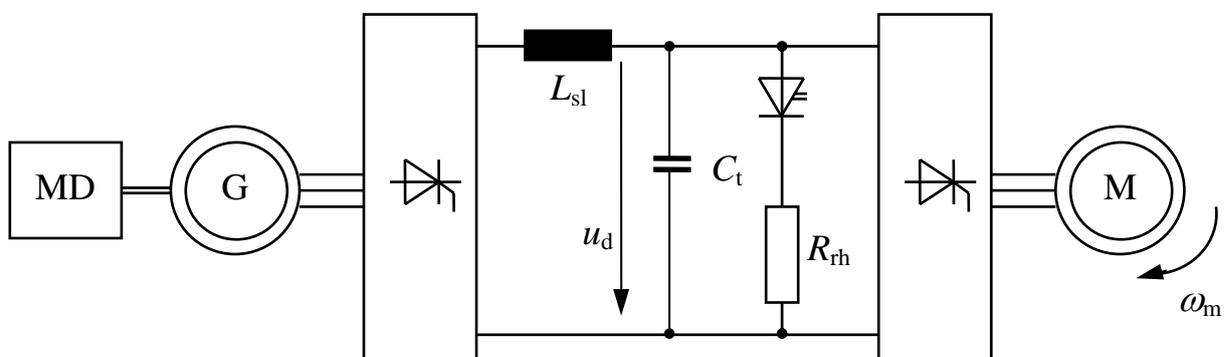


Fig. 4.227 Dieselelektrischer Antrieb: Asynchron-Gleichstrom-Asynchron-Antrieb.

In Brennstoffzellen nutzt das Leistungswandeln keine mechanische Zwischenleistung. Die elektrische Leistung ist auf einer niedrigen Spannung mit einem hohen Strom erzeugt. Vor dem Gleichspannung-Zwischenkreis ist ein Hochsetzsteller nötig.

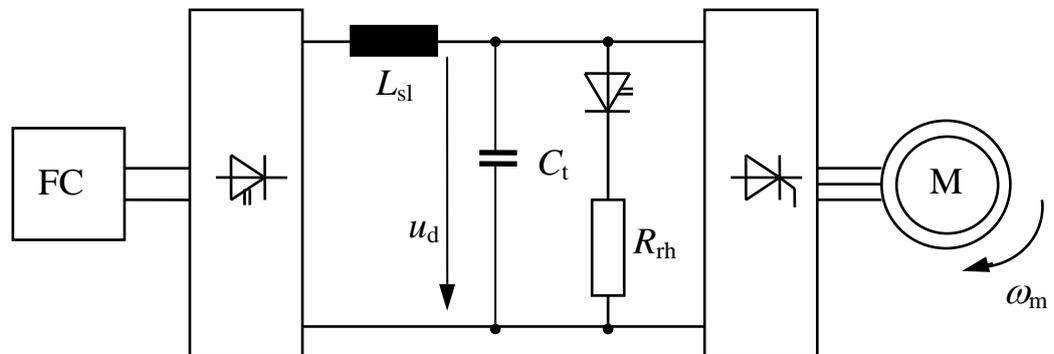


Fig. 4.228 Brennstoffzelle-Antrieb: Gleichstrom–Gleichstrom–Synchron.

Gegen dieselelektrische Antriebe kann man Vorteile und Nachteile listen (2003), diese Liste kann bald ändern.

- Besserer Wirkungsgrad (70 % anstatt 30 %).
- Auspuffgas ist Wasserdampf.
- Brennstofflagerung ist kritisch.
- Tankstellen sind komplexer.
- Braucht mehr Platz.
- Mehr Wartung.
- Niedrigere Zuverlässigkeit.

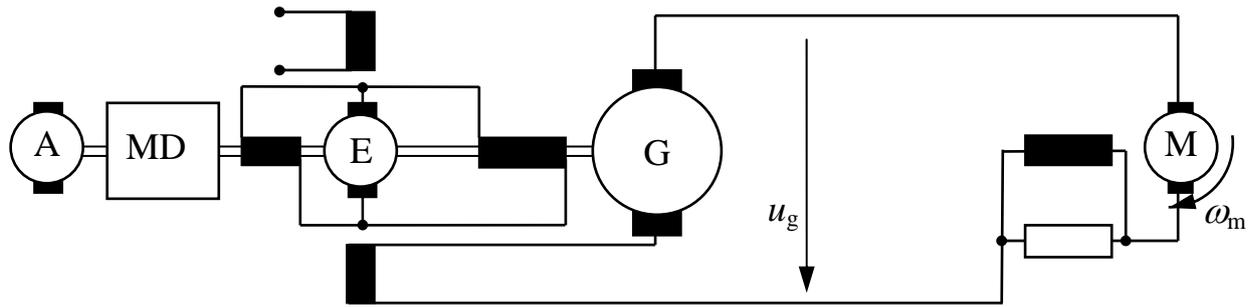


Fig. 4.207 Dieselelektrischer Antrieb: Gleichstrom-Generator.

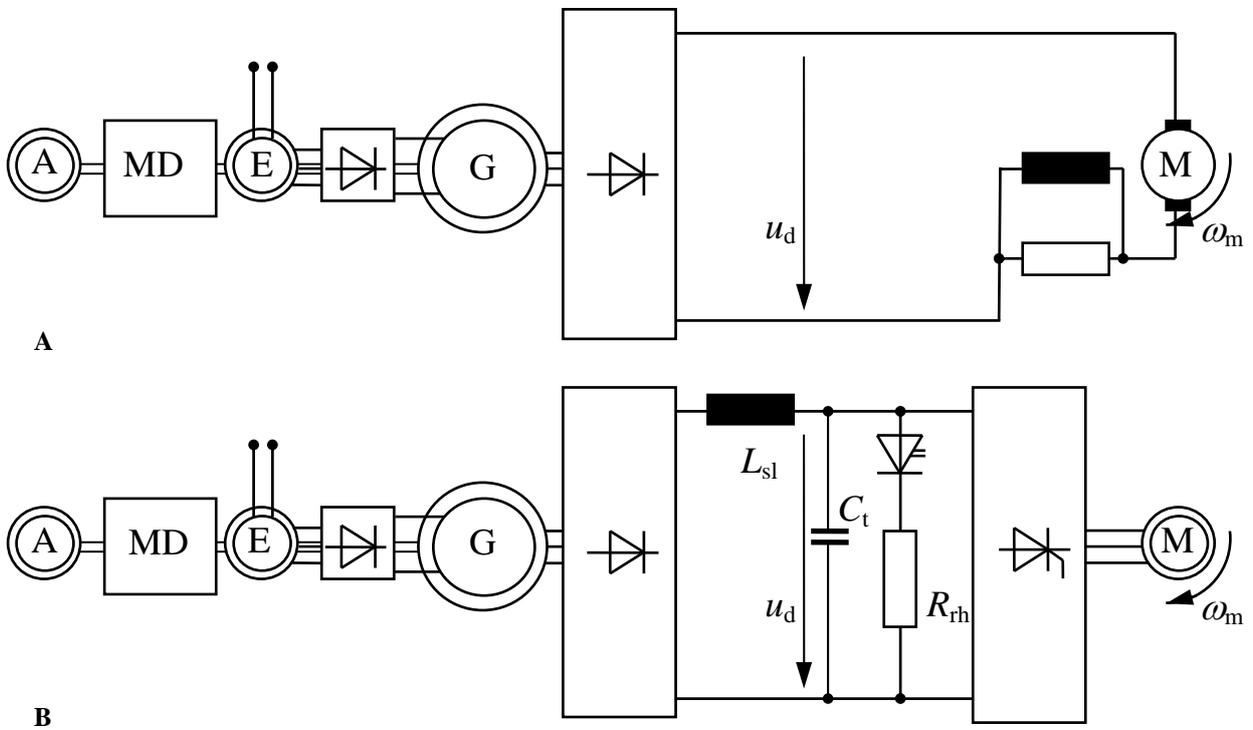


Fig. 4.218 Dieselelektrischer Antrieb: Asynchron-Generator mit Gleichrichter.

A Gleichstrom-Motoren.

B Asynchron- Motoren mit Wechselrichter.

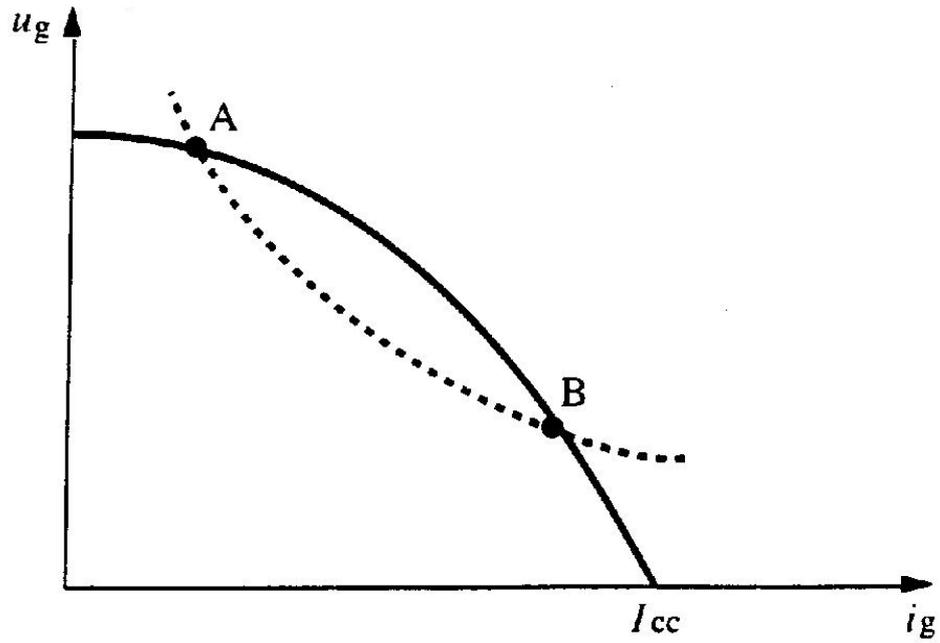


Fig. 4. 221 Begrenzungskennlinie eines Generators.

Die gestrichelte AB-Kurve zeigt die Grenzleistung des Diesel-Motors.

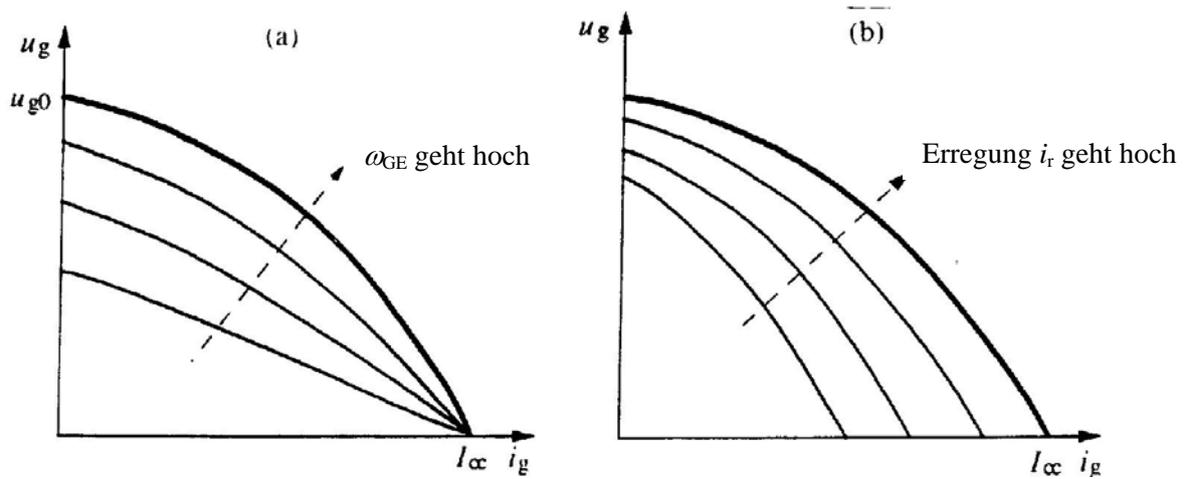


Fig. 4.222 Begrenzungskennlinie eines Generators:

- a Für verschiedenen Drehzahl des Generators, mit konstanter Erregung.
- b Für verschiedene Erregungen des Generators, mit konstanter Drehzahl.

Vergleich elektrisch –thermisch

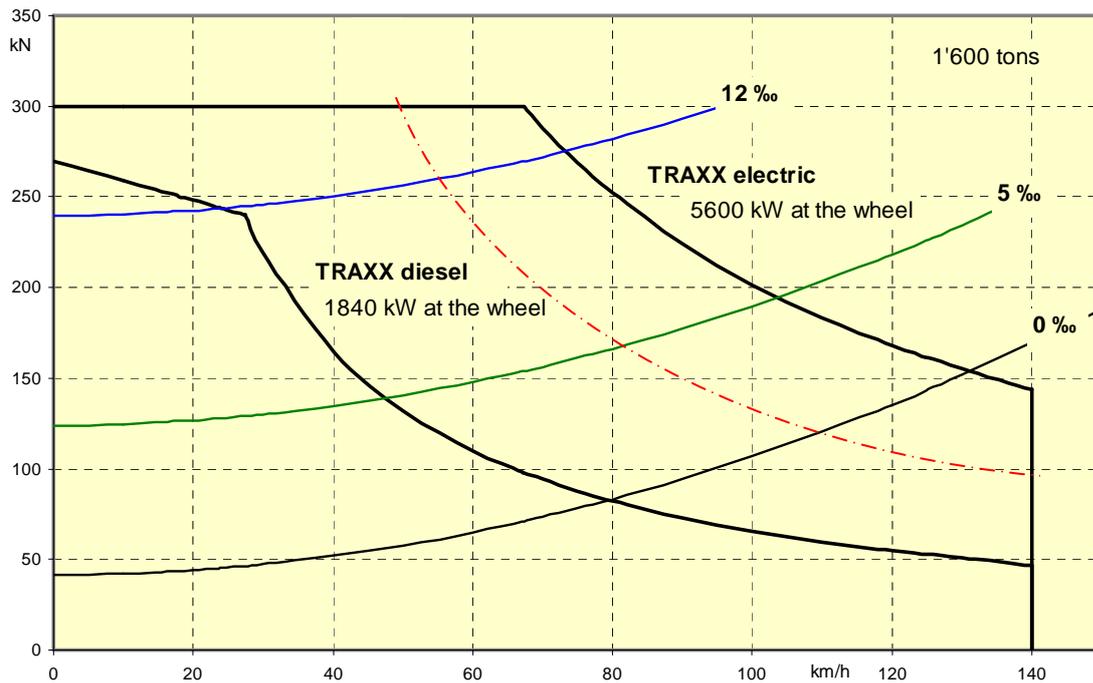


Fig. 4. 229 Elektrische und Diesel Locomotive mit gleichem Gewicht und gleicher Masse. (Dok. Bombardier).

Beim Vergleich eines diesel-elektrischen Triebfahrzeuges mit einem rein-elektrischen, man merkt dass die Fähigkeiten des elektrischen Fahrzeugs in Dauerdienst (rote Kennlinie in Strich-Punkt) grösser mit 4,2 MW als jenen maximalen des diesel-elektrischen mit nur 1,84 MW sind. Die Leistung des diesel-elektrischen Triebfahrzeuges ist bei seinem Motor (2,2 MW) begrenzt. Dazu darf man aus dem elektrischen Fahrzeug kurz (schwarze Kennlinie: circa 10 Minuten) eine höhere Leistung fragen. Mit einem elektrischen 82-Tonnen Triebfahrzeug kann man 5600 kW erreichen, aber nur 1840 kW mit einem diesel-elektrischen Triebfahrzeug.

Man sieht so dass eine Doppeltraktion öfter mit diesel-elektrischen Fahrzeugen nötig ist. Dazu sind die Beschleunigungen niedriger.

Stromversorgung des Zuges

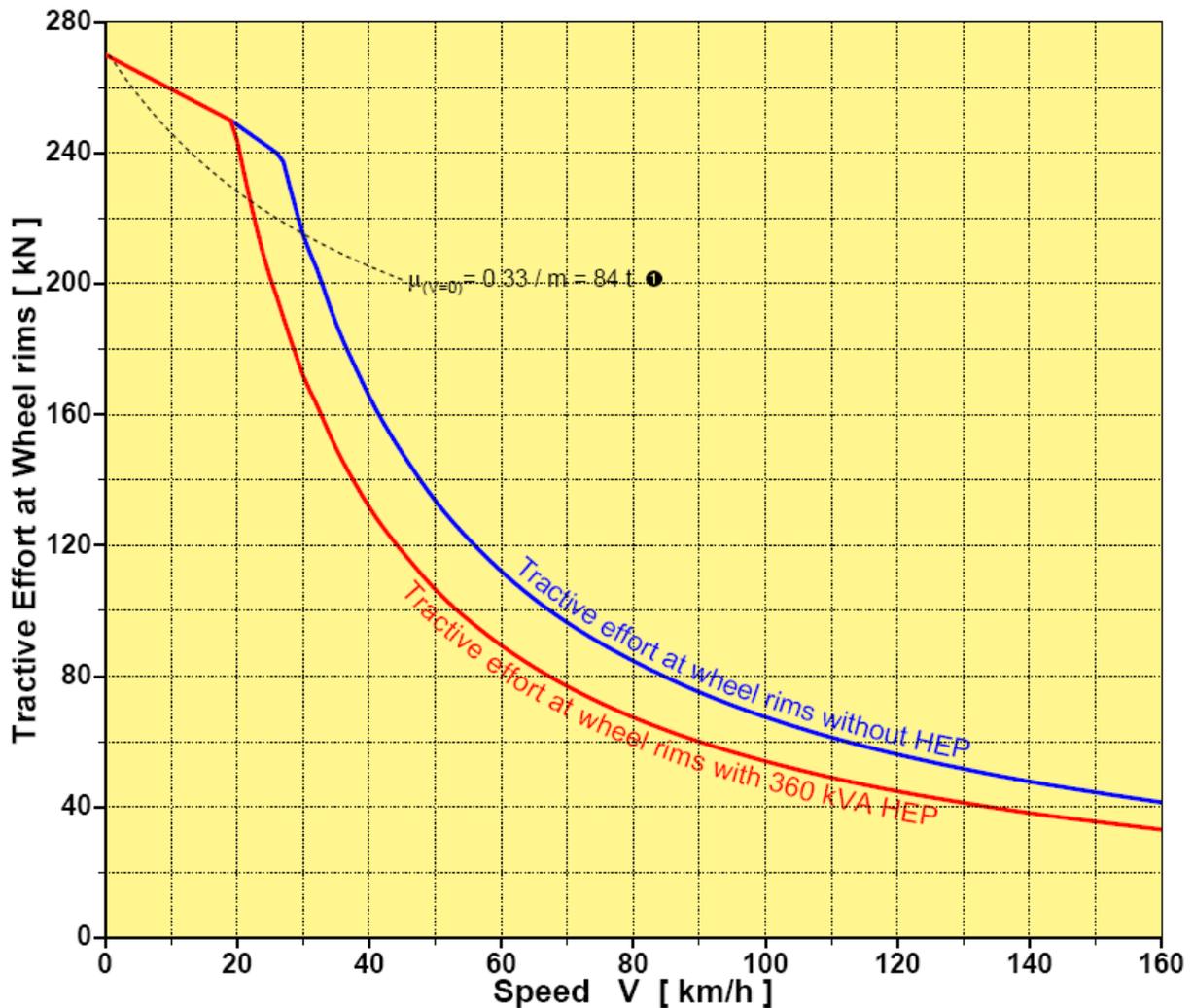


Fig. 4.230 Diesel Locomotive mit oder ohne Stromversorgung. (Dok. Bombardier).

Wenn ein Personenzug durch ein Diesellokomotive gezogen wird, soll die Leistung für das Zug auch aus dem Dieselmotor erzeugt. Diese Leistung ist doch nicht mehr für die Traktion verfügbar (rot Kurve)! Wenn der Zug auf einer kurze Rampe ankommt darf der Zuführer die Stromversorgung provisorisch ausschalten, um die ganze Leistung für die Zugkraft behalten. Die Klimaanlage werden dann momentan ausser Betrieb.

5.1 Mechanischen Antriebe

Der mechanische Antrieb, oder die mechanische Übertragung, soll das Drehmoment aus dem Motor zur Antriebachse leiten.

Zwischen die Triebfahrzeugkaste, das Drehgestellrahmen und die Achslager werden Federelemente eingebaut. Die Motoren sind am häufigsten am Drehgestell oder an der Kaste befestigt. Man spricht von vollabgefedertes Motor oder halbabgefedertes Motor. Die Drehmomentübertragung soll trotz den Bewegungen zwischen Motor und Achse in jeden Fall gesichert werden. Wenn die Motoren unter der Kaste befestigt werden soll auch die Bewegungen der Drehgestelle unter der Kaste ertragen (TGV, ICN). Man hat Kardanwellen und Gleitwellen.

Das Getriebe sichert noch zwei Zecken:

- Für eine bestimmte Leistung ist ein schneller Motor kleiner und leichter als ein langsamer. Das Getriebe bringt eine Drehzahlreduzierung.

$$\omega_e = k_G \omega_m \quad (5.1)$$

- Die Räder ertragen Rücken auf die Weichen oder Schienelücken. Man baut Dämpfelemente um die Rücken nicht am Motor zu führen.

Die Motorfederung und die elastische Getriebe schont auch das Gleis: die Schiene oder das Weichenherzstück erträgt Schlägen nur mit der Achsenmasse ohne die Zusatzmass des Motors.

Die Getriebe dürfen in drei Klassen von eurer Dämpfungsqualität geordnet werden:

- Klasse 1: Die Tatzlagermotoren werden auf einer Seite am Rahmen durch eines elastischen Teil gehängt und auf der anderer Seite mit Lager auf der Achse gelegt. Sie sind nur halbgefedert (N1 – N3). Die *gearless*-Getriebe oder Planetengetrieben gehören auch an dieser Klasse.
- Klasse 2: Eine Kardanwelle wird zwischen Motorwelle und Getriebe eingebaut. Es bewegt sich innerhalb des Hohlwelle des Motors (*BBC-Scheibenantrieb*, *Sécheron-Lamellenantrieb*, *ASEA*, *Sumitomo*). Der Motor wird am Rahmen – des Drehgestells oder der Kaste – befestigt. Das Grossrad der Getriebe wird an der Achswelle befestigt (B1, B2, B6, B8, K1, K4, K5).
- Klasse 3: Eine Kardanwelle wird zwischen Getriebe und Achswelle eingebaut. Diese ist eine Hohlwelle (*Jaquemin*, *BBC à joint caoutchouc*, *Alstom*, *Kaelble-Gmeinder*) (K2, B3, B4, B7). In dieser Klasse findet man auch die zweistufigen Getriebe mit freier Kardanwelle (B5, K3).

Das Bild 5.0 schaut ein Übersicht auf die Antriebsprinzipien.

Die mechanische Leistung an der Motorwelle ist nicht ganz an der Achse geführt, sondern mit dem Wirkungsgrad η_G zwischen 0,95 und 0,99.

$$P_j = \eta_G P_{\text{mot}} \quad (5.4)$$

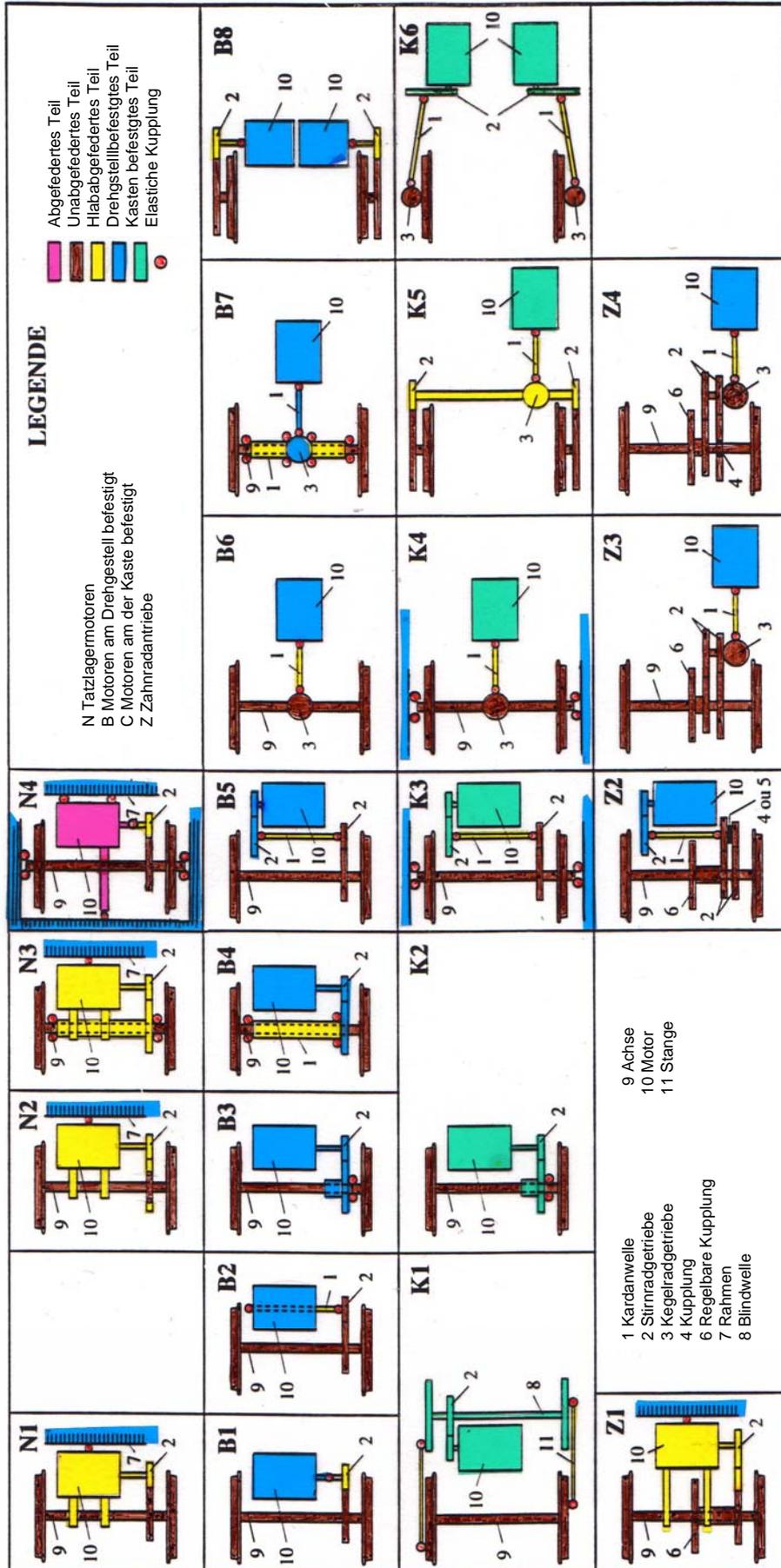
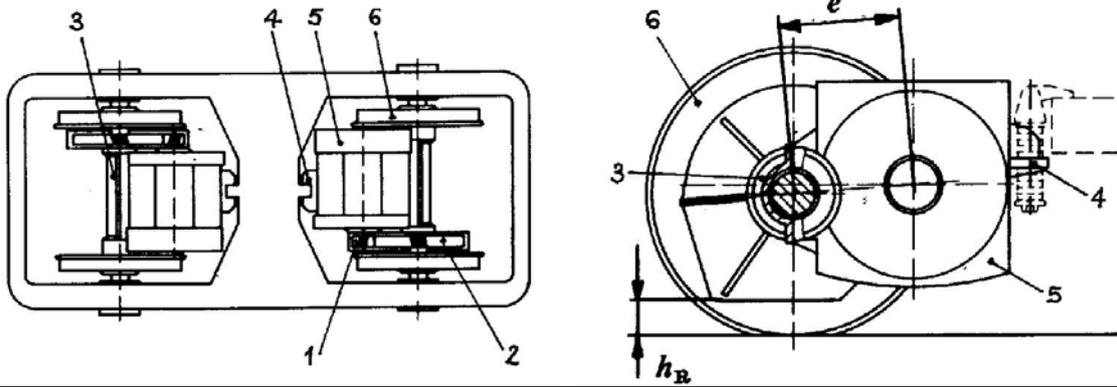


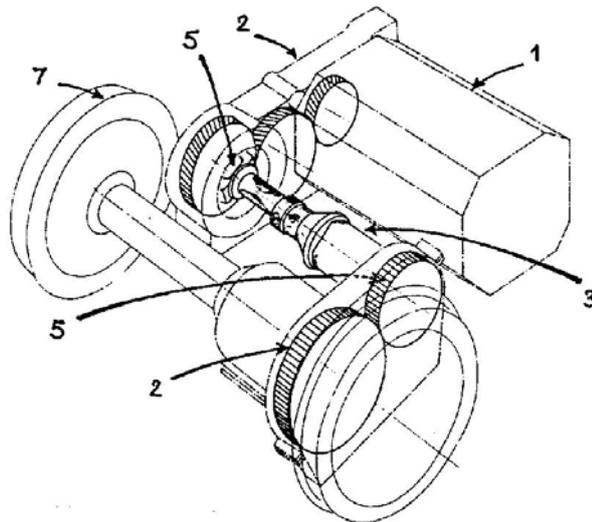
Fig. 5.0 Antriebstypen.

5.2 – 5.6 Gewählten Beispiele



1 Ritzel	5 Motor
2 Grossrad	6 Achse
3 Lager	e Abstand
4 Rahmenbefestigung (Nase)	h_R Höhe unter Getriebegehäuse

Fig. 5.2 Tatzlagermotor



1 Motor (unter Kaste befestigt)	5 Kardan
2 Stirnradgetriebe	7 Achse
3 Gleitwelle	

Fig. 5.30A TGV-Antrieb.

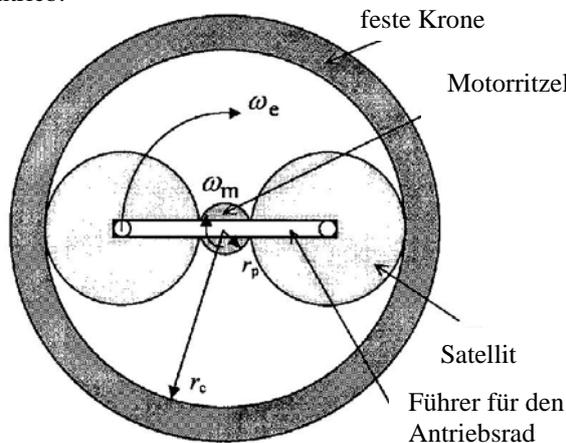
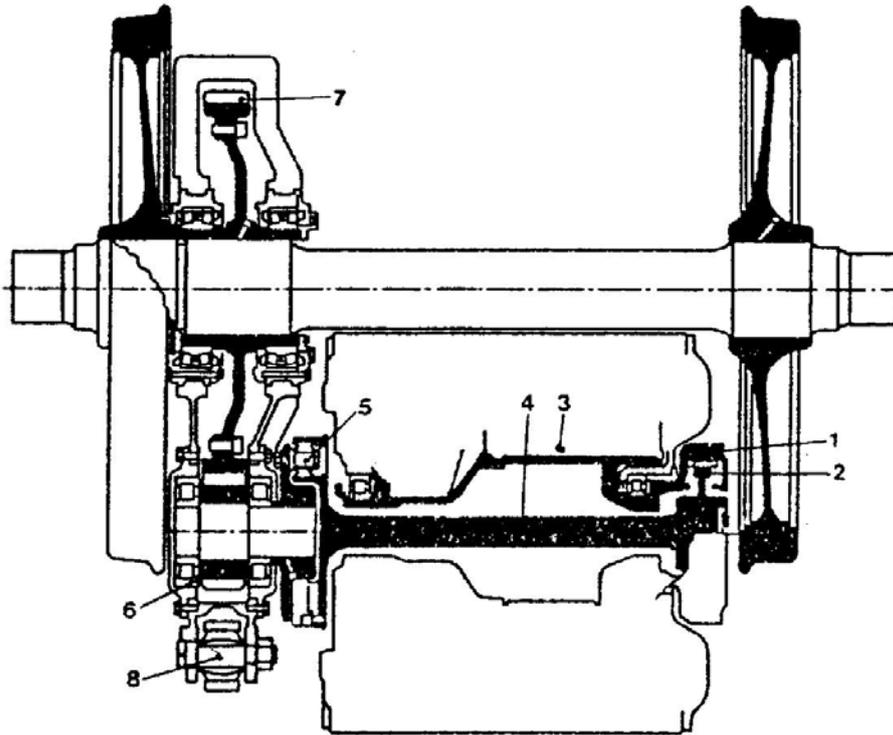
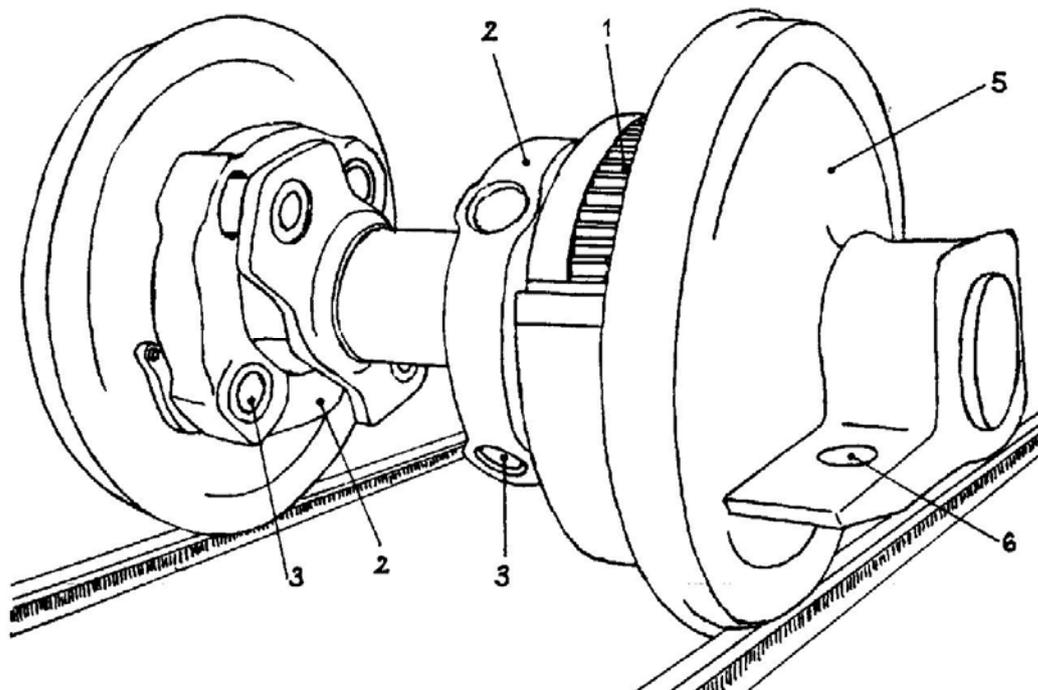


Fig. 5.32A Planetengetriebe.



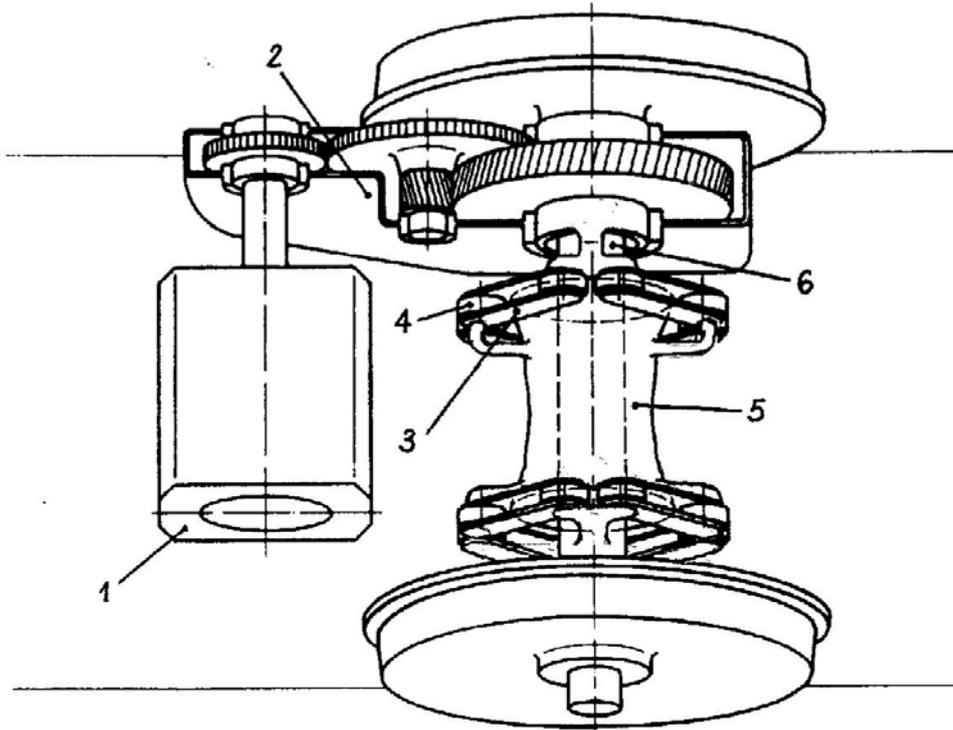
1 Zahnkupplung im Ölbad	5 Kardan mit Gummielemente
2 Kupplungsritzel	6 Getrieberitzel
3 Hohlwelle des Rotors	7 Getriebegrossrad
4 Torsionswelle	8 Gehäusefederung

Fig. 5.23 ASEA-Antrieb.



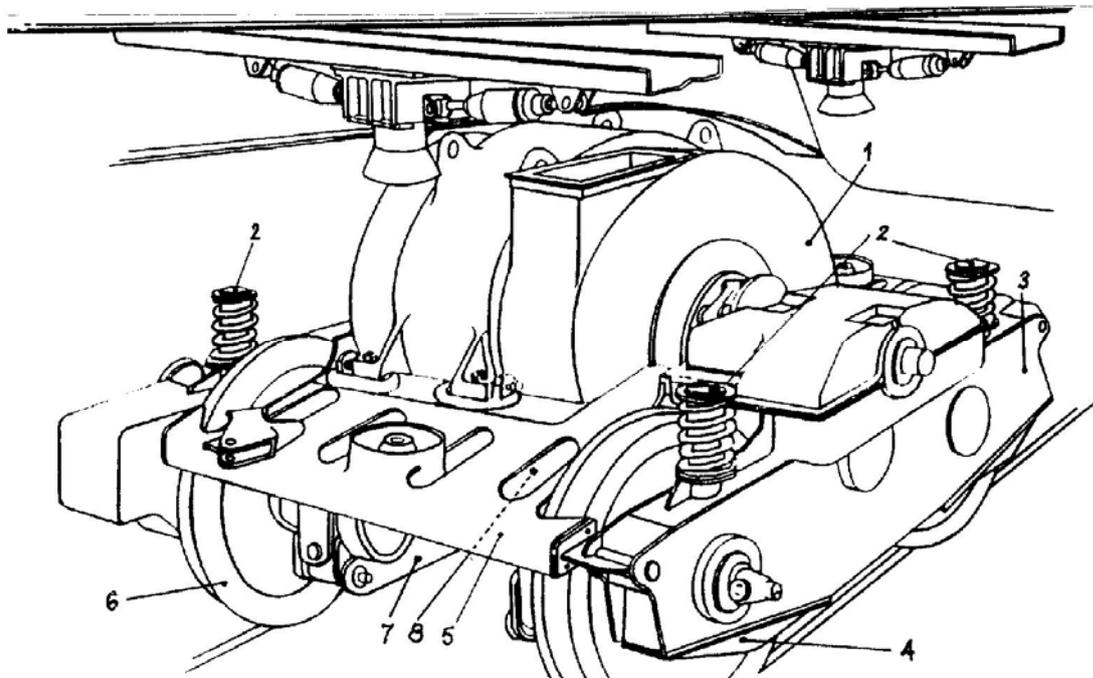
1 Getriebegrossrad	4 Hohlwelle
2 Ring	5 Achse
3 Kugelpkupplung	6 Stütze für Primärfederung

Fig. 5.24 Jacquemin-Antrieb.



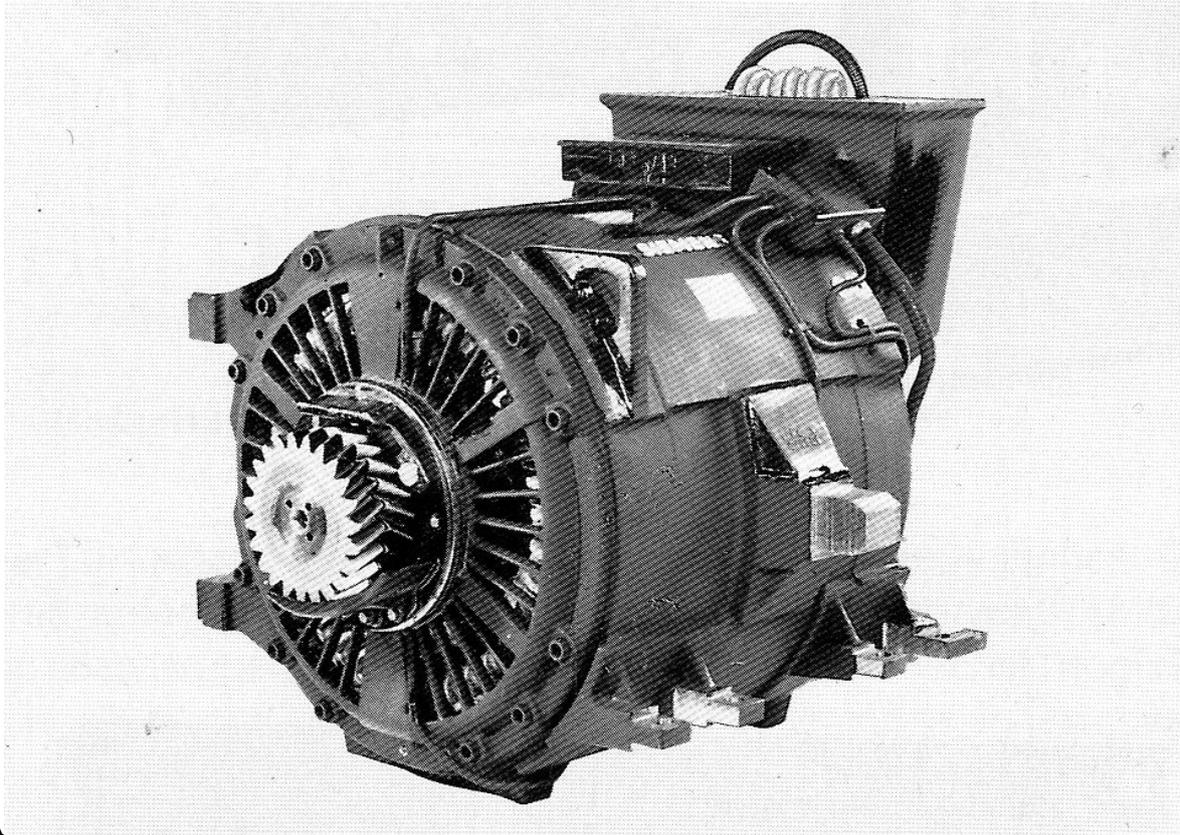
1 Motor	4 Gummigelenk
2 Getriebe	5 Hohlwelle
3 Hebel	6 Achsenwelle

Fig. 5.25 Gummigelenkantrieb (ABB, BBC, Hurth, Kaelble-Gmeinder, Krauss-Maffei).

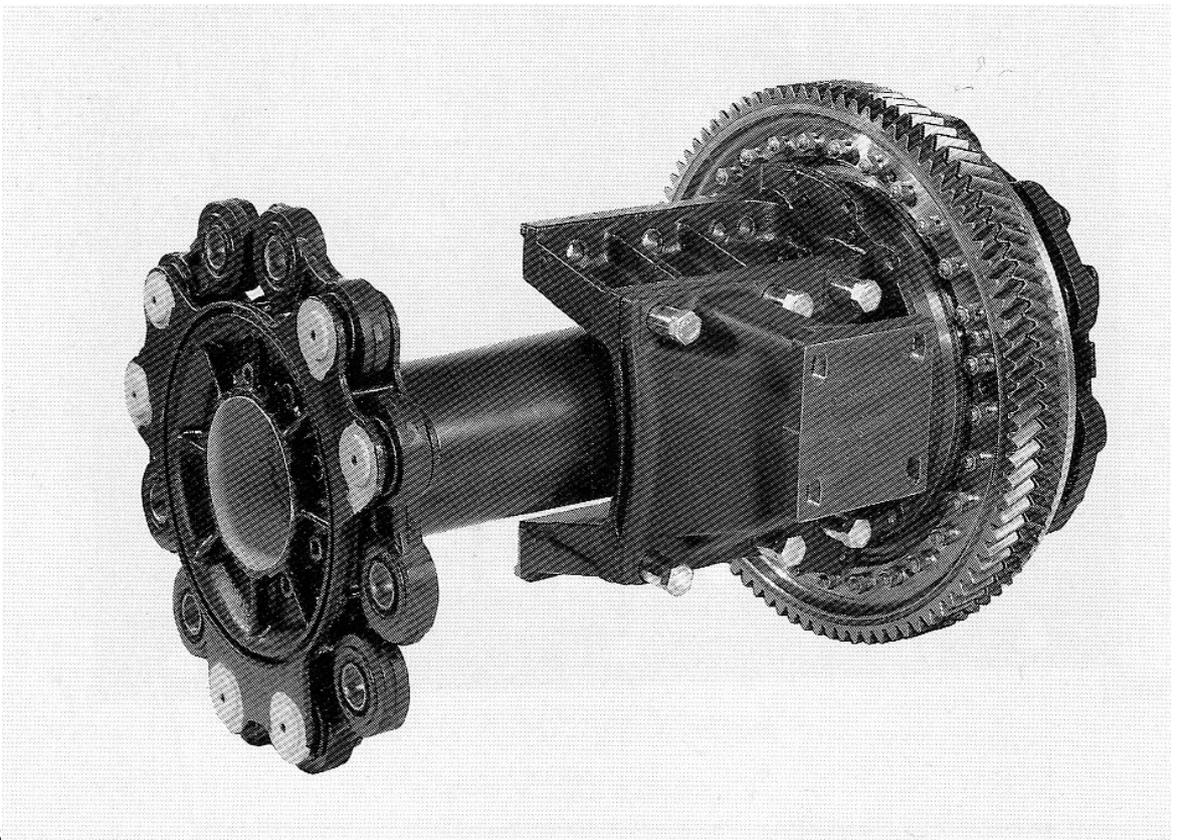


1 Motor	5 Drehgestellrahmen
2 Sekundärfederung	6 Achse
3 Getriebegehäuse	7 Achslagern
4 tanzender Ring	8 Primärfederung

Fig. 5.27 Einmotordrehgestell (SNCF: BB 8500).



A



B

A Motor und Ritzel. Rechts : Befestigung an der Drehstelltraverse
 B Getriebegrossrad, Hohlwelle und Kardan. Rechts, Befestigung am Drehstellrahmen.
Fig. 5.35 Beispiel eines Hohlwellenantriebs: *Krauss-Maffei*.

5.8 Dimensionierung für mechanische Antriebe

Ein mechanisches Antrieb, oder eine Getriebe, überträgt an die Triebräder das Drehmoment das aus dem Motor erzeugt wird. Die Abmessungen der Zähne und der Wellen sollen für die Maximalzugkraft berechnet werden. Die Stützpunkten und die Silent sollen auch fest halten, auch mit dem Altern.

Das schwierigste Teil findest man anderswo: Man hat ein schwingendes System mit mehreren mit Torsionswellen verbundenen Schwungräder. Die Komplexität wächst mit dem Klassennummer auf (siehe Seite 5-1.1). In einem Klasse-3-System kann man bis 20 Freiheitsgrade finden. An jenen Fahrgeschwindigkeiten kann man eine Resonanzfrequenz für das mechanische Teil treffen. Wenn dazu ein Resonanzfrequenz ein Vielfach einer elektrische Frequenz am Netz oder Umrichter findet man wirklich schwierige Probleme. Die Wissenschaft des Mechanikers soll prüfen, dass diesen Resonanzfrequenzen nie in normalem Betrieb erregt werden. Die Dämpfungen und Elastizitäten sollen richtig berechnet werden.

Bei der Berechnung der Form der Getriebezähne soll man prüfen dass der Kontaktanzahl konstant bleibt, um keine Vibrationen zu erzeugen.

Eine Unregelmässigkeit eines Radkreises – einige Millimeterzehntel – kann eine Resonanz im mechanischen System bei einer spezifischen Geschwindigkeit erzeugen.

5.9 Zahnstangenantrieb

Für die steilen Rampen ist die Adhäsion nicht genügend um die nötige Zugkraft zu versichern. Man nützt Zahnräder auf einer Zahnstange.

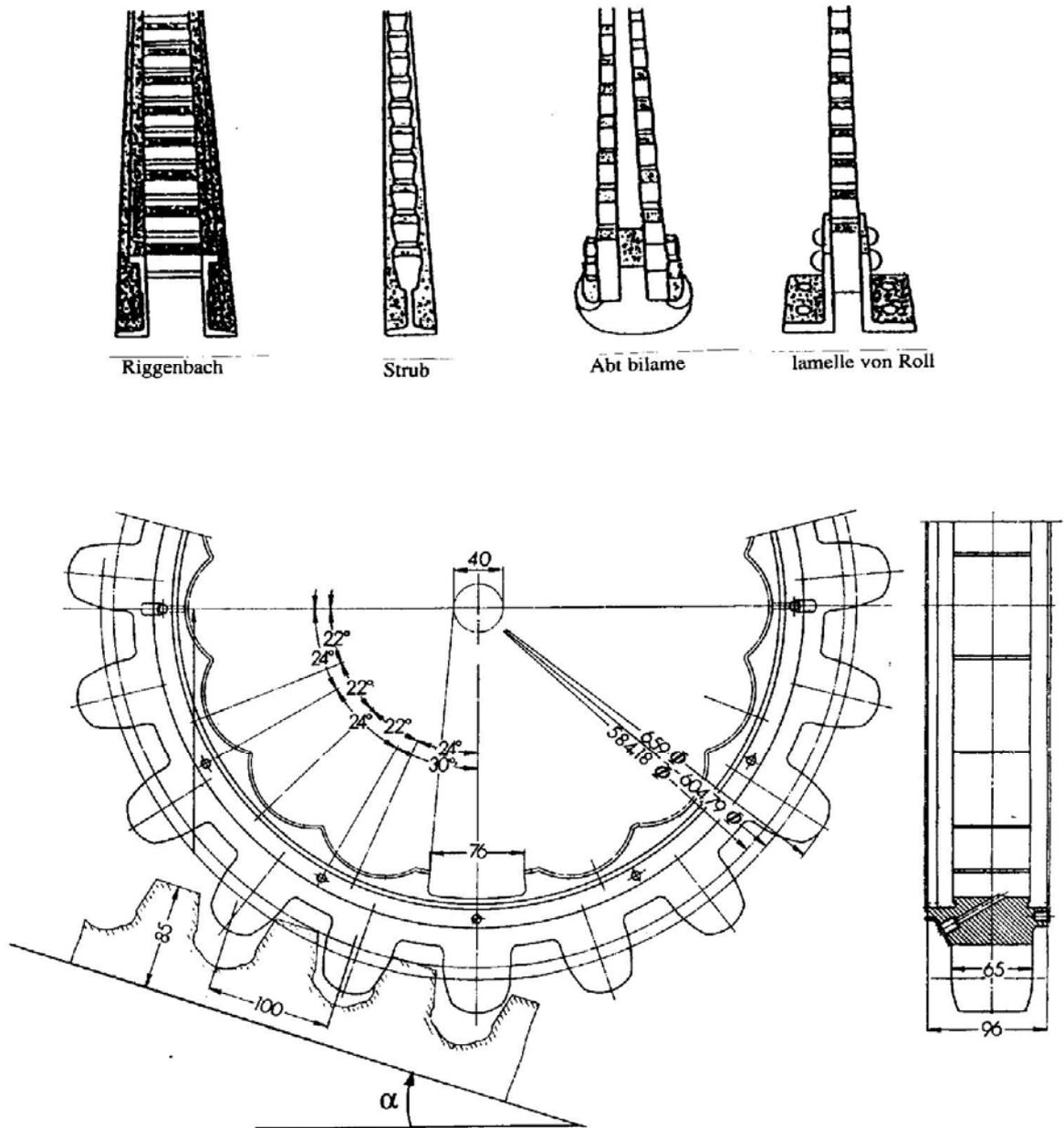


Fig. 5.36 Zahnstange.

Referenz

http://www.voev.ch/dcs/users/117/D_RTE_29700_d_2010-04-19.pdf

6.1 Nebenbetriebe

Wenn man oft die elektrischen und mechanischen Antriebe studiert, soll man nicht die Nebenbetriebe vernachlässigen: sie sind für ein sicheres Betrieb wesentlich.

Mit einer Energie aus Fahrleitung (oder Diesel-Motor) sollen die Nebenbetriebe zwei Funktionen erfüllen:

1. Versorgung der nötigen Dienste für ein gutes Betrieb des Traktionseinrichtung und der Zugsbewegung.
2. Stromversorgung für Reisende-Komfort (Beleuchtung, Heizung – Klimaanlage, Türantriebe, usw.).

Man wird über der ersten Funktion überlegen, die für alle Züge gültig ist.

Ein Triebfahrzeug ist oft mit gesunkenen Stromabnehmern stationiert. Bordenergie ist nötig um das Triebfahrzeug einzuschalten, bis der Stromabnehmer auf der Fahrleitung gedrückt wird und der Hauptschalter geschlossen wird. Diese Energie ist in einer Batterie gespeichert; diese soll mit einer Anlage aus der Fahrleitung geladen werden. In einem thermischen Triebfahrzeug soll die geladene Energie den Diesel-Motor starten.

Das Zugbremsen soll in jeder Zeit garantiert werden. Man nutzt pneumatische Energie (Druckluft- oder Vakuumbremse). Die Vakuumpumpe oder der Kompressor sollen die Verfügbarkeit der pneumatischen Energie garantieren.

Endlich soll man auch die Kühlung und die Schmierung aller Apparate des Antriebsaggregats garantieren. Die Motoren für die Lüfter und Pumpen sollen bei jeder Fahrleitungsspannung funktionieren (Standard: -30% $+20\%$ um dem Nennwert).

Bei modernen Realisierungen (ab ungefähr 1990), hat man ein statisches Bordnetzrichter eingebaut. Aus dem Zwischenkreis erzeugt es ein dreiphasigen Bordnetz mit fester Frequenz (z.B. 400V 50 Hz). Oft hat man zwei Bordnetzrichter die eine Redundanz offerieren. Ein einzelner kann die Haupt Funktionen einspeisen. Mit einer solchen Versorgung darf man industrielle Geräte einbauen und nicht spezielleentwickelten Geräte.

Früher hatte man komplexe und geniale Lösungen, um die Verfügbarkeit und die Zuverlässigkeit der vitalen Komponenten zu versichern.

7.1 Automatanlagen

Man wird hier kein Kurs in Regelungstechnik unterrichten, sondern die gebiete beschreiben, wo die elektrische Zugförderung Automatik braucht.

Man kann verschieden Ebene treffen:

1. Die schnelle Regelungen oder Steuerungen dürfen nicht beim Mensch geführt werden: Stromregelung in einem Motor der durch einem Stromrichter gesteuert wird, Steuerung der Ventile in einem Dreiphasen-Wechselrichter, Steuerung der Hüpf bei einer Serie-Parallel-Umschaltung, ...
2. Andere Steuerungen entlasten den Fahrpersonal, der auf dem Zugführen konzentrieren kann: Kadenz der Hüpf in einer Widerstandsteuerung, Optimierung des Betriebspunkt bei einer dieselektrische Gruppe, Regelung einer Nutzbremse, Schleuderschutz, ...
3. Man findet Überwachungsfunktionen, wo das Führen automatisch bei Personalausfall übernommen wird: Bremsen eines Zuges vor einem Signal wenn die Verzögerung nicht genügend ist (European Train Control System (ETCS) Ebene1). Zentralführung der Züge auf Linien ohne seitliche Signale (ETCS Ebene2).
4. Automatische Fahrten, wo das personal nur für eine Überwachung anwesend ist (ETCS Ebene 3, RATP: Linie 1 bis Dez. 2012) oder total abwesend ist (Lille: VAL, RATP: Meteor). Die Anlage soll die Geschwindigkeit und die Lage des Zuges sehr genau kennen, um die Fahrsicherheit und die Fahrzuverlässigkeit zu garantieren.

Der Regelungsingenieur soll nicht nur die guten Funktionen garantieren, aber auch die erwähnte Gesetze respektieren, die von Land zu Land für die gleiche Funktion ändern können.

8.1 Vorführung

Um den theoretischen Teil besser zu erläutern, hat man einige Beispiele aus der ganzen Welt vorgeschlagen, die eine wichtige Rolle spielen. Jedes Beispiel wird in einer vierseitigen Notiz enthalten.

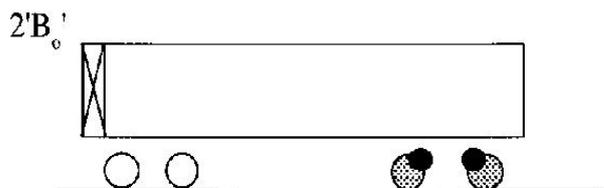
Die erste Seite gibt eine generelle Darstellung:

- Fahrzeugtyp.
- Achsfolge.
- Bahnbetrieb.
- Bild.
- Symbolische Darstellung der Einrichtung.
- Baujahr.
- Hauptdaten.

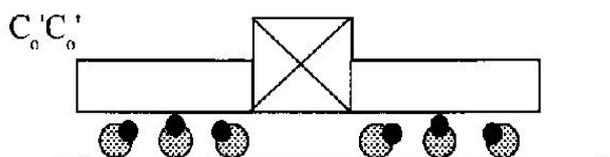
Die zweite Seite gibt eine Fahrzeugbeschreibung, wo anderen ähnlichen Serien sind auch zitiert. Man findet Referenzen an theoretischen Kapiteln und an Artikeln oder Büchern.

Die beiden letzten Seiten präsentieren eine Typenskizze, den Hauptschema und die Kennlinien für Fahren oder Bremsen.

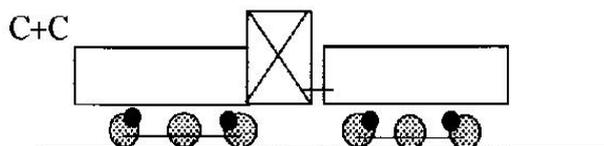
Die Anordnung der Achsen werden nach UIC-Normen geschrieben. Man hat den Index «i» für den individuellen Radantrieb eingeführt, wie der Index «o» den individuellen Achsantrieb eingeführt beschreibt.



Motorfahrzeug mit einem einzigen Kasten auf 2 zweiachsigen Drehgestellen (davon nur einem Motodrehgestell)
Beispiele: BT BDe 2/4 -Triebwagen



Motorfahrzeug mit einem einzigen Kasten auf 2 dreiachsigen Drehgestellen
Beispiele: SBB Ee 6/6 -Lok



Motorfahrzeug mit zwei kurzgekuppelten Kästen je auf 3 gekuppelten Achsen
Beispiele: SBB Eem 6/6 -Lok

Fig. 8.2 Beispiele für Achsfolge.

Die Notizen sind nach Stromart geordnet.

Für die symbolische Darstellung hat man einige einfache Symbole gewählt, um eine gesamte Idee der Ausrüstung schnell zu sammeln.

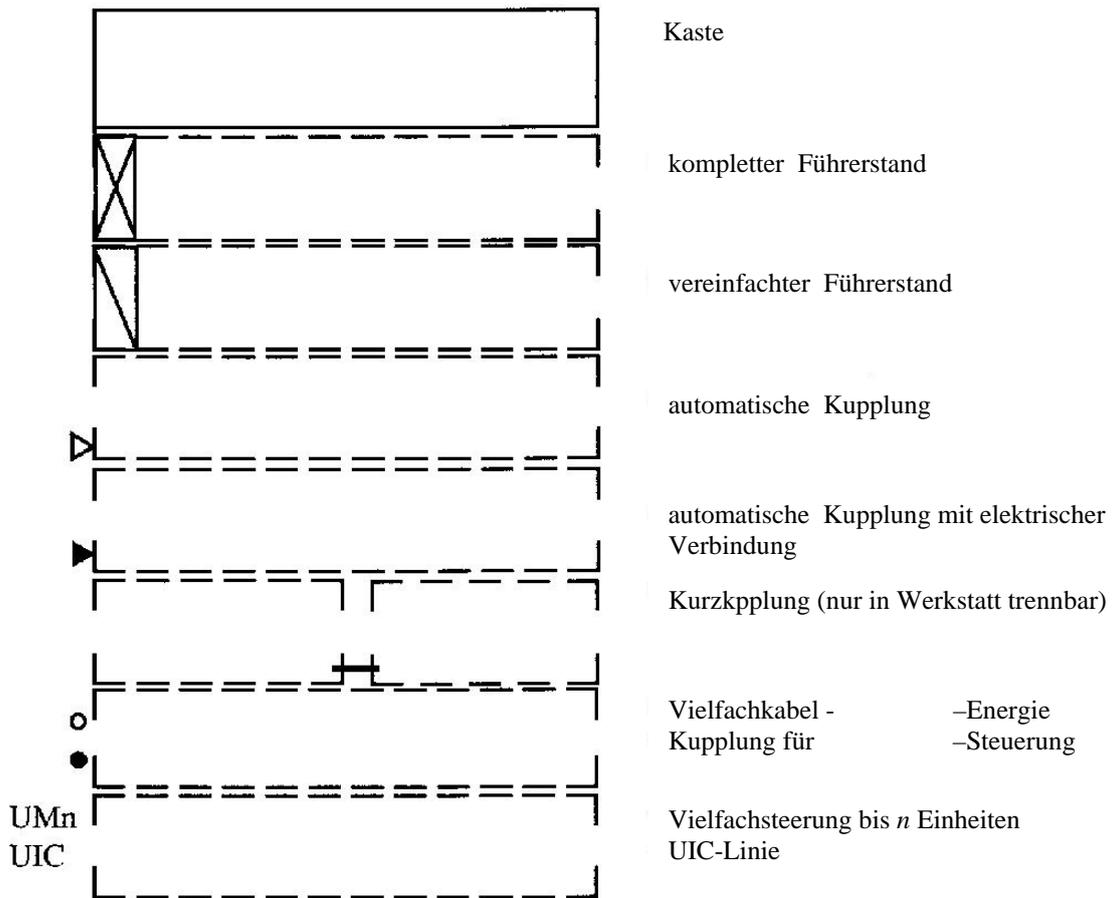


Fig. 8.3 Symbole : Kasten und Verbindungen.

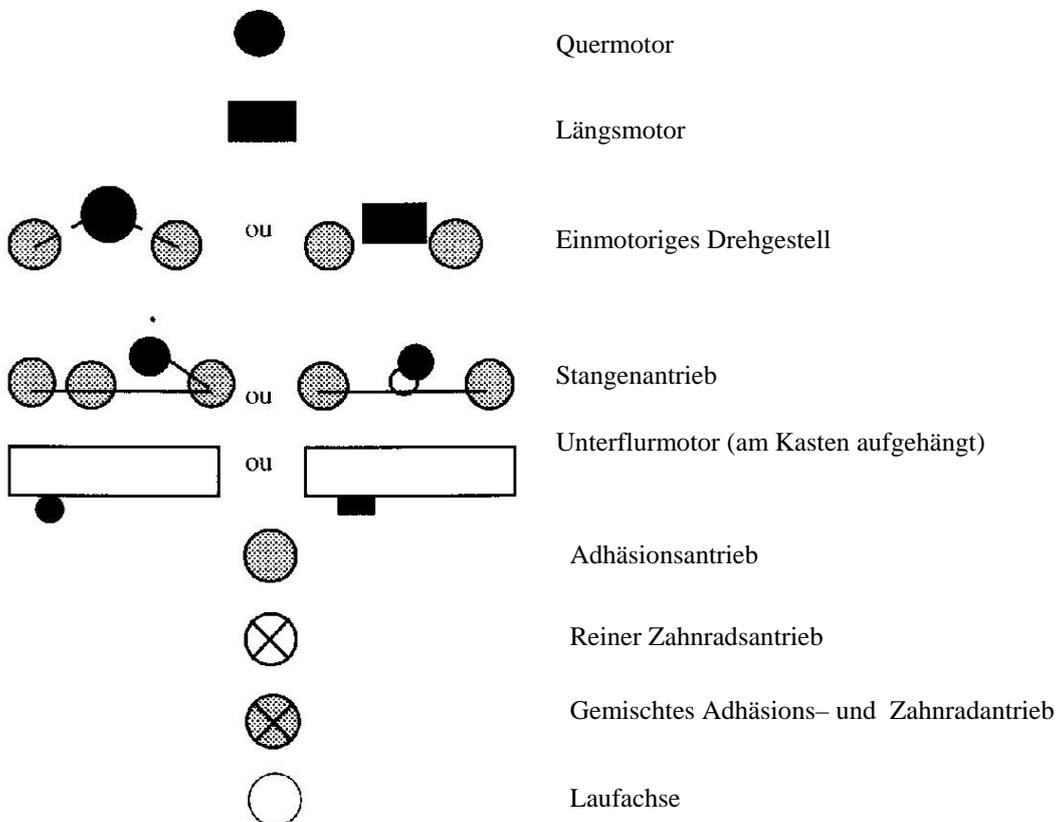


Fig. 8.4 Symbole : Motoren und Achsen.

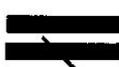
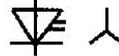
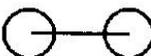
	Druckluftbremse	
	Transformer mit Hochspannungsregelung	
	Transformer mit Niederspannungsregelung	
	Schützensteuerung	-elektro-pneumatische -elektromagnetische
	Stufenschalter-Steuerung	
Rh	Widerstandsbremse	
Réc	Nutzbremse	
	keine elektrische Bremse	
	elektr.-magnetische Schienenbremse	
	Quecksilberdampfgleichrichter (Ignitron, Exzitron)	
	Gleichrichter mit Gittersteuerung (Exzitron)	
	Dioden-Gleichrichter	
	Thyristor-Gleichrichter	
	Gleichstromsteller	
	Wechselrichter für Mehrphasenmotor	
	rotierende Umformergruppe	
DE =	Dieselmotor mit Gleichstromgenerator	
DE 	Dieselmotor mit Dreiphasengenerator	
DH	Dieselmotor mit hydraulischer Übertragung	

Fig. 8.5 Symbole : elektrische Ausrüstung.

pna	Druckluftbremse	
pnv	Vakuumbremse	
hy	hydraulische Bremse	
epna	elektro-pneumatische Bremse	
rub	Bandbremse	} unerschöpfbar
ress	Federbremse	
cli	Klinkenbremse	
	Elctr. Wirbelstrom-Bremse („Telma“)	

Fig. 8.6 Symbole : mechanische Ausrüstung.

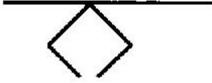
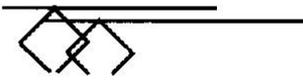
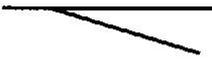
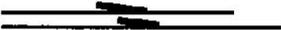
	V	Scherenstromabnehmer
	V	Einholmstromabnehmer
	V	Doppelt-Stromabnehmer (für Dreiphasenbetrieb)
	V	Stangenstromabnehmer
	V	doppelter Stangenstromabnehmer
	V	Schienen-Stromabnehmer (für dritte Schiene)
	V	Schienen-Stromabnehmer (für dritte und vierte Schiene)
	V	Batterie

Fig. 8.7 Symbole : Stromabnahme.

	Anordnung der Einstiegstüren
A	Erstklass-Abteil
B	Zweitklass-Abteil
D	Gepäckabteil
R	Bar- oder Speise-Abteil
Clim	Klimaanlage
ChR	Widerstandsheizung
ChRv	Warmluftheizung

Fig. 8.8 Symbole für Triebwagen.

9.1 Gleistechnologie

Die Fahrbahn ist ein System mit vier Komponenten: die Schienen, die Schwellen, der Schotter und das Erdplanum (die *Plattform*), die zusammen der Transportzweck erfüllen.

Die Schiene ist eine Stahlstange mit 3 Teilen; die Rollfläche ist die obere Fläche der Schienenkopf, wo die Räder rollen.

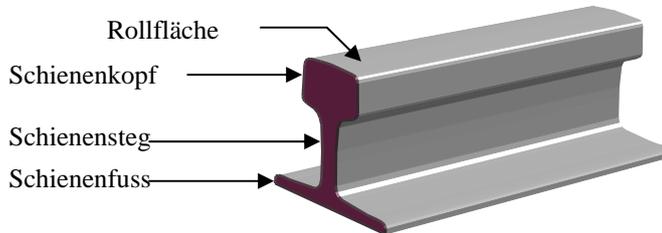


Fig. 9.2 Schienenprofil

Die Schwellen halten nicht nur eine konstante Spur $2e$, sondern ertragen auch die Längs- Quer- und Vertikalkräften. Es existiert mehrere Befestigungssysteme die ein Gleis auf der Schwelle halten. Die heutigen Klemmen erlauben kein Gleit der Schiene auf der Schwelle.

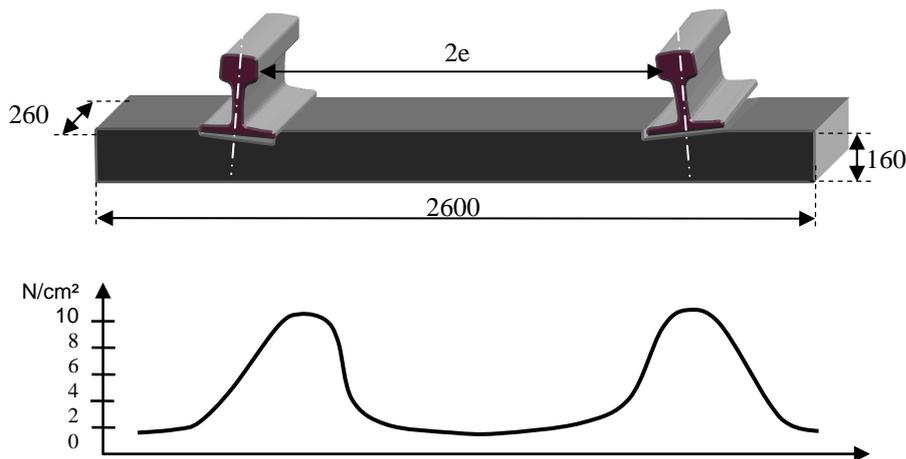


Fig. 9.6 Lastverteilung auf einer Schwelle.

Die Plattform bestimmt die Trassierung und garantiert das Fließen der Regen. Das Schotter hält die Schwellen in allen Richtungen.

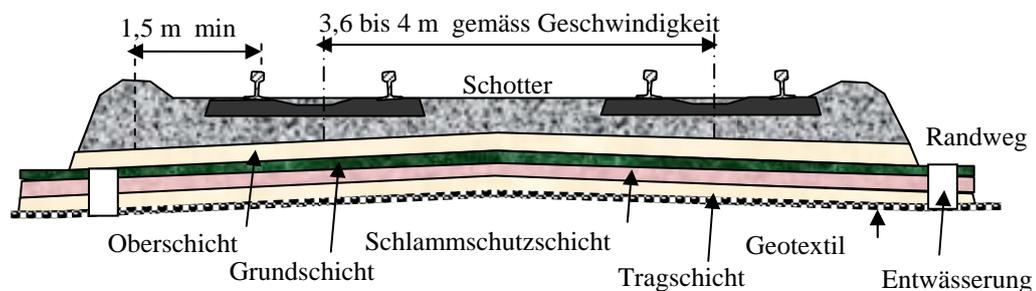


Fig. 9.10 Querschnitt der Fahrbahn.

In den Kurven erlaubt die Gleislage eine Überhöhung. Bei normaler Geschwindigkeit steht die Kraftzusammensetzung senkrecht zum Gleisplan. Die Überhöhung ist begrenzt,

sodass die Anfahrt eines Zuges kein Kippen der Wagen in der Mitte der Kurve führt. Wenn die Überhöhung ungenügend ist kann ein schneller Zug ausser der Kurve kippen. Die Kastenneigung erlaubt eine höhere Geschwindigkeit ohne Komfortreduzierung. Die Kraftzusammensetzung bleibt senkrecht zum Wagenboden. Das Entgleisungsrisiko bleibt trotzdem weit.

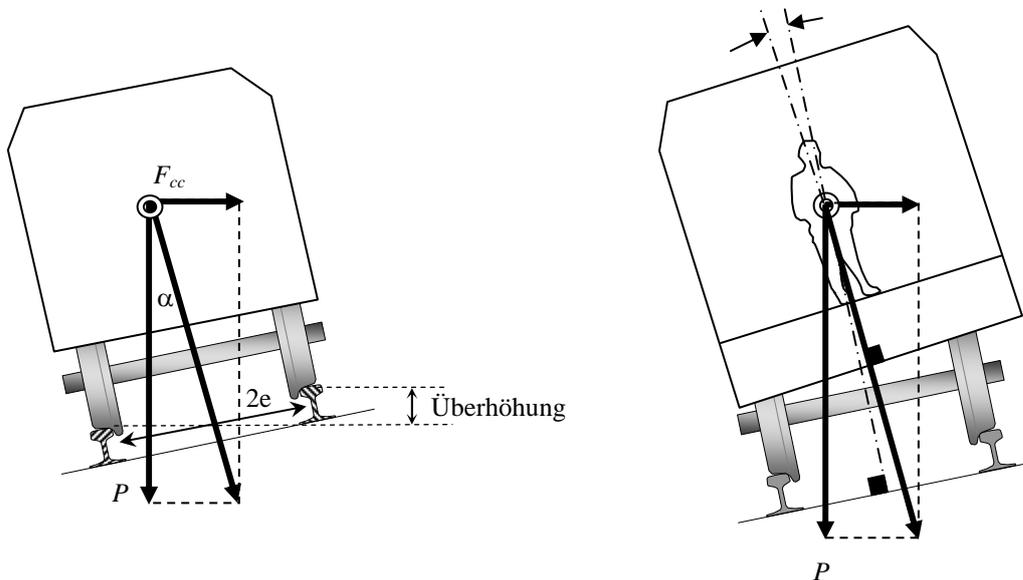


Fig. 9.16 Kurvenkraft und Überhöhung.

9.2 Fahren auf Schienen

Das Laufband der Räder und die Rollfläche der Schienen bilden ein Doppelkegel, die die Zentrierung der Achse garantiert; der Spurkranz gerührt fast nie die interne Fläche des Schienenkopf. Diese Doppelkegel ist eine Art „automatischer Differential“ die in den Kurven die Wegdifferenz der Schienen kompensiert.

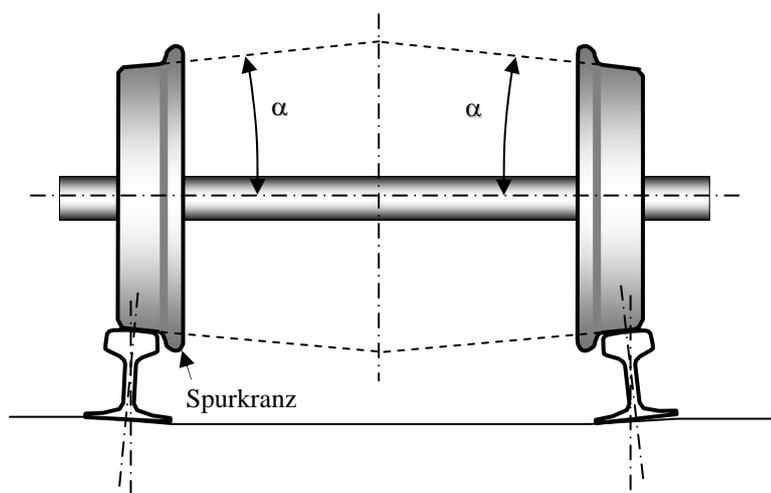


Fig. 9.24 Radprofil und Schienenlage.

Man soll die Kurvengeschwindigkeit begrenzen, um zu vermeiden dass der Spurkranz sich über der Rollfläche hebt, was eine Entgleisung führen würde. Praktisch darf die Zentrifugalkraft Y nicht 150 % des Gewicht Q überschreiten.

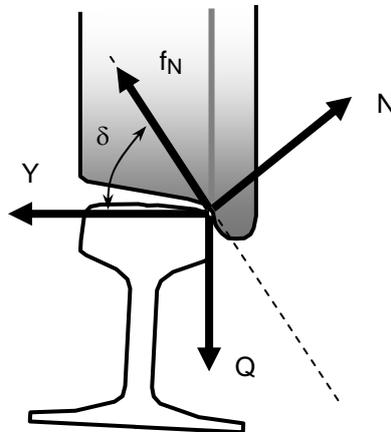


Fig. 9.30 Entgleisungskräfte.

In Prinzip sind die Achsen nicht in der Richtung der Kurvendrehpunkt orientiert. Gruppiert in Drehgestelle haben die Achsen ein Winkel mit der Kurvenradius, was das Risiko des Spurkranzklettern noch vergrößert.

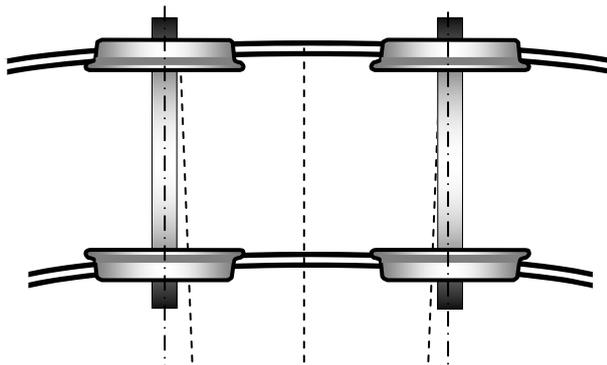


Fig. 9.31 Drehgestell in einer Kurve.

Man kann noch die Prud'homme-Grenze benennen, wo das Schotter die Zentrifugalkraft Y auf der Schwellen nicht mehr halten kann.

Die Radabnutzung stört die gute Fahrt des Fahrzeuges, so in einer Kurve das in einem geraden Streckenstück. Man soll dann den Profil erneuern.

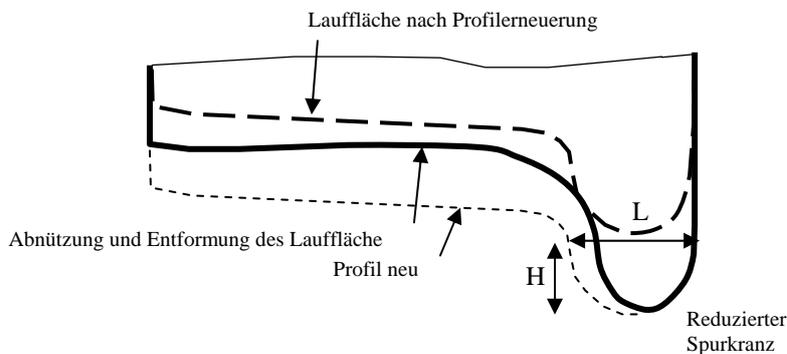


Figure 9.33 – Radabnutzung

9.3 Weiche

Ein System mit Radsätze, mit Spurkranzräder, auf Eisschienen hat als Folge dass die Richtungsänderung komplex ist. Die Hauptkomponenten sind bewegliche Zungen die die Spurkranze in der guten Richtung führen. Es gibt Herzstücklücken unter der Rollfläche des Rads wo die Spurkranz im anderen Weg rollt. Das Rad « fällt » in der Lücke und klopft nachher die Schiene oder den Herzstückspitze.

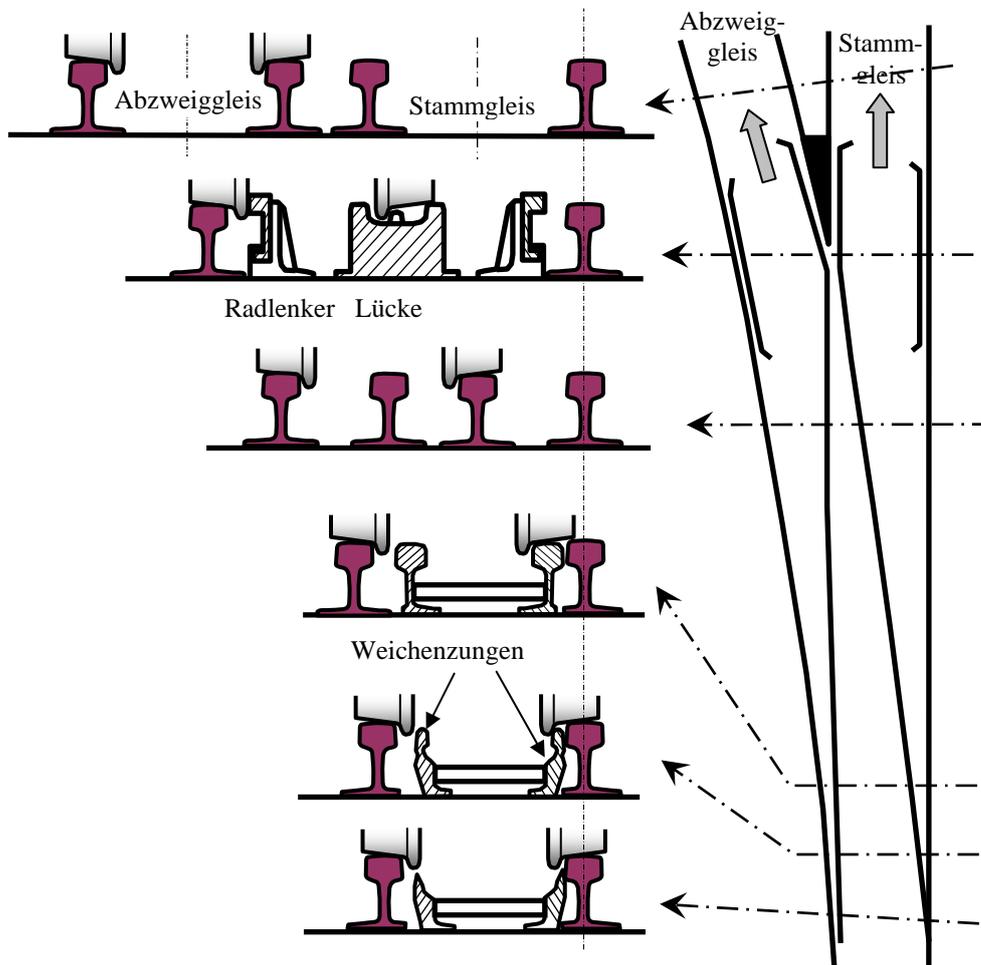


Fig. 9.37 Kinematik auf einer Weiche. " "

9.4 Spezielle Gleise

Wie auf der Sektion 5.9 erklärt, kann man die Zugkraft mit einem Zahnrad auf einer Zahnstange übermitteln. Ausser einer Ausnahme (Santos-Jundiai) ist die Zahnstange so hoch gelegt dass das Zahnrad problemlos über die Gleisen auf einer Weiche fährt.

9.5 Behrührunglose Gleise

Diese Führungssysteme sind extrem komplex mit Magnetlevitation für « leichte » Fahrzeuge. Diese Systeme sind mit klassischer Eisenbahn nicht kompatibel

9.6 Profilen

Der Regellichtraum ist der Platz, den alle angrenzenden Bebauungen entlang von Eisenbahngleisen mindestens freilassen müssen. Man soll an die Fahrzeugdämpfung und an die Gleisunregelmässigkeiten beachten.

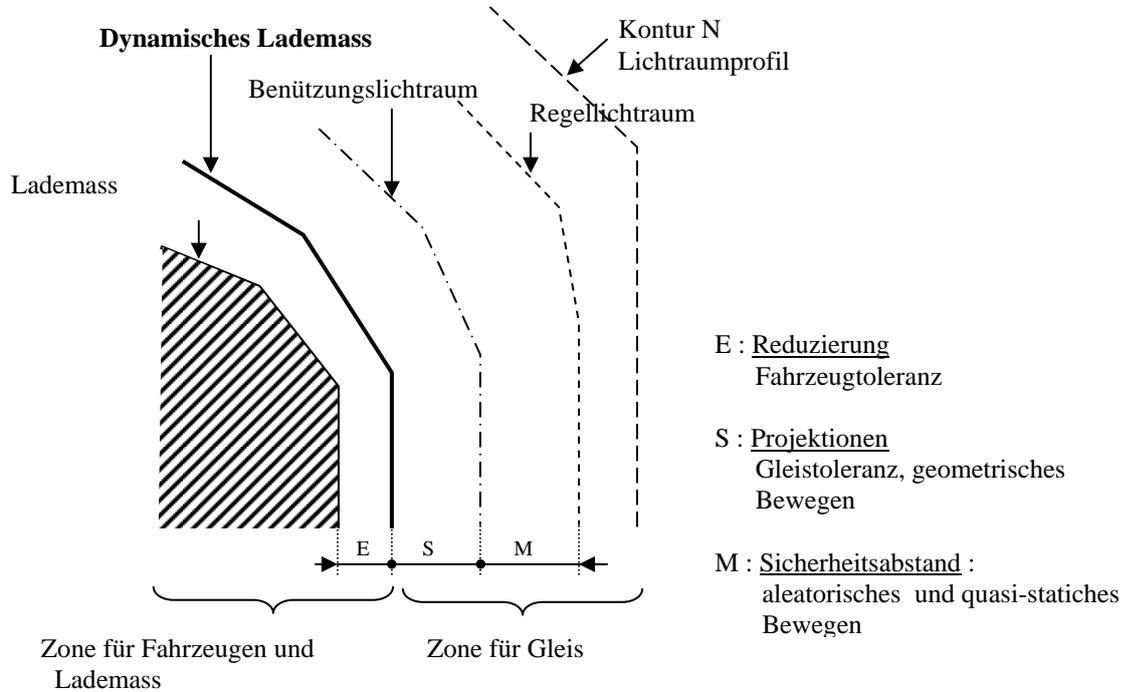


Fig. 9. 52 Sicherheitsabstand für Lichtraumprofil.

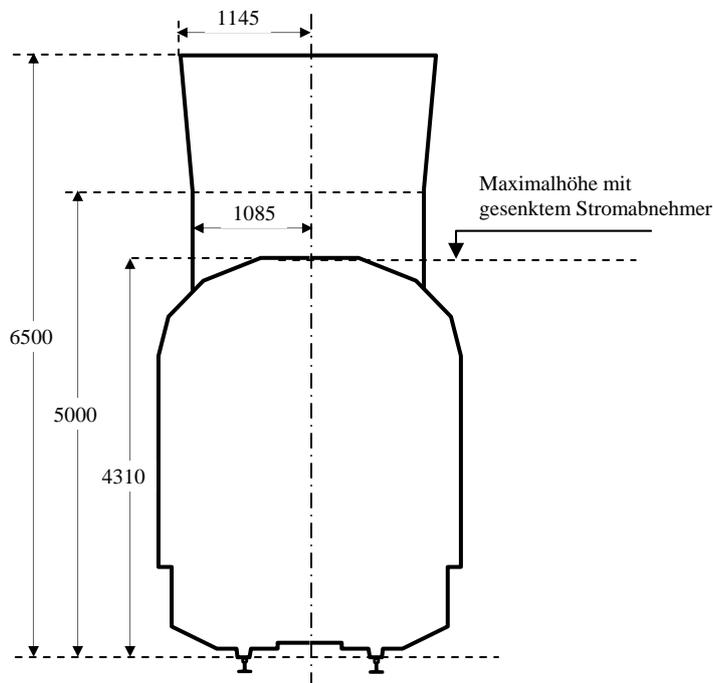


Fig. 9. 54 Beispiel : Lichtraum für elektrische Triebfahrzeugen (Oberleitung).

10.1 Dynamische Topologie

Das ganze System besteht aus einer verformbaren Schaltung zwischen Stromversorgung und Triebfahrzeug. Das Unterwerk versorgt die Energie mit Eigenschaften, die bei dem Triebfahrzeug benützt werden können. Es bekommt Energie mit anderen Eigenschaften die für den Transport aus dem Erzeugungsort angemessen sind.

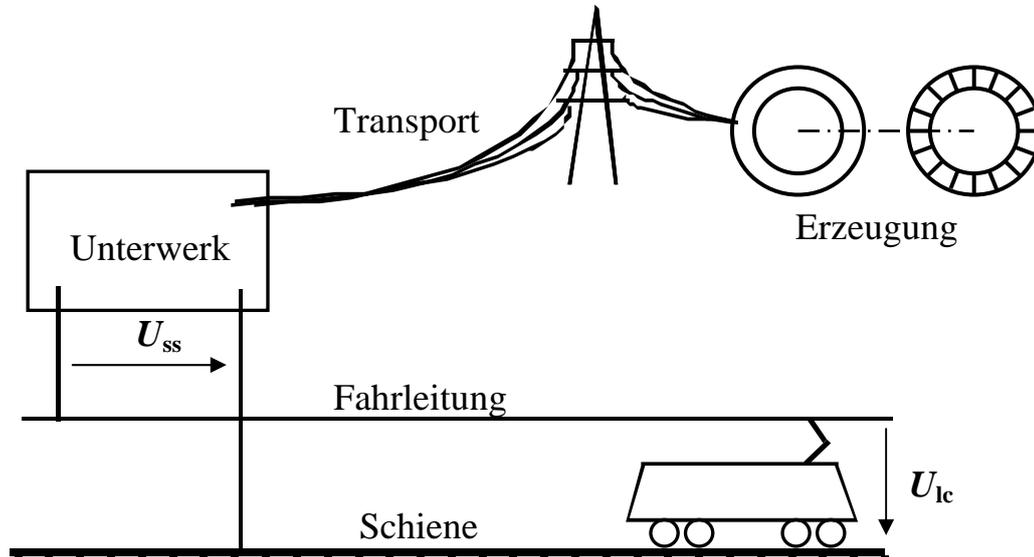


Fig. 10.3 Schematische Darstellung des elektrischen Zugförderungssystems.

10.2 Verfassung der elektrischen Schaltung

Die Traktionsschaltung besteht sich auch zwei sehr verschiedenen Stromleitern:

1. Die Fahrleitung die auf Träger isoliert ist und dessen Kenndaten schön bekannt sind.
2. Die Schienen und das Feld neben der Linie, wo der Strom mit unbestimmter Art fließt.

Man kann trotzdem ein vereinfachtes Schema skizzieren, der alle Impedanzen enthält.

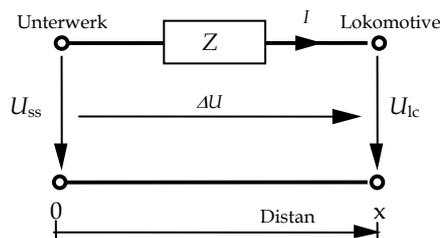


Fig 10.4 Traktionsschaltung : vereinfachter Schema.

Die Impedanz Z ist ab der Distanz abhängig; man spricht so von linearer Impedanz. Man hat einige Werten für typischen Fahrleitungen berechnet; für den Erdleiter hat man Mittelwerten gewählt. Das Gleis soll sorgfältig montiert werden: man soll die elektrische Kontinuität garantieren, sodass dem Hauptstrom durch die Scheinen fließt.

	Linear Impedanz [Ω/km]	
	Eingleisig	Zweigleisig
1,5 kV=	0,07	0,05
3 kV=	0,08	0,06
15 kV 16,7 Hz	$0,08 + j 0,13$	$0,05 + j 0,08$
25 kV 50 Hz	$0,13 + j 0,35$	$0,09 + j 0,21$

Fig. 10.10 Linear Impedanzen für typischen Linien.

Die Spannung die beim Triebfahrzeug wirklich benutzbar ist, ist die Spannung am Unterwerk minus den Spannungsabfall auf der Linie. Der Spannungsabfall hängt aus der Distanz Triebfahrzeug – Unterwerk und aus dem Strom, der beim Triebfahrzeug benützt wird. Die Linien sind nicht alle aus einem einzigen Unterwerk gespeist. Man kann auch auf beiden Enden einer Linie d aus Länge speisen, besonders in Gleichstrom.

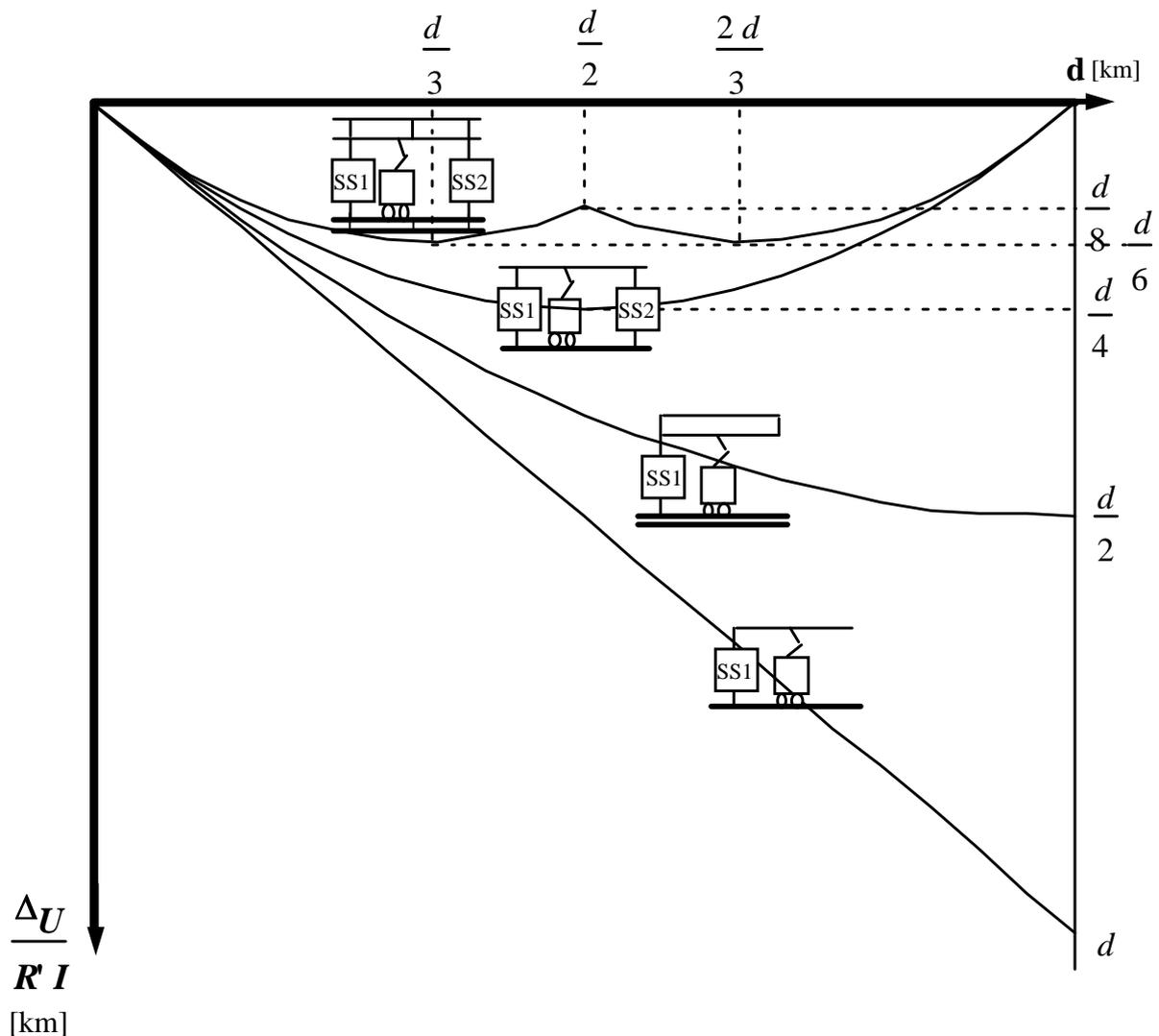


Fig. 10.17 Relativen Spannungsabfällen auf einer Linie.

10.2 Zusammensetzung

Die Unterwerke und die Fahrleitung sind mit Schützen verbunden, die verschiedenen Anordnungen der Traktionsschaltung erlauben. Für Gleichstrom hat man kein Problem zwei Unterwerken in Parallel zu schalten. Für einphasigen Wechselstrom soll man die beiden Phasen beachten bevor man eventuell die Unterwerke in Parallel schaltet.

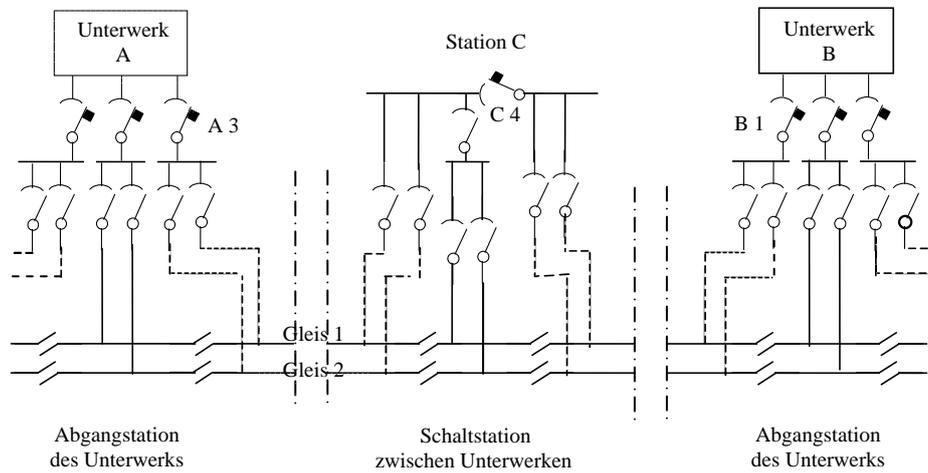


Fig. 10.46 Kupplung zwischen zwei Unterwerken.

Um die lineare Impedanz zu reduzieren benützt man oft die Doppelspannungspeisung, mit Spartransformatoren auf der Linie.

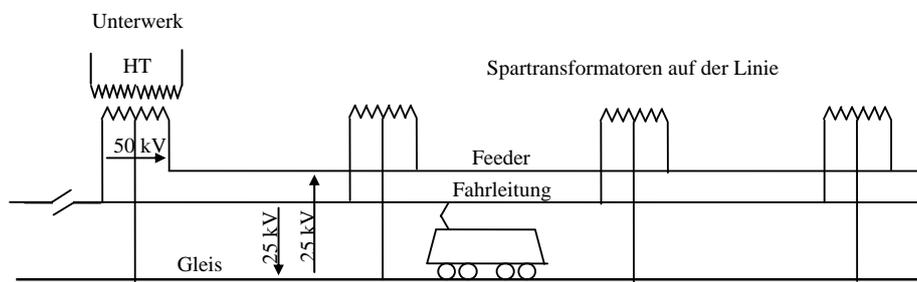


Figure 10.48 Speisung mit Doppelspannung: Beispiel für 25 kV.

	Intervalle zwischen Unterwerken [km]	Leistung pro Unterwerk [MVA]
Gleichstrom 1500 V	8 à 14	3 à 12
Einphasen 16,7 Hz 15 kV	30 à 60	10 à 30
Einphasen 50 Hz 25 kV	30 à 60	10 à 30
Einphasen 50 Hz 2 x 25 kV	40 à 90	30 à 60

Tableau 10.52 Intervalle und Leistungen der Unterwerken für verschiedenen Systemen.

Der Transformator definiert die Nennleistung des Unterwerks, er kann kürzlich überlastet werden (z.B. $200\% \cdot P_n$ während 2 Minuten). Für Gleichstrom-Unterwerk ist die Überlast noch durch den Maximalstrom des Gleichrichters begrenzt.

10.3 Anspeisung

Die Einphasen-Fahrleitungen mit industrieller Frequenz sind aus dem generellen Dreiphasen-Netz gespeist (Fig. 10.52a) bei Dreiphasen-Einphasen-Abspannstationen. Man soll die Spannungsunsymmetrie begrenzen, wenn man die Unterwerke auf dem Netz schaltet.

Die Gleichstrom-Fahrleitungen sind auch aus dem generellen Dreiphasen-Netz gespeist (Fig. 10.52c) bei Dreiphasen-Transformator und Gleichrichter. Am Anfang der elektrischen Zugförderung existierten auch Gleichstromkraftwerken die direkt die Fahrleitung anspeisen.

Die Einphasen-Fahrleitungen mit spezieller Frequenz dürfen aus Einphasen-Kraftwerken und Einphasen-Netz durch Einphasen-Unterwerke gespeist, aus dem generellen Netz und Umrichter-Unterwerke gespeist, oder durch eine Mischung beider Moden.

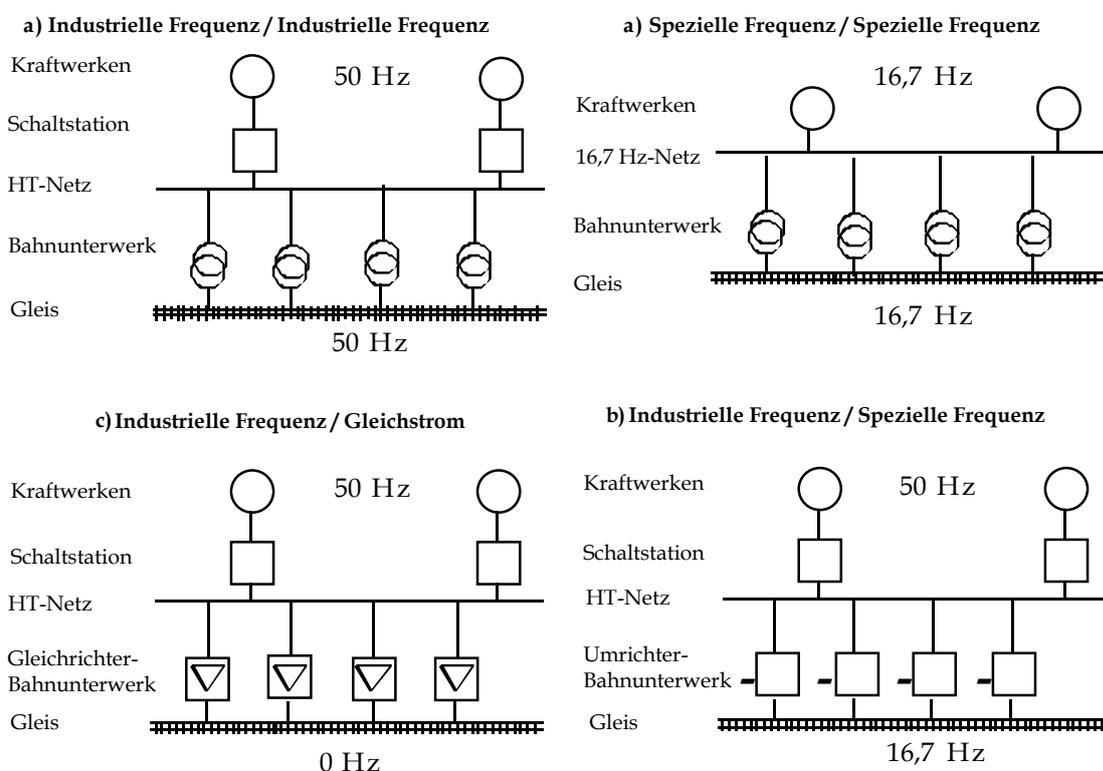


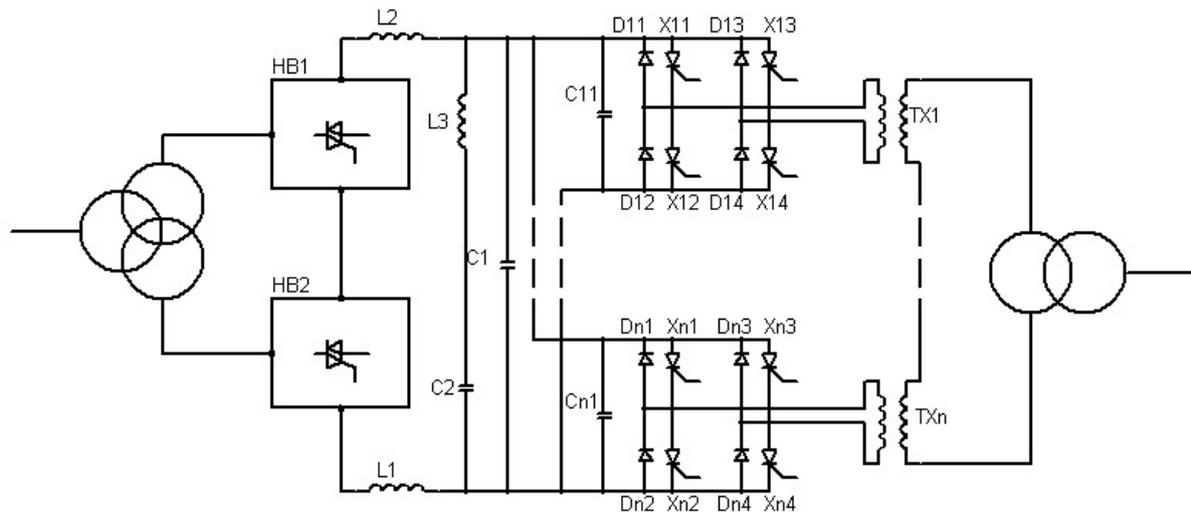
Fig. 10.53 Verschiedene Anspeisungslösungen.

Für die Frequenzwandlung hat man zuerst rotierenden Umrichter benützt: starre für Netze ohne Eigenerzeugung und weiche für Netze mit Eigenerzeugung. Man baut jetzt statischen Umrichter mit Gleichspannung-Zwischenkreis (U-Umrichter). Seite Dreiphasen und Seite Einphasen baut man mehrere Einfachumrichter in Kaskade, um ein guten Oberschwingungsgehalt zu garantieren. Die ersten Realisierung wurden mit GTO gebaut (CFF: Giubiasco) [122]. Heute nützt man gern IGCT (DB: Bremen) [123], die die Leitungsverluste um 25 % reduzieren. Die Leistung der Steuerelektronik ist 5 bis 6 Mal niedriger und die Kommutierungsdauern 6 bis 8 Mal kürzer. Diese Kommutierungsdauern sind mit IGBT vergleichbar, die mehr Leitungsverluste haben. Die Silikonstruktur eines IGCT ist mit IGBT sehr nah, man kann so Produktion optimieren.

Diese Einrichtungen dürfen die Leistung in beiden Richtungen führen.

Solche Einrichtungen sind auch zwischen den generellen 50 Hz-Netz und die Einphasen 50 Hz Fahrleitung vorgesehen [147]. Mit einem bescheidenen Überpreis am Bau hat man niedrigere Betriebskosten:

- Man hat keine Strafen am Energielieferant wegen Spannungsunsymmetrie zwischen Phasen zu bezahlen.
- Die Oberschwingungen aus Triebfahrzeugen sind bei den Filtern im Zwischenkreis vernichtet. Auch keine Strafe am Energielieferant.
- Die Blindleistung kommt aus dem Zwischenkreis. Auch keine Strafe am Energielieferant.
- Die Spannung an der Fahrleitung kann dynamisch geregelt werden: maximaler Wert wenn das Unterwerk liefert und minimaler Wert wenn es bekommt Leistung.



Dreiphasen 50 Hz Umrichter Umrichter Transfo. mit 16.7 Hz
Transformatoren Zwischenkreis in Parallel Sekundär in Serie Transfo.

Fig. 10.62 Frequenzumrichter.

Um die Gleichstrom Fahrleitung zu speisen nützt man heute weder rotierenden Maschinen noch Quecksilber-Gleichrichtern, die am Anfang der elektrische Zugsförderung zu finden waren. Man nützt Dioden-Gleichrichtern.

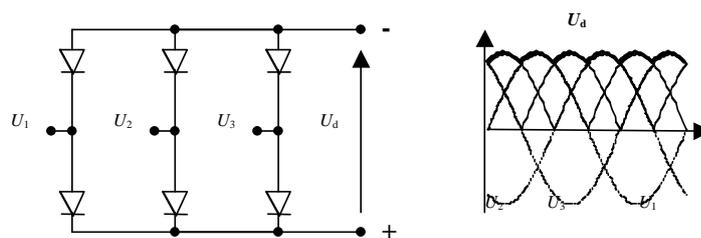


Fig.10.64 Dreiphasen-Brückengleichrichter.

Auf Einphasenwechselstrom ist die lineare Impedanz komplex (Fig. 10.10). Am Triebfahrzeug ist die Spannung nicht nur niedriger als am Unterwerk, es ist auch in Phasen geschoben (Fig.10.69a). Anstatt die Distanz zwischen Unterwerk zu reduzieren, was sehr teuer sein kann, kann man Kondensatoren in Serie mit der Fahrleitung (RhB, NSB, fig. 10.69b) oder in Parallel (SNCF, Fig. 10.69c) hinzufügen. Die Spannung an der Fahrleitung ist nicht nur höher, das Unterwerk soll auch weniger Blindleistung liefern: die Phasenunterschied φ_{ss} zwischen die Spannung U_{ss} und der gelieferter Strom I ist kleiner.

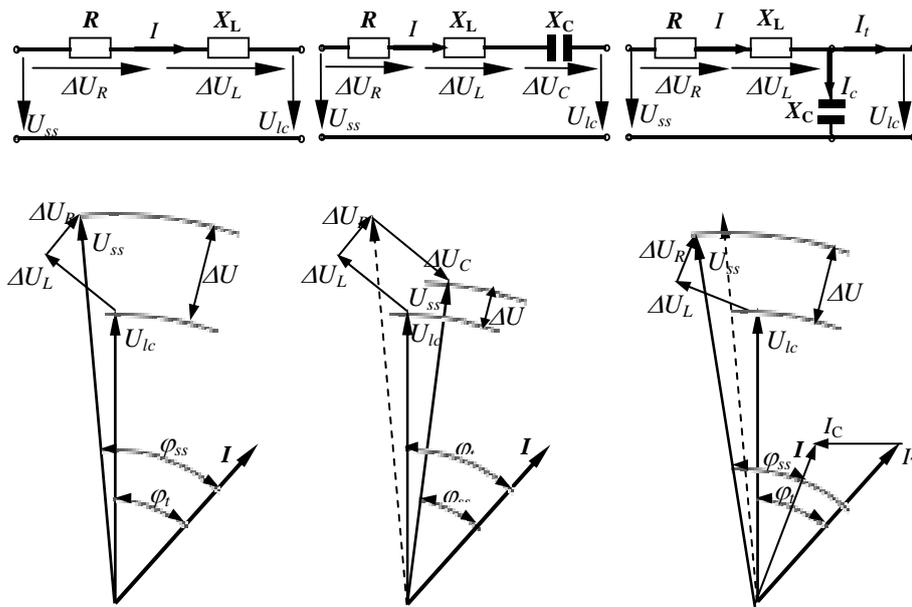


Fig. 10.69 Spannungsabfall-kompensation durch Kondensatoren.

Die passiven Komponenten sind nur auf Teilen der Linie mit einem bescheidenen Anzahl Lasten nützlich. Man installiert heute statischen Kompensatoren (SVC) die mit Kondensatoren, Induktivitäten und Halbleitern gebaut werden. Ein Software beobachtet Spannung und Strom an der Fahrleitung, es steuert die Halbleitern um die Blindleistung und Oberschwingungen zu minimieren Die Impedanz ist so in Echtzeit an der Last lokal angepasst.

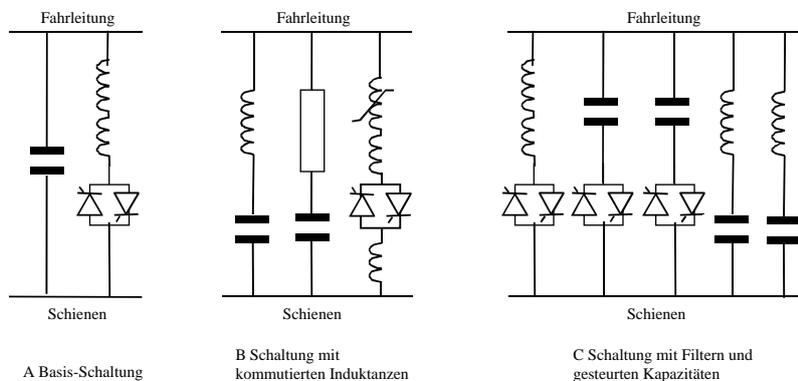


Fig. 10.71 Statische Kompensatoren für Blindleistung.

Die Gleichstrom-Unterwerke sind realen Spannungsquellen für U_0 geregelt, mit eine interne Widerstand interne R_i und für ein Nennstrom I_{ssn} . Sie dürfen momentan überlastet werden.

$$U_{ss} = U_0 - R_i \cdot I_{ss} \tag{10.75}$$

$$I_{ss2h} = 1,5 \cdot I_{ssn} \quad I_{ss1min} = 3 \cdot I_{ssn} \tag{10.76}$$

Die Einphasen-Unterwerke ohne Leistungselektronik, dürfen auch überlastet werden.

$$I_{ss15min} = 1,5 \cdot I_{ssn} \quad I_{ss5min} = 2 \cdot I_{ssn} \tag{10.77}$$

10.5 Triebfahrzeugwirkung und Beherrschung

An der Sektion 10.2 hat man die Wirkung des Stroms auf dem Spannungswert an der Fahrleitung beobachtet. Nach der Richtlinien der UIC, die Fahrleitungsspannung darf zwischen -30% bis $+20\%$ um dem Nennwert variieren.

In modernen Triebfahrzeugen sind diesen Werten in der Computersteuerung integriert. Das Programm stoppt den Stromverbrauch wenn die Spannung zu schwach ist, und die Stromerzeugung wenn si zu hoch ist. Das erlaubte Intervall ist so respektiert. Um der Nennwert an der Fahrleitung ist die Maximalleistung erlaubt und die bei dem Fahrpersonal gefragte Leistung ist am der Einrichtung geliefert.

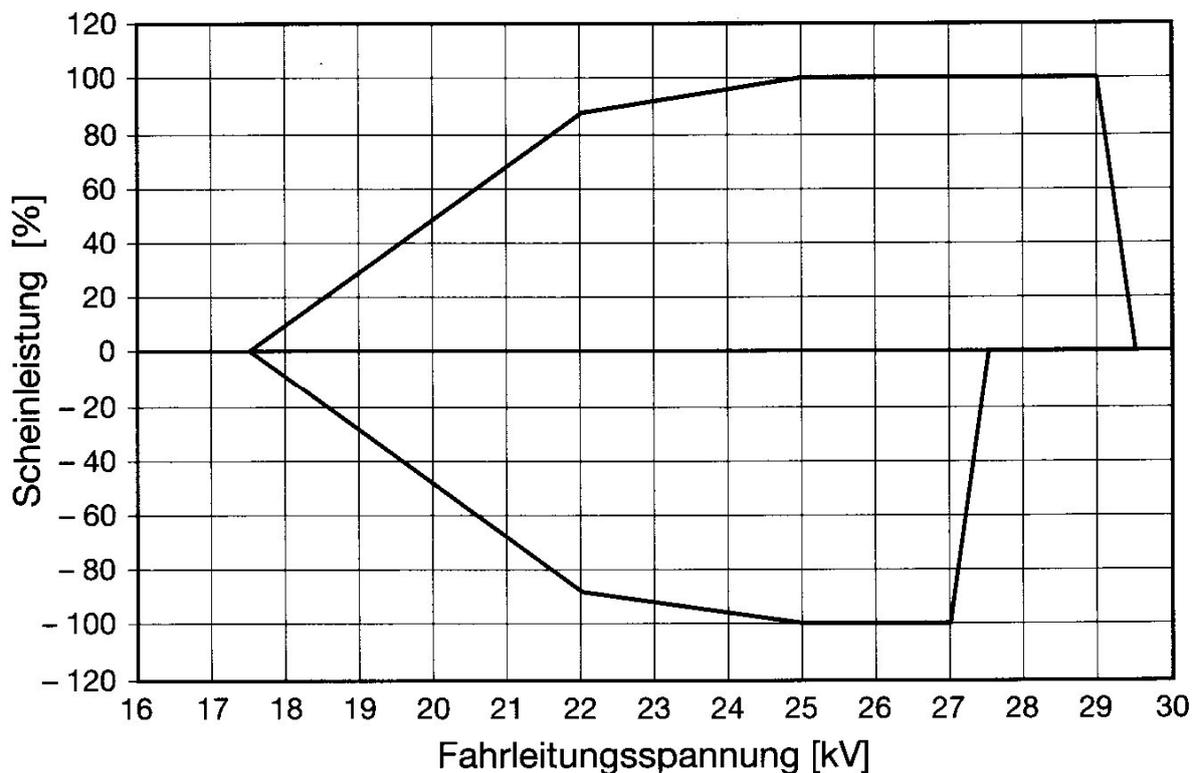


Fig. 10.83 Leistungsbegrenzung in Abhängigkeit der Fahrleitungsspannung: Beispiel für 25 kV.

Das Bild 10.83 schaut ein Beispiel, der nur als Prinzip zu behalten ist. Die Kennlinie hängt aus den Netzparametern ab. Die Begrenzung soll eine Funktion ohne Diskontinuität sein. Das Prinzip kann man auch ohne weiteres für Gleichstromfahrzeuge benutzen. Mit dieser Massnahme ist man sicher dass die Leistung für Hilfsbetriebe (Kap. 6) immer genügend bleibt, ausser bei Totalabwesenheit der Spannung.

Bei Einphasenwechselstrom kann man auch auf dem Leistungsfaktor wirken, um die Spannung zu regeln. Um den Nennwert der Fahrleitungsspannung steuert die Elektronik ein Leistungsfaktor an 1, oder die Blindleistung an 0%. Man kann die Blindleistung nur mit modernen Pulsationsstromrichtern regeln.

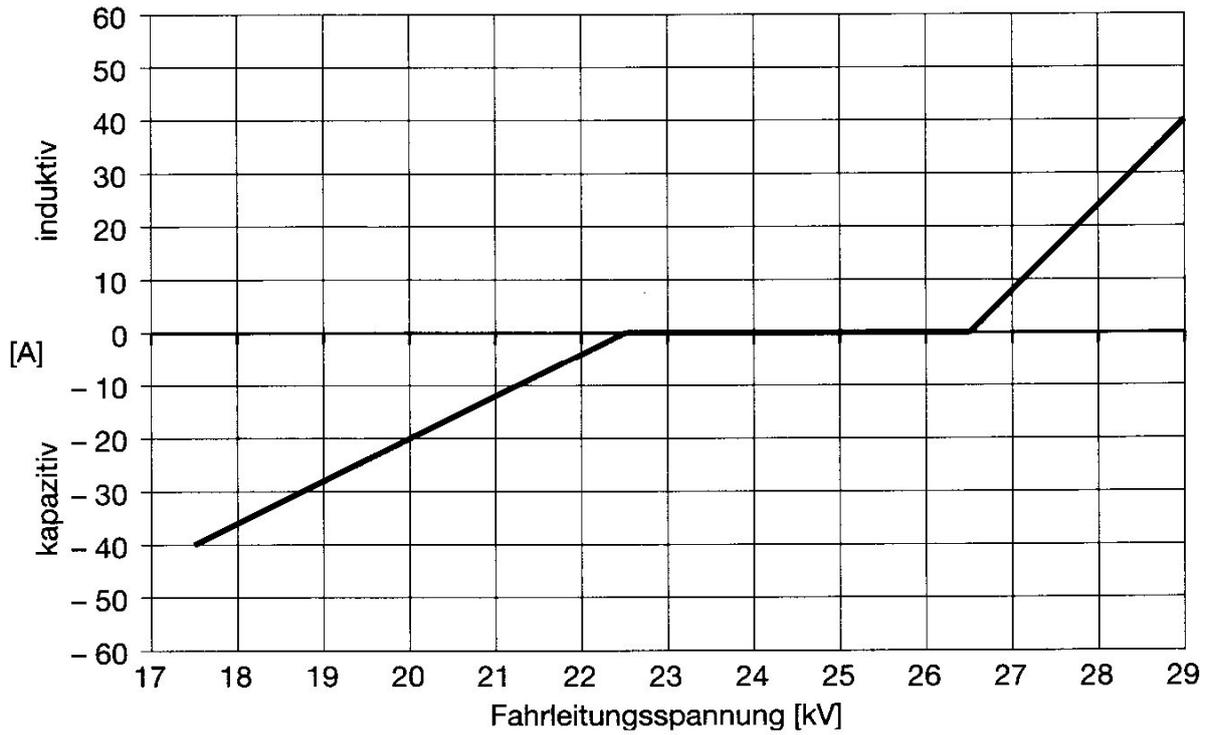


Fig 10.84 Blindleistungsteuerung in Abhängigkeit der Fahrleitungsspannung: Beispiel für 25 kV, mit Blindstrom.

11.1 Generell

Die Stromversorgung an einer Eisenbahnlinie nützt zwei Stromleiter für Gleichstrom oder Einphasen-Wechselstrom¹ (Sekt. 10.2). Ein Leiter besteht aus beiden Gleisschienen; der andere, isoliert, kann:

- eine Oberleitung sein;
- eine Stromschiene am Boden befestigt (nicht ferner beschreibt) sein.

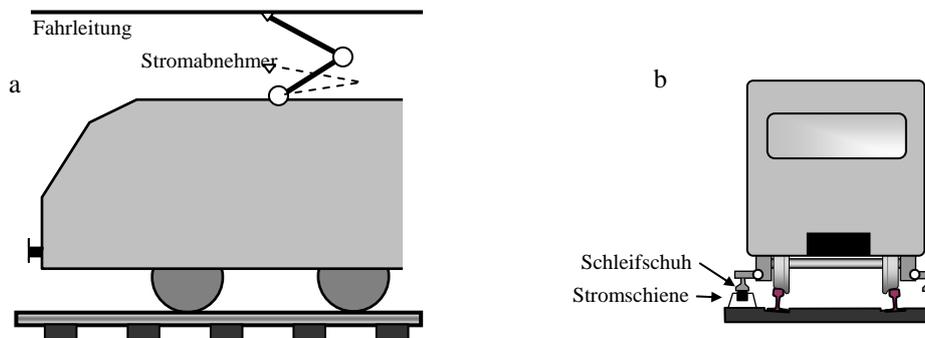


Fig. 11.1 Stromabnahme an der Oberleitung und am Boden.

11.2 Dynamik

Die Oberleitung besteht aus einem Kupferleiter, der zwischen Isolatoren gespannt wird. Die Isolatoren werden durch Masten getragen.

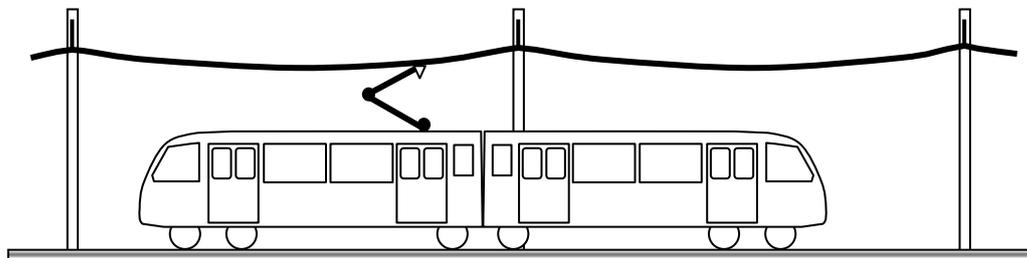


Fig. 11.3 Oberleitung

Oberhalb einer Geschwindigkeit, 60 km/h ungefähr, braucht die Stromabnahmequalität eine Höhe H so konstant als möglich für den Fahrdrat. Man soll den natürlichen Durchhang der Fahrleitungskette soviel als möglich vernichten. Es gibt 3 Lösungen:

- Man kann die Träger multiplizieren bis den Pfeil vernachlässigbar wird. Diese Lösung ist ökonomisch und visuell ungünstig!
- Man kann das Querschnitt des Fahrdrat vergrößern, sodass den Pfeil vernachlässigbar wird. In einigen Sonderfällen mit engem Lichtraumprofil – zum Beispiel in Tunnel – ist diese Lösung benützt: die *Stromschieneoberleitung*.

¹ Drei Leiter sind nötig für Dreiphasen-Wechselstrom, wie in Italien bis 1960 Jahren.

- Man kann Zwischenträger hinzufügen – die Hänger – die zwischen den Fahrdrähten und den Tragseilen gebaut werden. Dieser Bauart ist sehr weit als Kettenfahrleitung benützt, es ist am Bild 12.4 dargestellt.

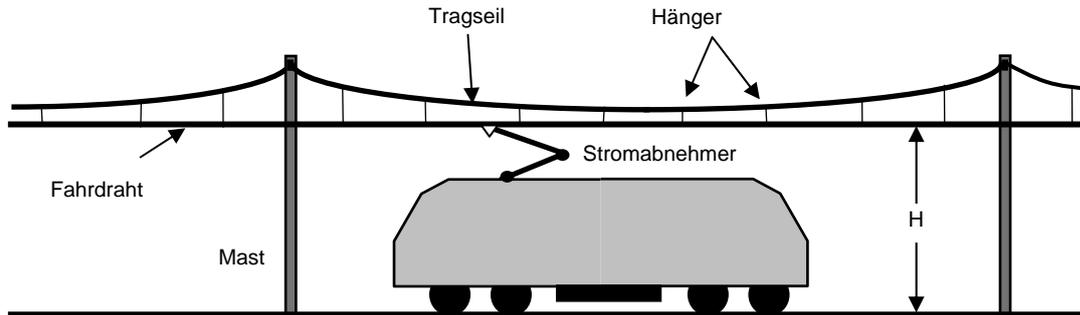


Fig. 11.4 – Prinzip der Kettenfahrleitung.

11.3 Ein Paar: Fahrleitung – Stromabnehmer

Man muss die Qualität der Stromabnahme garantieren und die Betriebsdauer des Fahrdrahts und der Schleifleiste. Um diese beiden Zwecke zu erreichen sollen die Fahrleitung und der Stromabnehmer gut zusammen angepasst werden. Der Stromabnehmer soll mit Kraft auf dem Fahrdraht drücken um ohne Unterbruch in Kontakt bleiben. Er soll den Fahrdraht nicht zu viel heben: der Kontakt wurde nach jedem Stützpunkt verloren.

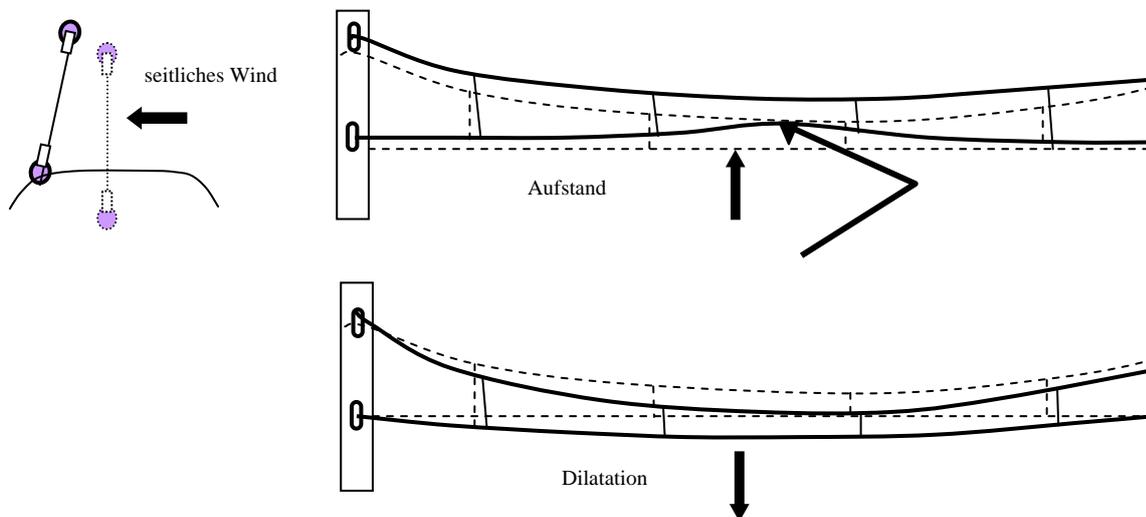


Fig. 11.5 Faktoren die die Fahrdrähtendynamik beeinflussen.

11.4 Technologie

Der kreisförmige Querschnitt des Fahrdrahts hat zwei Rillen für die Hängezange (Fig 11.9). Gemäss der Spannungsversorgung und der Leistungen kann der Querschnitt zwischen 107 mm² und 150 mm² ändern. Der Fahrdraht ist aus Kaltziehen erhalten, der Querschnitt kann kreisförmig sein oder eine flache Stelle enthalten, um die Kontaktfläche zwischen Fahrdraht und Schleifleiste zu vergrössern.

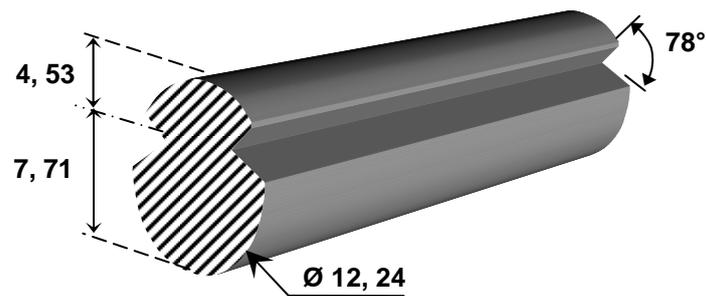


Fig. 11.9 Fahrdraht : Beispiel.

Das Tragseil soll die mechanischen Kräfte gut ertragen, er ist an den Masten befestigt. Das Tragseil und der Fahrdraht sind in Parallel verbunden, um die elektrische Widerstand niedrig zu behalten: die Verbindung ist bei den Hänger oder bei Kupferschund realisiert. Die Kettenfahrleitung ist durch einen äquivalenten Kupferquerschnitt (in mm²) dargestellt. Die verschiedenen Elektrifizierungssysteme benützen spezifische Bauarten, gemäss den transportierten Strömen.

Fahrleitung	Tragseil	Fahrdraht	äquivalentes Kupferquerschnitt	Masse pro Meter
« tramway » 		hartes Kupfer 107 mm ²	107 mm ²	1,52 kg
1500 V compound 	<u>Hauptseil</u> : Bronze - Sn 116 mm ² <u>Hilfseil</u> : 143 mm ²	hartes Kupfer 2 × 150 mm ²	480 mm ²	5,309 kg
3000 V eifach 	Kupfer 120 mm ²	hartes Kupfer 2 × 100 mm ²	320 mm ²	2,85 kg
15 kV 	Stahl- Kupfer 92 mm ²	Kupfer 1 × 107 mm ²	189 mm ²	1,85 kg
25 kV 	Al + Stahl 36 mm ²	Cu – Mg (ou Sn) 1 × 150 mm ²	147 mm ²	1,334 kg

Tableau 11.12 – Hauptdaten für einigen Fahrleitungen.

Im Plan soll die Fahrleitung ein Zik-zak präsentieren, links und rechts der Gleisachse. Den Kontaktpunkt zwischen den Fahrdraht und die Wippe ändert so wenn das Triebfahrzeug rollt. Sonst würde die Schleifleiste schnell gesägt!

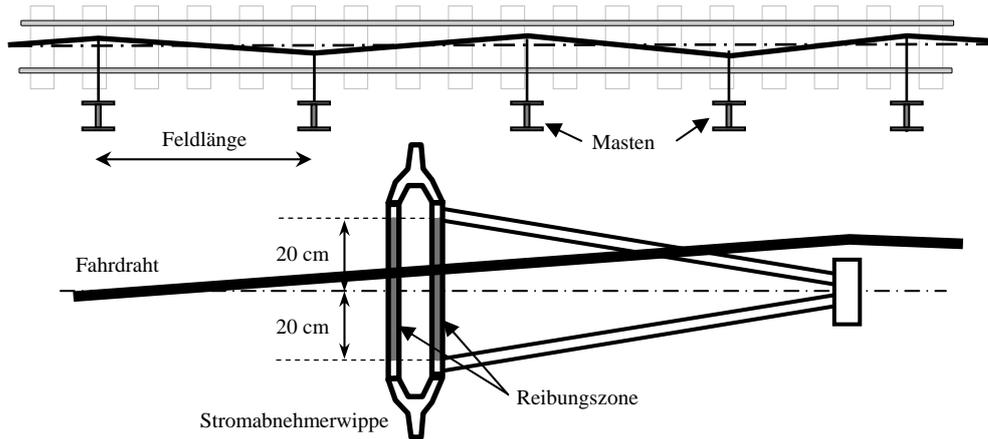
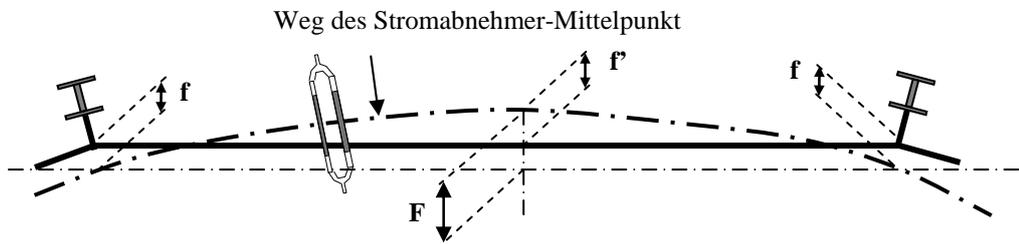


Fig. 11.14 Die periodische seitliche Bewegung auf einer geraden Linie.

In einer Kurve soll man die Regel-Feldlänge an der Wippenbreite anpassen.



F : Kurvendurchhang in der Mitte der Feldlänge $a = a^2/8r_v$

f : Achsenverschiebung beim Mast

f' : Achsenverschiebung in der Mitte der Feldlänge

Fig.11.15 Achsenverschiebungen in einer Kurve.

11.5 Stromabnehmer

Heute werden leichten Stromabnehmer benützt.

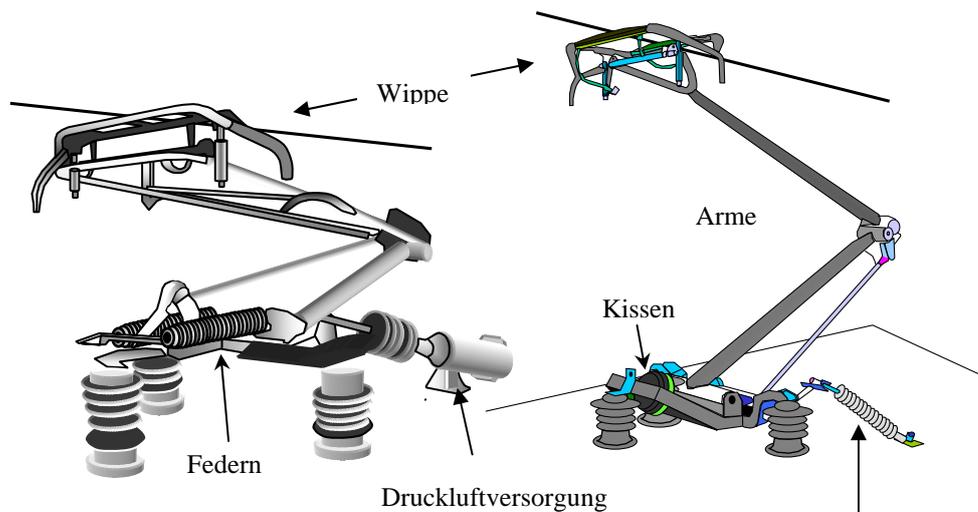


Fig. 11.28 – Zwei Stromabnehmerbeispiele

12.1 Sicherheitsanlagen

12.1.1 Gründen

Wenn mehr als ein Zug auf einem Netz fährt soll man Bestimmungen beschliessen, um Fahrkonflikte zu vermeiden und Unfallrisiko zu reduzieren. Der erste Schritt war mit Sichtsignalen, die am Führpersonal zeigte ob eine Weiterfahrt erlaubt war, oder nicht. Das Zugpersonal sollte die Befehle strikt einhalten und Bahnhofpersonal sollte das richtige Bild am Signal geben: Prinzip des *Kantonnement*. [144, 152 - 155]. Die Signale dürfen keine Mehrdeutigkeit erlauben. Sie wurden zuerst mit beweglichen Komponenten gebaut, später mit Lichtern.

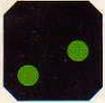
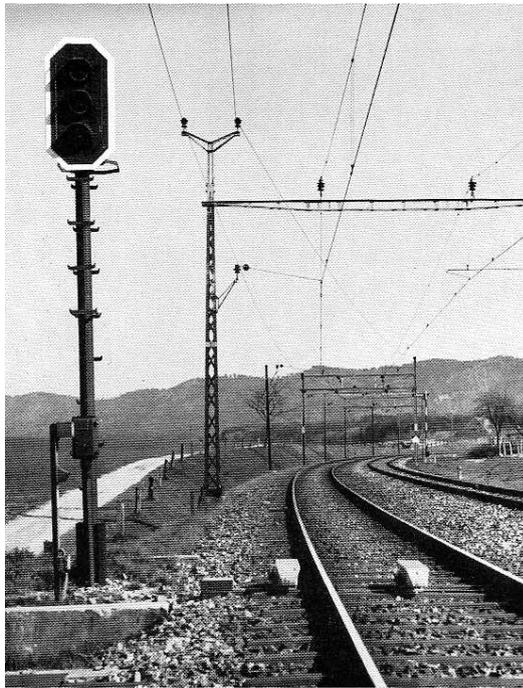
Vor-signal	Haupt-signal	Image	Sinn :
		—	Halt vor dem Hauptsignal
		1	Freie Fahrt nach Dienstfahrplan.
		2	Geschwindigkeits-Ankündigung an 40 km/h.
		3	Geschwindigkeits-Ankündigung an 60 km/h.
		5	Geschwindigkeits-Ankündigung an 90 km/h.
		6	Geschwindigkeits-Ankündigung an 40 km/h: - ab dem nächsten Signal - ab der nächsten Weiche

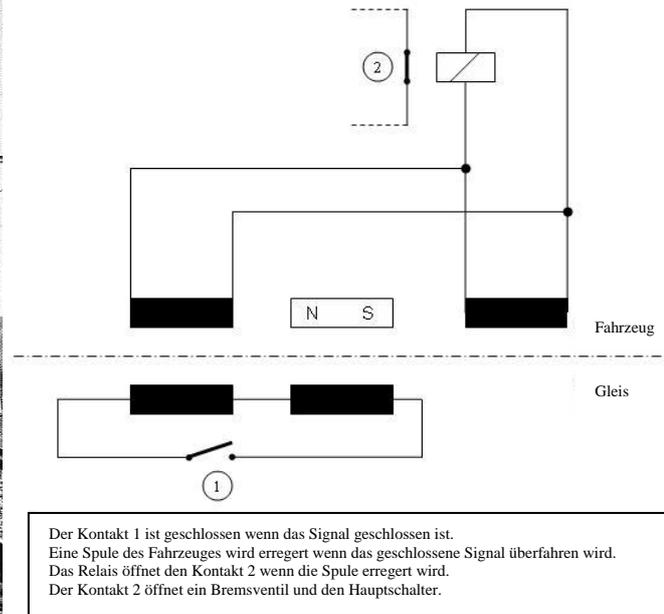
Fig. 12.1 – Beispiel aus Lichtsignale : Schweiz um 1970.

12.1.2 Grundentwicklung

Unfälle mit Menschlichen Fehler führten ein zweiten Schritt: ein Bodengerät ist mit dem Signal verbunden, es führt ein Nothalt am Zug wenn ein geschlossenes Signal nicht beobachtet wird. Die Hauptleitung der Bremse ist geöffnet was ein e Schnellbremsung auf dem ganzen Zug führt und das Hauptschalter ist auch geöffnet was die Zugkraft stoppt. Gegen der Fehler des Bahnhofpersonal hat man den *Blocksystem* eingeführt: wenn ein Gleisteil schon mit einem Zug besetzt wird darf man kein neues Einfahrt erlauben. Meisten aus Eisenbahngesellschaften sind an diesem Schritt am Anfang des 21. Jahrhunderts. Die Funktionen sind überall fast gleich, mit verschiedenen Komponenten die miteinander nicht kompatibel sind.



A Gleisgerät.



B Funktionsprinzip

Fig. 12.2 – Beispiel einer Signalüberwachung : *Signum*.

Die Systeme sind nicht absolut sicher: zum Beispiel ist der Weg nicht genügend für eine Notbremse zwischen den Signal und den gefährlichen Punkt. Diesen Punktgeräte nutzen zwei Mitteln: entweder Kontakte oder Induktion (wie auf Bild 12.2). Mit den grösseren Geschwindigkeiten wird die Sichtdistanz des Signals nicht für einen Bremsweg genügend; man hat Vorsignale eingeführt. In besondere Fälle hat man zwei Stufen aus Vorsignalen eingeführt. Mit noch grösseren Geschwindigkeiten hat man ein Wiederholung im Fahrpult eingeführt, um genügend Zeit für die Signalbeobachtung erlauben.

12.1.3 Letzten Entwicklungen

Mit der Verkehrserhöhung und die Sicherheitslücken in Systeme haben ein nächsten Schritt an der Ende des XX. Jahrhunderts: ein codierter Telegramme ist punktuell aus dem Bodengerät an dem Triebfahrzeug geschickt. Der Telegramminhalt ist mit dem Signalbild bestimmt, am Anfang des neues Gleisabschnitt. Der Bordrechner berechnet das Bremsgrenzprofil aus den Zugparametern, die vor dem Fahrt durch Lokführer eingeführt wurden, und aus den Telegrammdate: die Distanz bis Haltepunkt oder Geschwindigkeitbegrenzung, die Linienneigung. Dieser System überwacht auch dei erlaubte Geschwindigkeit. An jedes Signal bekommt der Rechner ein neues Telegramm mit aktualisierten Daten.

L'ordinateur ne provoque un arrêt d'urgence que si le profil limite est franchi. On garantit ainsi que le train sera arrêté – manuellement ou par l'ordinateur – avant un signal fermé ou n'abordera pas à vitesse excessive un tronçon autorisé à faible vitesse. Ici aussi, on peut observer plusieurs systèmes analogues qui font appel à des solutions techniques différentes, mais incompatibles entre elles, pour assurer la transmission sol–train (KVB, ZUB, ...) [117, 118].

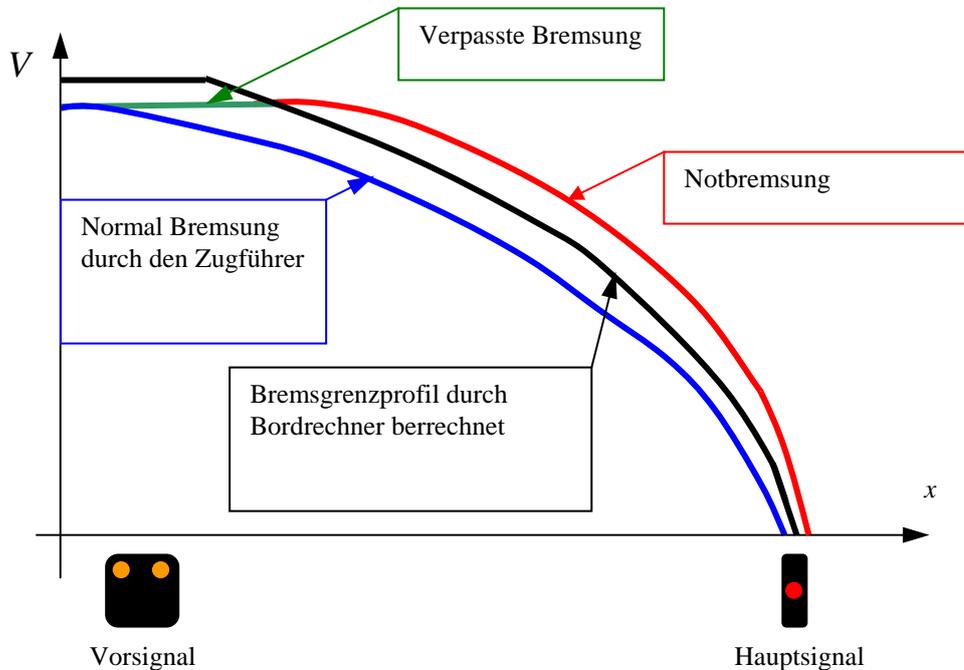


Fig. 12.3 – Reale und berechnete Geschwindigkeitsprofil.

Ein viertes Schritt ist im Gang: eine europäische Standardisierung der Boden-Zug-Übertragung (Wellentyp und Kommunikationsprotokoll) mit einer Funktionalitätserweiterung auf den ganzen Fahrt, oder bald eine vollautomatische Fahrt (ETCS : *European Train Control System*) [119, 120]. Einige Linien sind schon im Dienst, für Güterverkehr, Personenverkehr oder gemischten Verkehr. Man kann die seitlichen Signale verlassen weil alle Daten in der Fuhrkabine erhältlich sind. Mit einem solchen System sollen die Streckenabschnitte nicht unbedingt fest mit dem Boden verbunden werden. Man kommt zum *gleitenden Kantonement*. Der Boden-Zug-Übertragung soll hoch zuverlässig sein und die Zügenlagen sollen bei der Verkehrsführung gut bekannt werden.

Für die Geschwindigkeit sind die Geber an der Radsatzwelle genügend, aber nicht für die Wegberechnung: mit einer falschen Lageberechnung kann ein Zug beim System gestoppt werden obwohl es kein Risiko gibt. Die Lageberechnung soll von Zeit zu Zeit aus einem Bodentelegramm korrigiert werden oder bei Satellitensystem überwacht (GPS, Galileo).

12.1.4 Interoperabilität

Man hofft Lokomotiven über die Bahngesellschaftsgrenzen zu benutzen, um Triebfahrzeugtausch zu sparen. Elektrisch und mechanisch konnte ein Güterzug aus Gdansk bis Barcelona durch Polen, Deutschland, Schweiz, Frankreich und Nordspanien mit einem einzigen Vierstrom-Triebfahrzeug reisen. Der Platz ist leider viel begrenzt um alle Empfänger zu installieren. Und die Geräte dürfen sich nicht miteinander stören. Solange ein Korridorstrasse voll mit ECTS ausgerüstet wird ist ein solcher Zug noch Utopie.

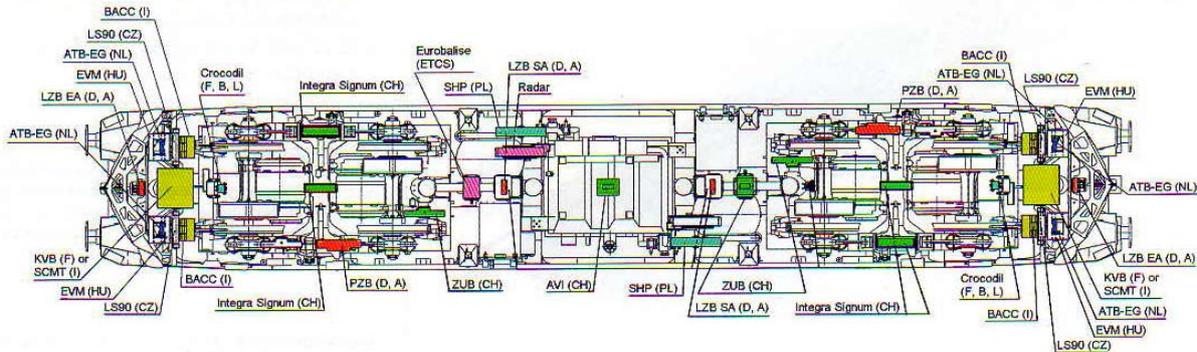


Fig. 12.4 – Sicherheitsgeräte unter einer Vierachslokomotive.