

# **Elektrische Bahnen**

## **1 Einführung**

- 1.1 Konkurrenz der Verkehrssysteme
- 1.2 Meilensteine der elektrischen Traktion
- 1.3 Anwendungsgebiete
- 1.4 Globaler Überblick
- 1.5 Technologische Perspektiven
- 1.6 Technik der Spurführung

## **2 Systementscheid und Ortsfeste Anlagen**

- 2.1 Energiebedarf
- 2.2 Systemwahl
- 2.3 Energieerzeugung und Energieumformung
- 2.4 Energieverteilung
- 2.5 Fahrleitungen

## **3 Triebfahrzeuge**

- 3.1 Entwurfskriterien
- 3.2 Zugkraft und Leistung
- 3.3 Rad/Schiene Verhalten
- 3.4 Elektrische Auslegung
- 3.5 Mehrsystemfahrzeuge
- 3.6 Dieselelektrische Fahrzeuge
- 3.7 Leittechnik

## **4 Bordnetzversorgung**

- 4.1 Hilfsbetriebe
- 4.2 Komforteinrichtungen

## **5 Interaktionen Netz - Fahrzeug**

- 5.1 Netzrückwirkungen
- 5.2 Psophometrische Störströme

## **6 Magnetschweben**

- 6.1 Systeme
- 6.2 Stationäre Einrichtungen
- 6.3 Fahrzeuge

# Literaturverzeichnis Elektrische Bahnen

## Fachbücher

**Filipovic, Z.** Elektrische Bahnen. Grundlagen, Triebfahrzeuge, Stromversorgung  
Springer-Verlag 2. Aufl. 1995 ISBN 3-5405-93543

**Steimel, A.** Elektrische Triebfahrzeuge und ihre Energieversorgung  
Oldenbourg Industrieverlag 2. Aufl. 2003 ISBN 3-486-27045-1

**Kießling, F.; Puschmann, R.; Schmieder, A.** Fahrleitungen elektrischer Bahnen  
Teubner Verlag 2. Aufl. 1998 ISBN 3-519-16177-X

**Feihl, J.** Die Diesellokomotive. Aufbau, Technik und Auslegung  
Transpress Verlag 1997 ISBN 3-6137-10609

**Baur, K. G.** Taurus Lokomotiven für Europa  
EK Verlag GmbH ISBN 3-88255-182-8

**Gralla, D.** Eisenbahnbremstechnik  
Werner Verlag 1999 ISBN 3-8041-1813-5

## Fachzeitschriften

**ETR Eisenbahntechnische Rundschau** Fachzeitschrift für die gesamte Bahntechnik  
Hestra-Verlag ISSN 0013-2845

**Eisenbahn-Revue International** Fachzeitschrift mit Schwerpunkt Fahrzeuge  
Minirex AG SCHWEIZ ISSN 1421-2811

**Eb Elektrische Bahnen** Fachzeitschrift für Elektrotechnik im Verkehrswesen  
Oldenbourg Industrieverlag ISSN 0013-5437

**Eisenbahn Kurier Vorbild und Modell** Fachzeitschrift mit Schwerpunkt Fahrzeuge  
EK Verlag GmbH ISSN 0170-5288

**Signal+Draht Rail Signalling + Telecommunication** Fachzeitschrift für Betriebleittechnik  
Hestra-Verlag ISSN 0037-4997

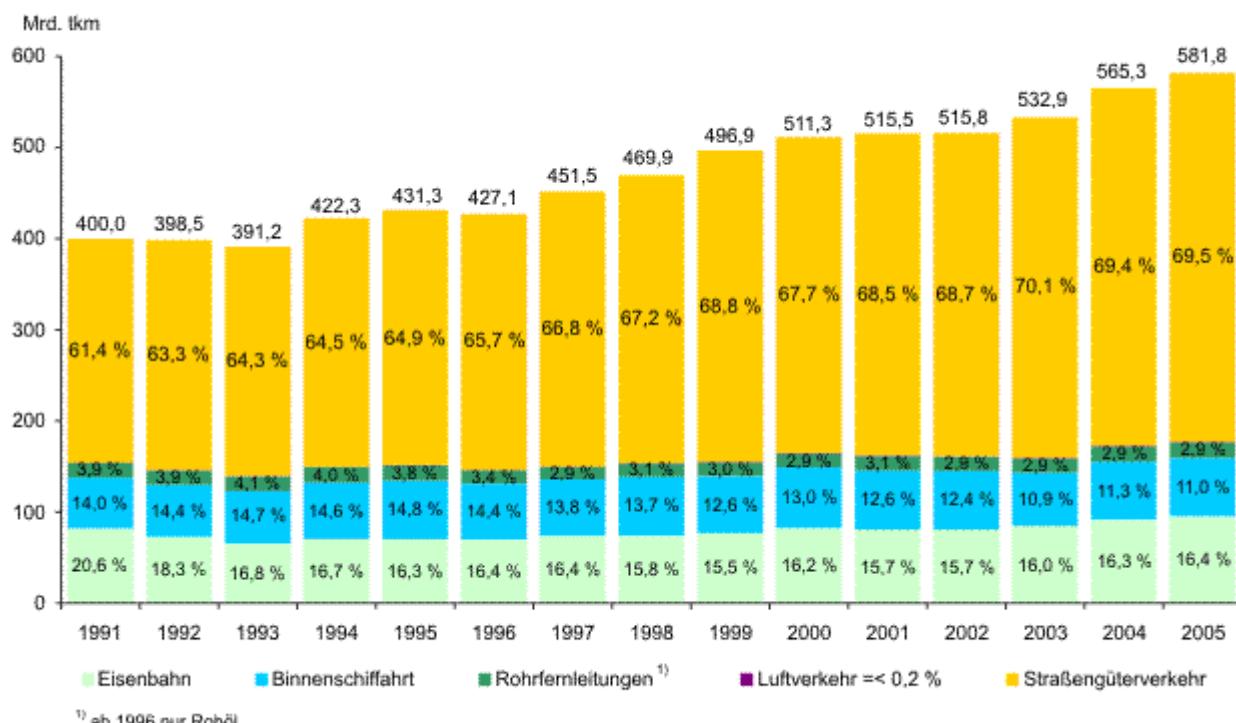
**ZEV+DET Glasers Annalen** Die Eisenbahntechnik  
Georg Siemens Verlagsbuchhandlung

## Internet Links

<http://www.elektrolok.de/>  
<http://www.hochgeschwindigkeitszuege.com/index.htm>  
<http://www.urbanrail.net/eu/euromet.htm>  
<http://www.bahnonline.ch/>

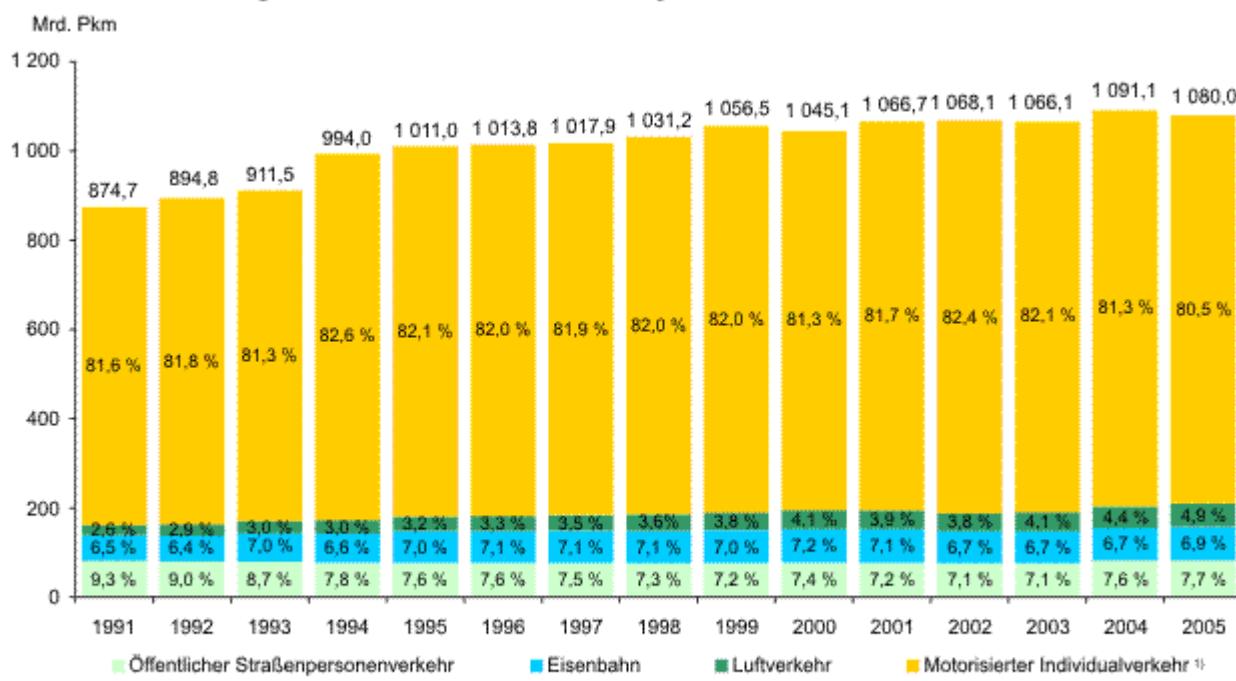
# Konkurrenz von Straßen, Schienen und Lufttransport

## Anteile der Verkehrsträger an der Güterverkehrsleistung



Quelle: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen 2006 (Hrsg): Verkehr in Zahlen 2006/2007

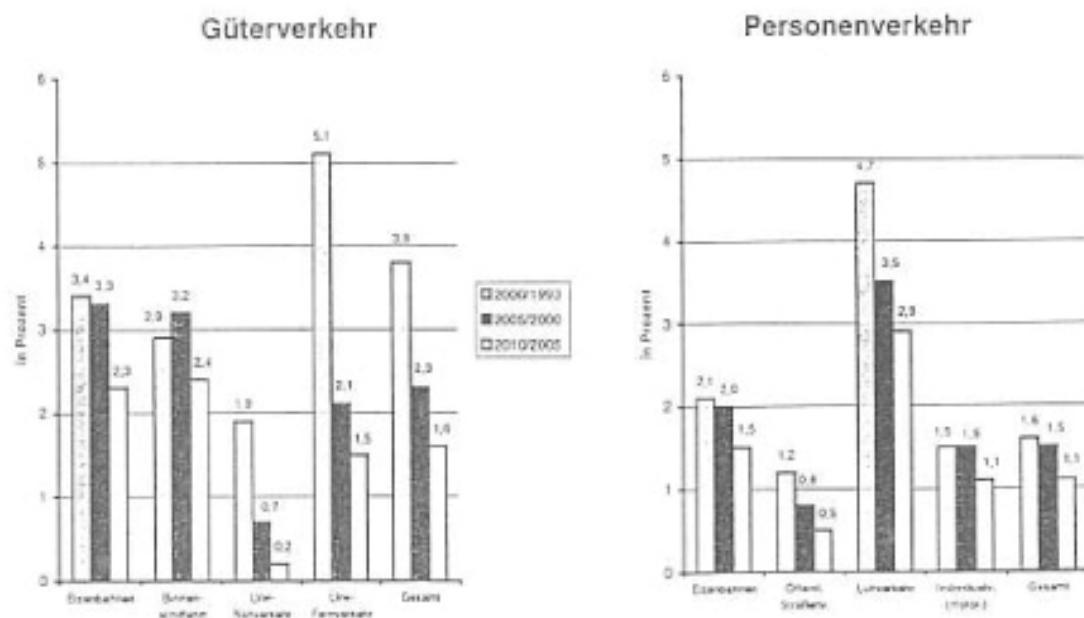
## Anteile der Verkehrsträger an der Personenverkehrsleistung



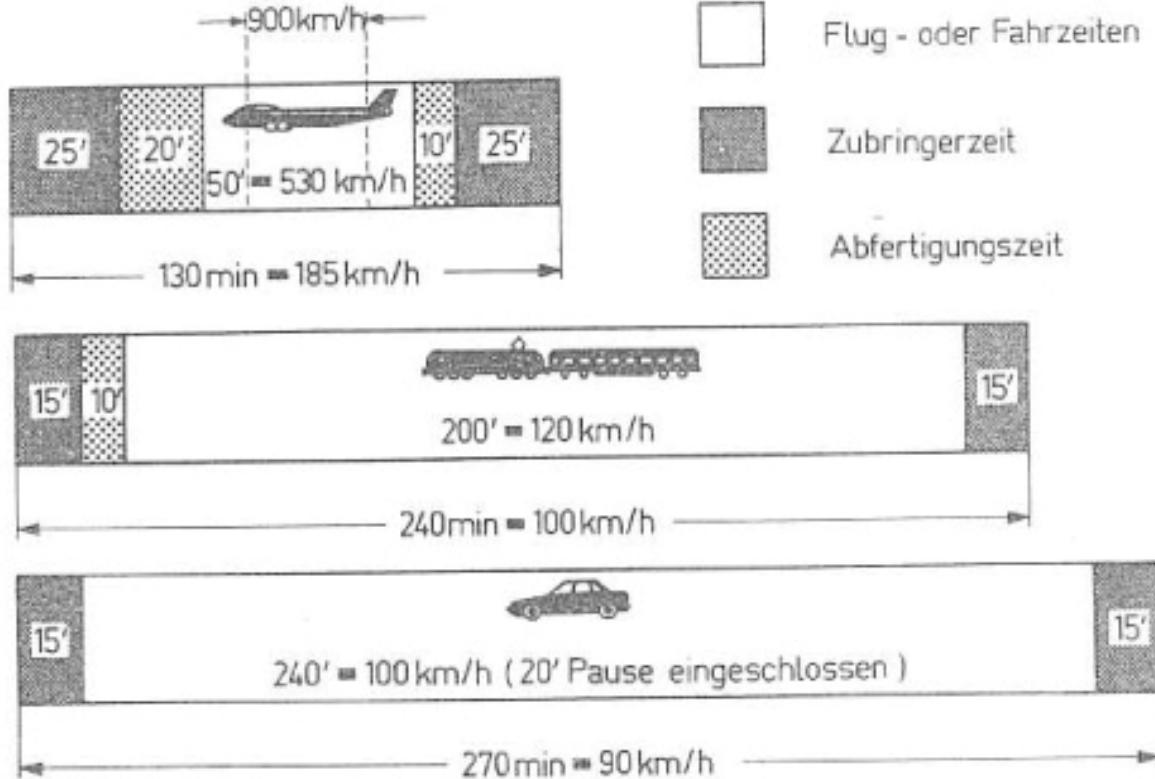
Quelle: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (Hrsg): Verkehr in Zahlen 2006/2007

# Konkurrenz von Straßen, Schienen und Lufttransport

Durchschnittliches jährliches Wachstum der Verkehrsleistung  
in Deutschland bis 2010



Reisezeiten u.- Geschwindigkeiten für Flugzeug, Bahn und Pkw auf eine  
Entfernung von 400km



# Meilensteine der elektrischen Traktion

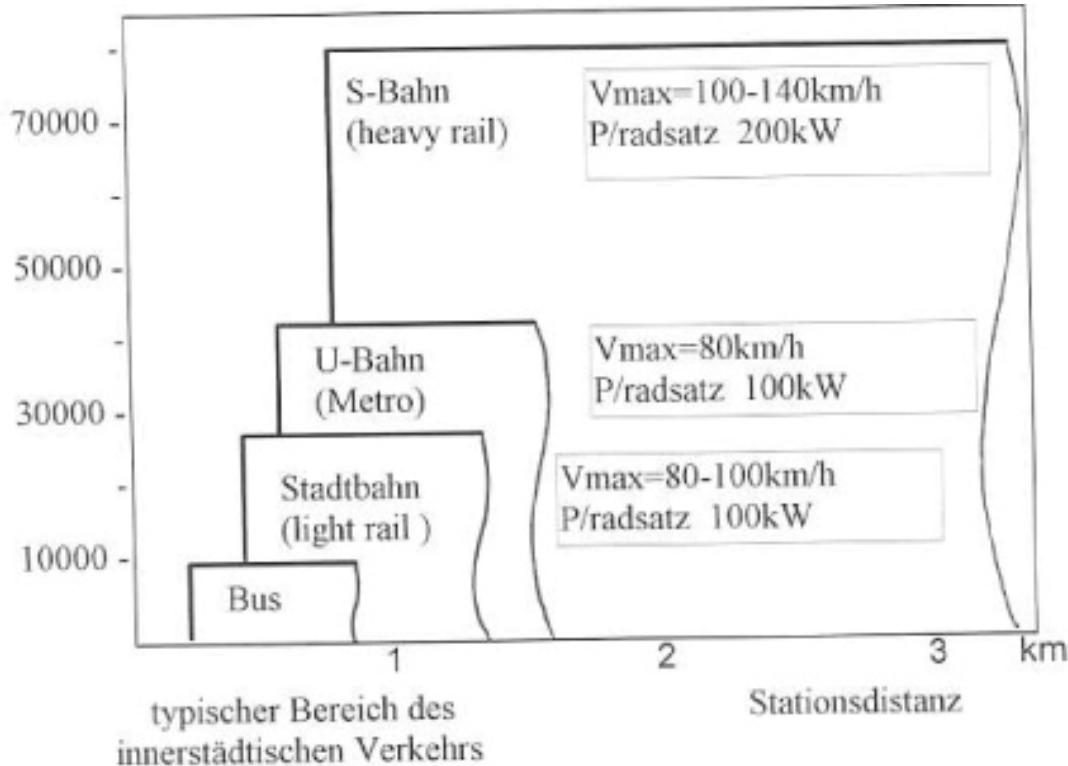
- 1879 Erste elektrische Eisenbahn der Welt auf der Gewerbe -Ausstellung in Berlin, von Siemens und Halske. Heute im Deutschen Museum  
2-achsig, Spurweite 500mm, Spannung 150V DC, 2,2 kW
- 1881 Erste „Elektrische“ Straßenbahn in Berlin, Länge 2,5km, Schienen führen Spannung gegeneinander.  
2-achsig, Spurweite 1m, Spannung 160V DC, 10 kW, vmax=30km/h
- 1890 Erste elektrische U-Bahn in London, Länge 5km,dritte Schiene  
2-achsige Lok, Spurweite 1435mm, Spannung 500V DC, 74 kW
- 1899 Vollbahn Burgdorf -Thun in der Schweiz von BBC, Drehstrom
- 1903 Schnellfahrversuche Marienfelde -Zossen mit Triebwagen  
Spurweite 1435mm, Drehstrom 11kV , 2,2MW, vmax=210km/h  
Geschwindigkeitsvorgabe durch Kraftwerksfrequenz
- 1904 Murnau - Oberammergau, Einphasenwechselstrom 16 2/3 Hz, 5,5kV
- 1912 Festlegung Deutsche Länder, Schweiz auf 16 2/3 Hz, 15kV
- 1932 Budapest-Hegyeshalom Kando-Umformerlok 1`D`1  
Einphasenwechselstrom 50 Hz, 16kV 1,84 MW, vmax=135km/h
- 1936 Freiburg-Neustadt (Schwarzwald) Versuchsbetrieb 50Hz, 20kV
- 1938 Schnellfahrlok E19, 1Do1, 108t, 15KV AC, 3,72MW, vmax=180km/h
- 1939 USA Dieselelektrische Lok „F“-Serie, Vielfachtraktion, Gleichstromgenerator und - fahrmotoren, Bo`Bo`, 104t, 1120kW, vmax=120km/h
- 1944 Schweiz BLS Ae 4/4, Drehgestelle, Hochspannungsschaltwerk  
BoBo, 80t, 15KV AC, 2,95MW, vmax=125km/h
- 1950 Versuchsbetrieb in Frankreich, Einphasenwechselstrom 50 Hz, 25kV
- 1955 Rekordfahrt in Frankreich mit BB 9004 und CC 7107 1,5KV DC, vmax=331km/h
- 1964 Shinkansen Schnellfahrstrecke 515km, Tokio-Osaka mit Triebzügen  
1435mm, Einphasenwechselstrom 50/60 Hz, 25kV, vmax=210km/h
- 1971 DE-Lok als Versuchsträger, Asynchronmotoren an Spannungszwischenkreis - Wechselrichter. Co`Co`, 1,84MW, vmax=140km/h
- 1974 Drehstromversuchsfahrzeug mit 4 Quadrantensteller
- 1975 Straßenbahn Nürnberg, Asynchronmotor mit Thyristor-Chopper und Stromzwischenkreis - Wechselrichter am 750V DC Netz, 185kW
- 1980 Hochleistungslok mit Asynchronmotoren und 4 Quadrantensteller  
BR120, Bo`Bo`, 5,6MW, vreg=200km/h
- 1981 Schnellfahrstrecke 426km Paris- Lyon, Thyristoranschnittsteuerung  
Gleichstromfahrmotoren, AC 50Hz, 25 kV, 6,3MW, vreg=260km/h
- 1988 Rekordfahrt des ICE-V, 2 Triebköpfe und 3 Mittelwagen  
8,4MW, vmax=406km/h Erstmalige Anwendung der Mikroprozessorsteuerung
- 1990 Rekordfahrt des TGV Atlantique, 2 Triebköpfe und 3 Mittelwagen,  
Umbau auf 12 MW, vmax=515km/h
- 2003 Aufnahme des kommerziellen Betriebes der Magnetschnellbahn in Shanghai  
Vmax = 430 km/h regulärer Betrieb, Vmax = 505 km/h im Versuchsbetrieb.
- 2006 Rekordfahrt in Deutschland mit Bo Bo Serienlok 1216 050 15KV AC, 6,4MW  
erhöht auf 7,4 MW, vmax=357km/h
- 2007 Rekordfahrt des fünfteiligen V150 TGV in Frankreich 25KV AC, 19,8MW  
vmax=574,8km/h

# Anwendungsgebiete der elektrischen Traktion

## 1.3.1 Verkehrstechnische Unterteilung der Bahnen

### Nahverkehrsbahnen

Maximale Beförderungskapazität  
Personen je Richtung und Stunde



### Nebenbahnen, Regionalbahnen

### Hauptbahnen und Hochgeschwindigkeitsverkehr (HGV)

Nationaler und internationaler Personenfernverkehr  
Nationaler und internationaler Gütertransport

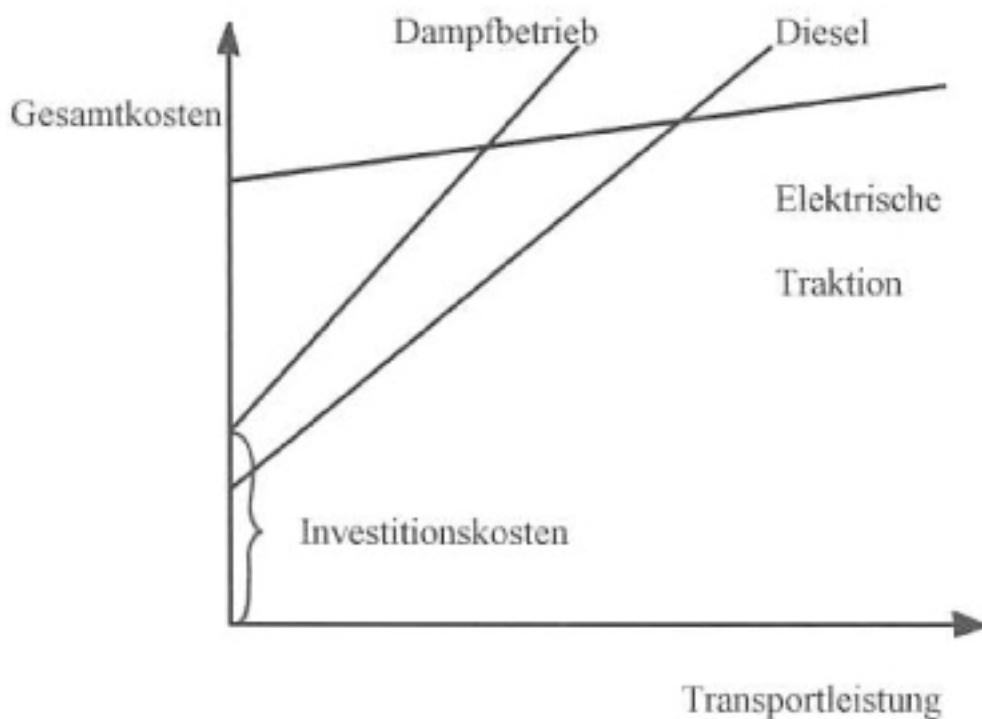
### Sonderanwendungen

- Bergbahnen
- Grubenbahnen
- Industriebahnen ( Zubringerverkehr zu Hauptbahnen )
- Werkbahnen ( Transport innerhalb des Werkes )
- Erzbahnen ( Erztransport z.B. Kiruna)

# Anwendungsgebiete der elektrischen Traktion

## 1.3.2 Vor- und Nachteile der elektrischen Traktion

- + Niedrige Energiekosten
- + Ausnutzung heimischer Energieträger
- + Guter Wirkungsgrad, vor allem im Teillastbereich
- + Energierückgewinnung beim Bremsen
- + Sofortige Startbereitschaft der Triebfahrzeuge
- + Geringe Wartungskosten
- + Umweltfreundlich, lärmarm, geringe Gefahr von Ölverschmutzung
- + Keine Abgase
- + Hohe mögliche Triebfahrzeugeleistungen und Überlastfähigkeit
- + 7MW bei vierachsiger E-Lok mit 90t – 3 MW bei D-Lok mit 130t
- Größeres Lichtraumprofil
- höhere Investitionskosten



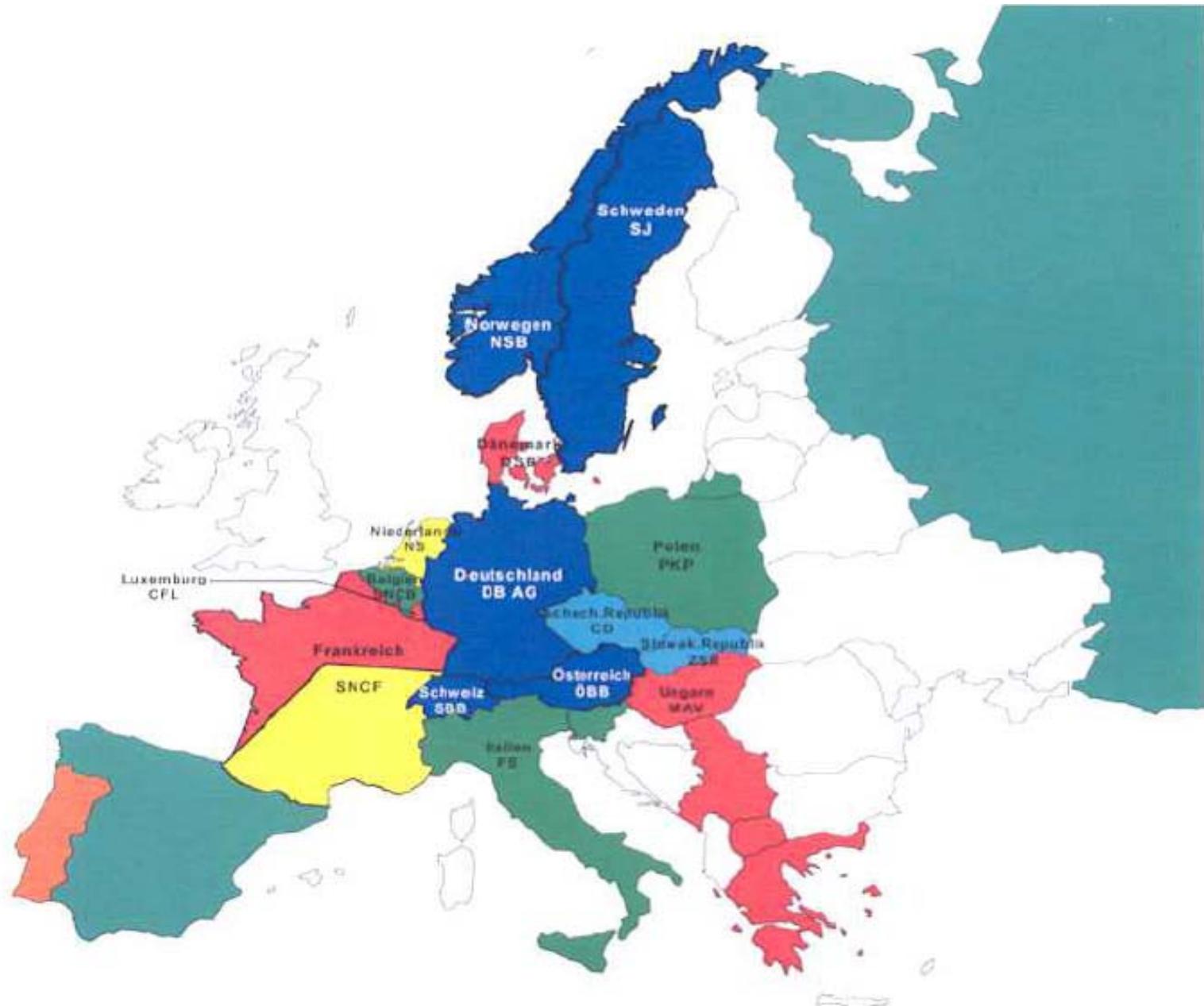
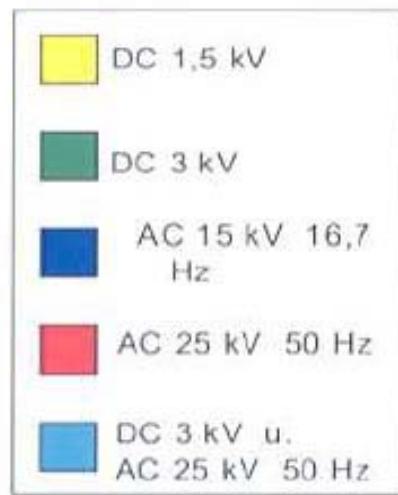
# Globaler Überblick

## 1.4.1 Streckenlängen und Elektrifizierungsgrad

Länder, Erdteile	Streckenlänge	Dichte/km je 100km <sup>2</sup>	Elektrifizierte km	Steckenlänge %
Deutschland (2006) (1993)	34 000 41 000	11	19 500	57
Schweiz	5000	12	3000	99
Frankreich	37 000	7	12 000	32
Italien	20 000	7	10 000	50
<b>Europa gesamt ohne Türkei und UdSSR- Nachfolge</b>	<b>296 000</b>	<b>6</b>		
USA (2002) (1930)	228 000 690 000	5 14	2 000	0,5
Kanada	50 000	0,5	43	0,0
Mexico	20 000	1	125	0,6
<b>Nord- und Mittel- amerika gesamt</b>	<b>330 000</b>	<b>2,4</b>	<b>2000</b>	<b>0,5</b>
<b>Südamerika</b>	<b>130 000</b>	<b>0,8</b>	<b>6 000</b>	<b>4</b>
UdSSR-Nachfolge	136 000	0,6	36 000	27
China (2006)	76 000	0,6	18 600	24
Indien (2006)	63 000	2	17,800	28
Japan	25 000	7	11 000	44
<b>Asien gesamt einschl. Türkei und UdSSR- Nachfolge</b>	<b>320 000</b>	<b>0,7</b>		
<b>Australien (2006)</b>	<b>44 000</b>	<b>0,6</b>	<b>5 300</b>	<b>0,1</b>
Südafrika	23 000	2	5 000	21
<b>Afrika gesamt</b>	<b>79 000</b>	<b>0,3</b>	<b>7 000</b>	<b>9</b>
<b>Welt gesamt</b>	<b>1 400 000</b>	<b>1</b>		

Angaben aus verschiedenen Jahren, daher keine Saldierung der elektrifizierten Strecken

# Globaler Überblick



# Globaler Überblick

## 1.4.3 Aktive Hochgeschwindigkeitsstrecken 2006

Streckenlänge >50km, planmäßige Geschwindigkeit > 250 km/h

Land	Streckenlänge km	Planmäßige Höchstgeschwindigkeit km/h	Stromsystem
Deutschland ICE	883	280/300	AC 16 <sup>2</sup> /3 15kV
Frankreich TGV	1799	270 300	AC 50Hz 25kV
Belgien TGV, ICE3	183	300	AC 50Hz 25kV
Spanien AVE (TGV, ICE3)	871	270/300	AC 50Hz 25kV
Großbritannien Eurostar	108	300	AC 50Hz 25kV
Italien ETR	440	250 300	DC 3kV AC 50Hz 25kV
Japan Shinkansen	2451	240 300	AC 50/60Hz 25kV
Korea KTX (TGV)	281	300	AC 50Hz 25kV
Taiwan (ab 1.11.06) Shinkansen	345	300	AC 50Hz 25kV
<b>Welt gesamt</b>	<b>7178</b>		

## Typische Kenngrößen aller Hochgeschwindigkeitsstrecken

- Elektrischer Betrieb
- Spurweite 1435mm
- Triebkopf- oder Triebzüge
- Taktfahrplan

# Technologische Perspektiven

## 1.5.1. Entwicklungsziele der Fahrzeugtechnik

- Leistungserhöhung (pro Zugeinheit)  
Höhere Geschwindigkeiten (Rad/Schiene bis 350km/h sinnvoll)  
Gewichtsreduktion (Achslasten, Sitzplatzgewicht, Doppelstock)  
Optimierung des Energieverbrauches  
Umweltfreundlichkeit (Lärmemissionen, Ölarmut, Recycling)  
Geringe Lebenszykluskosten (Anschaffung, Verbrauch, Wartung, Instandhaltung)  
Neigetechnik  
Niederflurfahrzeuge (Nahverkehr)  
Fahrzeugbussysteme (train-communication network)  
Kurzstator Linearmotorantrieb (Nahverkehr und People Mover)  
Magnetschwebetechnik (Fernverkehr und Airport Links)  
Getriebeloser Direktantrieb (Nahverkehr)

### Darstellung am Beispiel der HGV Fahrzeuge

Kenngrößen		ICE1	ICE3	Ziel	TR
<b>Ersteinsatz</b>	Jahr	1990	1998	2000+	2005
<b>Installierte Leistung (je 200m)</b>	MW	4,8	8	9	Strecke
<b>Höchstgeschwindigkeit</b>	km/h	280	330	350	400
<b>mittlere Beschleunigung</b>	m/s <sup>2</sup>	0,17	0,33	0,5	1,1
<b>Leergewicht (200m Einheit)</b>	t	440	400	330	394
<b>Sitzplätze</b>		348	418	>400	550

## 1.5.2. Entwicklungen der Antriebsausstattung

1997 Einsatz von IGBT-Bauelementen mit 3,3kV Sperrspannung (Unetz=1,5kV)

2002 Serieneinsatz 6,5 KV IGBT Bauelemente für Mehrsystemlokomotiven

Ersatz von 16<sup>2</sup>/3 Hz Trafos durch 20khz Wandler

Haupttrafo mit Supraleitern

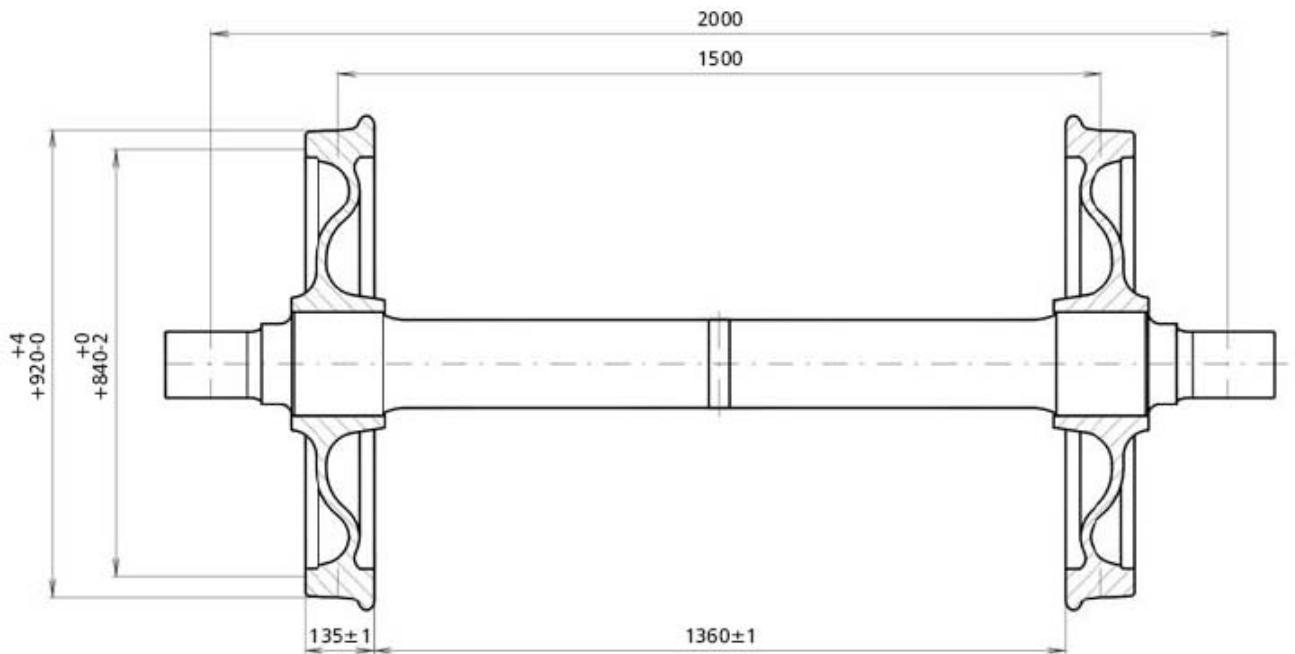
15kV Einspeisestromrichter mit Mittelfrequenztrafos

Getriebeloser Antrieb mit neuartiger Synchronmaschine

Anpressdruck geregelter Stromabnehmer

Integration nationaler Zugsicherungssysteme als Vorläufer von ETCS

# Technik der Spurführung



Mittlerer Radradius neu  $R=460$  mm

Radrückenabstand  $A_r$

Spurkranzdicke  $S_d = 33$  mm

Abstand der Radaufstandspunkte  $S_1$  entsprechend der Berührpunkte 1440-1460 mm

Abstand der Schieneninnenkanten = Spurweite  $S_w$  (1435 -5/ +35 mm)

Die beiden durch die Achse fest miteinander verbundenen Räder laufen nach außen konisch zu.

Die Neigung in der Messkreisebene (1500mm) beträgt  $\tan \gamma = 0,025 \approx 1,4^\circ$

Im Bereich des Spurkranzes steigt dieser Winkel  $\tan \gamma$  steil auf bis auf  $70^\circ$  an.

*Spurführung in den Graden (bis ca. 500m Kurvenradius mit Profil S1002)*

Verschiebt sich der Radsatz aussermittig um  $\Delta s$  ergibt sich eine Raddurchmesser-differenz von  $\Delta r = \Delta s \tan \gamma$ , diese führt zu einer Selbstzentrierung des Radsatzes.

Da keine Relativbewegung in Kraftrichtung erfolgt entsteht auch keine Reibleistung, allerdings auch keine Dämpfung. Der Radsatz wird über die Mittenposition hinaus geführt. Es stellt sich der so genannte Sinuslauf mit der typischen Wellenlänge  $\lambda$  ein.

$$\lambda = 2\pi \sqrt{\frac{R \cdot S_1}{2 \tan \gamma}} \quad (\text{mit obigen Werten } 23,3 \text{ m geschwindigkeitsunabhängig})$$

Die senkrecht angreifenden Radaufstandskraft  $Q$  wird in die senkrecht zur Berühr-ebene gerichtete Normalkraft  $N = Q / \cos \gamma$  und die in Richtung Gleismitte gerichtete Profilseitenkraft  $F_y = Q \tan \gamma$  zerlegt.

*Enge Radien (<180m)*

Der kurvenäußere Berührpunkt wandert auf den Spurkranz und führt zu einem steilen Anstieg von  $\tan \gamma$ , die resultierende Kraft  $F_{ya}$  wird durch die gleich große Reibkraft  $F_{yi}$  kompensiert und es tritt erheblicher Reibverlust und damit Verschleiß auf. Die Reibkraft  $\mu N$  steht senkrecht auf der Kraft  $N$ , ihre Vertikalkomponente verringert die Kraft  $Q$  und der Spurkranz klettert an der Schiene hoch. Wird der maximale  $\tan \gamma$  am Spurkranz überschritten tritt Entgleisung auf.

# Energiebedarf

## 2.1.1 Allgemeiner Bewegungsvorgang

$$s(t) = \int v(t) dt \quad (\text{m})$$

$$G [\text{N}] = m [\text{kg}] g [\text{m/s}^2] \quad 1 \text{kN} = 0,102 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$v(t) = \int a(t) dt \quad (\text{m/s})$$

$$v [\text{km/h}] = 3,6 [\text{m/s}] \quad 90 \text{ km/h} = 25 \text{ m/s}$$

$$a(t) = \frac{Z(t) - W(t)}{m} \quad (\text{m/s}^2)$$

$$a_{\text{mit}} = \frac{v_{\text{end}}}{t_1}$$

mittlere Beschleunigung

$$P = Z v \quad (\text{Nm/s}), (\text{W})$$

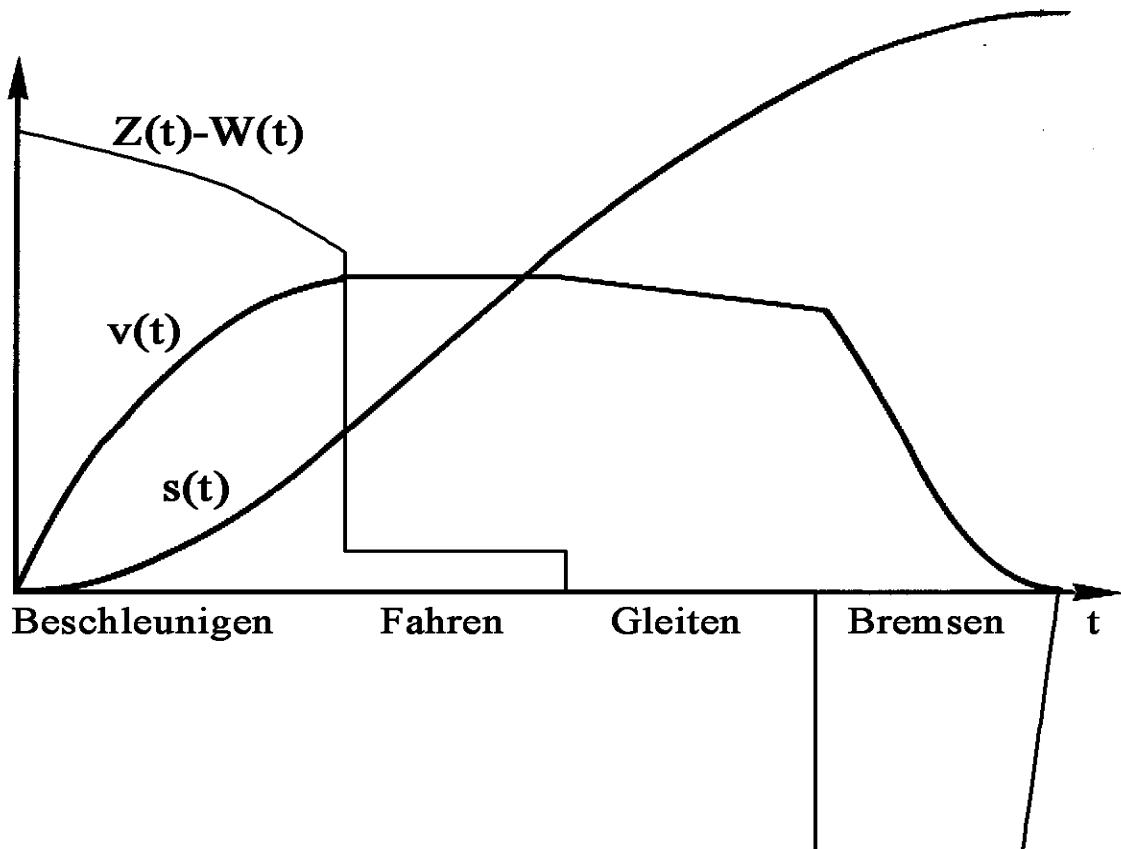
$$P [\text{KW}] = Z [\text{kN}] v [\text{km/h}] / 3,6$$

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m v^2 \quad (\text{Nm}), (\text{J}), (\text{Ws})$$

$$1[\text{kWh}] = 3,6 \cdot 10^6 [\text{J}]$$

$$E = P t \quad (\text{Nm})$$

$$E = \frac{1}{2} 80 t (25 \text{ m/s})^2 = 25 \cdot 10^3 \text{ kNm} = 6,94 \text{ kWh}$$



Grenzfälle

Dreieck nur Beschleunigen u. Bremsen  
Rechteck hohe, kurze Leistungsspitzen

zeitoptimal „Spitzfahrt“  
arbeitsminimal „Gleiten“

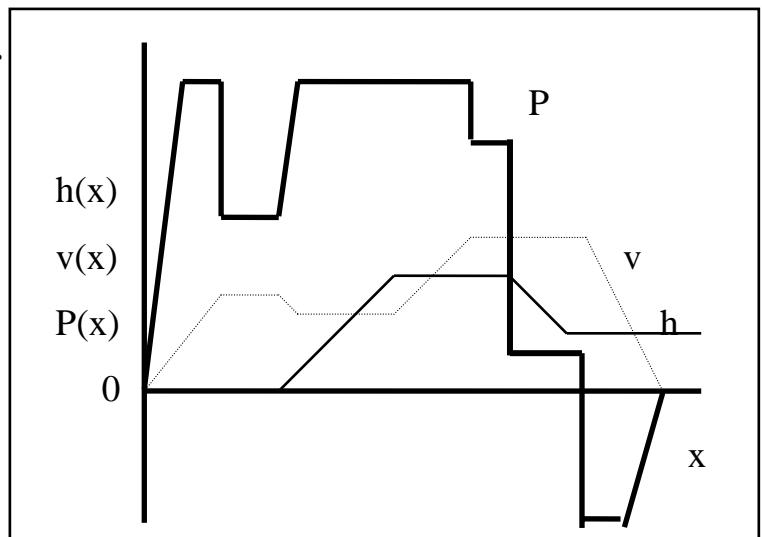
# Energiebedarf

## 2.1.2 Arbeitsverbrauch

abhängig von: Standpunkt ( Rad, Stromabnehmer, Unterwerk, Kraftwerk )  
Betriebsart ( HGV, Regionalbahn, Gütertransport, S-U- Bahn )

### Auslegung auf Streckenstruktur

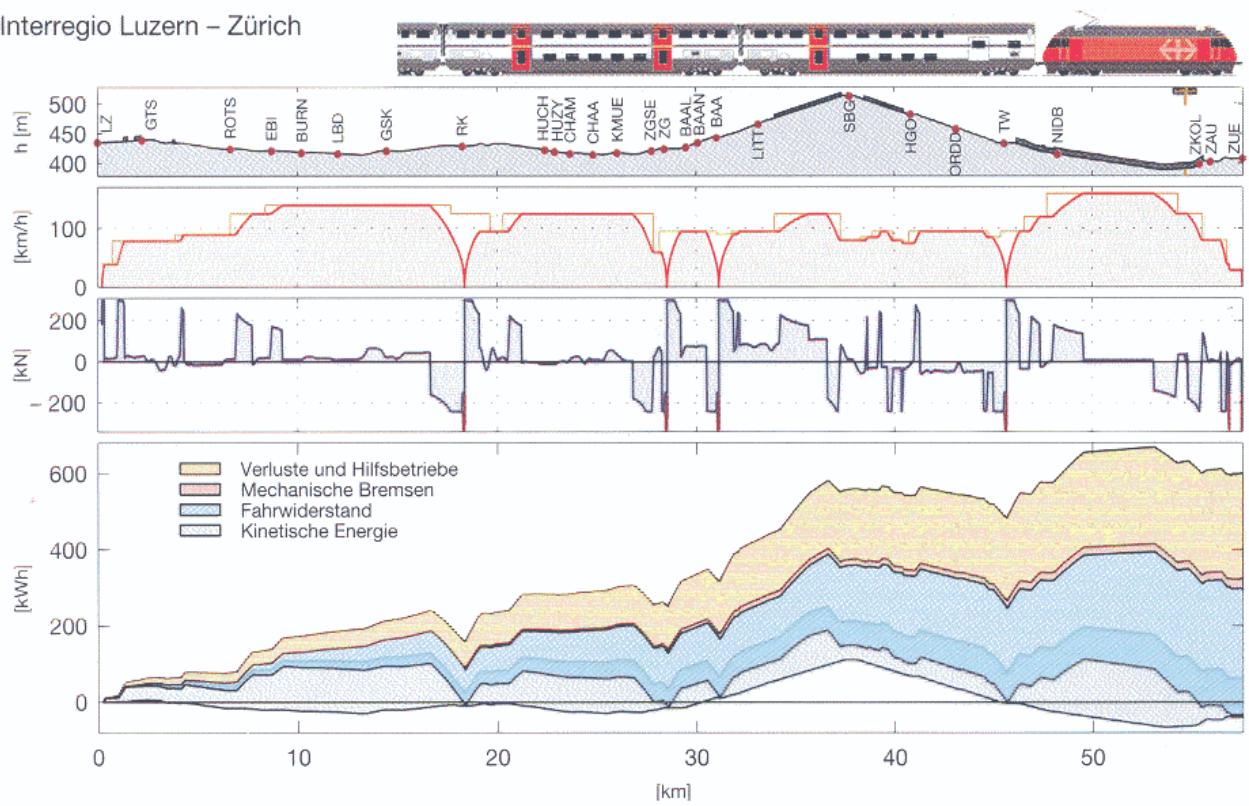
- $h(x)$  Höhenlinie
- $v(x)$  Geschwindigkeitsprofil
- $Z(x)$  Zugkraft
- $P(x)$  benötigte Leistung
- $E(x)$  Arbeitsverbrauch



Addition der einzelnen Zugleistung über Bildfahrplan zur Gesamtleistung  $P(t)$

### Energieverlauf einer Zugfahrt

Interregio Luzern – Zürich



# Energiebedarf

## 2.1.3 Arbeitsverbrauch und zu installierende Leistung

$$w = \frac{P t}{G l} \text{ (kWh/ t km)} \quad \text{spezifischer Arbeitsverbrauch}$$

$$w_{Str} = \left( \frac{w_F \pm w_S \pm w_B}{\eta_{Rad/Schiene.} + \eta_{Fzg}} \right) + w_{zus} = w_{mech} + w_{zus}$$

$w_{mech}$  = (bezogene) Arbeit für Traktionszwecke eines Zuges

$w_{zus}$  = (bezogene) Arbeit der Nebenbetriebe + Heizung/Klima + Verschiebearbeit

$$W_{UW} = \frac{n_z w_{Str} G l}{\eta_{Fahrdraht}} \quad \text{Unterwerksarbeit}$$

$$W_{KW} = \frac{W_{UW}}{\eta_{Fernleitung} \eta_{UW}} \quad \text{vom Kraftwerk geliefert}$$

$$W = \frac{W_{Jahr}}{l} > 300\,000 \text{ (kWh/ km a)} \quad \text{Streckenelektrifizierung angebracht}$$

$$P_{mit}^h = \frac{W^h(kWh)}{1(h)} = \frac{n_z w_{Str} G l}{\eta} \quad \text{Stunden-Mittelleistung}$$

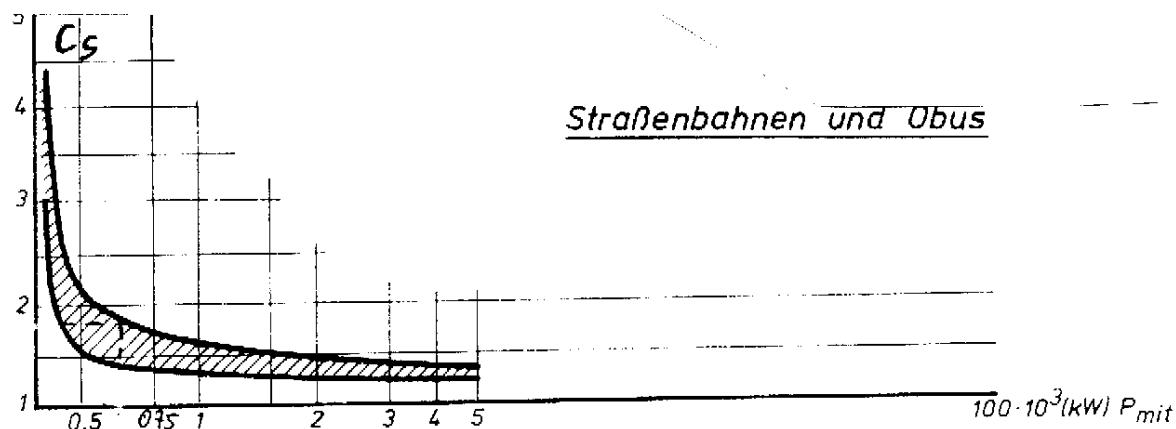
$$P_d = P_{mit}^h \frac{C_s}{C_{ii}} + P_{Heiz} \quad \text{Dauerleistung}$$

$$C_s = \frac{P_{max}}{P_{mit}^h} \quad \text{Stoßspitzenfaktor f(Betriebes)}$$

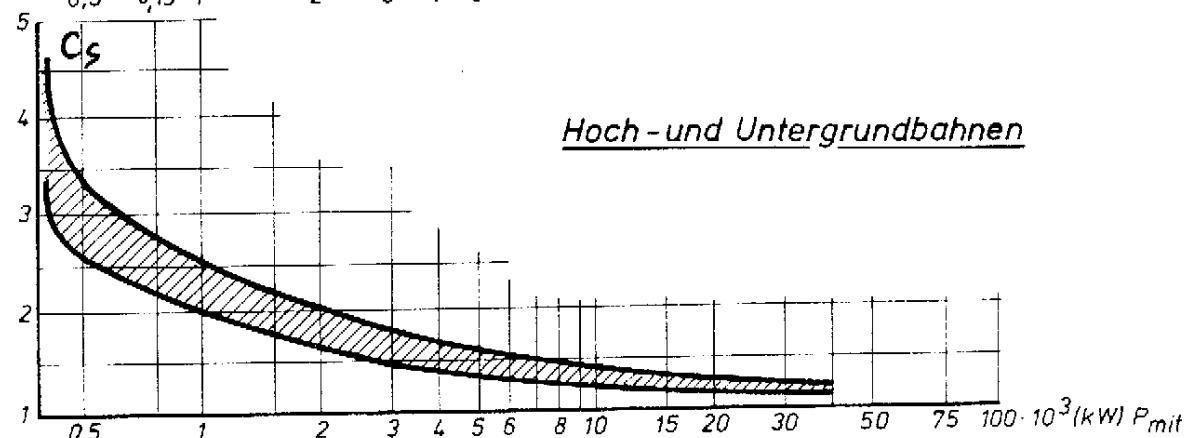
$$C_{ii} = \frac{P_{max}}{P_{dauer}} \quad \text{Überlastfaktor f(Anlage, Dauer)}$$

# Energiebedarf

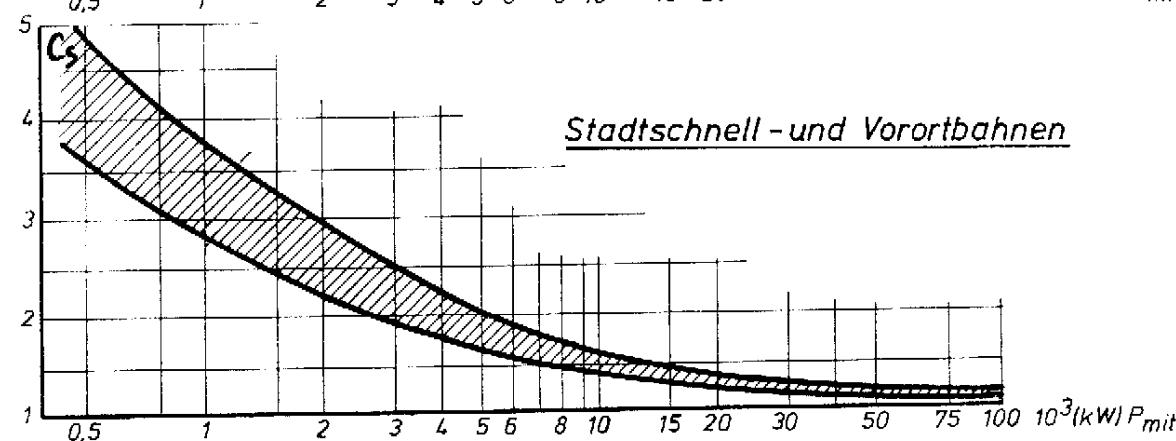
## Stoßspitzenfaktor $C_s$ bei verschiedenen Bahnarten



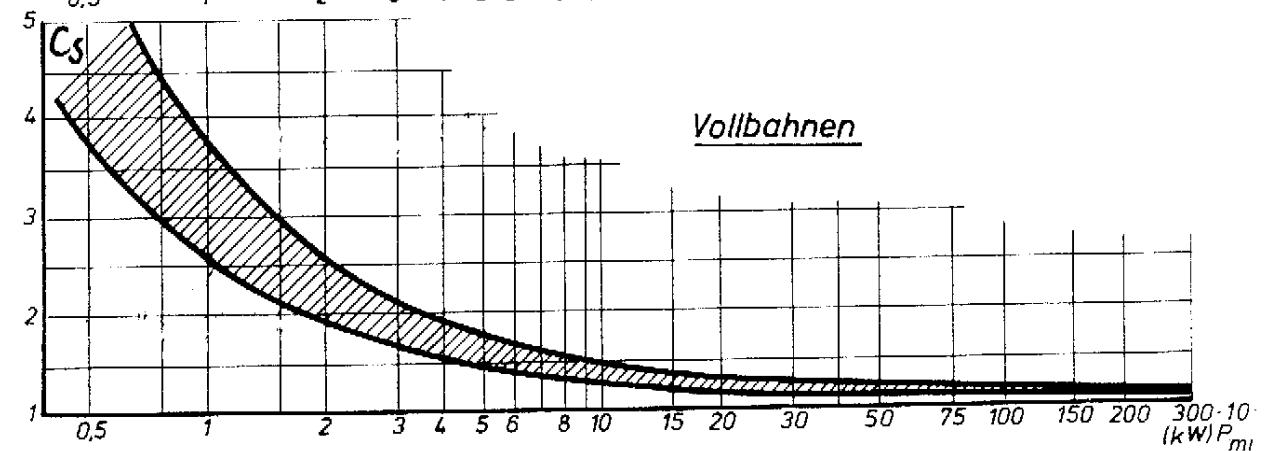
Hoch- und Untergrundbahnen



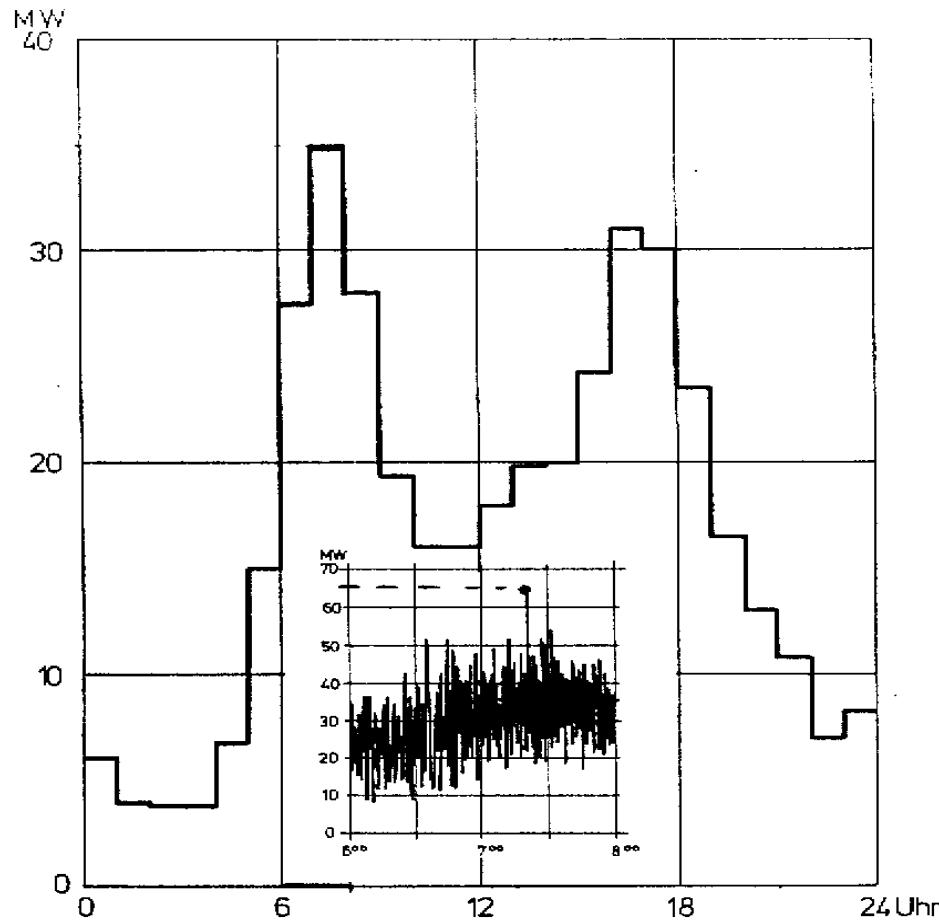
Stadtschnell- und Vorortbahnen



Vollbahnen



# Energiebedarf



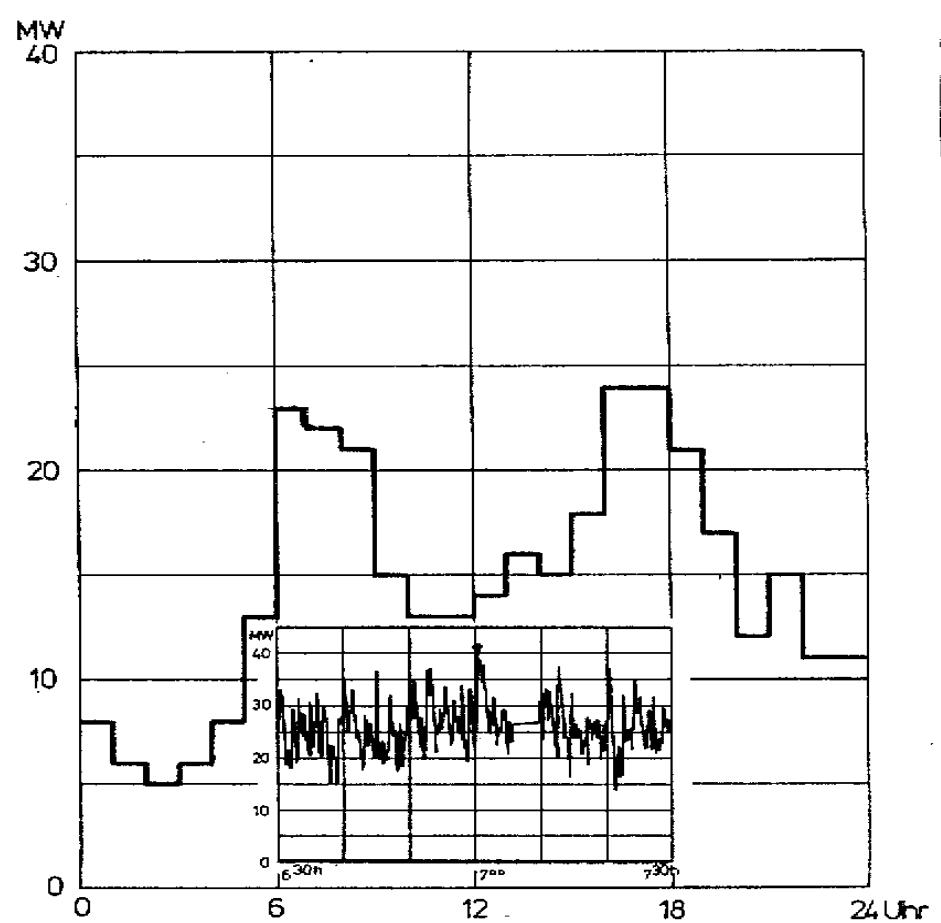
$$P_{\max} = 64,0 \text{ MW}$$

$$P_{\max}^h = 35,1 \text{ MW}$$

$$P(15m)_{\max} = 36,7 \text{ MW}$$

$$W = 409 \text{ MWh}$$

Belastungsverlauf Hamburger S-Bahn  
Dienstag 6.6.78



$$P_{\max} = 40,5 \text{ MW}$$

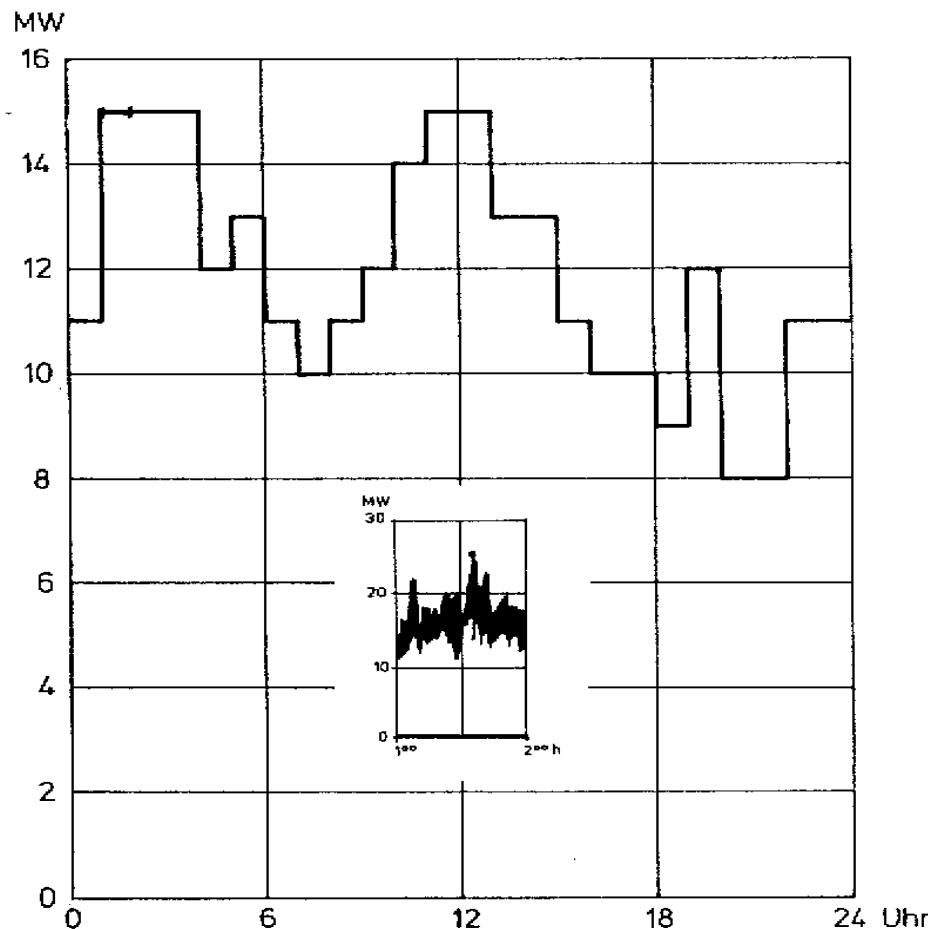
$$P_{\max}^h = 24,0 \text{ MW}$$

$$P(15m)_{\max} = 27,3 \text{ MW}$$

$$W = 315 \text{ MWh}$$

Belastungsverlauf Unterwerk München Pasing  
Dienstag 6.6.78

# Energiebedarf



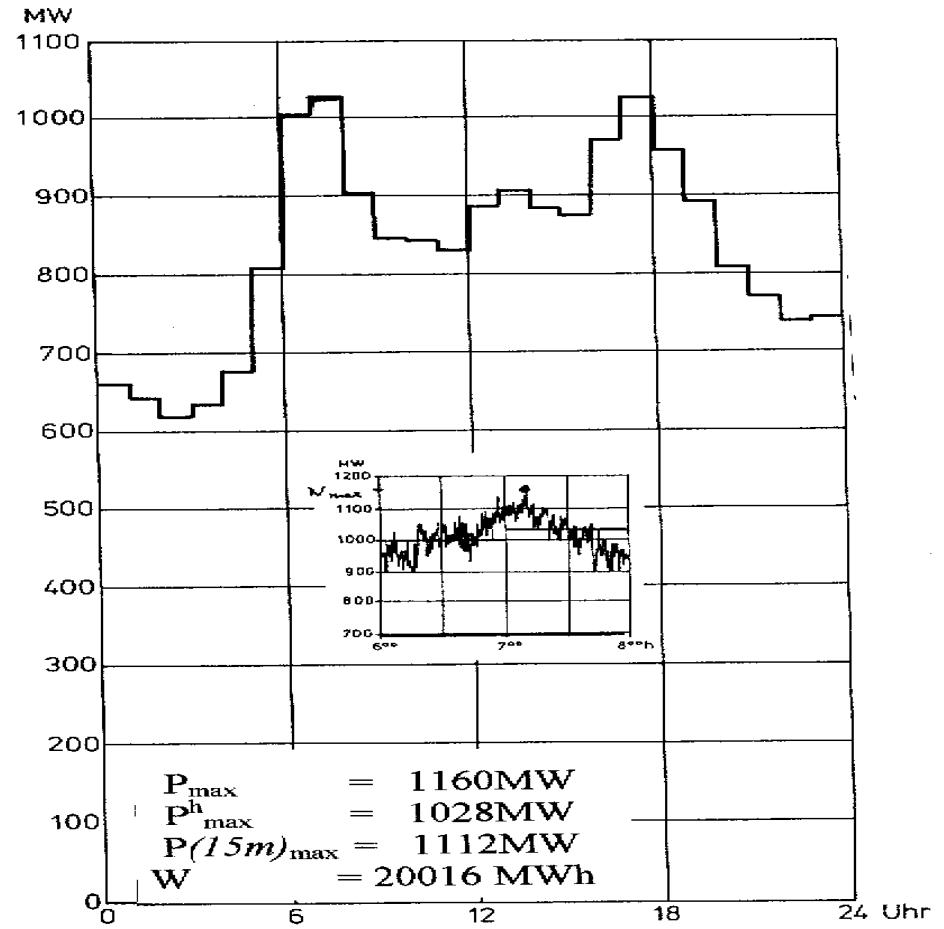
$$P_{\max} = 24,2 \text{ MW}$$

$$P_{\max}^h = 15,0 \text{ MW}$$

$$P(15m)_{\max} = 16,0 \text{ MW}$$

$$W = 285 \text{ MWh}$$

Belastungsverlauf Unterwerk Eichenberg  
Dienstag 6.6.78



$$P_{\max} = 1160 \text{ MW}$$

$$P_{\max}^h = 1028 \text{ MW}$$

$$P(15m)_{\max} = 1112 \text{ MW}$$

$$W = 20016 \text{ MWh}$$

Belastungsverlauf Gesamtnetz  
Dienstag 6.6.78

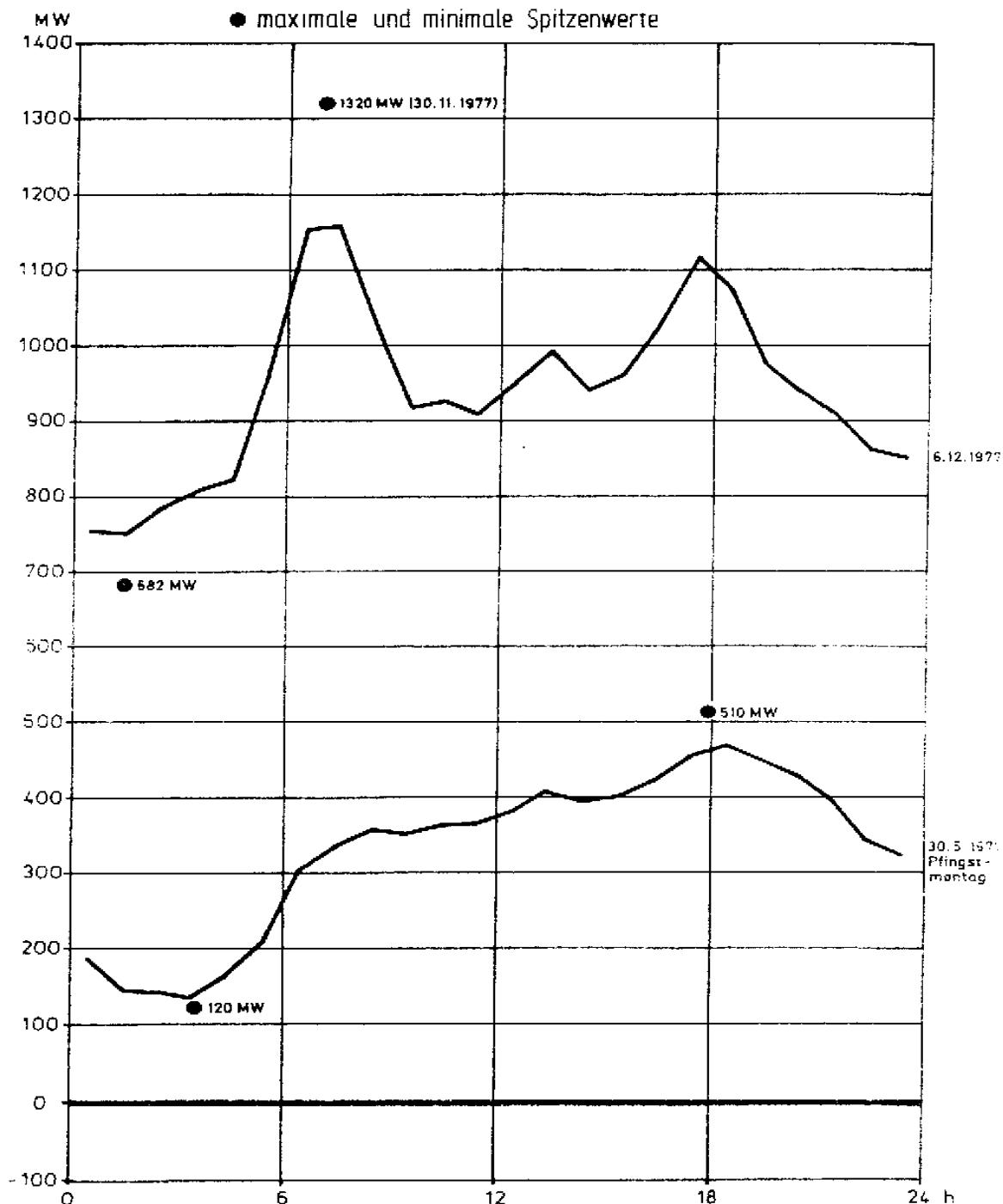
# Energiebedarf

## DB Abgabeleistung ab KW bei höchster und niedrigster Last

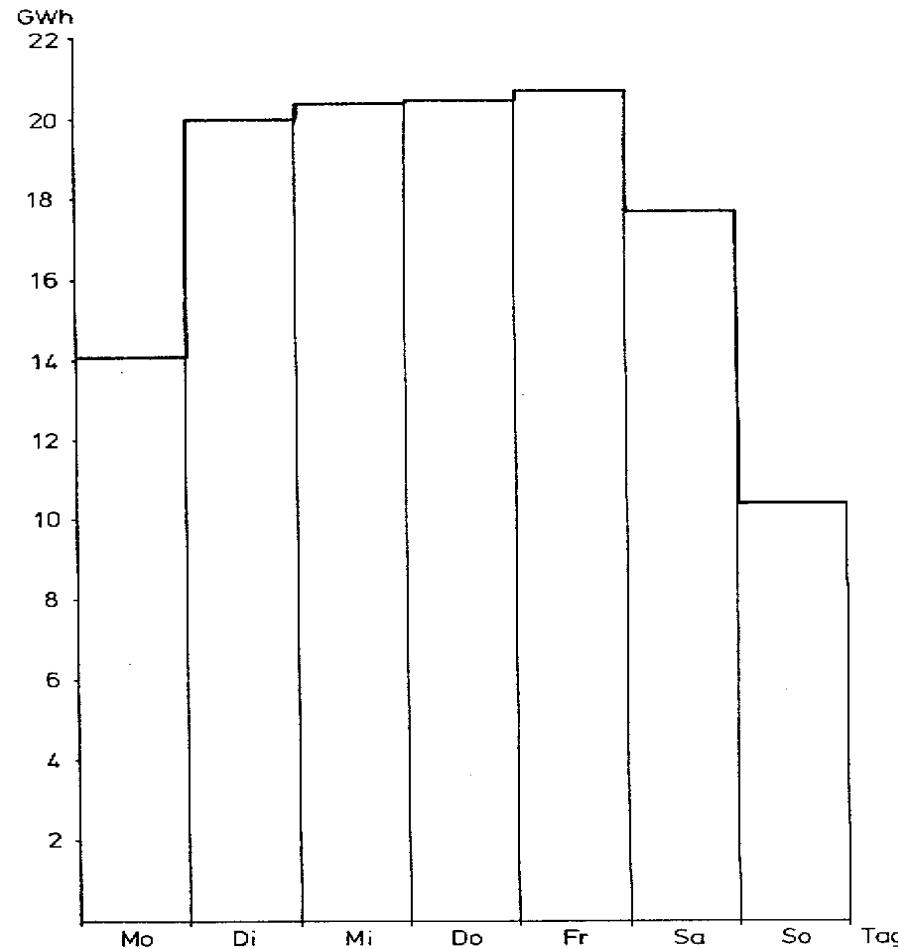
Installierte Leistung DB 1977 1600MW, derzeit Bahn AG 1996 3010 MW  
Erzeugte Brutto Energie 1977 6115 GWh 1996 10550 GWh

Gleichzeitigkeitsfaktor

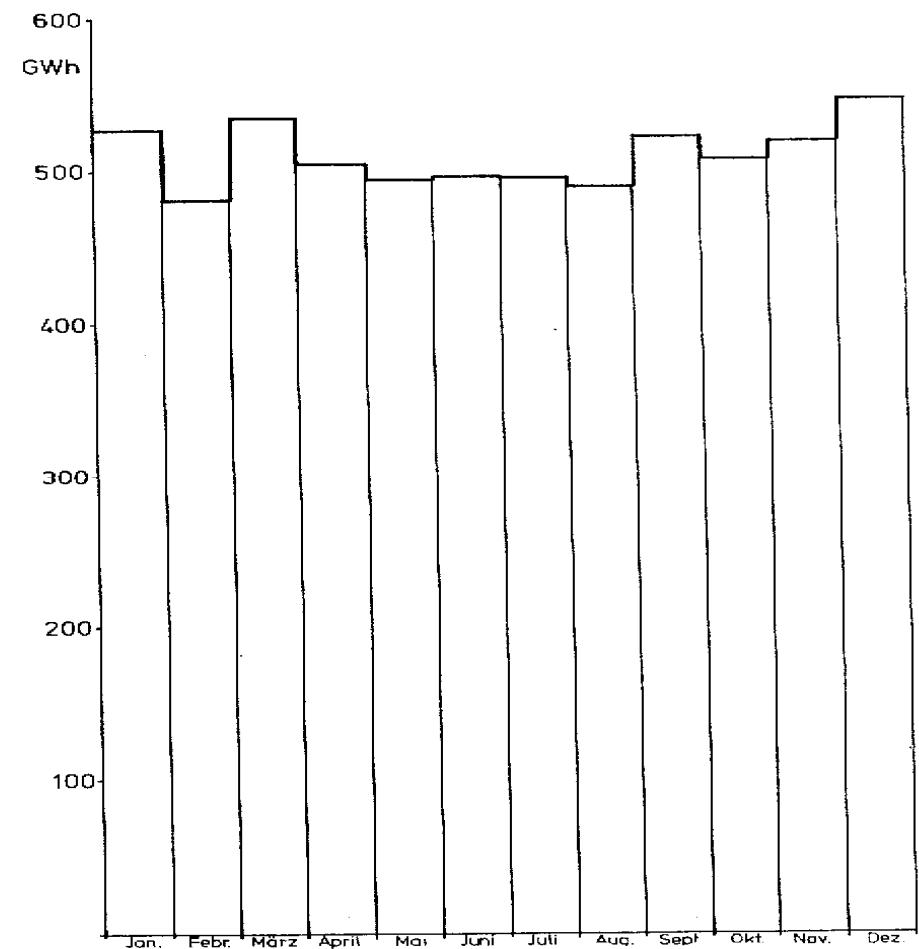
$$P_{\text{KW}} : P_{\text{UW}} : P_{\text{TFZ}} = 1,0 : 1,8 : 8,0$$



# Energiebedarf



$W = 123,7 \text{ GWh}$   
Wochenstromverbrauch  
Juniwoche 78



$W = 6115 \text{ GWh}$   
Jahresstromverbrauch  
Regeljahr.77

# Energiebedarf

**Elektrifiziertes Streckennetz der deutschen Bahn AG (1.1.2006)**



# Systemwahl

## Historische Auswahlkriterien

Gleichstrom:

Triebfahrzeug      billig, robust, einfach  
                      kein pulsierendes Moment  
                      Widerstandsbremse leicht realisierbar

ortsfeste Anlagen      Motorisolation gibt Netzspannung (  $U_{nenn}$  ) vor  
                          schwere Fahrleitung für hohe Ströme  
                          aufwendig, ( Quecksilbergleichrichter )  
                          kurze Unterwerksabstände (  $l$  )

$$I_{Anf} = \frac{P_{max}}{U_{nenn} N_{Gleis}} \leq 0,9 \quad I_K = 0,9 \quad \frac{U_K}{Z \frac{l}{2}}$$

max. Anfahrstrom < 0,9 min. Kurzschlußstrom

Spannungseinbruch       $\Delta U = I_{TFZ} Z' x$   
                          Kurzschlüsse schwierig abzuschalten

## Einphasenwechselstrom mit niedriger Frequenz ( $16 \frac{2}{3} \text{ Hz}$ )

Triebfahrzeug      aufwendig, schwer (  $16 \frac{2}{3} \text{ Hz}$  Trafo; große Motoren )  
                      mit  $2 f_I$  pulsierendes Moment  
                      zusätzlich transformatorische Kommutierungsspannung  
 $U_{ir} = 4,44 f_I W_{Spule} \Phi$   
                      aufwendige Schaltung zur E-Bremse

ortsfeste Anlagen      einfache, leichte Fahrleitung, durchverbunden  
                          Unterwerksabstände entspr. Netzspannung höher

## Einphasenwechselstrom mit Landesfrequenz ( 50/60 Hz )

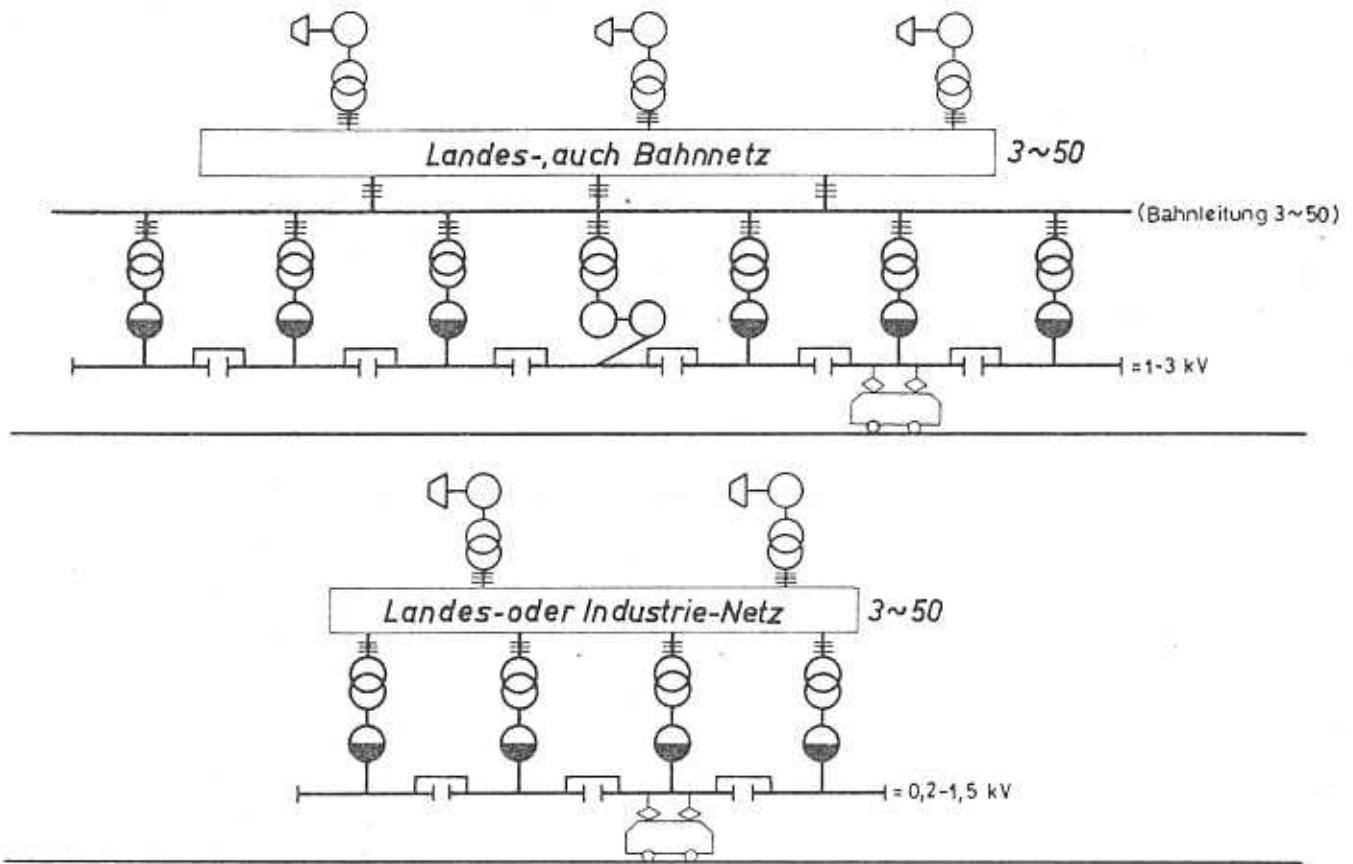
Triebfahrzeug      Gleichrichter und Mischstromfahrmotoren

ortsfeste Anlagen      leichte Fahrleitung mit Phasentrennstellen  
                          höhere Impedanz ( Stromverdrängung )

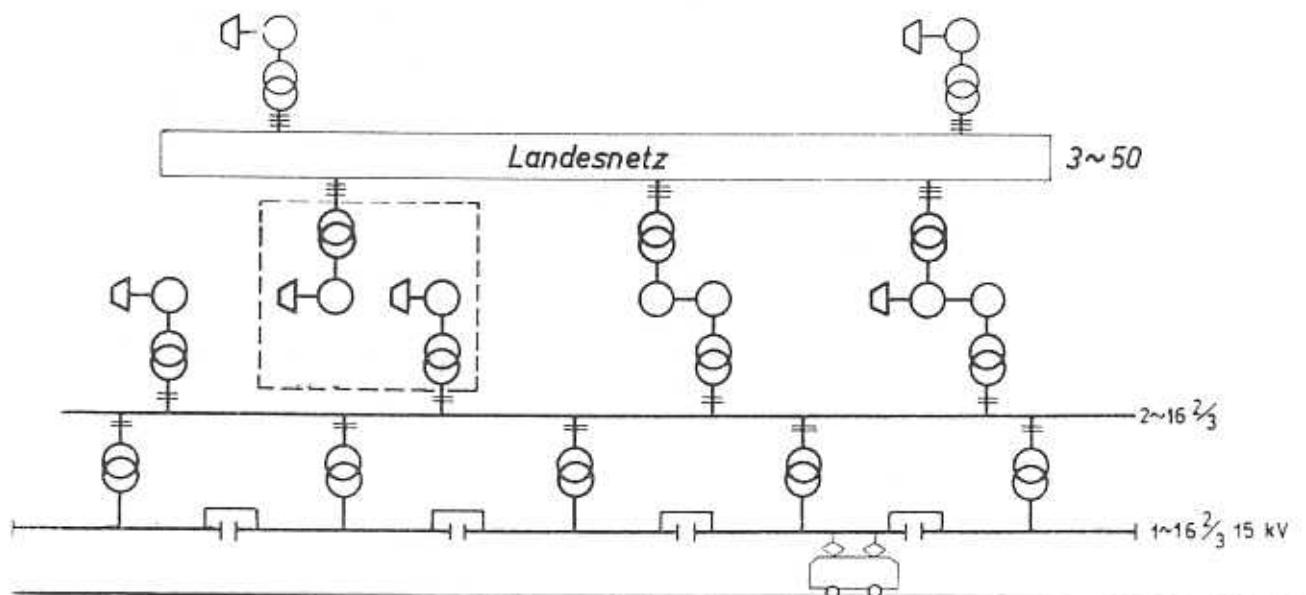
# Systemwahl

## Erzeugungs und Verteilungssysteme für Bahnstrom

### Gleichstrom - Bahnen

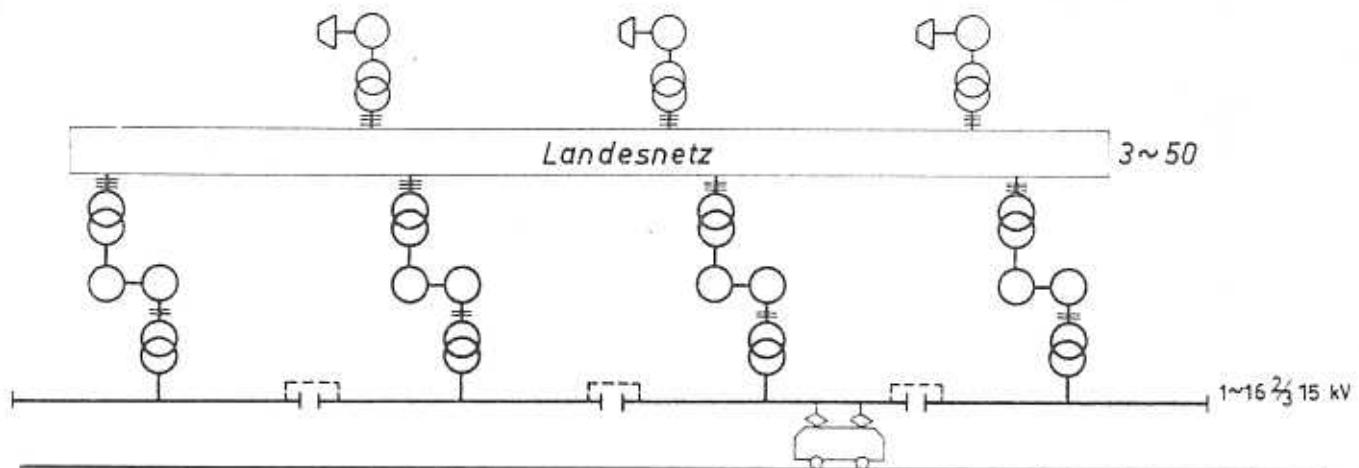


### Einphasenwechselstrom mit Sonderfrequenz

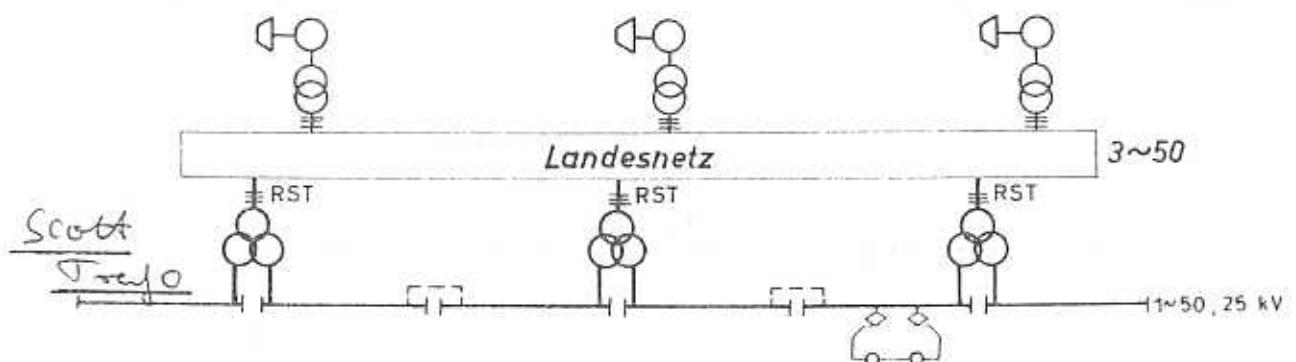
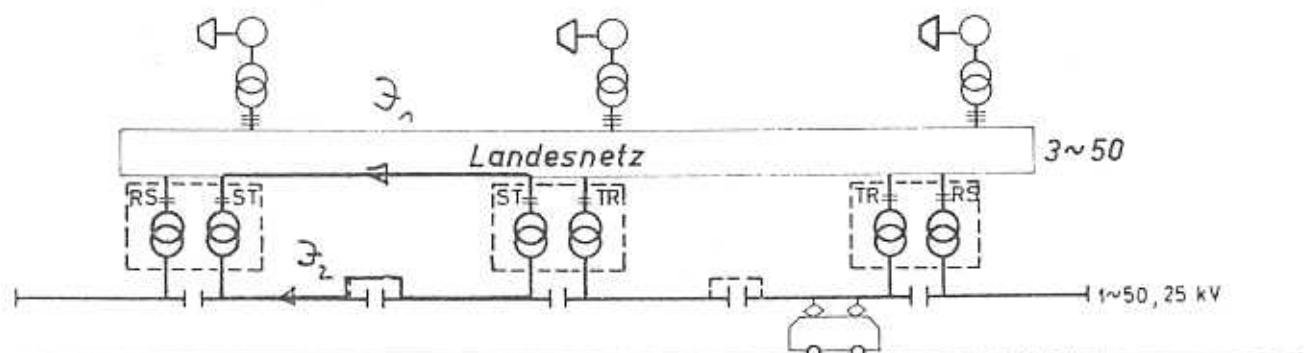
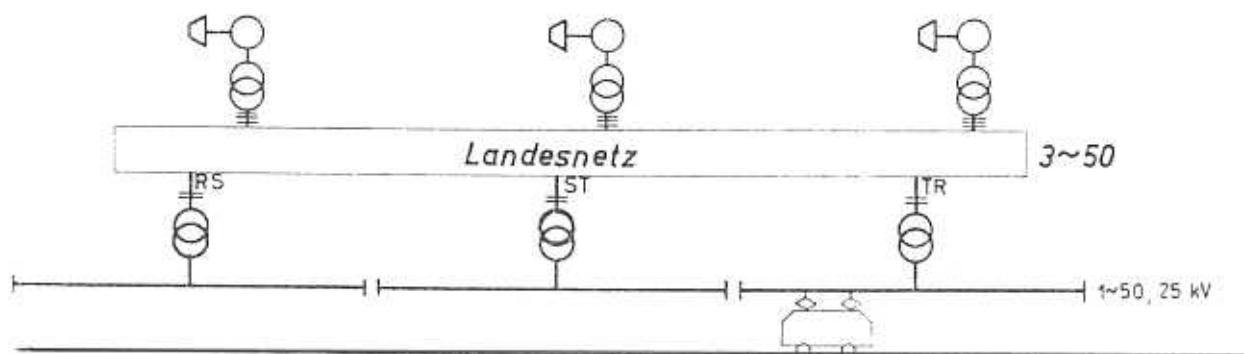


durchgekuppelt

# Systemwahl



Einphasenwechselstrom mit Landesfrequenz

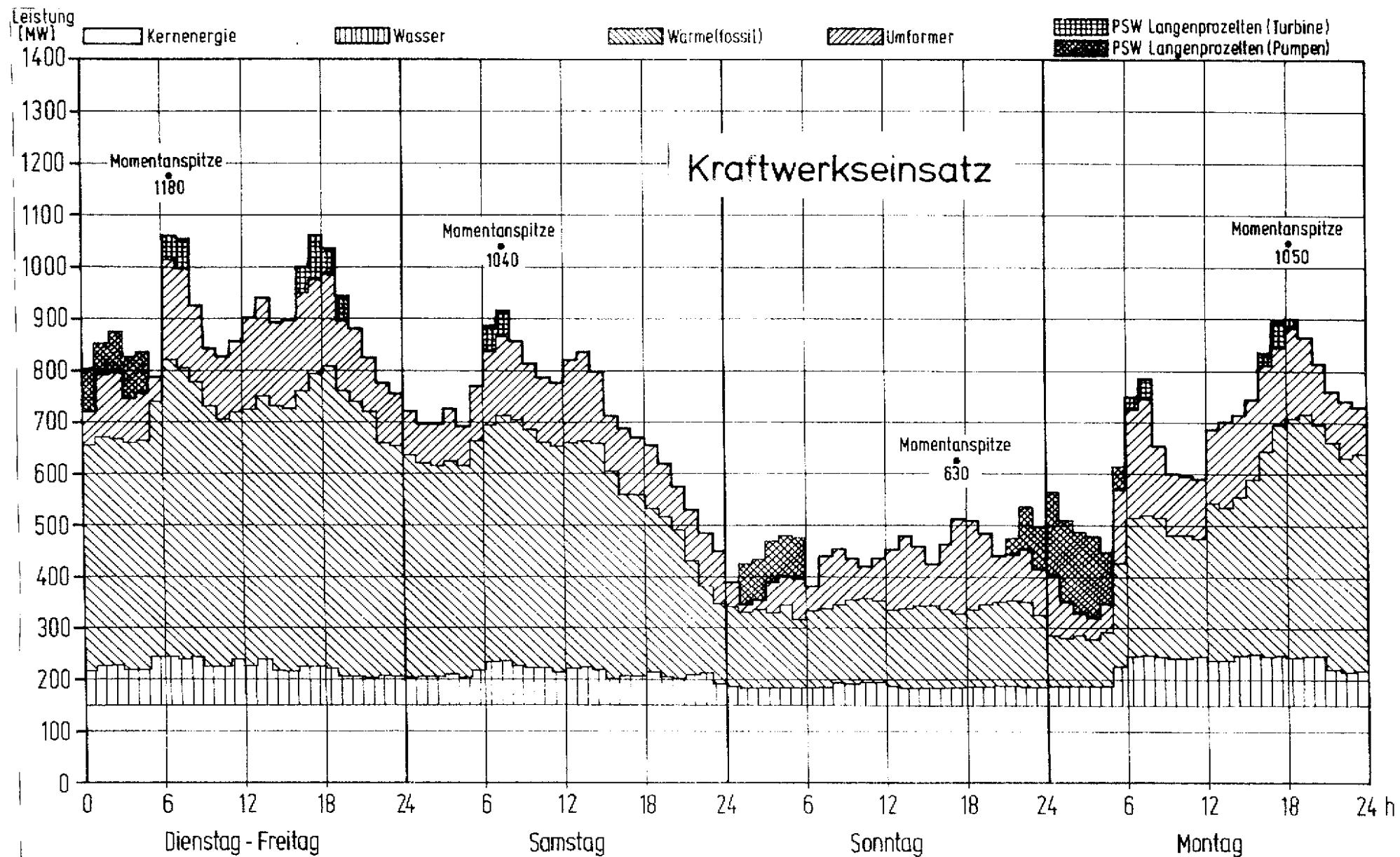


# Energieerzeugung und Energieumformung

## 2.3.1 Übersicht über die $16\frac{2}{3}$ Hz Bahnenergieanlagen der DB (Stand 1.1.2006)



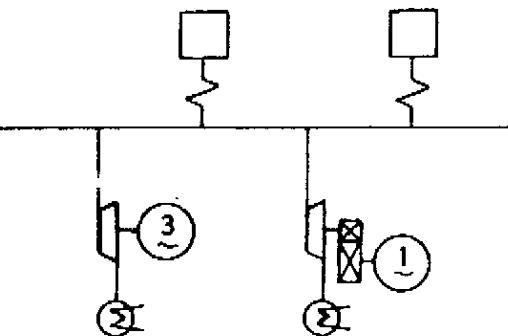
# Energieerzeugung und Energieumformung



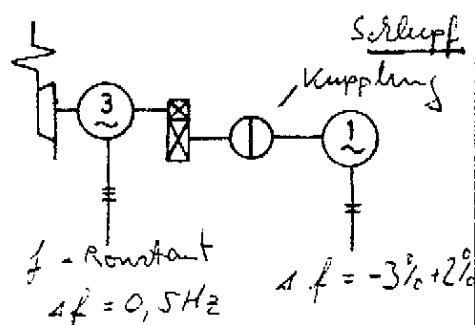
# Energieerzeugung und Energieumformung

## Wärmeschaltbilder für $16\frac{2}{3}$ Hz Bahnstromerzeugung

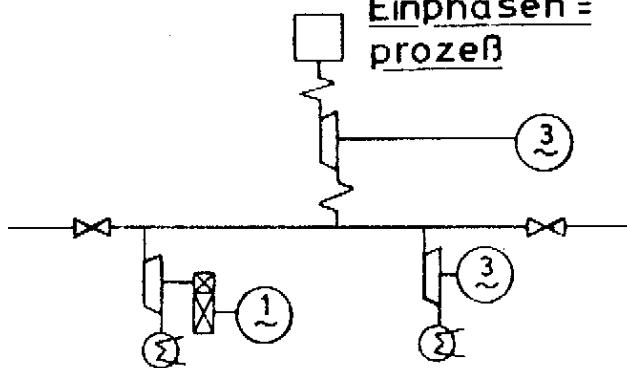
### Dampfsammelschienen - Kraftwerk



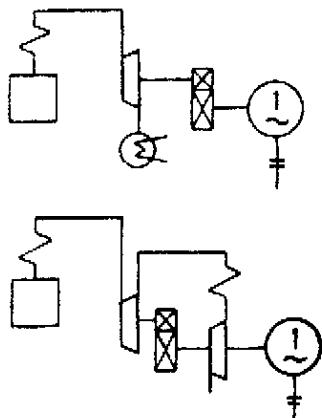
### Nachschatlturbine für Drehstrom und Einphasenprozeß



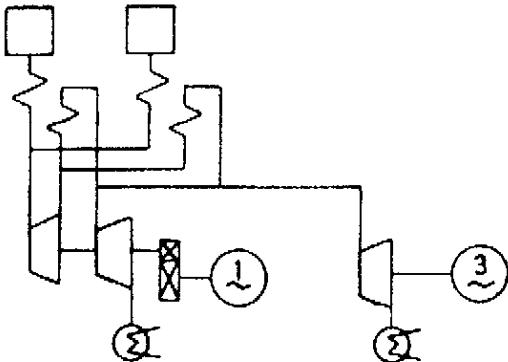
### Kombinierter Drehstrom - Einphasen - prozeß



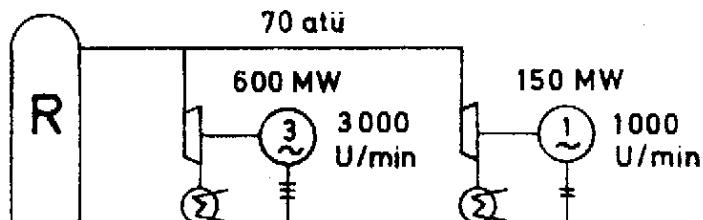
### Reine Blockschaltung für Einphasenerzeugung



### Blockanlage mit 2 Kesseln zur Einphasenerzeugung mit Nachschaltturbine für Drehstrom



### Kernnergie



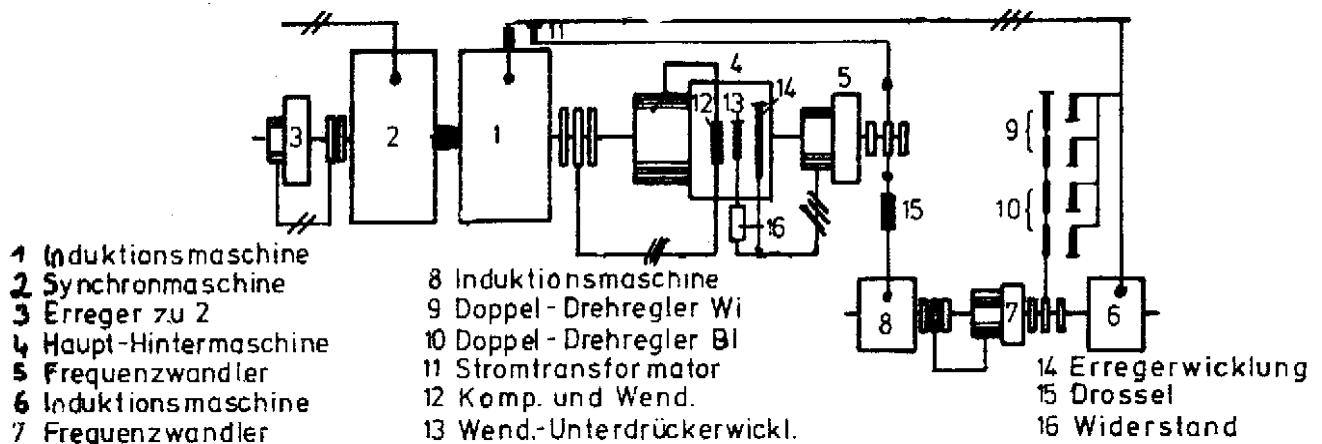
# Energieerzeugung und Energieumformung

Prinzipdarstellung von frequenzelastischen 50Hz/16 2/3 Netzkupplungsumformern

## Historische Lösung mit rotierendem Umformer

16 2/3 Netz (  $\Delta f +2\% / -3\%$  )

50Hz Netz (  $\Delta f +/-0,5\%$  )



## Funktion von frequenzelastischen 50/16<sup>2/3</sup> Hz Netzkupplungsumformern

Bahnseitig:

$$n_{mech} = 60 \frac{f_{Bahn}}{2p_{syn}} \quad \text{Die Synchronmaschine am Bahnnetz } f_{Bahn} \text{ bestimmt die mech. Drehzahl, mit Vollpolläufer } 2 p_{Bahn} = 2 \text{ folgt } n_{mech} = 1000 \text{ U/min } (\Delta n = +20/-30 \text{ U/min})$$

Stellgröße für die Blindleistungsaufnahme der SM im Bahnnetz ist der Erregerstrom der Synchronmaschine, zur Speisung der induktiven Verbraucher wird übererregt.

Landesnetz:

Für die mit  $n_{mech}$  rotierende Asynchronmaschine mit Schleifringen ergibt sich aus

$$s_{ASM} = \frac{n_1 - n_{mech}}{n_1} \quad \text{der Schlupf der Asynchronmaschine am Landesnetz mit } f_1$$

die Polpaarzahl der ASM wird zu  $3 p_{Bahn} = 6$  gewählt, damit ist die synchrone Drehzahl  $n_1 = 1000 \text{ U/min } (\Delta n_1 = +/- 5 \text{ U/min})$

ASMN im MW Bereich erreichen bei  $s = 1\%$  Schlupf ( $n_1 = 990 \text{ U/min}$ ) ihr Nennmoment

$$f_2^{sl} = s f_1 = f_1 - 2 p_{ASM} \frac{n_{mech}}{60} \quad \text{Frequenz der ASM-Läufergrößen an den Schleifringen}$$

eingesetzt  $f_2^{sl} = s f_1 = f_1 - 3 f_{syn}$  d.h. da die Frequenzen beider Netze extern vorgegeben sind muß über die in die Schleifringe eingespeiste Spannung  $\vec{U}_2$  mit der Frequenz  $f_2$  die mechanisch übertragene Wirkleistung abhängig von der aktuellen Frequenzabweichung eingestellt werden.

# Energieerzeugung und Energieumformung

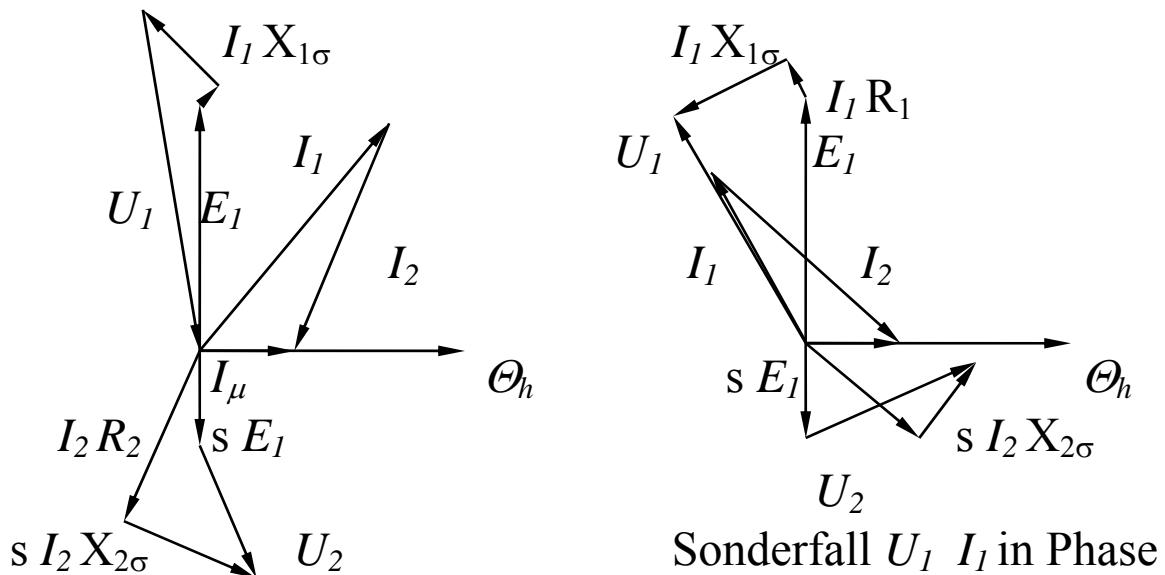
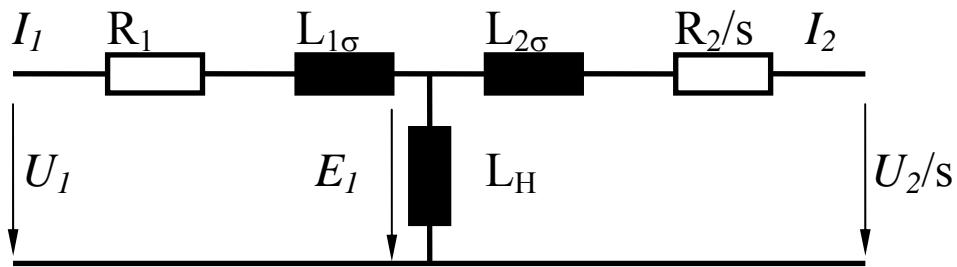
Zur Erzeugung von  $\vec{U}_2$  diente historisch eine dreiphasige Kommutatormaschine, die Hintermaschine (Verstärker) mit Frequenzwandler. Für alle Kommutatormaschinen gilt  $f_2^{Ko} = f_1$  Frequenz der Läufergrößen am 3ph. Kommutator = Stator (Feld)Frequenz

Stellgröße für die Wirkleistungsaufnahme der ASM am Landesnetz ist

$$U_2 = 4,44 \text{ s } f_1 \xi_{res} \Theta_h \quad \text{Amplitude der ASM-Läuferspannung}$$

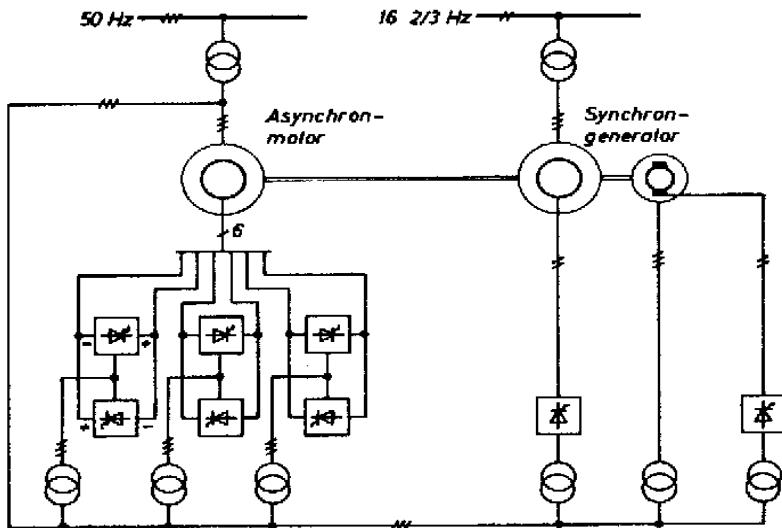
Stellgröße für die Blindleistungsaufnahme der ASM am Landesnetz ist die frei wählbare Phasenlage der komplexen Größe  $\vec{U}_2$

## Ersatzschaltbild der Schleifring Asynchronmaschine und Vektordiagramm



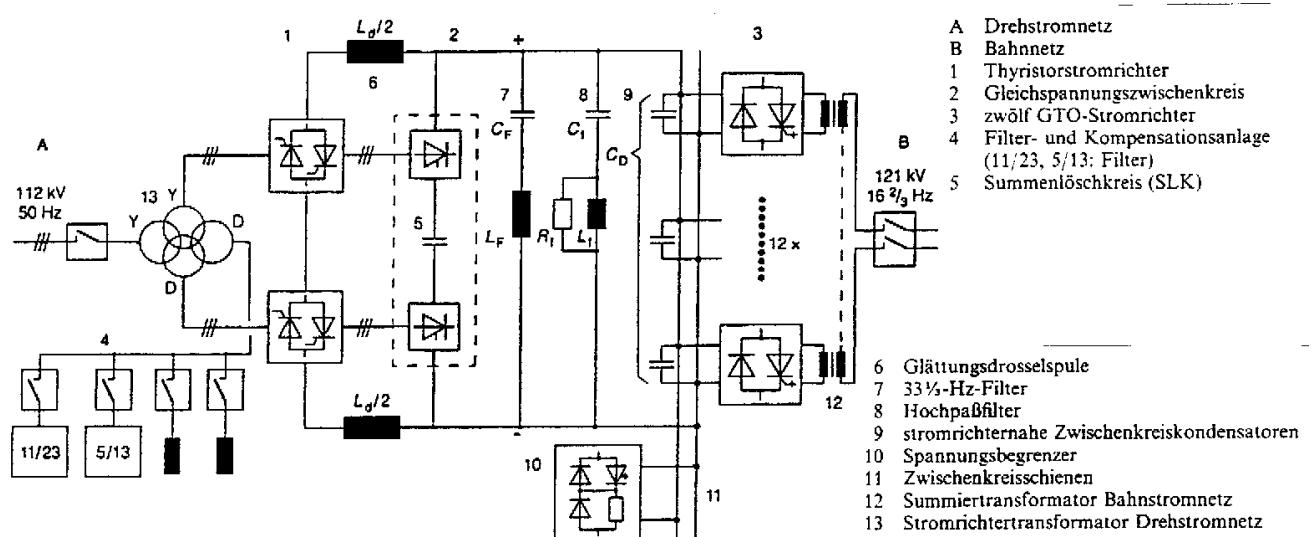
# Energieerzeugung und Energieumformung

## Erzeugung der Läuferspannung $U_2$ durch einen Steuerumrichter



Jeder der drei Stränge der ASM ist mit zwei gegenparallelen, vollgesteuerten B6 Teilstromrichtern verbunden. Es sind daher 6 Schleifringe notwendig. Damit kann jeder Strang in allen 4-Quadranten des  $U_2/I_2$  Kennlinienfeldes betrieben werden. Die Ausgangsfrequenz  $f_2$  ist auf  $0,1 f_1$  begrenzt.

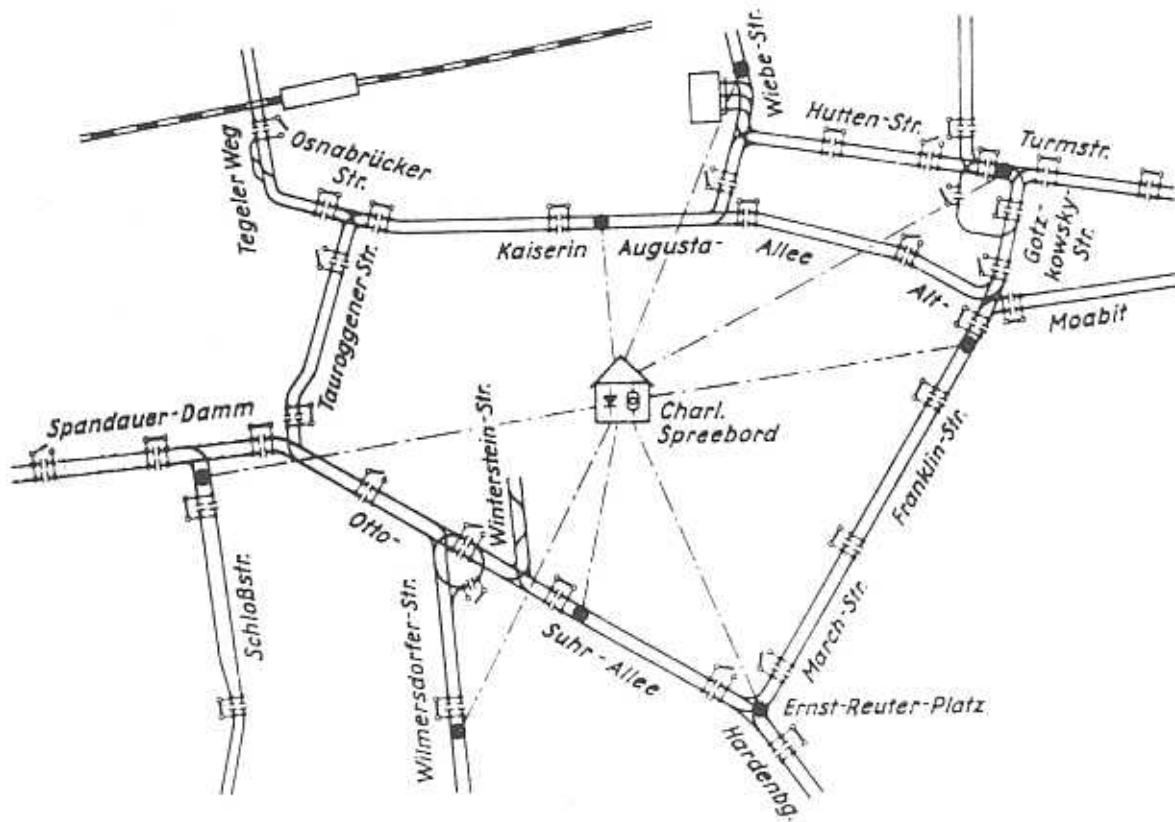
## Vollstatischer 100 MW Frequenzumrichter mit selbstgeföhrtem Stromrichter



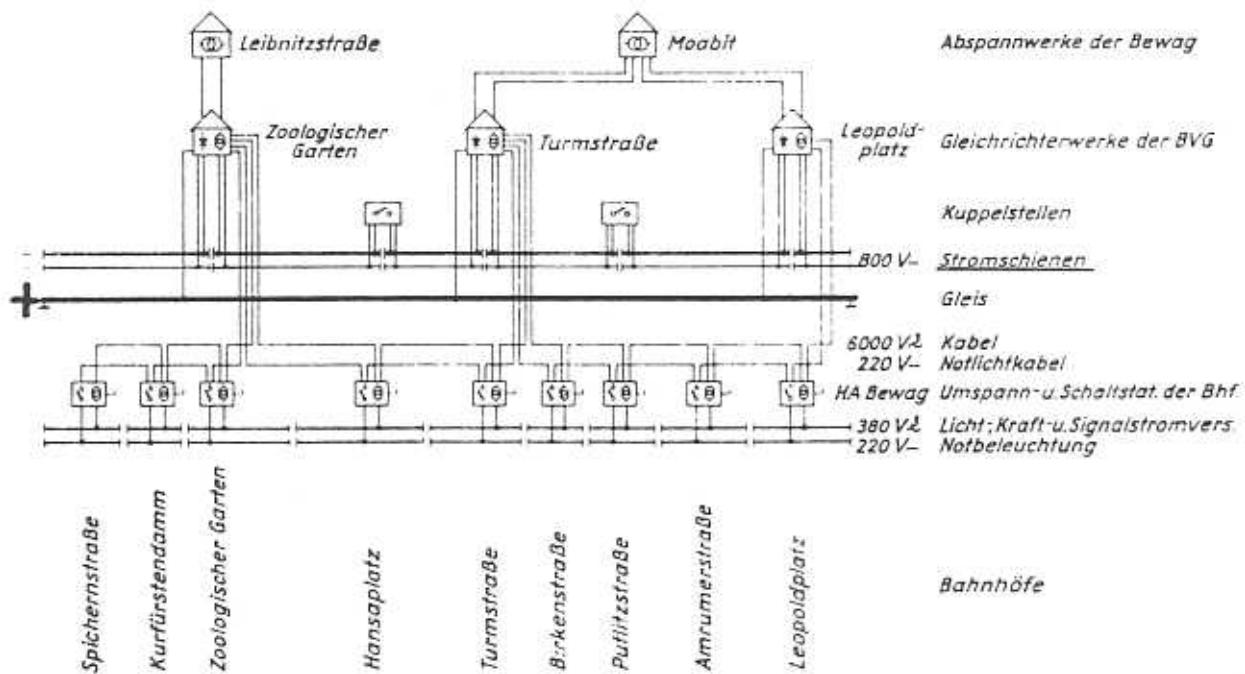
# Energieverteilung

## 2.4.1 Stromversorgung bei Nahverkehrsbahnen

### Straßenbahn



### U-Bahn



# Energieverteilung

## 2.4.2 Dreiphasige Gleichrichterschaltungen für DC-Unterwerke

$s$  Faktor ( Mittelpunktschaltung  $s=1$ , Brückenschaltung  $s=2$ )

$q$  Kommutierungszahl einer Kommutierungsgruppe

$U_{st} = \frac{1}{\sqrt{3}} U_s$  sekundäre Strangspannung (Effektivwert)

$U_{di} = s \frac{q}{\pi} \sqrt{2} U_{st} \sin \frac{\pi}{q}$  ideelle Leerlaufgleichspannung

$U_{Spmax} = \frac{2\pi}{sq} U_{di}$  maximale Sperrspannungsbeanspruchung des Gleichrichters

$S_{Tr} = \frac{1}{2} \sum U_{Tr} I_{Tr}$  Trafobauleistung

$I_{Tr} = \sqrt{\frac{\int_0^T i(t)^2 dt}{T}}$  Trafostrom (Effektivwert des Strangstromes)

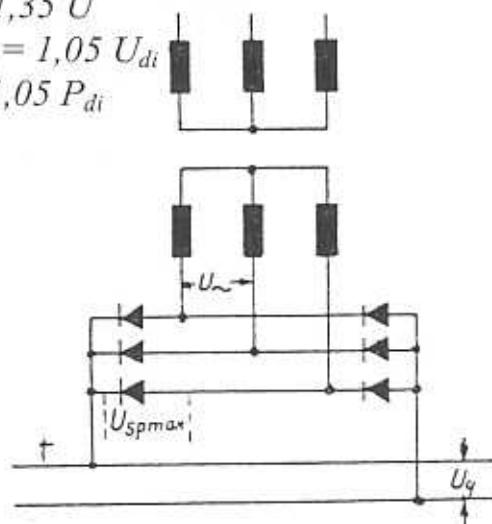
$P_d = U_{di} I_d$  ideelle Gleichstromleistung

### Brückenschaltung (6 pulsig)

$$U_{di} = 1,35 U$$

$$U_{Spmax} = 1,05 U_{di}$$

$$S_{Tr} = 1,05 P_{di}$$

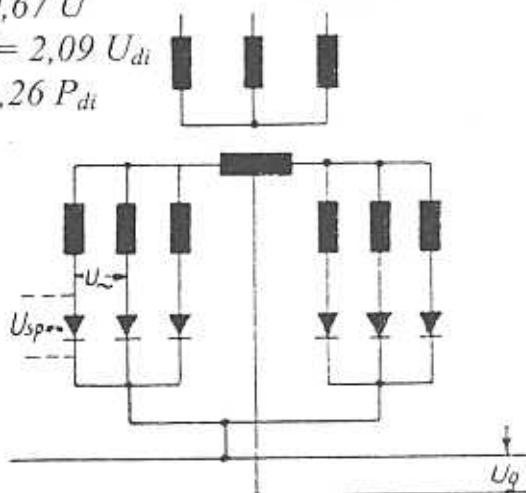


### Saugdrosselschaltung (6 pulsig)

$$U_{di} = 0,67 U$$

$$U_{Spmax} = 2,09 U_{di}$$

$$S_{Tr} = 1,26 P_{di}$$

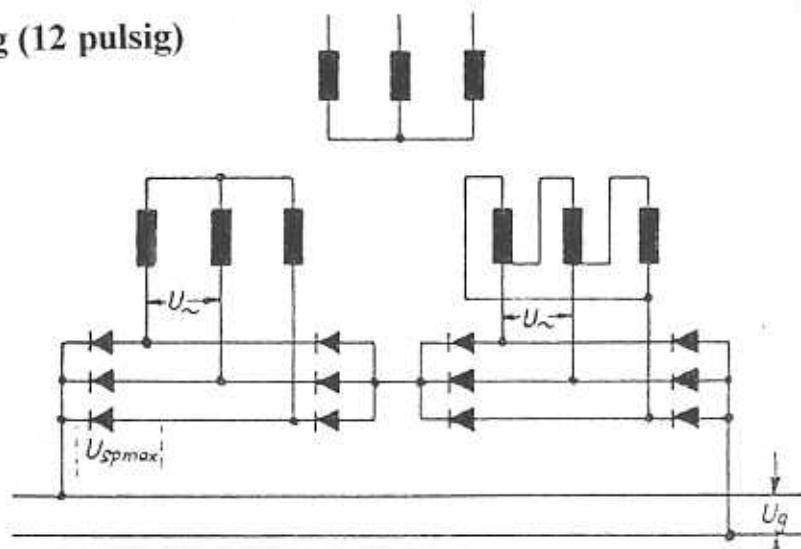


### Brückenserienenschaltung (12 pulsig)

$$U_{di} = 2,70 U$$

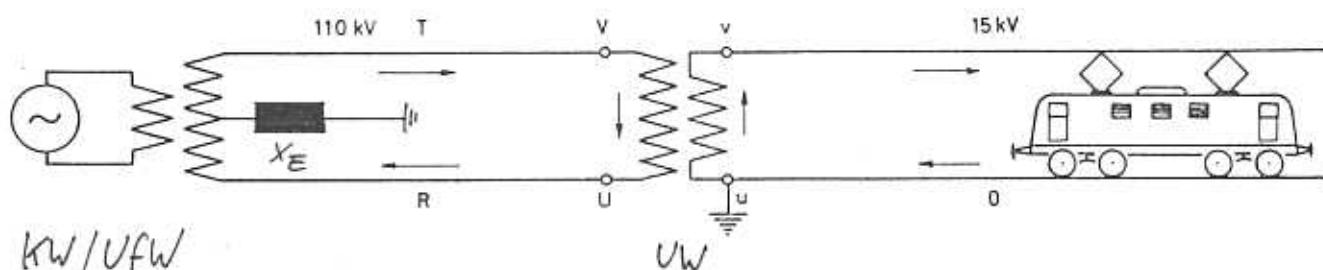
$$U_{Spmax} = 0,52 U_{di}$$

$$S_{Tr} = 1,05 P_{di}$$



# Energieverteilung

## 2.4.3 Stromverlauf im Bahnstromnetz



### Freileitungen im bahneigenen Netz

Spannungsebene 110kV jeweils 55kV gegen Erde

Doppelleitungen auf einem Mast

Erdschlußkompensation mit Löschspule  $X_E$  zur Kompensation der Leiter/Erdkapazitäten

### Auslegung der Unterwerke bei $16 \frac{2}{3}$ Hz Einphasenwechselstrom

Kriterien:

$$1.) \quad l = \frac{P_d C_s}{W_{UW}^h C_s} \quad \text{Speiselänge als Funktion der Einbauleistung}$$

$$2.) \quad \Delta U = I_{Fd} Z' l \frac{\sum n_{TFZ}}{n_{TFZ}} \quad \text{Spannungsabfall in der Fahrleitung}$$

$$I_{Fd} = \frac{P_{\max}}{U_{nenn} \cos \varphi} \quad \text{Strom in der Fahrleitung}$$

$$C_v = \frac{\sum n_{TFZ}}{n_{TFZ}} \quad \text{Verteilfaktor (n=1; } C_v=1, n=\infty C_v=0,5)$$

$$\frac{Z}{l} = z' = r_t + j 2\pi f l \quad \text{Impedanzbelag der Fahrleitung je km f(Geometrie)}$$

$$l = \frac{\Delta U U_{nenn} n_{Gl}}{P_{\max} z' C_v} \quad \text{Speiselänge als Funktion der Spannungsabfalles}$$

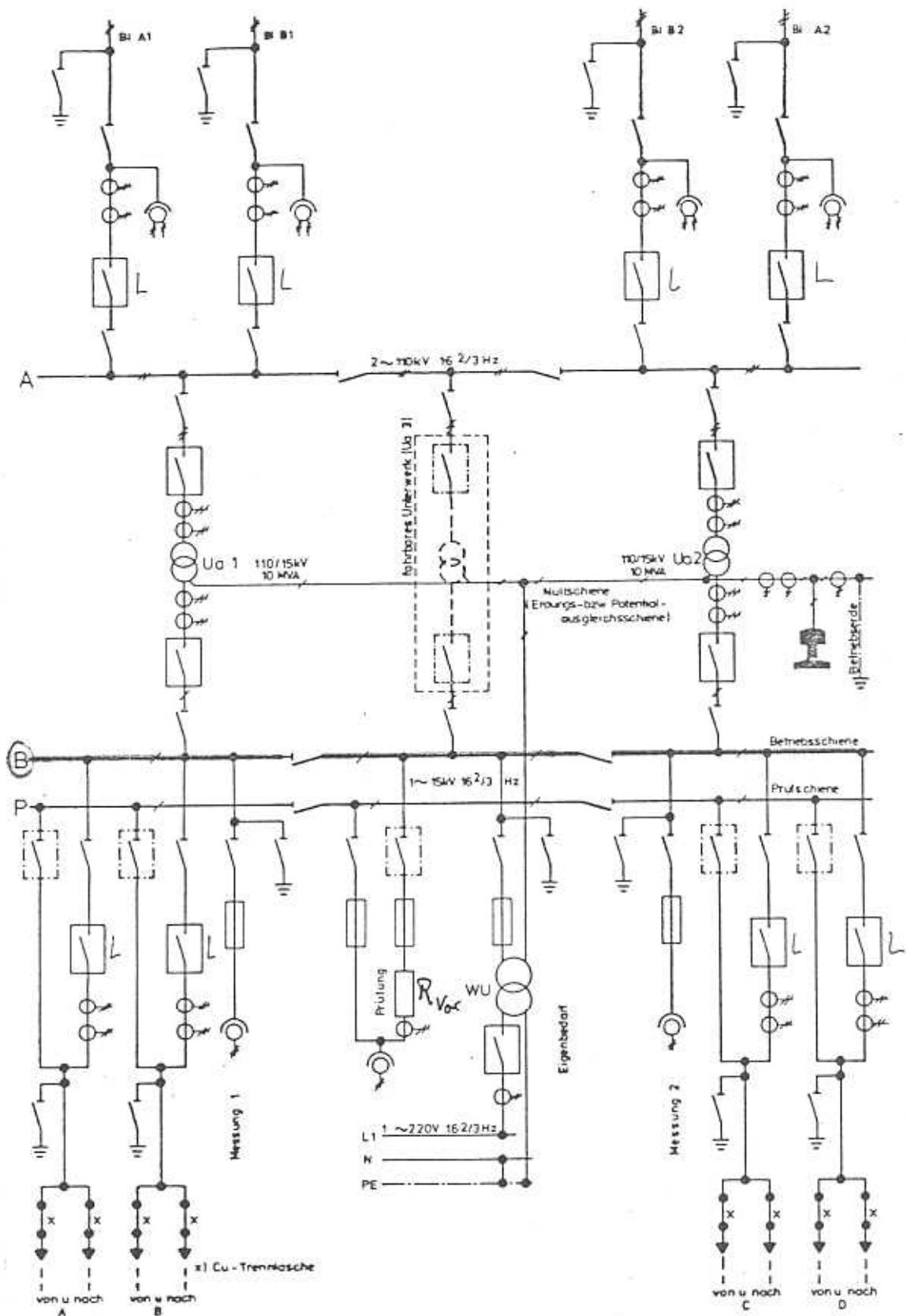
3.) Strombelastbarkeit der Fahrleitung und evt. Verstärkungsleitungen

$$l = \frac{l_{quer} U_{nenn} \cos \varphi}{W_{UW}^h C_s} \quad \text{Speiselänge als Funktion der zulässigen Stromdichte}$$

Quer- und Längskupplungen vorteilhaft aber aufwendig (Schalter)

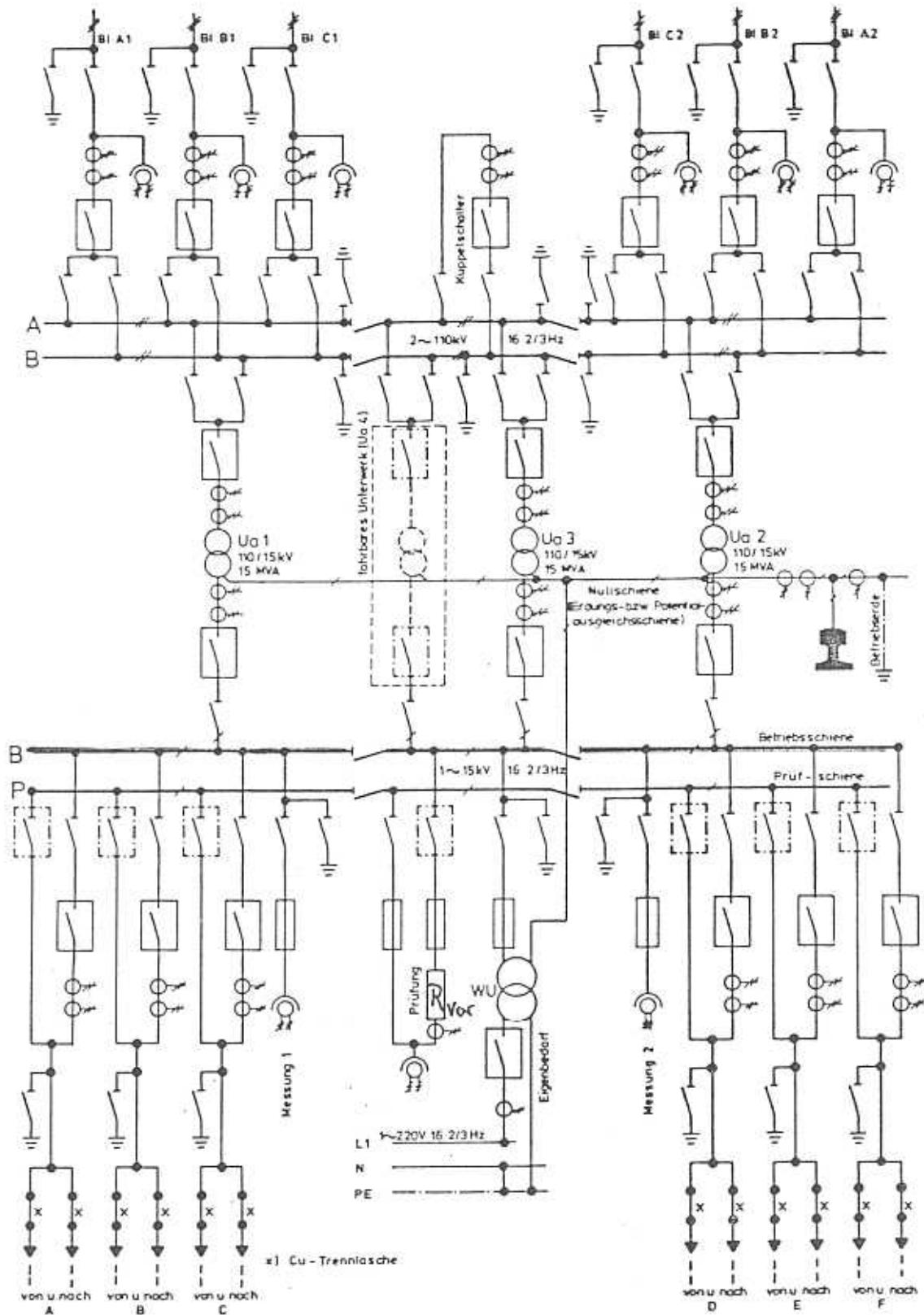
# Energieverteilung

Übersichtsschaltplan eines kleineren Unterwerkes für  
16 2/3 Hz Einphasen-Wechselstrom



# Energieverteilung

Übersichtsschaltplan eines größeren Unterwerkes für  
16 2/3 Hz Einphasen-Wechselstrom

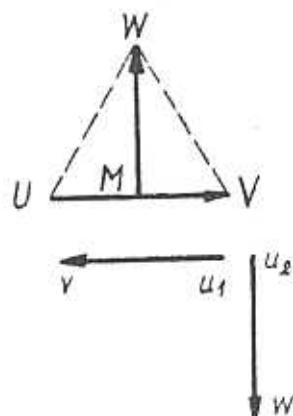
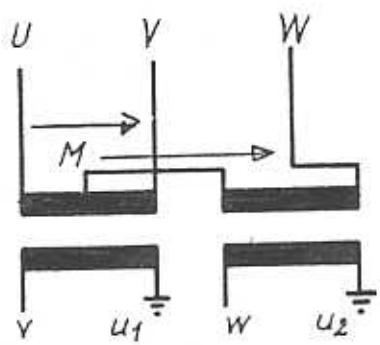


# Energieverteilung

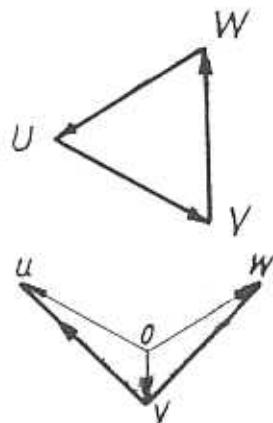
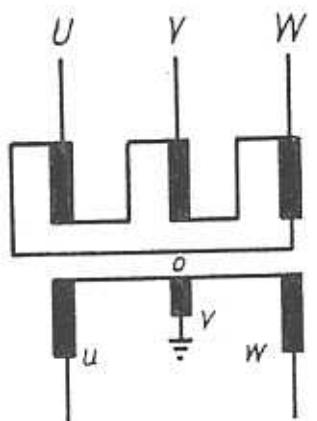
## 2.4.4 Grundschatungen zur 50 Hz Bahnspeisung aus dem Drehstrom Landesnetz

Ziel ist mit 2 einphasigen, gleich großen Lastströmen in der Fahrleitung eine konstante Last im dreiphasigen Netz zu erzeugen. Dazu müssen die Ausgangsgrößen ein Orthogonalsystem bilden.

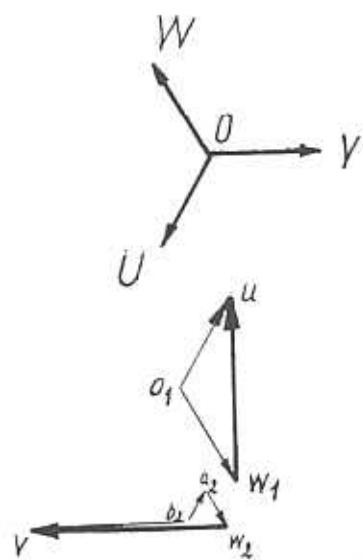
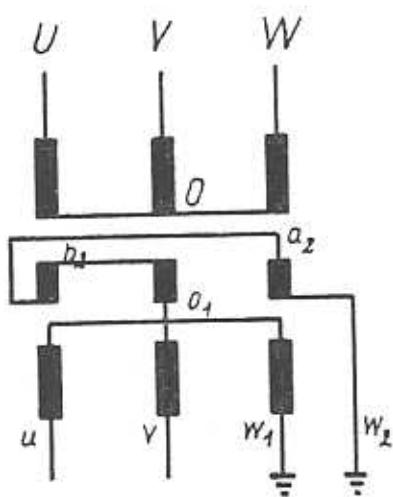
### Scottschaltung



### Drei/Zweiphasenschaltung



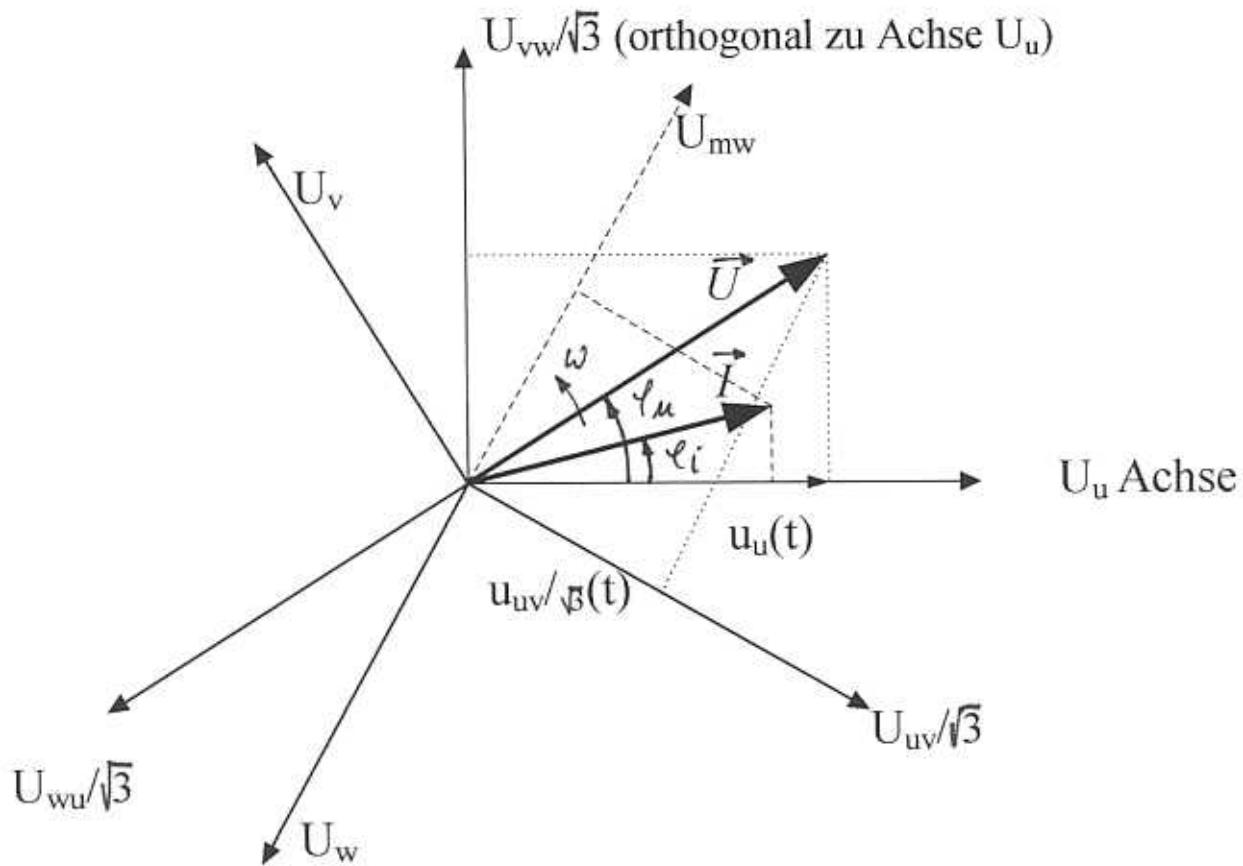
### Leblanc-Schaltung



# Energieverteilung

Ableitung der Schaltungskonfigurationen über die Raumzeigerdarstellung

Im stationären Fall gilt:  $\vec{U} = U e^{j(wt + \varphi_u)}$



Die Strangspannungen werden durch Projektion des umlaufenden Raumzeigers auf die jeweilige Achse dargestellt,

$$u_u(t) = \operatorname{Re} \{ \vec{U} \} = U \cos(wt + \varphi_u)$$

$$u_v(t) = \operatorname{Re} \left\{ \vec{U} e^{j(-2\pi/3)} \right\} = \operatorname{Re} \left\{ U e^{j(wt + \varphi_u - 2\pi/3)} \right\}$$

$$u_w(t) = \operatorname{Re} \left\{ \vec{U} e^{j(+2\pi/3)} \right\} = \operatorname{Re} \left\{ U e^{j(wt + \varphi_u + 2\pi/3)} \right\}$$

für die verketteten Spannungen folgt mit:  $\vec{U}_{uv} = \vec{U}_u - \vec{U}_v$

$$u_{uv}(t) = \operatorname{Re} \left\{ \sqrt{3} U e^{j(wt + \varphi_u + \pi/6)} \right\}$$

$$u_{vw}(t) = \operatorname{Re} \left\{ \sqrt{3} U e^{j(wt + \varphi_u - \pi/2)} \right\}$$

$$u_{wu}(t) = \operatorname{Re} \left\{ \sqrt{3} U e^{j(wt + \varphi_u + 5\pi/6)} \right\}$$

# Energieverteilung

**Das Drehstromsystem wird in Orthogonalkomponenten zerlegt.**

$$u_u(t) = \operatorname{Re} \{\vec{U}\} = U \cos(wt + \varphi_u) \quad \text{Realkomponente}$$

$$u_h(t) = \operatorname{Im} \{\vec{U}\} = U \sin(wt + \varphi_u) \quad \text{Imaginärkomponente}$$

Im stationären Fall unter der Voraussetzung gleicher Wirk- und Blindleistungsaufnahme der Lastseite gilt:  $\vec{I} = I e^{j(wt + \varphi_i)}$  mit

$$i_u(t) = \operatorname{Re} \{\vec{I}\} = I \cos(wt + \varphi_i)$$

$$i_h(t) = \operatorname{Im} \{\vec{I}\} = I \sin(wt + \varphi_i)$$

damit ist der zeitliche Verlauf der Leistung

$$P(t) = \frac{3}{2} \operatorname{Re} \{\vec{U} \cdot \vec{I}\} = \frac{3}{2} \operatorname{Re} \left\{ U e^{j(wt + \varphi_u)} I e^{-j(wt + \varphi_i)} \right\} = \frac{3}{2} U I \cos(\varphi_u - \varphi_i)$$

**Scott Trafo** Der frei wählbare Winkel  $\varphi_u$  wird  $-\pi/6$  gesetzt

$$\vec{U}_{uv} = \ddot{u}_B \vec{U}_{uv}^p = \ddot{u}_B \sqrt{3} U e^{j(wt)}$$

$$\vec{U}_{mw} = \ddot{u}_H \vec{U}_{mw}^p = \ddot{u}_H \frac{3}{2} U e^{j(wt - \pi/2)}$$

damit ergibt sich das Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u}_H = \ddot{u}_B \frac{2}{\sqrt{3}}$ , da die Höhenwicklung an kleinerer Primärspannung liegt, beträgt die Windungszahl  $w_{MW}$  nur  $\frac{\sqrt{3}}{2}$  von  $w_{UV}$ .

**Drei/Zweiphasenschaltung**

$$\vec{U}_{uu} = -\ddot{u} \vec{U}_{uv}^p = -\ddot{u} \sqrt{3} U e^{j(wt)}$$

$$\vec{U}_{uw} = -\ddot{u} \vec{U}_{wu}^p = -\ddot{u} \sqrt{3} U e^{j(wt + 2\pi/3)}$$

$$\vec{U}_{vv} = -\ddot{u} k \vec{U}_{vw}^p = -\ddot{u} k \sqrt{3} U e^{j(wt - 2\pi/3)}$$

aus einfachen geometrischen Überlegungen folgt:  $k = \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1}{2} = 0,366$

**Leblanc Schaltung** (hier  $\varphi_u = -\pi/3$ )

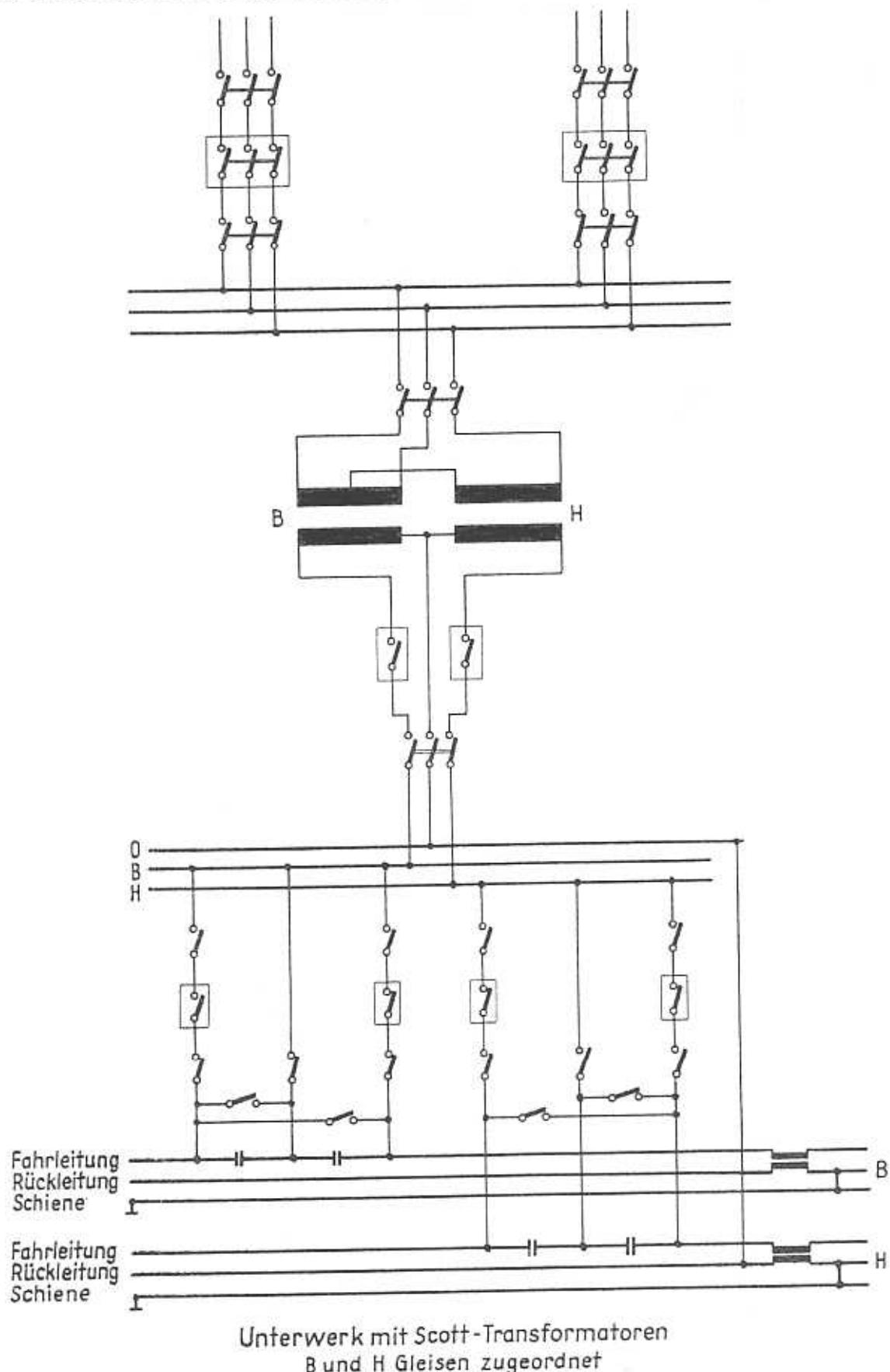
$$\vec{U}_{w1u} = -\ddot{u} \vec{U}_{wu}^p = -\ddot{u} \sqrt{3} U e^{j(wt + \pi/2)}$$

$$\vec{U}_{w2v} = -\ddot{u} \vec{U}_v^p + k (\vec{U}_v^p - \vec{U}_u^p + \vec{U}_w^p) = -\ddot{u} \sqrt{3} U e^{j(wt)}$$

durch Amplitudenvergleich folgt:  $\ddot{u} \sqrt{3} = \ddot{u} + 2k \quad k = \frac{(\sqrt{3} - 1)}{2} = 0,366$

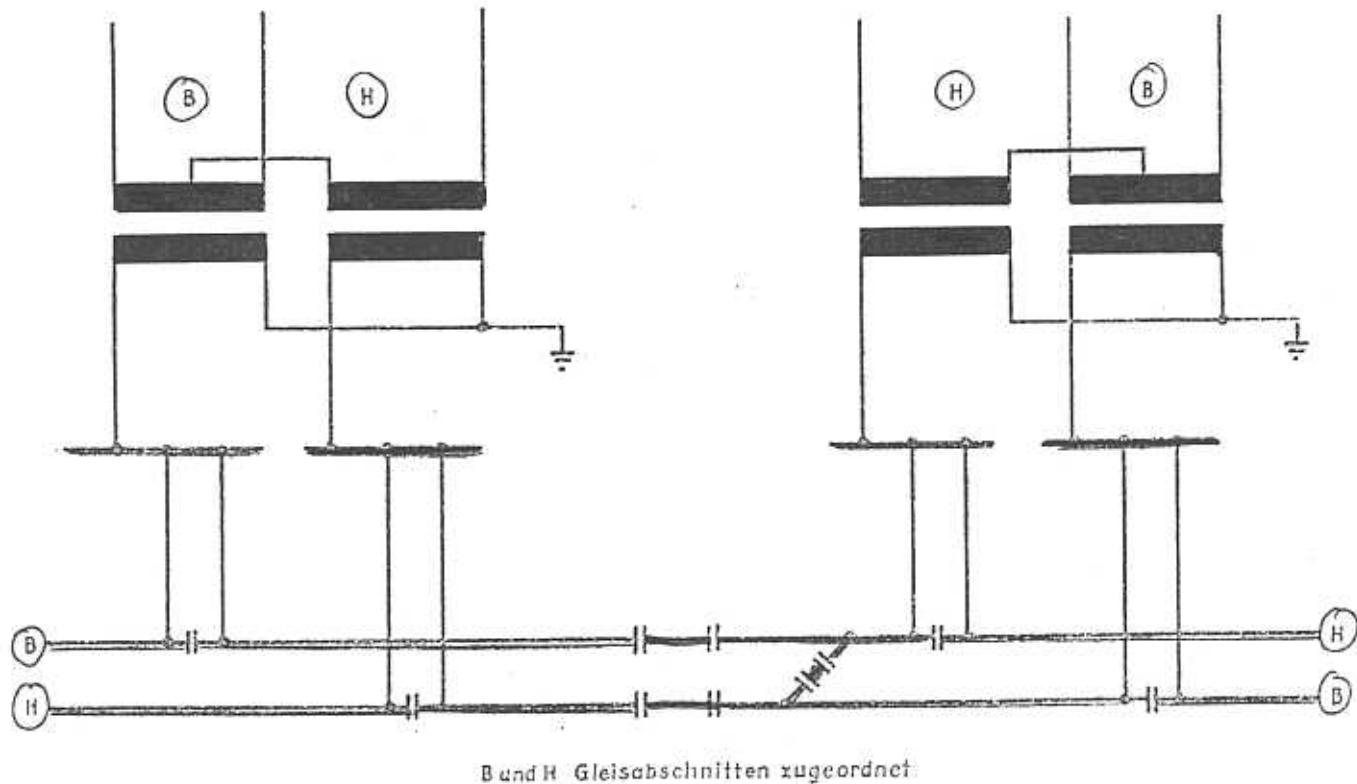
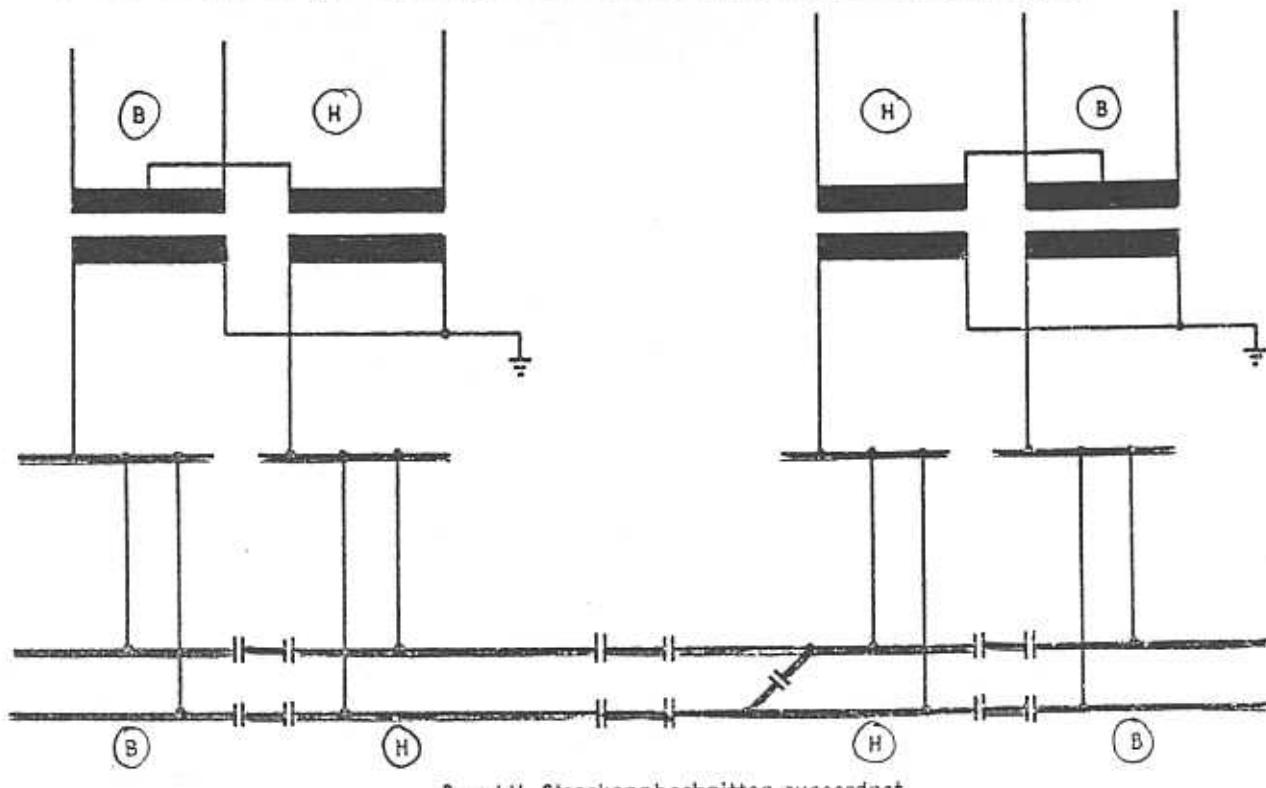
# Energieverteilung

## 50Hz Unterwerk mit Scott-Transformator



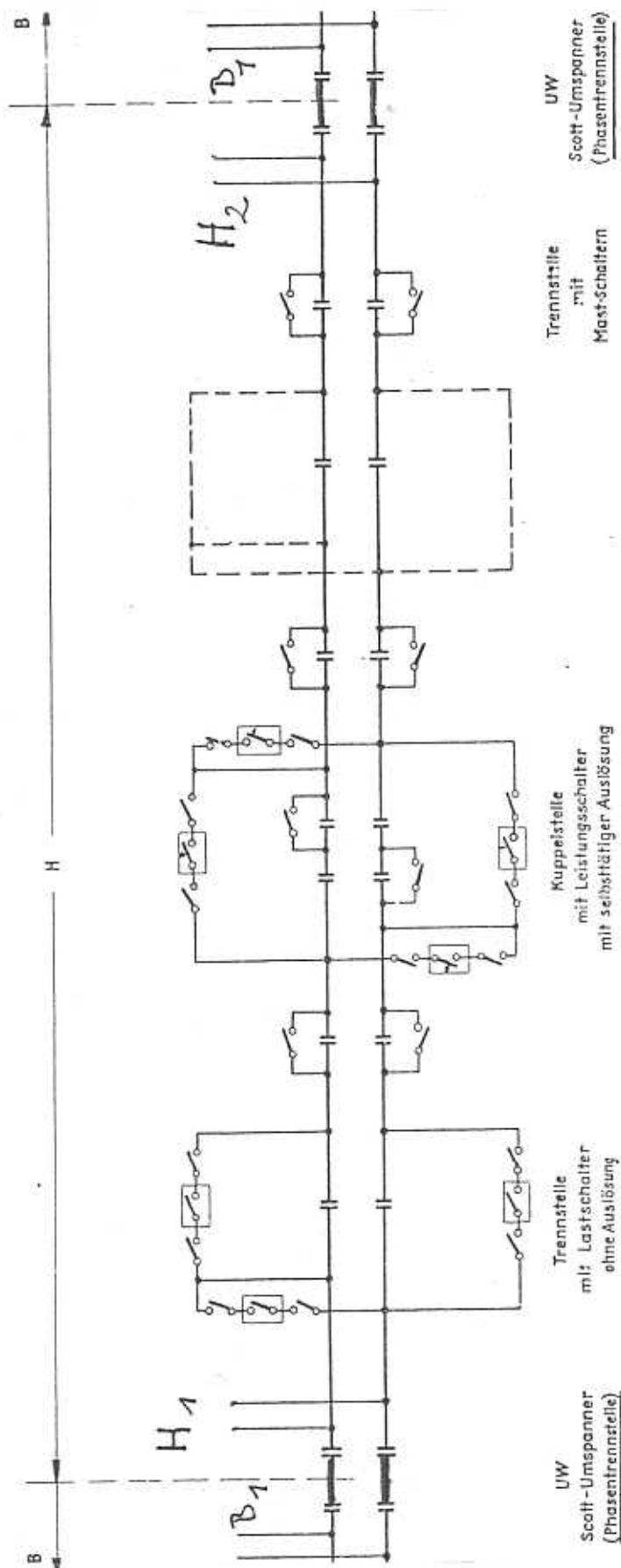
# Energieverteilung

Streckenspeisung mit Scott-Transformatoren und Phasenwechsel



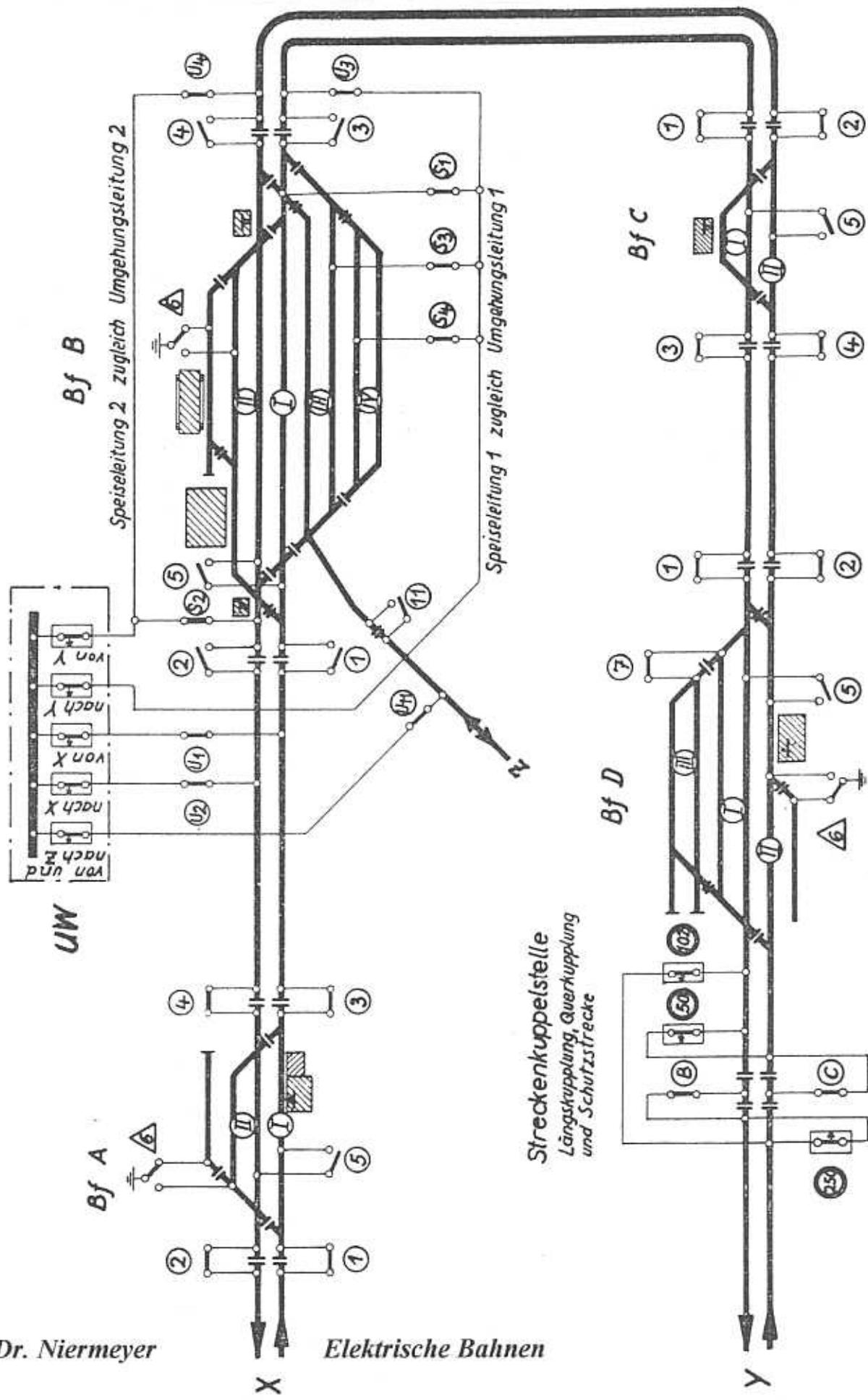
# Energieverteilung

Erweiterte Streckenspeisung mit Scott-Transformatoren und Phasenwechsel



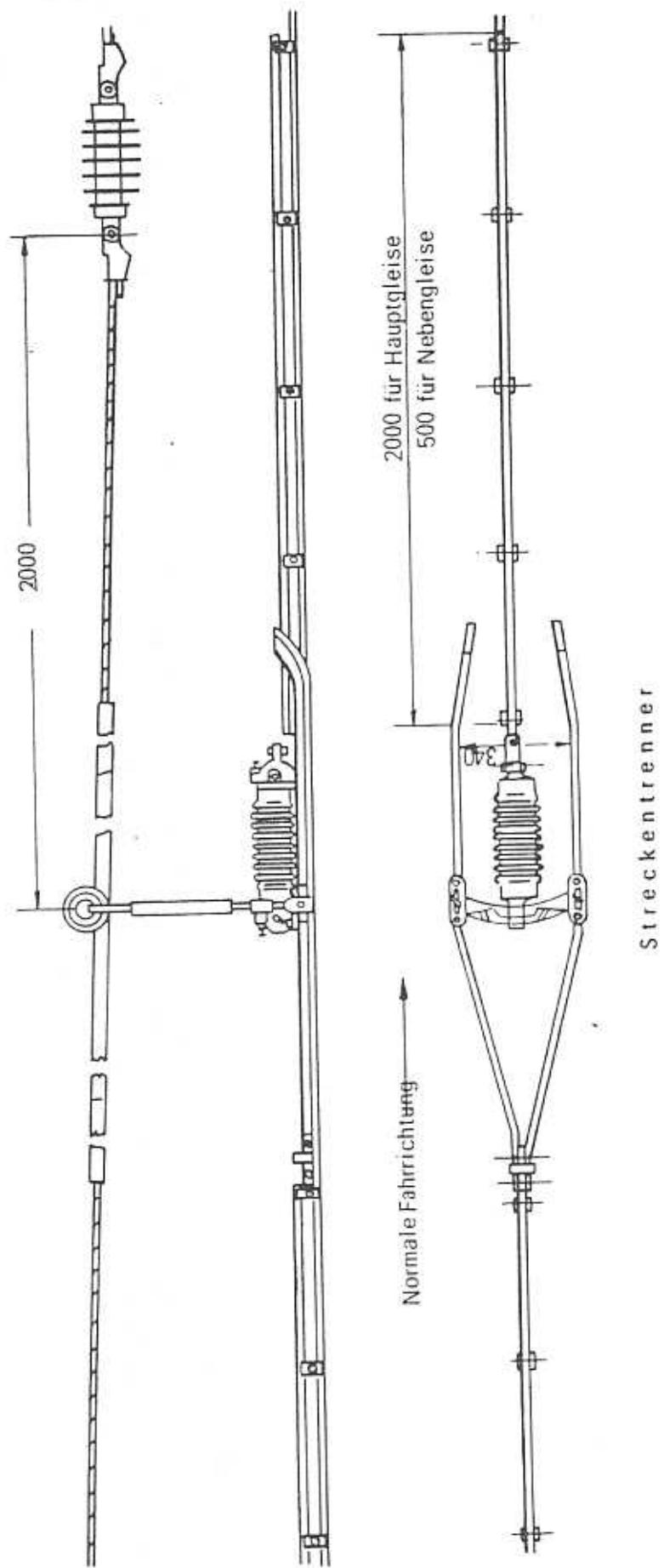
# Fahrleitungen

## 2.5.1 Schaltung der Fahrleitung bei 16 2/3 Hz Bahnnetspeisung

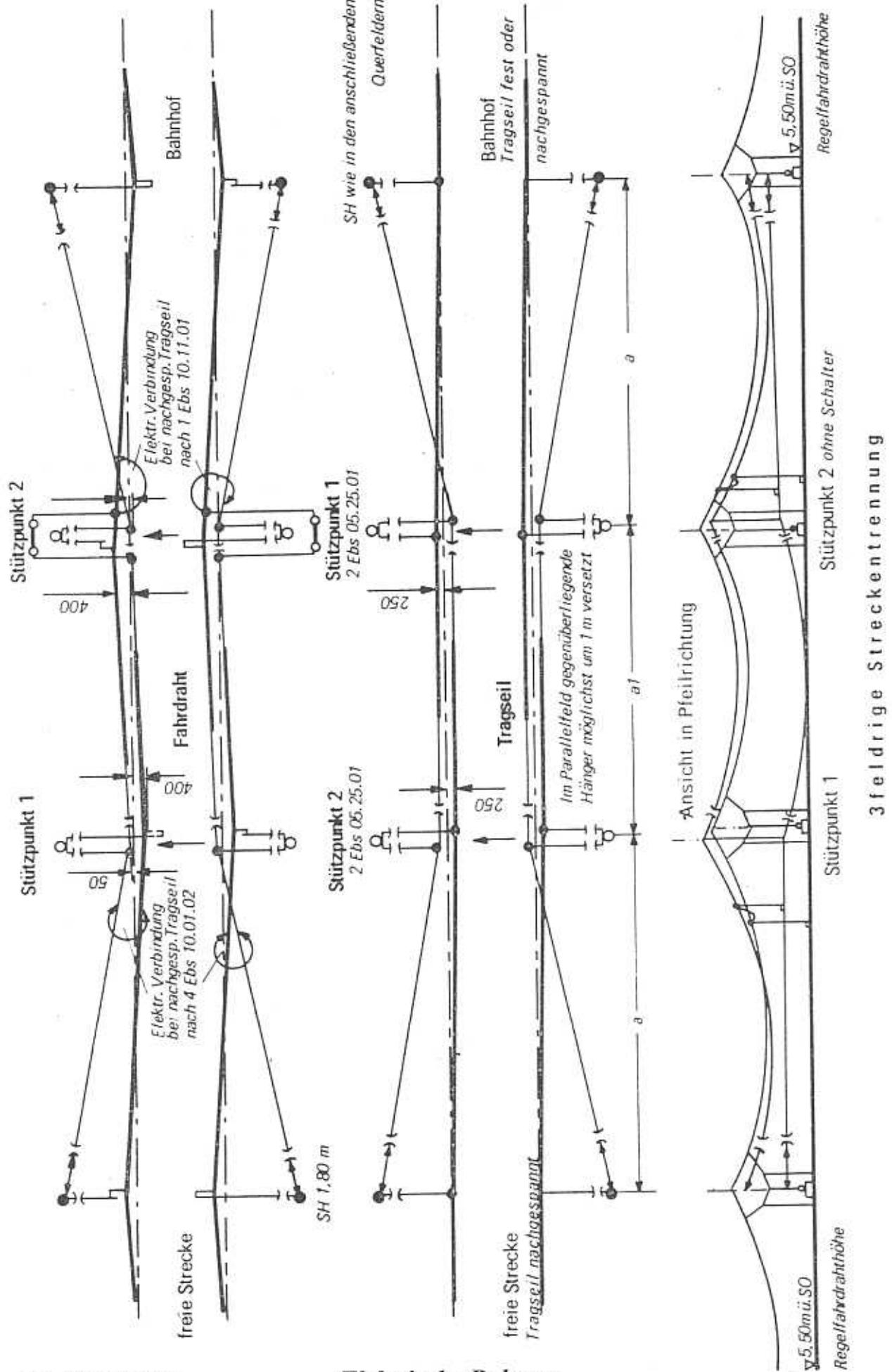


# Fahrleitungen

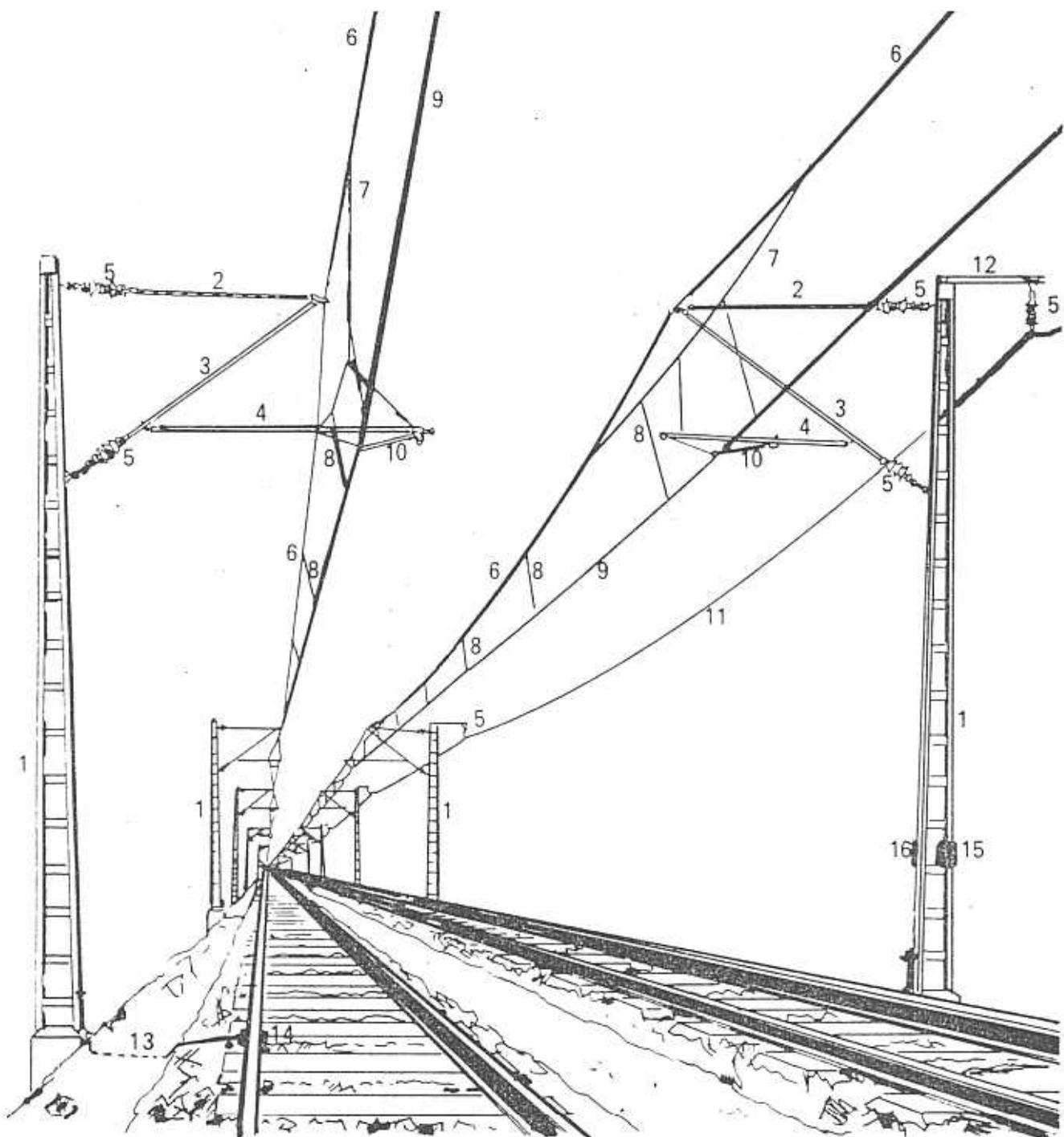
Streckentrenner



# Fahrleitungen



# Fahrleitungen

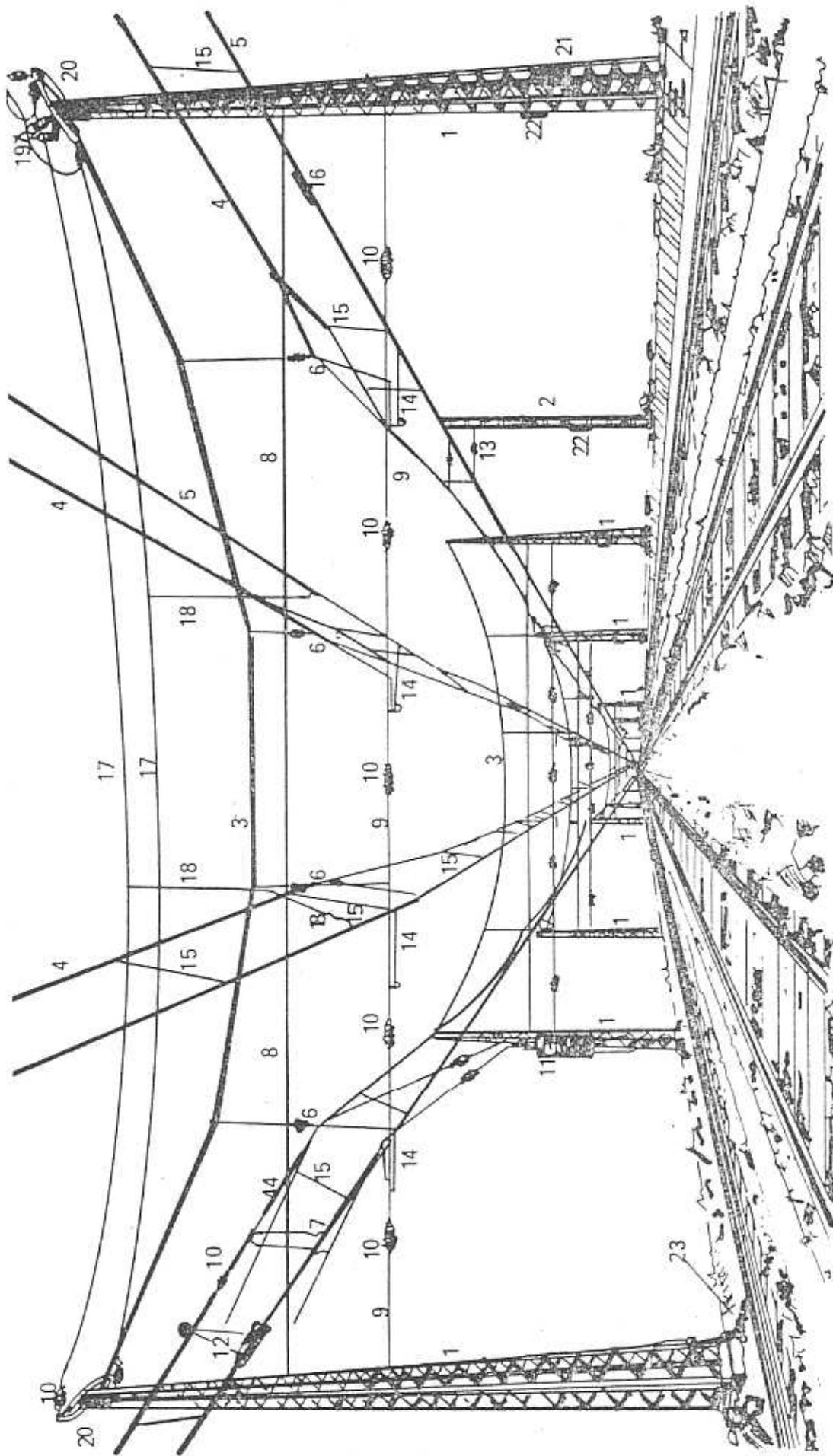


Fahrleitung der freien Strecke  
Einzelmaste mit Schwenkauslegern

- |                                |   |
|--------------------------------|---|
| 1) Flachmast                   | 9) Fahrdräht                              |
| 2) Auslegerzugseil (oder Rohr) | 10) Seitenhalter                          |
| 3) Auslegerrohr                | 11) Speiseleitung                         |
| 4) Auslegerstützrohr           | 12) Speiseleitungsausleger                |
| 5) Isolator                    | 13) Masterdung (im Erdboden bzw Schotter) |
| 6) Tragseil                    | 14) Schienenfußerdungsklemme              |
| 7) Y - Seil                    | 15) Richtungsschild für Speiseleitung     |
| 8) Hänger                      | 16) Mastnummernschild (z.B. 8/11)         |

km lfd Nr

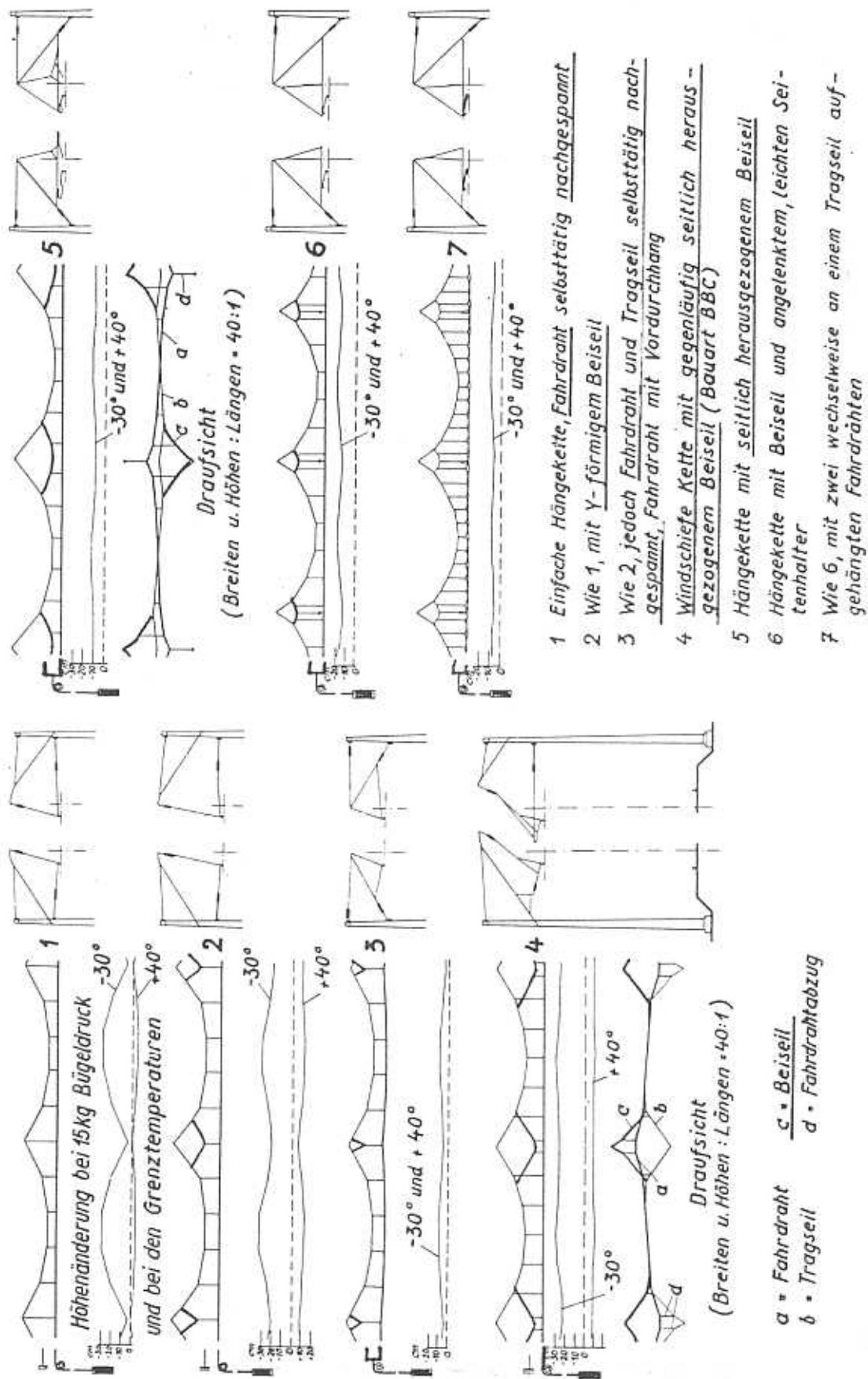
# Fahrleitungen



Fahrleitung im Bahnhof Rechteckmaste mit Quertragewerken

# Fahrleitungen

## 2.5.2 Vollbahnhofsfahrleitungen, Kettenwerke und Stützpunkte



# Fahrleitungen

## 2.5.3 Auslegungskriterien von Fahrleitungen

Verschleißfestigkeit (DB 2 Mio. Stromabnehmerdurchgänge, 30a)

Lichtbogenfreier Betrieb

Kurzschlußfestigkeit

Hohe Leitfähigkeit und Stromtragfähigkeit

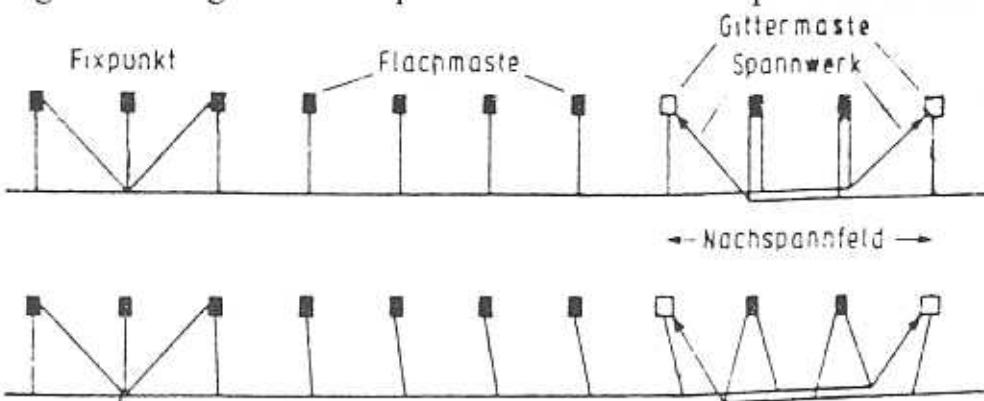
Entgleisungssicherheit des Stromabnehmers

Gute dynamische Eigenschaften, hohe Wellenausbreitungsgeschwindigkeit

Gleichmäßige Elastizität  $\epsilon = \frac{F_{ad}}{\Delta d}$  auch an den Stützstellen

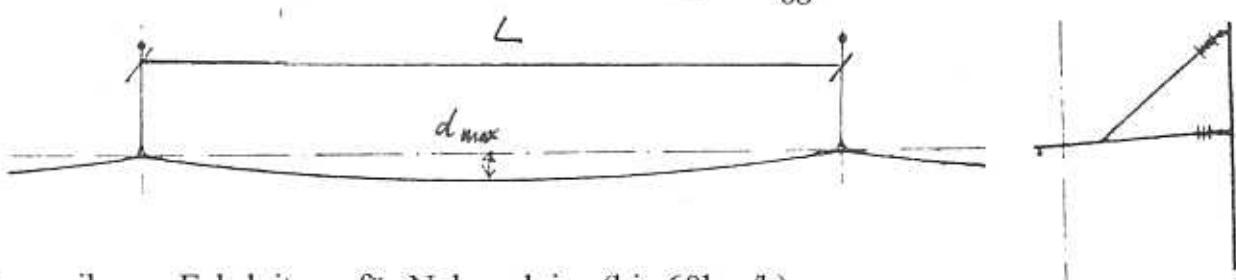
Beherrschung des Windabtriebes  $\varepsilon_{wind} = \frac{P_{wind} L}{8\sigma}$  durch windschiefes Aufhängen

Längenänderung durch Temperatureinfluß muß kompensiert werden

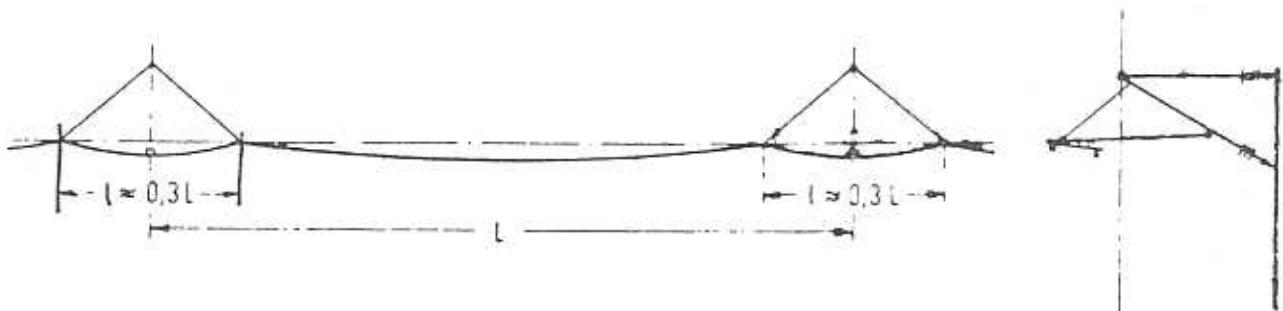


Einfacher Kettenwerksaufbau mit möglichst großen Spannweiten

Durchhang einer tragseillosen Fahrleitung  $d_{max} = \frac{G_{Fd} L}{8\sigma}$



Tragseilarme Fahrleitung für Nebengleise (bis 60km/h)



## Fahrleitungen

### 2.5.3 Die Regelfahrleitungen der Deutschen Bahn und HGV Oberleitungen

Bauart	Re75	Re100	Re160	Re200	Re250	SNCF Paris-Lyon	Shinkansen Tokio-Osaka	FS
Aufbau	Tragseil fest	Tragseil nachgespannt	Tragseil nachgespannt					
Nachspannung			3 Felder	3 Felder	5 Felder	4 Felder		
Fahrdrahthöhe	m	5,50	5,50	5,50	5,30	5,00		4,85
Systemhöhe	m	1,80	1,80	1,80	1,80	1,40	1,50	1,80
Feldlänge	m		80	80	65	63	50	60
Fahrdräht	Cu	100mm <sup>2</sup>	100mm <sup>2</sup>	100mm <sup>2</sup>	120mm <sup>2</sup>	120mm <sup>2</sup>	170mm <sup>2</sup>	2*150mm <sup>2</sup>
Tragseil	BzII	50mm <sup>2</sup>	50mm <sup>2</sup>	50mm <sup>2</sup>	BzII	BzII	Cu	Cu
Hänger	BzII	10mm <sup>2</sup>	10mm <sup>2</sup>	10mm <sup>2</sup>	BzII	BzII	BzII	BzII
Beiseil				25mm <sup>2</sup>	25mm <sup>2</sup>	25mm <sup>2</sup>	150mm <sup>2</sup>	35mm <sup>2</sup>
Länge des Beiseils	m	ohne	ohne	12	18	18	16	ohne Beiseil
Zugspannung	N/mm <sup>2</sup>	100	100	100	100	125	116	100
Fahrdräht	N/mm <sup>2</sup>	200	200	200	215	215	140	100
Tragseil	N/mm <sup>2</sup>		230	230	100	160	100	-
Beiseil	mm	0-30	0-30	0-30	0-5	65	50	60
Vordurchhang	mm/N	0,8	0,95	0,95	0,55	0,7	0,3	0,35
mittlere Elastizität	%	50	26	16	9			
Ungleichförmigkeit	km/h				426	411	355	422
Wellenausbreitungs-geschwindigkeit					Elektro Kohle	Elektro Kohle	Stahl	Kupfer
Schleifstück								

# Fahrleitungen

Darstellung der Regelfahrleitungen der DB

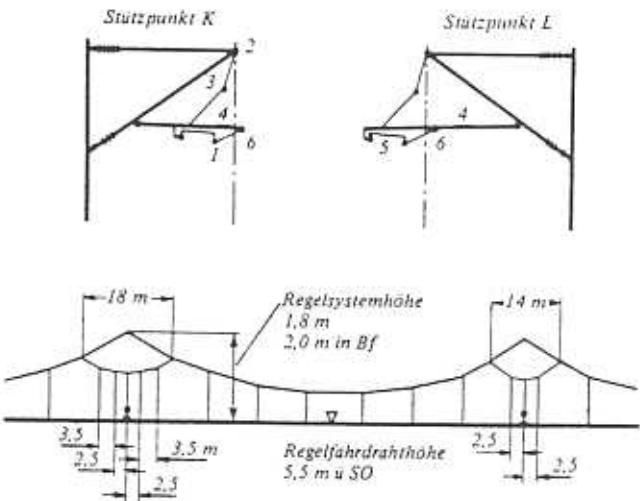
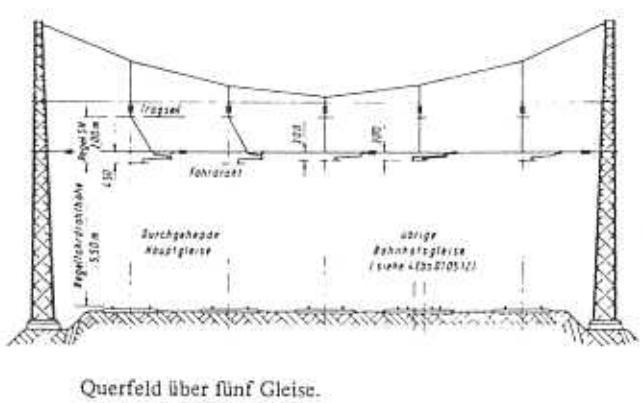
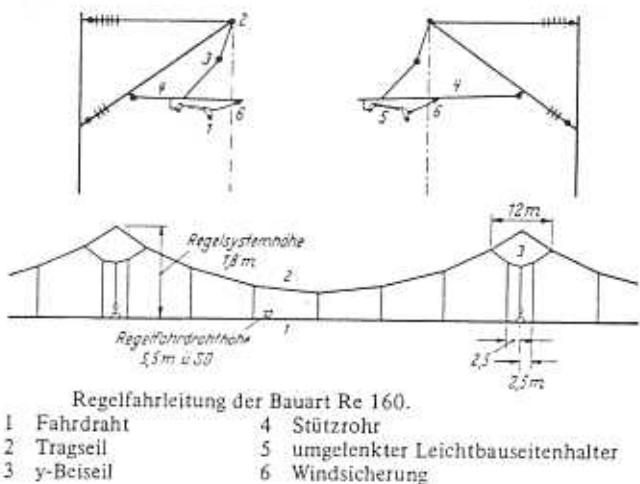
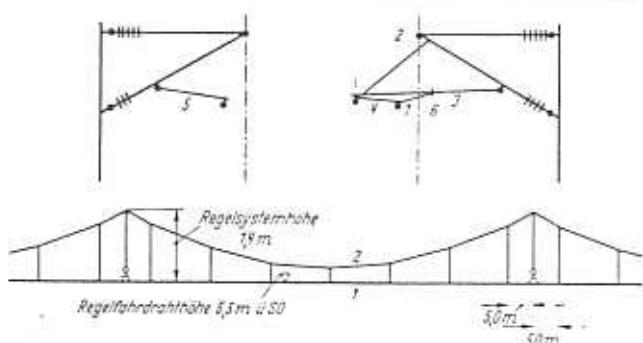
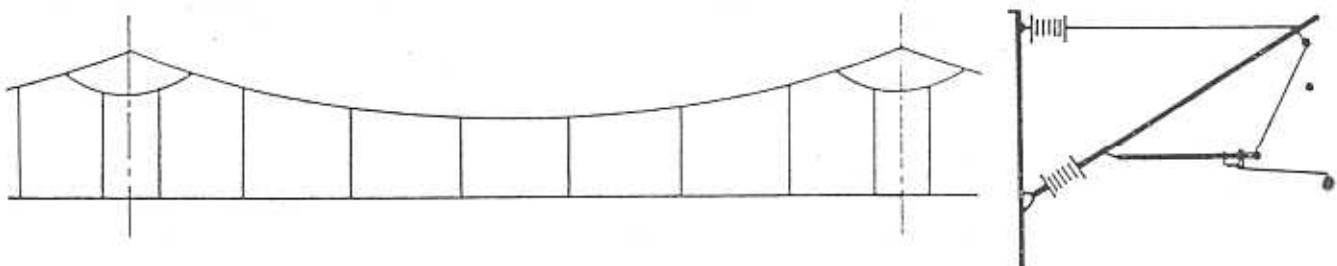
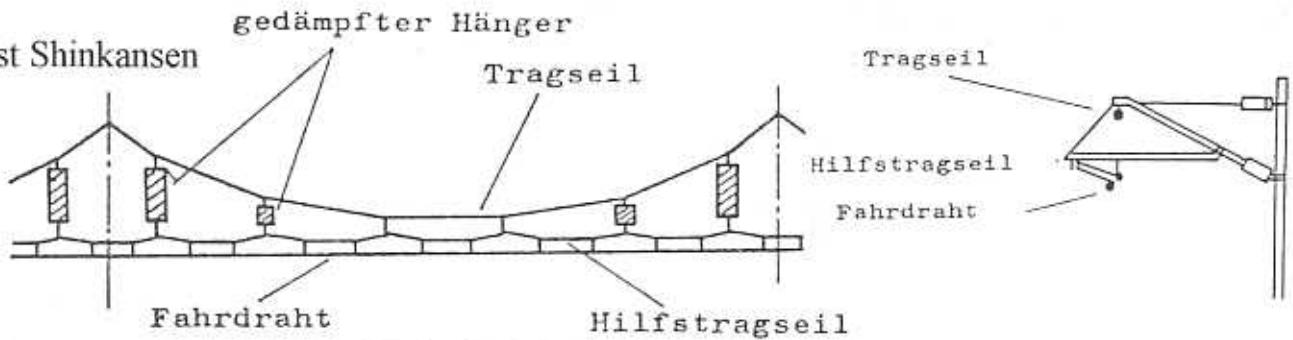


Bild 6. Regelfahrleitung der Bauart Re 200.  
 1 Fahrleitung 4 Stützrohr  
 2 Tragseil 5 umgelenkter Leichtbauseitenhalter  
 3 y-Beiseil 6 Windsicherung

SNCF 25kV/50Hz

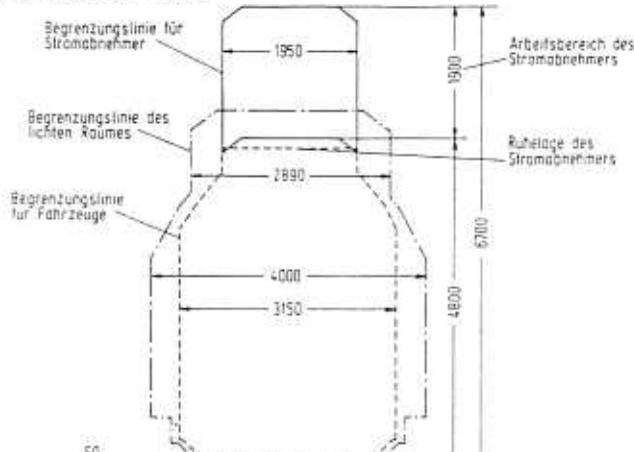


JR East Shinkansen

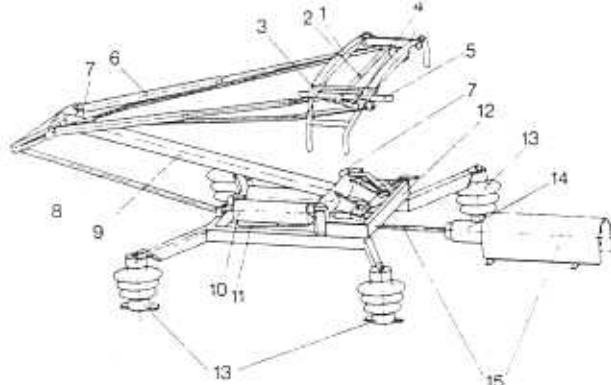


# Fahrleitungen

## Stromabnehmer



Begrenzung für Stromabnehmer bei Oberleitung.

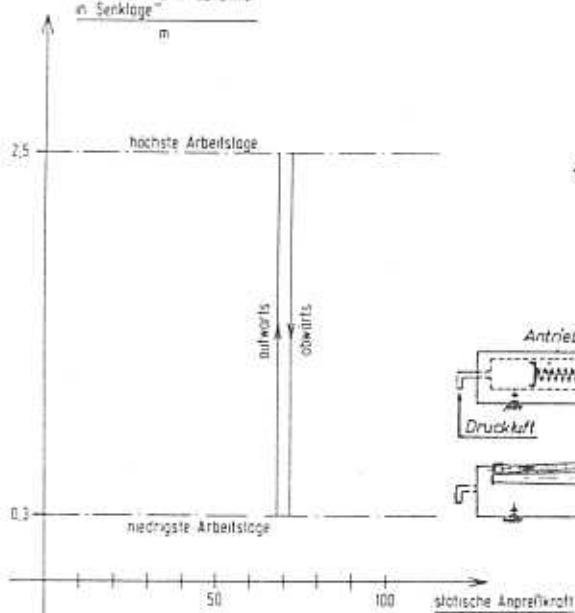


Einholmstromabnehmer SBS 65.

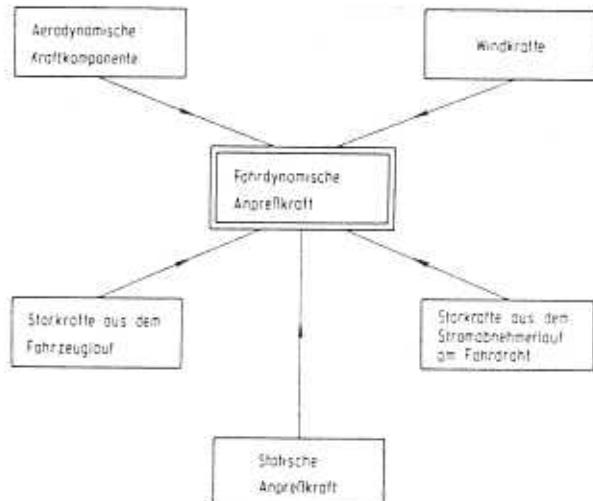
1	Schleifstück	9	Unterarm
2	Wippenaufhängung	10	Hubfedereinhängung
3	Wippenhorn	11	Stoßdämpfer
4	Gummielement	12	Grundrahmen
5	Wippenanschlag	13	Stützisolator
6	Oberarm	14	Zugisolator
7	Stromverbinde	15	Senkfederantrieb
8	Kuppelstange		

Höhe über "Stromabnehmer in Senklage":

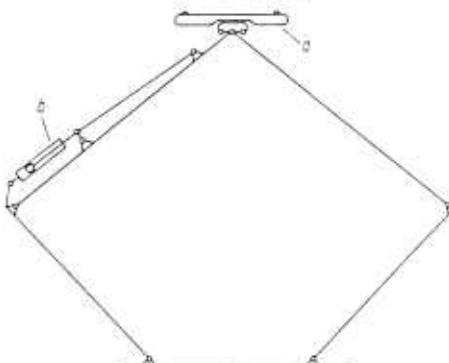
m



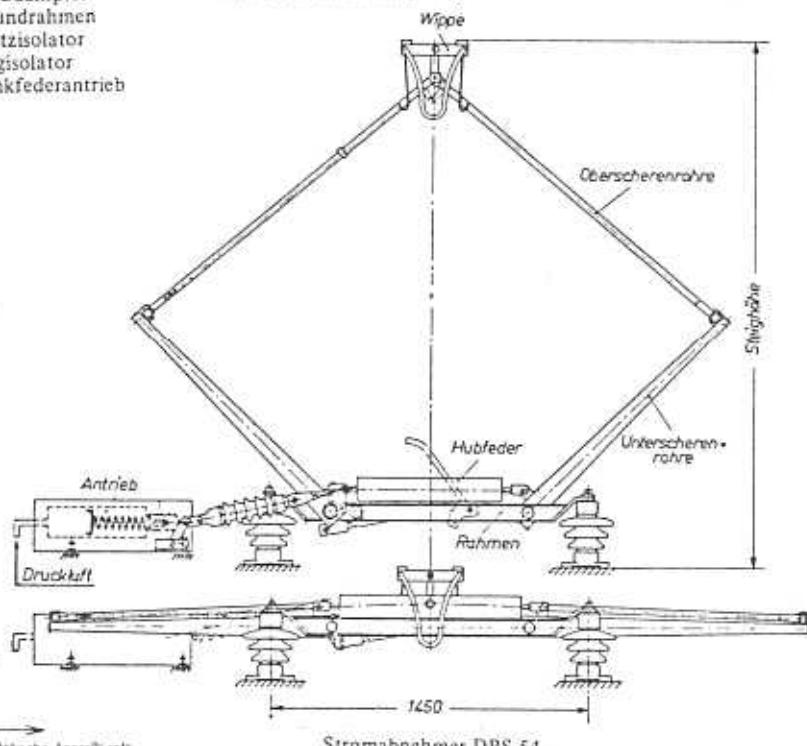
Prinzipieller Verlauf der statischen Anpreßkraft als Funktion von der Arbeitslage der Schleifelementen.



Die Einflußfaktoren auf die fahrdynamische Anpreßkraft des Kontaktes Stromabnehmer/Fahrdräht.

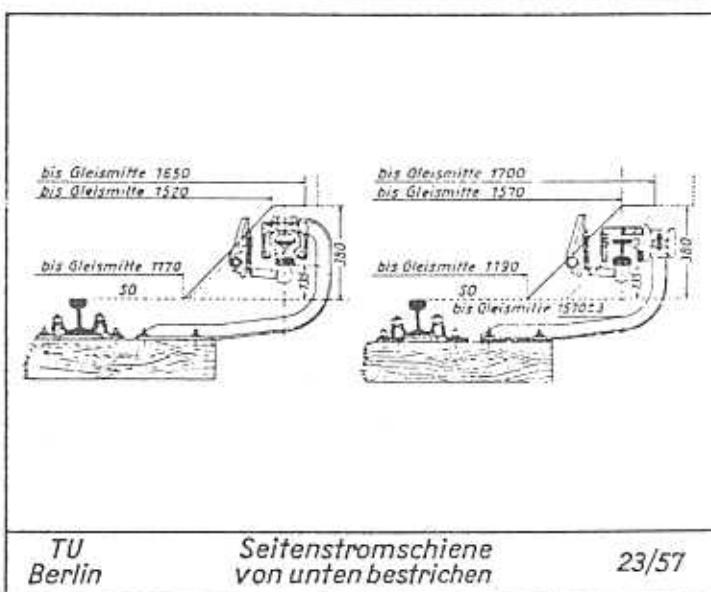
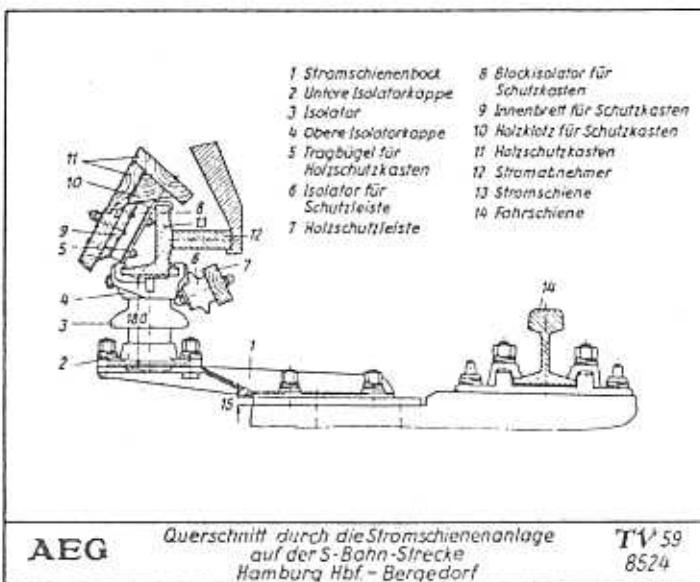
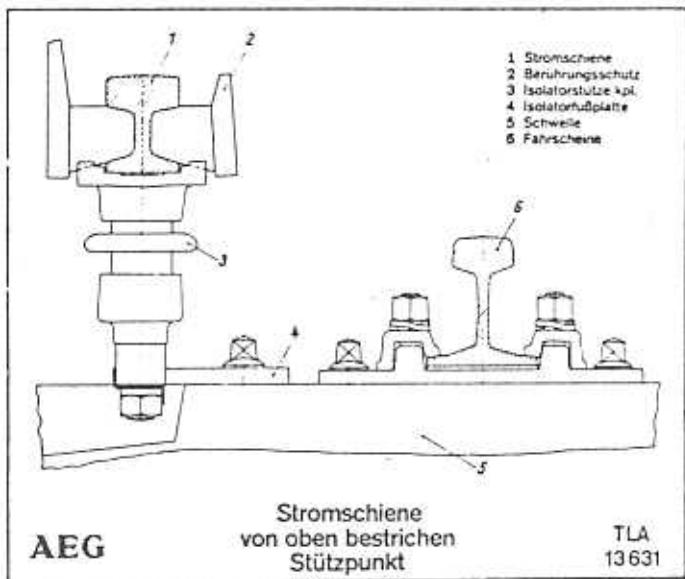


Prinzipskizze des Stromabnehmers DBS 54 mit Wippe B 11 und Oberscherendämpfung.



# Fahrleitungen

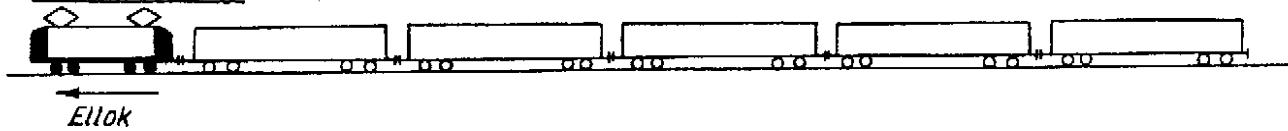
Stromschienen im Nah- und Regionalverkehr



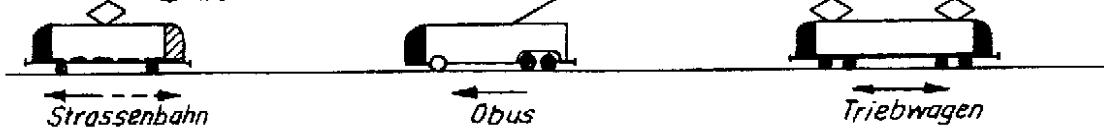
# Entwurfskriterien von elektrischen Triebfahrzeugen

## 3.1.1 Konfigurationen zur Zugbildung

### Lokomotivzug



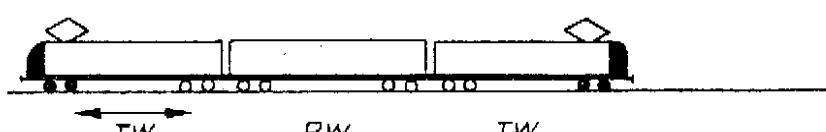
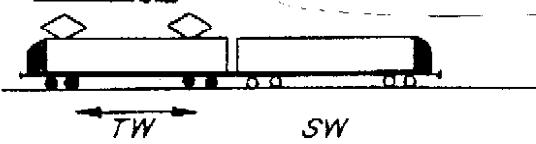
### Triebwagen



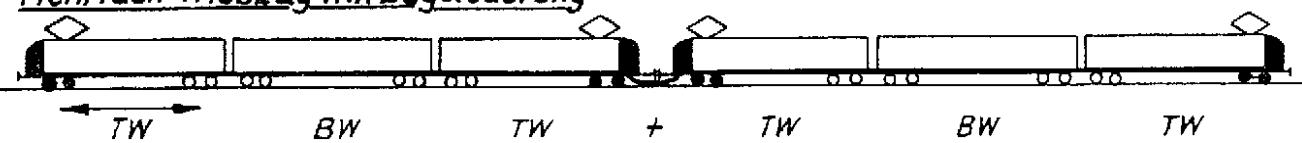
### Triebwagen mit Anhänger



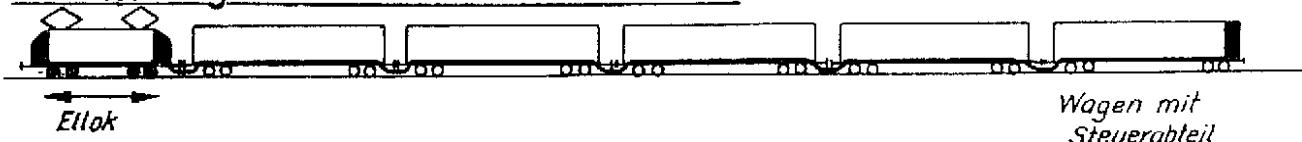
### Triebzüge



### Mehrfach-Triebzug mit Zugsteuerung



### Lokomotivzug mit Steuerabteil für Schubbetrieb



# Entwurfskriterien von elektrischen Triebfahrzeugen

## Vergleich Lokomotivzug zu Triebzugkonzepten

Triebzüge betrieblich nicht trennbar	Halbzugkonfiguration
	Jakobsdrehgestelle
Verteilung der Antriebsausrüstung	Geänderte Wartung und Revision
	Leistungserhöhung
	Geringere Kraftschlußausnutzung
	Verringerte Achslasten
	Mehrere, kleinere Motoren
	Erweiterter Lärmschutz für Fahrgastrraum
	Nutzung der vollen Zuglänge

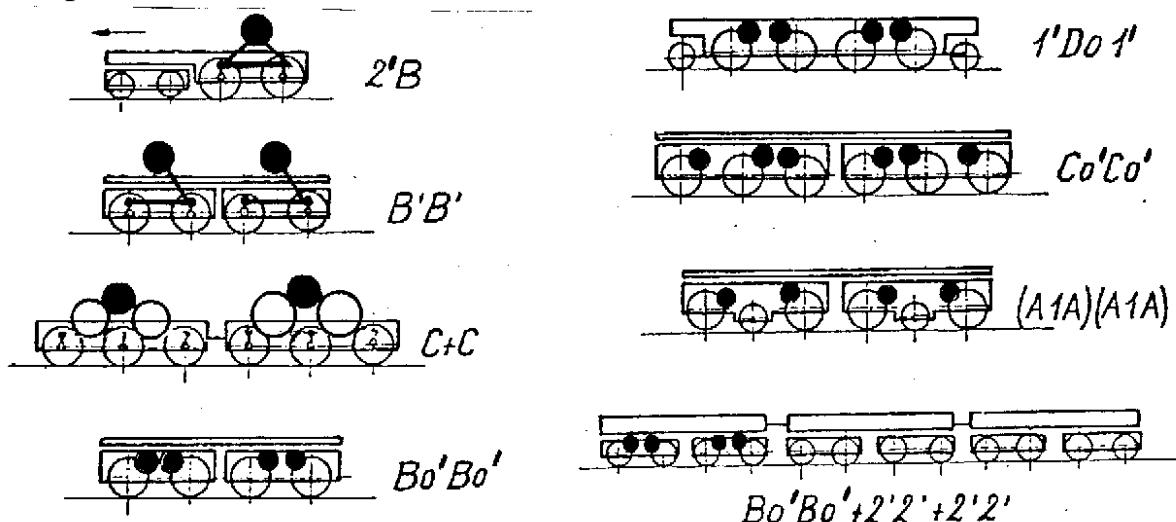
Neigetechnik

## Bezeichnungsschema der Achsanordnungen

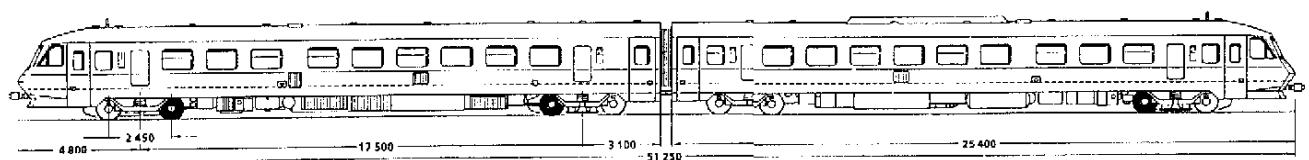
„A“, „B“, „C“, „o“	Anzahl angetriebene Achsen in einem Rahmen oder Drehgestell
„x“, „y“	Zusatz bei einzeln angetriebenen Achsen
„1“, „2“	Zusatz bei gruppenweise angetriebenen Achsen
	Anzahl Laufachsen in einem Rahmen oder Drehgestell

Sind die Achsen in einem Drehgestell angeordnet, so werden einzelne Buchstaben und Ziffern mit Apostroph gekennzeichnet, bei Kombinationen verschiedenen Typs werden Drehgestellgruppen durch Klammern zusammengefasst.

Beispiele:



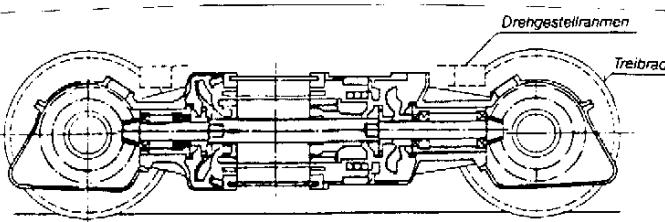
Bei Triebwagen zusammenfassende Nennung der funktionsmäßig untrennbaren Einheit.  
Beispiel: DB BR 610 „Pendolino“: **(1A) (A1) + 2 (A1)**



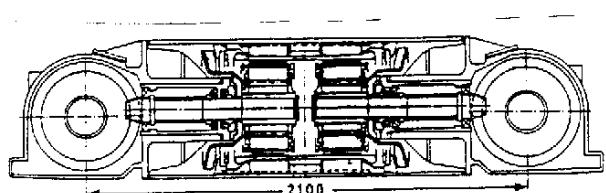
# Entwurfskriterien von elektrischen Triebfahrzeugen

## 3.1.2 Anordnung der Fahrmotoren im Drehgestell

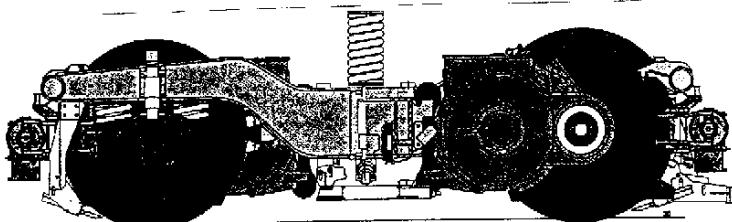
Straßen-, Stadtbahnen



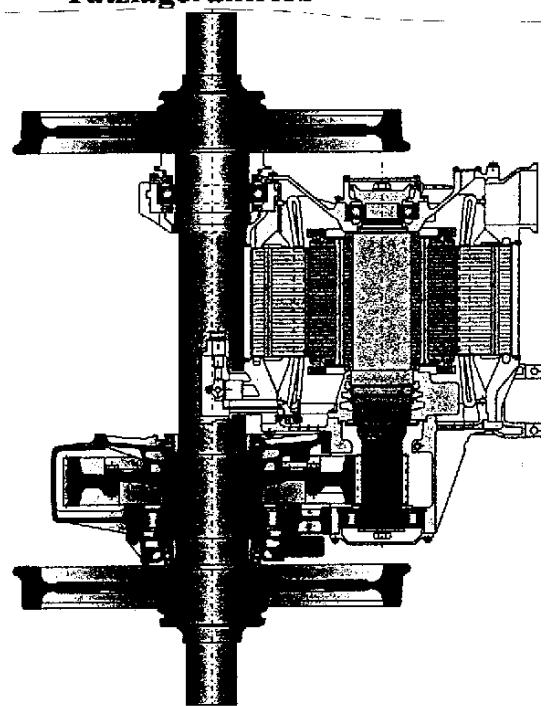
Längsbauart bis  $v_{max}=100\text{km/h}$



S-Bahnen, Lokomotiven bis  $v_{max}=140\text{km/h}$

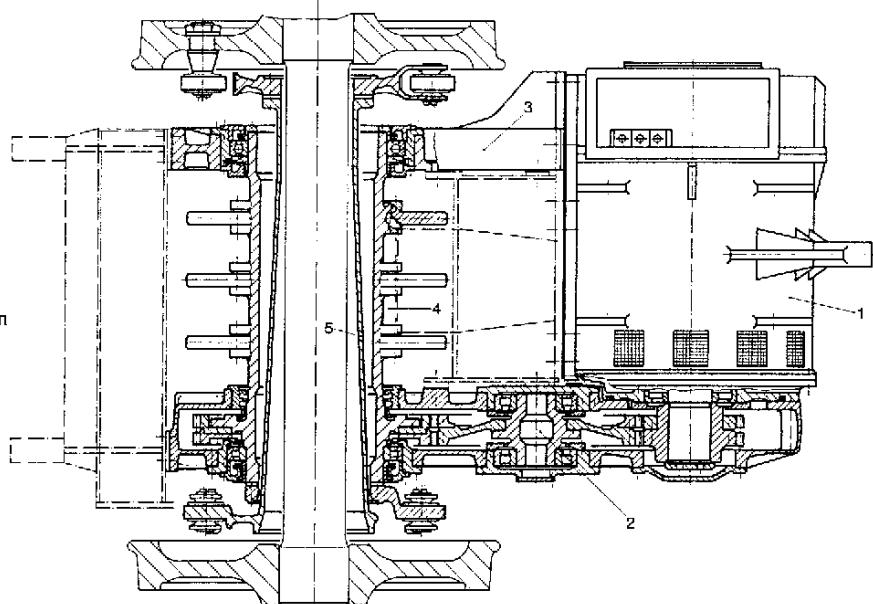


Tatzlagerantrieb



HGV-Triebzüge, Lokomotiven mit  $v_{max}>140\text{km/h}$

- Antriebssystem.  
1 Asynchronfahrmotor  
2 Getriebe mit Getriebekasten  
3 Tragarm  
4 Bremshohlwelle mit Bremsscheiben  
5 Gummigelenk-Kardan-Antrieb



# Entwurfskriterien von elektrischen Triebfahrzeugen

## Tatzlagerantrieb mit Membrankupplung BR189

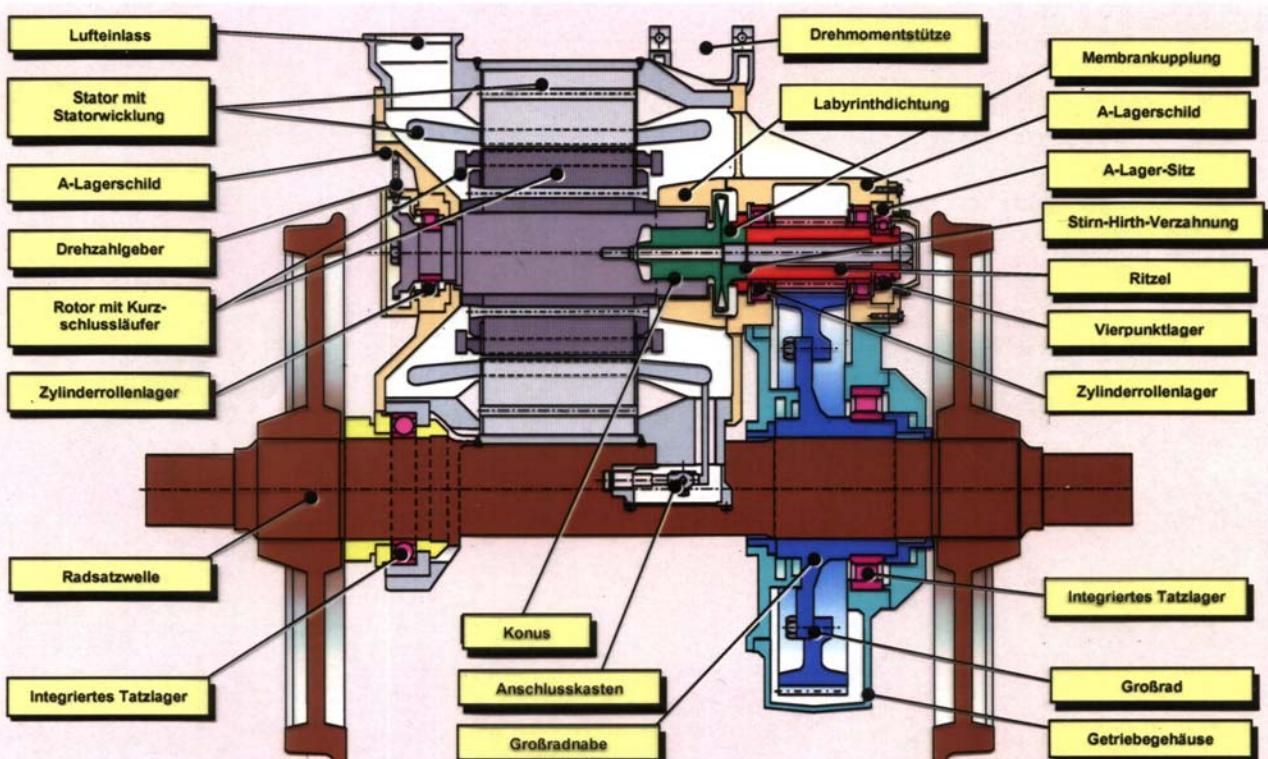


Abb. 4-10:: Fahrmotor mit Tatzlagerantrieb und Membrankupplung

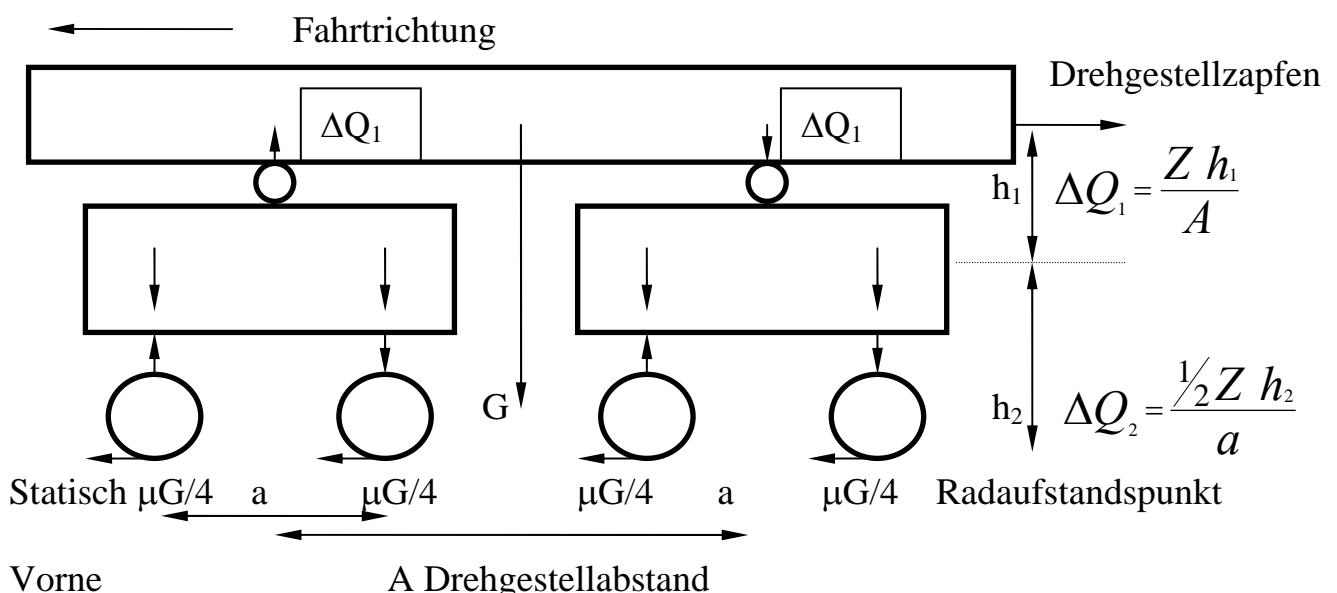
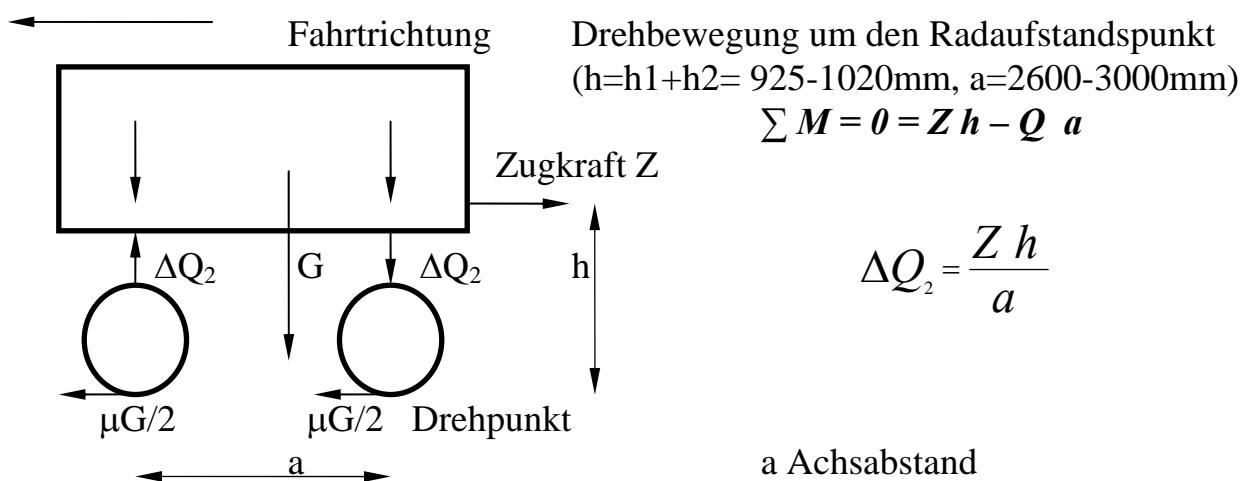
# Entwurfskriterien von elektrischen Triebfahrzeugen

## 3.1.3 Achsdruckentlastung

Durch die im Betrieb der Lok an verschiedenen Punkten angreifenden Kräfte und die notwendigen Federungen kommt es zur Be- und Entlastung der einzelnen Achsen. Dieses wirkt sich ungünstig auf die zu übertragenden Zugkräfte aus.

- Angriffspunkte:
  - Zug und Bremskräfte in der Zughakenebene an.
  - Luftwiderstand, Steigungskomponente im Massenschwerpunkt
  - Trägheitskräfte im Massenschwerpunkt.
  - Laufwiderstand in Achslagerebene

Drehgestellfahrzeuge besitzen zwei, in Reihe geschaltete Federungen  
 Primärfederung zwischen Radachse und Drehgestell  
 Sekundärfederung zwischen Drehgestell und Lokkasten



$$\text{Achsentlastung an vorderster Achse } \Delta Q_{\max} = \frac{\Delta Q_1}{2} + \Delta Q_2 = \frac{1}{2} Z \left( \frac{h_1}{A} + \frac{h_2}{a} \right)$$

# Entwurfskriterien von elektrischen Triebfahrzeugen

## 3.1.4 Zusammenstellung mechanischer Größen

Begriff	Größe	Einheit		
Zeit	$t$	s		
Masse	$m$	kg		
Länge, Weg	$s$	m		Vektor im x,y,z Koordinatensystem
Kraft Gewichtskraft (Erde) Radaufstandskraft	$F$ $G$ $Q$	N	$F = m \cdot a$ $G = m \cdot g$	Vektor $\{F_x, F_y, F_z\}$
Drehmoment	$M$	Nm	$M = F \cdot s$	Vektorprodukt, rechte Hand Regel
Geschwindigkeit	$v$	m/s	$v = ds/dt$	Vektor
Beschleunigung	$a$	$m/s^2$	$a = dv/dt$ $g = 9.81 m/s^2$	Vektor
Ruck	$\ddot{a}$	$m/s^3$	$\ddot{a} = da/dt$	Vektor
Impuls	$p$	kg m/s	$p = m \cdot v$	Vektor
Massenträgheitsmoment	$J$	$kg \cdot m^2$		
Drehwinkel	$\alpha$	rad		Vektor
Winkelgeschwindigkeit	$\omega$	rad/s	$\omega = da/dt$ $\omega = 2 \pi n$	Vektor
Drehzahl	$n$	U/s	$1 \text{ U} = 2 \pi$	
Winkelbeschleunigung	$\ddot{\omega}$	$rad/s^2$	$\ddot{\omega} = d\omega/dt$	Vektor
Drehimpuls	$L$	$kg \cdot m^2/s$	$L = J \cdot \omega$	Vektor
Energie, Arbeit	$W$	$Nm = J = W_s$	$W = F \cdot s$	Skalares Produkt
Leistung	$P$	$Nm/s = W$	$P = dW/dt$	

### Grundgleichungen der Mechanik

$$\sum \mathbf{F}(x,y,z) = \mathbf{0} \quad \sum \mathbf{M}(x,y,z) = \mathbf{0}$$

# Zugkraft und Leistung von Triebfahrzeugen

## 3.2.1 Berechnung der Fahrwiderstände

$$Z_{erf} = \sum W = W_F + W_{Str} + W_B \quad [N]$$

Für die auf die Achslast  $Q$  bezogenen Größen gilt  $w_i = \frac{W_i}{Q}$  N/kN Angabe in %

$$W_F = W_R + W_L \quad \text{Fahrwiderstand des Zuges}$$

### $W_R$ Rollwiderstand auf ebener und grader Fahrbahn

Reibung, Spurkranz-Anlauf, Walkarbeit bei Gummireifen

### $W_L$ Luftwiderstand

Stirnflächen-Staudruck, Sog- und Wirbelbildung an den Drehgestellen und Fahrzeugzwischenräumen, Die Luftreibung an den Fahrzeugflächen ist abhängig von Fahrzeugform und Relativgeschwindigkeit zur Luft

$$W_F = K_0 + K_1 v + K_2 v^2 = W_{F_{Lok}} + W_{F_{Wagenzug}}$$

Die Fahrwiderstandsformel setzt sich bei Lokzügen zusammen aus den Fahrwiderständen der Lokomotive und der angehängten Wagen.

$$W_{F_{Lok}} = k_{L_{Lok}} G_L + k_{T_{Lok}} G_T + c_{w_{Lok}} A v^2$$

Bezeichnung	Größe	Zahlenwert	Einheit	Anmerkung
Rollwiderstandsbeiwert der Laufachsen	$k_L$	1,5 .. 2,0	N/kN	Kleinere Werte bei kurzen (4-achsigen) Loks, größere Werte für längere (6-achsigen) Loks
Rollwiderstandsbeiwert der Treibachsen	$k_T$	2,0 4,5 5,0	N/kN	Asynchronmotorantriebe Tatzlagerantrieb (Kommutatormotor) Hohlwellenantrieb (Doppeltraktion $k_T$ der 2. Lok *1,6)
Luftwiderstandsbeiwert	$c_w$	0,03 .. 0,04 0,04 .. 0,05	$\frac{N \cdot h^2}{m^2 \cdot km^2}$	runde Kopfform
Stirnfläche	$A$	10 .. 12	$m^2$	
Gewicht auf den Laufachsen	$G_L$		kN	
Gewicht auf den Treibachsen	$G_T$		kN	
Fahrgeschwindigkeit	$v$		km/h	Gegenwind ist in der Leistungsreserve berücksichtigt

# Zugkraft und Leistung von Triebfahrzeugen

Für Wagenzüge ist die empirisch von Sauthoff festgelegte Formel gebräuchlich:

$$W_{F_{Wagenzug}} = (k_r + k_a v) G_w + c_{w_{ers}} A_{ers} (n + \Delta n) v^2$$

Bezeichnung	Größe	Zahlenwert	Einheit	Anmerkung
Rollwiderstandsbeiwert	$k_r$	1,36 .. 1,9	N/kN	
Achswiderstandsbeiwert	$k_a$	0,0025 0,004 0,007	N/kN	4-achsig 3-achsig 2-achsig
Ersatz-Luftwiderstandsbeiwert	$c_w$	0,048	$\frac{N h^2}{m^2 km^2}$	
Ersatzstirnfläche	$A_{ers}$	0,9 .. 1,2 1,45 .. 1,55 2,15	$m^2$	stromlinienförmige Wagen D-Zugwagen Personenwagen
Wagenzahl	$n$			
Sogzuschlag am Zugende	$\Delta n$	1,7 2,7		windschnittige Wagen normale Wagen
Fahrgeschwindigkeit	$v$		km/h	

Für Güterzüge ist die Formel von Strahl gebräuchlich:

$$W_{F_{Wagenzug}} = \left( 2 \frac{N}{kN} + k_g \frac{v^2}{100} \right) G_w$$

Bezeichnung	Größe	Zahlenwert	Einheit	Anmerkung
wagengattungs-abhängiger Luftwiderstandsbeiwert	$k_g$	0,107 0,057 0,047 0,032	$\frac{N h^2}{kN km^2}$	Leerwagen gemischte Güterzüge Eilgüterzüge Großraumgüterwagen

Triebwagen und Triebzüge:

$$W_{F_{Triebzug}} = k_l G_l + k_t G_t + c_{w_{Lok}} A v^2$$

Straßenbahnen auf Rillengleis:

$$W_{F_{Straba}} = 5 G_{Straba} + c_w A v^2$$

# Zugkraft und Leistung von Triebfahrzeugen

Bezeichnung	Größe	Zahlenwert	Einheit	Anmerkung
Rollwiderstandsbeiwert der Laufachsen	$k_L$	1,5 .. 2,0	N/kN	
Rollwiderstandsbeiwert der Treibachsen	$k_T$	2,5 3,0 3,0 .. 3,5	N/kN	Tatzlagerantrieb Hohlwellenantrieb Kardanantrieb
Luftwiderstandsbeiwert	$c_w$	0,038 .. 0,058 0,022 .. 0,036	$\frac{N \cdot h^2}{m^2 \cdot km^2}$	eckige Kopfform runde Kopfform
Stirnfläche	$A$	10 .. 11 7 .. 8	$m^2$	Vollbahnhofsfahrzeuge Straßenbahn
Gewicht auf den Laufachsen	$G_l$		kN	
Gewicht auf den Treibachsen	$G_t$		kN	
Fahrgeschwindigkeit	$v$		km/h	Gegenwind ist in der Leistungsreserve berücksichtigt

In Tunneln ist, abhängig von der Tunnellänge und der Querschnittsfläche der Luftwiderstandsbeiwert  $c_w$  um den Faktor 1,5 bis 2,5 höher.

Der Fahrwiderstand eines Fahrzeugs kann durch Auslaufversuche auf grader, ebener Strecke ermittelt werden.

Omnibusse und O-Busse

$$W_{F_{Bus}} = k_S G_{Bus} + c_w A v^2$$

Bezeichnung	Größe	Zahlenwert	Einheit	Anmerkung
Rollwiderstandsbeiwert	$k_S$	15 20 30	N/kN	Betonstraße Kleinpflaster Teerstraße
Luftwiderstandsbeiwert	$c_w$	0,04 0,06	$\frac{N \cdot h^2}{m^2 \cdot km^2}$	Einzelfahrzeug Bus mit Anhänger
Stirnfläche	$A$	7,5	$m^2$	

Der Rollwiderstandsbeiwert von Straßenfahrzeugen ist um den Faktor 10 höher als bei Stahlrad/Stahlschiene Fahrzeugen, jedoch ist der Haftwert besser und damit der Bremsweg kürzer.

# Zugkraft und Leistung von Triebfahrzeugen

$$W_{Str} = W_S + W_{Kr}$$

**Streckenwiderstand**

$W_S$  **Steigungs- oder Neigungswiderstand,**

Anteil der in die Fahrtrichtung fallenden Komponente der Schwerkraft.

Diese Komponente kann eine positive (hemmende) oder negative (unterstützende) Kraft auf das Fahrzeug ausüben.

Mit dem Neigungswinkel  $\alpha$  gegen die Horizontale und dem Zuggewicht G gilt:

$$W_S = \pm G_Z \sin \alpha$$

Bei kleinen Werten von  $\alpha$  ( $<10^\circ$ ), mit Ausnahme von Zahnradbahnen immer gegeben, kann  $\sin \alpha$  durch  $\tan \alpha$  ersetzt werden. Der Wert  $\tan \alpha$  ist durch das Verhältnis der Höhendifferenz  $s_h$  [m] bei 1000m horizontaler Wegstrecke beschrieben. ( $s_h = 20\text{m}$ ,  $s [\%]$  = 20)

$$W_S = \pm G_Z \tan \alpha = \pm G_Z \frac{s_h}{1000} = \pm s G_Z \text{ [N]}$$

der spezifische Neigungswiderstand ist damit  $w_s = \pm s$  Steigung in [%]

$W_{Kr}$  **Krümmungswiderstand**

infolge der Ablenkung von der geraden Bahn tritt ein stärkeres Anlaufen der äußeren Spurkränze an die Schienenköpfe auf. Dadurch ergibt sich ein zusätzlicher, gewichtsabhängiger Reibungswiderstand.

Gemäß der Formel von Protopapadakis gilt:

$$W_{Kr} = w_{Kr} G \quad \text{mit } w_{Kr} = \mu_s \frac{0,72d + 0,47a}{R} \quad \text{in N/kN}$$

Bezeichnung	Größe	Zahlenwert	Einheit	Anmerkung
Reibungszahl zwischen Rad und Schiene	$\mu_s$	220 165	N/kN	Sommer Winter
Gleisbreite	$d$	1,75 1,59 1,50 1,06 1,00 0,8 0,65	m	1676 mm 1529 mm 1435 mm 1067 mm 1000 mm 750 mm 600 mm
Krümmungshalbmesser	$R$		m	
Achsstand des Fahrzeuges oder Drehgestelles	a	1,75 .. 8,25 1,25 .. 5,00 1,00 .. 3,00 0,90 .. 2,50	m	1435 mm 1000 mm 750 mm 600 mm

## Zugkraft und Leistung von Triebfahrzeugen

$$W_B = m \cdot a + J \frac{d\omega}{dt} \quad \text{Beschleunigungswiderstand,}$$

Anteile der translatorisch und Anteile der zusätzlich rotatorisch beschleunigten Massen werden durch eine nur translatorisch zu beschleunigende Ersatzmasse  $m'$  beschrieben.

$$W_B = m^* \cdot a \quad \text{mit} \quad m^* = m (1 + \rho)$$

Der spezifische Beschleunigungswiderstand (bezogen auf das gesamte Zuggewicht  $mg$ ) ist

damit:  $w_B = \frac{W_B}{mg} = \frac{1000 (1 + \rho)}{9,81} \cdot a \quad \text{in N/kN (unabhängig von } m\text{)}$

Der Massenzuschlag  $\rho$  lässt sich aus den polaren Massenträgheitsmomenten der rotierenden Teile berechnen.

Bezeichnung	Größe	Zahlenwert	Einheit	Anmerkung
Fahrzeug bzw. Zugmasse	$m$		t	
Beschleunigung	$a$	0,02 .. 0,10 0,10 .. 0,20 0,30 .. 0,40 0,40 .. 0,70 0,80 .. 1,20 1,00 .. 1,30 0,7	$\text{m/s}^2$	Güterzug schwer Güterzug Reiserzug Triebzug S-Bahn U-Bahn ICE
Massenzuschlag	$\rho$	0,10 .. 0,20 0,08 .. 0,15 0,06 .. 0,12 0,15 .. 0,20 0,25 .. 0,30 0,04 .. 0,05 0,05 .. 0,10		Triebwagen allein Triebwagen + 1 Beiwagen Triebwagen + 2 Beiwagen Schnellzuglok Güterzuglok Güterwagen, beladen Güterwagen, leer

Bei Zahnradbahnen ist der Massenzuschlag wegen der meist 2-3 fachen Getriebeübersetzungen und der Triebzahnräder wesentlich größer.

Z. B. beträgt je nach Besetzung der Massenzuschlag bei den Triebwagen der Bayrischen Zugspitzbahn 1,25 bis 1,88.

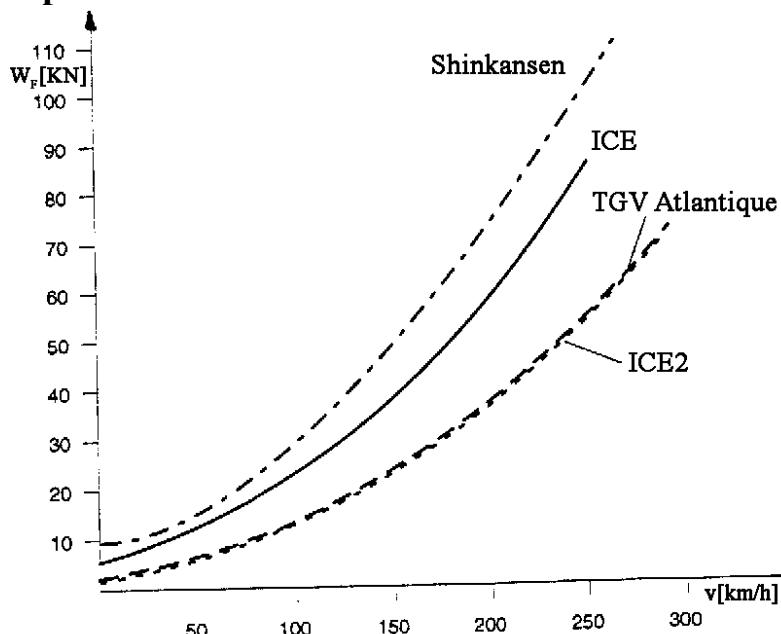
### 3.2.2 Traktionsleistung

Die Summe der Fahrwiderstände wird durch die Zugkraft  $Z_{erf}$  überwunden, die resultierende Leistung am Radumfang beträgt dann

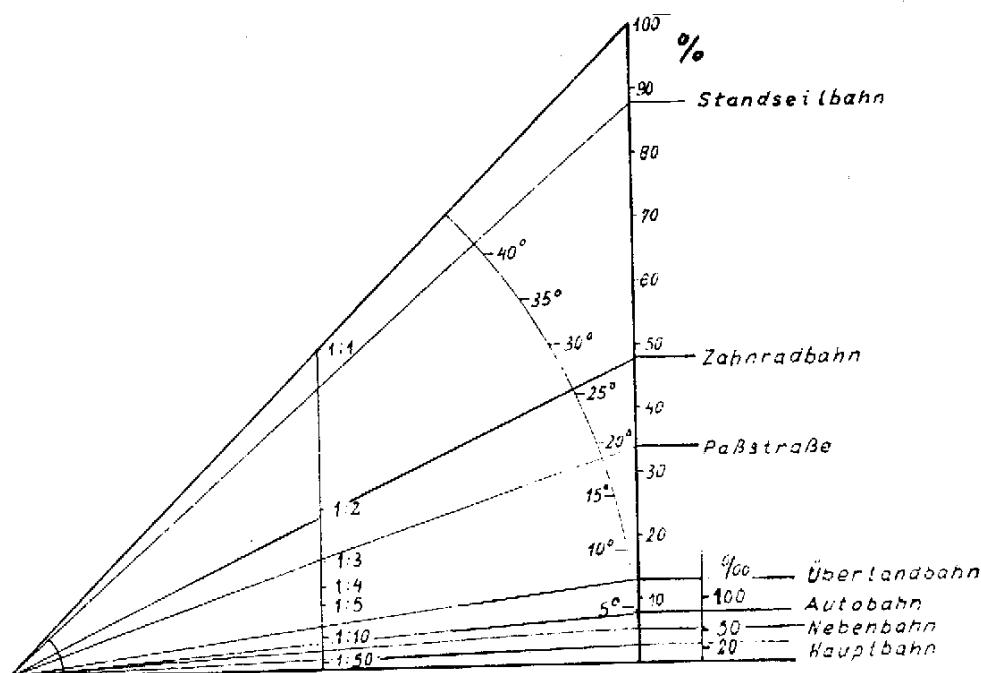
$$P = Z_{erf} \frac{v}{3,6} \quad \text{mit} \quad P \text{ in kW, } Z \text{ in kN und } v \text{ in km/h}$$

# Zugkraft und Leistung von Triebfahrzeugen

## Beispiel für Fahrwiderstandskennlinien



## Steigungsverhältnisse



## Anfahrtzugkraft und Traktionsleistungsberechnung für einen Güterzug

gegeben: Zugmasse 1000t; Lokgewicht 84t; Streckensteigung 1%; Anfahrsbeschleunigung  $a_a = 0,15 \text{ m/s}^2$ ; Restbeschleunigung  $a_{ii} = 0,01 \text{ m/s}^2$ ; Höchstgeschwindigkeit  $v_{max} = 100 \text{ km/h}$ ;  $\rho = 0,05$  Massenzuschlag

Anfahrt:  $v=0; w_F=2 \text{ N/kN}; w_{Str}=10 \text{ N/kN}; w_B=0,15^{1050}/9,81 = 16 \text{ N/kN}$

Anfahrtzugkraft:  $Z_a = \Sigma w (m_L + m_Z) g = 298 \text{ KN}$ ; Reibbeiwert:  $\mu_a = Z_a / (m_L g) = 0,36$

Fahrt:  $v=100 \text{ km/h}; w_F=7 \text{ N/kN}; w_{Str}=10 \text{ N/kN}; w_B=0,01^{1050}/9,81 = 1 \text{ N/kN}$

$Z_d = \Sigma W_d = \Sigma w (m_L + m_Z) g = 185 \text{ kN}; \mu = Z_d / (m_L g) = 0,22$

Traktionsleistung:  $P_d = W_d v / 3,6 = 5150 \text{ KW}$

# Zugkraft und Leistung von Triebfahrzeugen

## 3.2.3 Z-v Diagramme

Das Lastenheft für Triebfahrzeuge gibt dem Lieferanten u. A. für das Z-v Diagramm vor:  
Anfahrt mit Beschleunigung  $a_A$  und damit die Anfahrzugkraft  $Z_A$  bei Kommutatormotoren  
Z-v Punkte der 5 min-, Stunden- und Dauerzugkraft

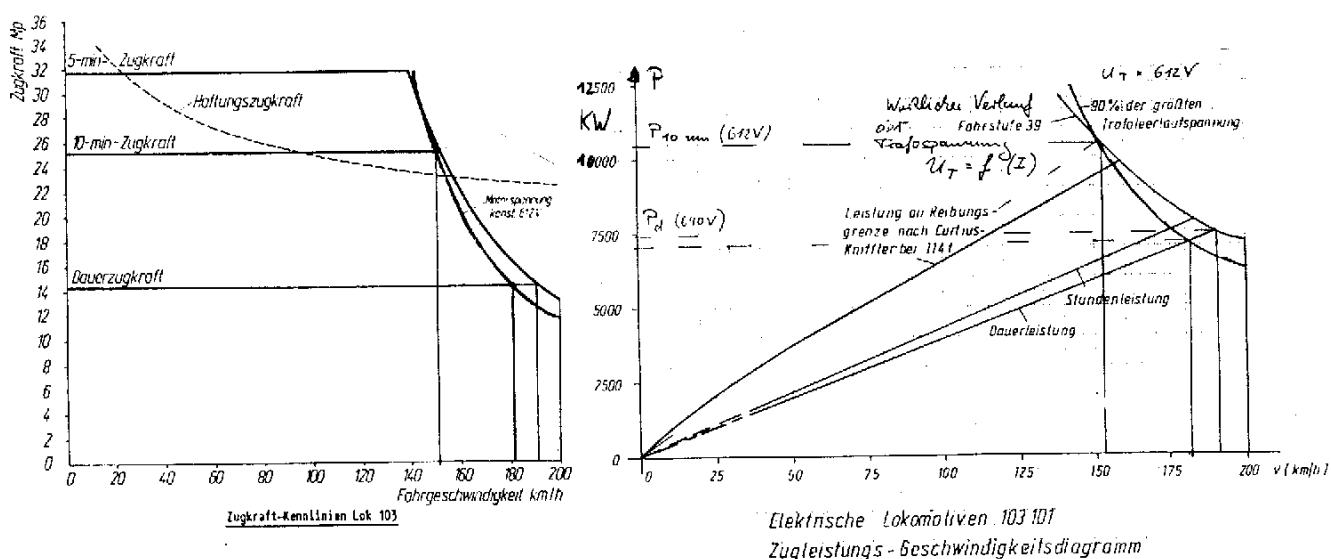
Typenpunkt 1, an diesem Z-v Punkt wird die Nennleistung erreicht

Bereich konstanter Leistung ( DIN Nennleistung = Stundenleistung )

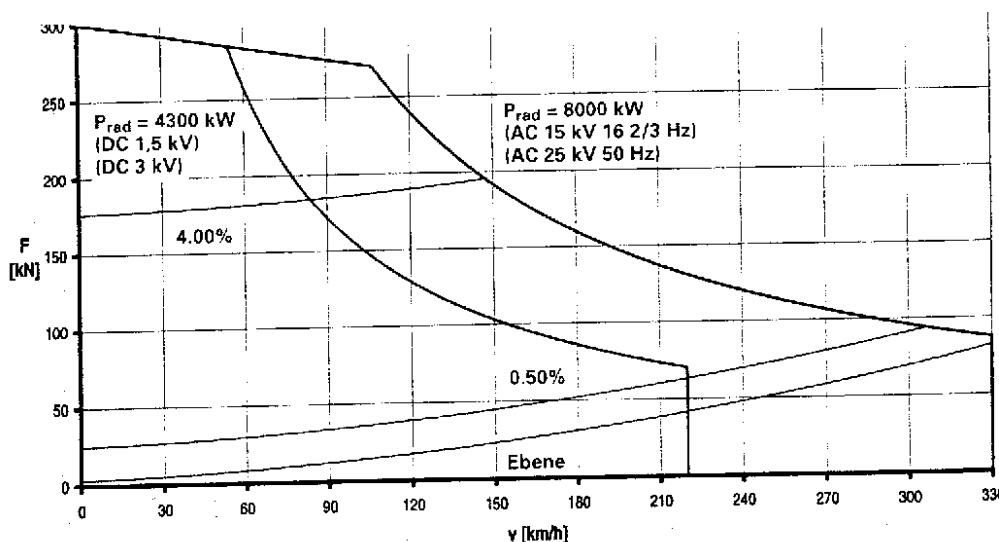
bei Kommutatormotoren Z-v Punkte der 5 min-, Stunden- und Dauerleistung

Höchstgeschwindigkeit  $V_{max}$

## Triebfahrzeug mit Kommutatormotoren



## Triebfahrzeug mit Asynchronfahrmotoren



In gleicher Darstellung wird auch die elektrische Bremskraft festgelegt, wobei aus Sicherheitsaspekten nur ein maximales  $\mu_r$  von 0,15 festgelegt ist.

# Zugkraft und Leistung von Triebfahrzeugen

## Dimensionierung eines U-Bahnfahrzeugs

Am Beispiel der Münchener U-Bahn wird die Auslegung für ein reines Beschleunigungsfahrzeug abgeleitet. Vorgegeben sind vom Betreiber, bzw Waggonbauer:

Netzspannung	$U_D$	750 V DC $^{+20\%}_{-30\%}$
maximale Netzaufnahmleistung	$P_N$	1050 kW
Haltestellenabstand	$S_H$	750 m
Maximalgeschwindigkeit	$v_{max}$	80 km/h
Leermasse des Fahrzeugs	$m_l$	57 t
Masse bei 4Pers/qm (Anfahrt auslegung)	$m_{2/3}$	76,5 t ( $\rho_{2/3} 0,2$ )
Maximale Masse (Bremsauslegung)	$m_v$	83,5 t ( $\rho_v 0,18$ )
Fahrwiderstand	$w_F$	$2,9 + 0,0943 v + 0,001 v^2$
Anfahrbeschleunigung	$a_{Fa}$	1,3 m/s <sup>2</sup>
Bremsverzögerung	$a_{Br}$	1,35 m/s <sup>2</sup>

Bereich der konstanten Anfahrzugkraft (aus Erfahrung)  $v=0$  km/h bis ca. 30 km/h

$$\text{Mittelwert des Fahrwiderstandes } w_F = 0,5 (w_{F0} + w_{F30}) = 4,78 \text{ N/kN.}$$

$$\text{Beschleunigungswiderstand } w_B = \frac{1000 (1+\rho)}{9,81} a_{2/3} = 159 \text{ N/kN,}$$

$$\text{benötigte Zugkraft zur Anfahrt } Z_a = m_{2/3} g (w_F + w_B) = 123 \text{ kN}$$

$$\text{am Rad zur Verfügung stehende Leistung } P_{Rad} = \eta P_{netz} = 882 \text{ kW}$$

$$\text{Punkt 1, Übergang auf Leistungshyperbel } v_1 = 3,6 P_{rad} / Z_a = 25,9 \text{ km/h}$$

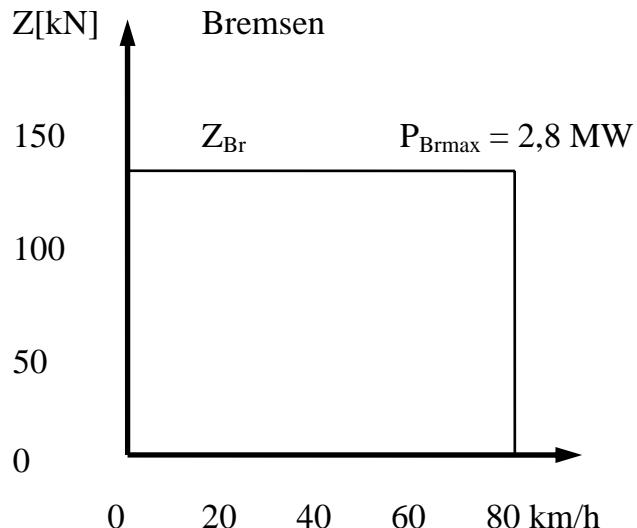
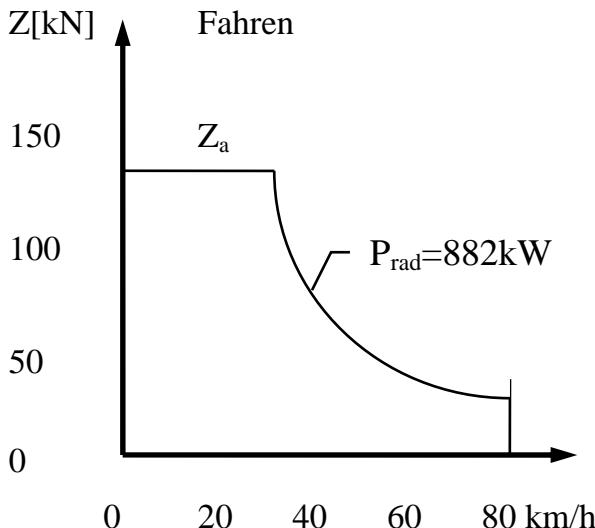
Bereich der konstanten Bremskraft  $v=80$  km/h bis 0 km/h

$$\text{Mittelwert des Fahrwiderstandes } w_F = 0,5 (w_{F0} + w_{F80}) = 9,87 \text{ N/kN.}$$

$$\text{Verzögerungswiderstand } w_B = \frac{1000 (1+\rho)}{9,81} a_v = 162 \text{ N/kN,}$$

$$\text{benötigte Bremskraft am Rad } Z_{Br} = m_v g (w_F - w_B) = 125 \text{ kN}$$

$$\text{Maximale Bremsleistung bei } 80 \text{ km/h } P_{br} = Z_{br} v_{max} / 3,6 = 2778 \text{ kW}$$



# Rad/ Schiene Verhalten

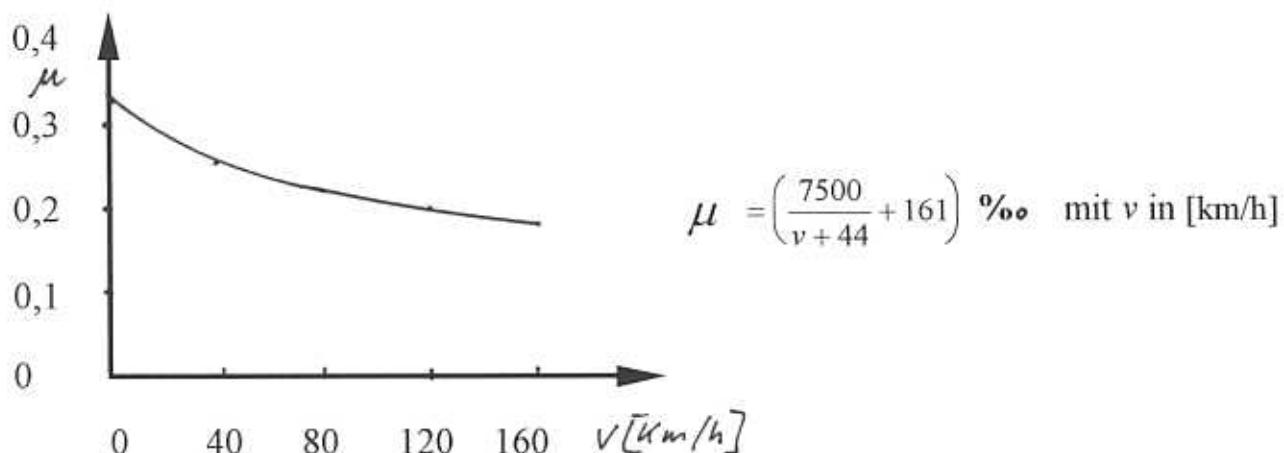
## 3.3 Der Adhäsionskoeffizient $\mu$

$$\mu = \frac{Z_{achse}}{G_{achse}}$$

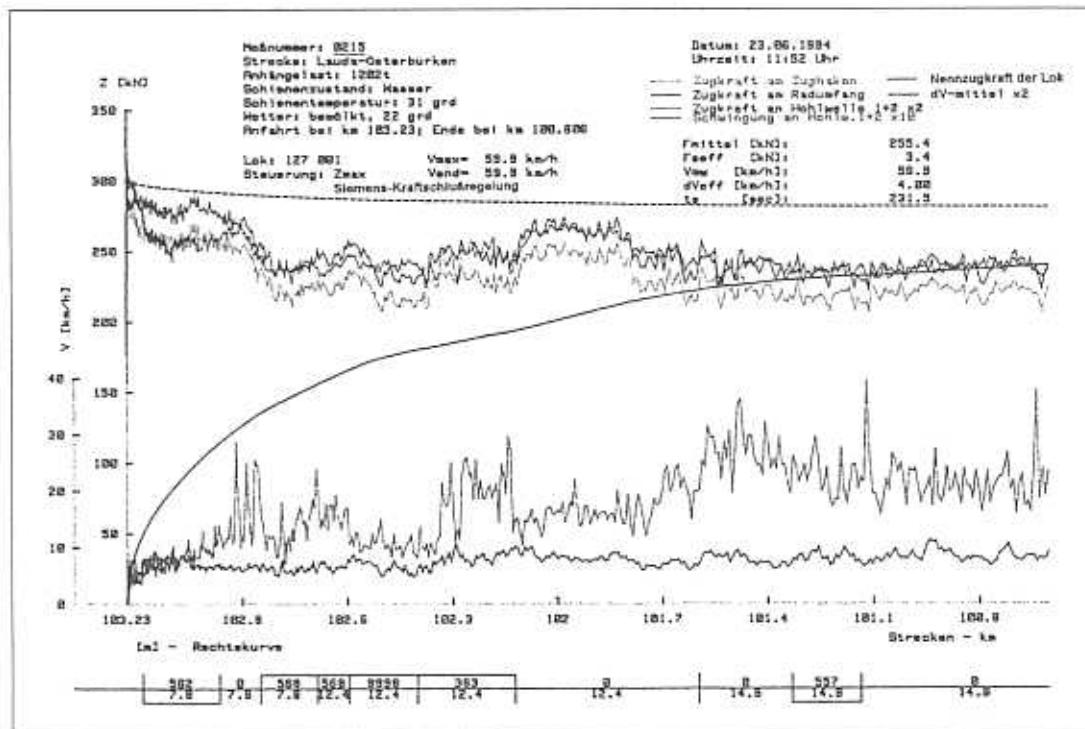
i.W. abhängig von: Schienenzustand und Geschwindigkeit

$$Z = n \mu G_{achse} \quad n \quad \text{Anzahl der angetriebenen Achsen}$$

Die Zahlenwertgleichung des Adhäsionskoeffizienten  $\mu$  für trockenen Schienenzustand wurde von Curtius-Kniffler 1935 mit Dampfloks experimentell ermittelt und wird für Fahrzeuge mit Kommutatormotoren im Z/v Diagramm mit dargestellt.



Fahrzeuge mit Drehstromfahrmotoren ermöglichen aufgrund des gleichförmigen Moments und durch Kraftschlußregelverfahren auch bei schwierigen Schienenverhältnissen einen hohen Adhäsionskoeffizienten  $\mu$ . Beispielhaft sind die Ergebnisse von Messungen mit der Lok 127 001 ( $m=86,2$  t) aufgeführt.

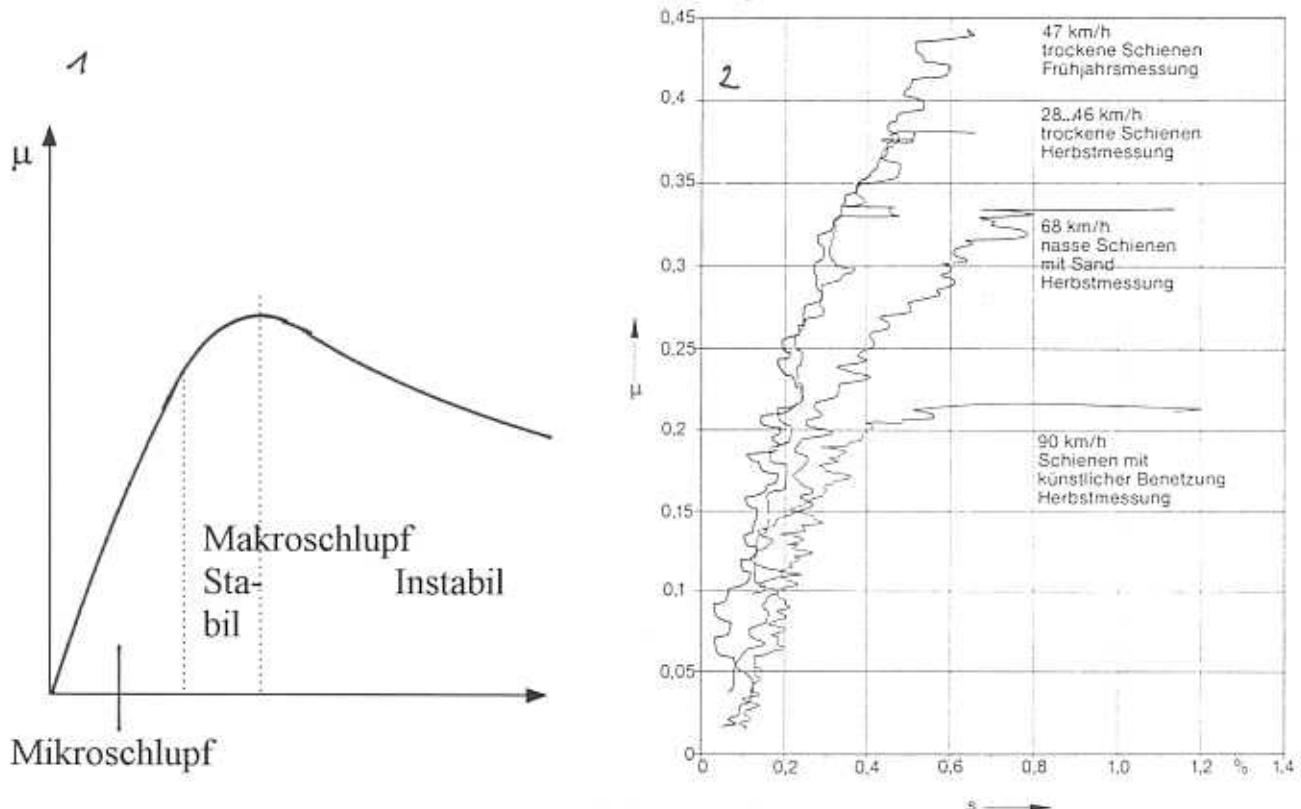


# Rad/ Schiene Verhalten

Bei schweren amerikanischen Dieselloks mit  $m=190,5t$  wird mit Sand eine Anfahrzugkraft von 890kN realisiert, dieses entspricht einem  $\nu$  von 0,47. Entscheidend ist dabei die Kenntnis des aktuellen Radschlupfes durch Messung der genauen Fahrzeuggeschwindigkeit mittels Radar.

## 3.3.1 Der Adhäsionskoeffizient $\mu$ in Abhängigkeit vom Radschlupf

Der Adhäsionskoeffizient  $\mu$  für einen definierten Schienenzustand (1) steigt mit dem Radschlupf  $S$  zunächst an, um dann bei  $S>1\%$  wieder abzusinken. Bei schlechteren Konditionen (2) ist das Maximum deutlich verringert.



Abhängig von der Kennlinie des Antriebsmotors ergibt sich daraus bei wechselnden Schienenverhältnissen ein für den Drehstromfahrmotor entscheidender Vorteil der stark verringerten Gefahr des Schleuderns.

# Elektrische Auslegung

## 3.4.1 Z/v Diagramm und Motorkennlinien

Aus dem vorgegebenen Z/v Diagramm werden über:

$$v = D \pi \ddot{u} n_{\text{Mot}}$$

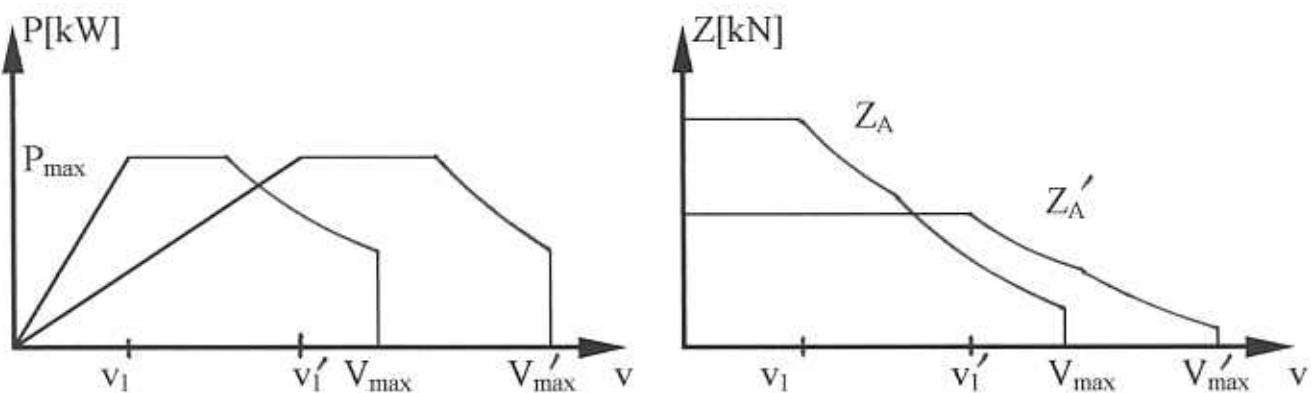
mit Raddurchmesser  $D$

$$Z_{\text{Rad}} = \frac{2}{D \ddot{u}} M_{\text{Mot}}$$

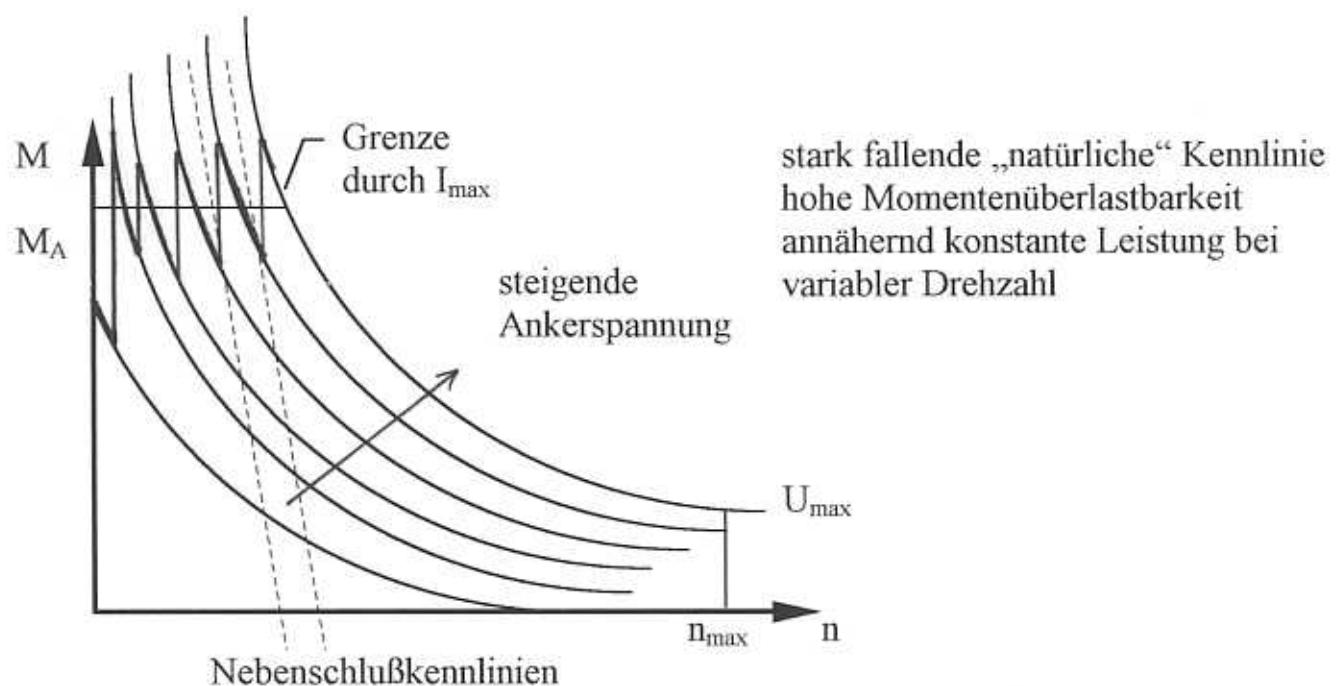
Getriebeübersetzung  $\ddot{u}$

die Motordaten bestimmt.

Durch die Wahl der Getriebeübersetzung erfolgt die Festlegung des Einsatzgebietes:



Jeder Punkt des Z/v Diagramms muß erreichbar und stationär fahrbar sein, diese Forderung ist im gesteuerten Betrieb nur mit einer Reihenschlußcharakteristik des Motors erfüllbar.



Drehstrommotoren können nur in Verbindung mit einer Momentenregelung eingesetzt werden, da die Kennlinie ausgeprägtes Nebenschlußverhalten zeigen.

## Elektrische Auslegung

### 3.4.2 Kombinationen von Einspeisung , Stellglied- und Fahrmotortypen

	Dieselmotor	DC-Netz	AC $16\frac{2}{3}$ Hz Transformator	AC 50 Hz Transformator
<b>DC- Motor</b>	Gleichstrom oder Drehstrom-Generator mit Gleichrichter	Parallel/Reihenschaltung Ankervorwiderstände, Feldshunt Anker- und Feldsteller		
<b>Mischstrommotor</b>			Stufenschaltwerk mit ungesteuerten Gleichrichtern halbgesteuerte Brücke(n) im Anker und Feldkreis	
<b>AC- Kommutatormotor</b>			halbgesteuerte Brücke(n) im Anker und Feldkreis löschbare gesteuerte Brücke hoch-/ niederspannungs- seitiges Schaltwerk	
<b>Drehstrom- asynchronmotor</b>	Pulswechselrichter an Gleichspannungs-Zwischenkreis	Eingangssteller Stromzwischenkreisumrichter Pulswechselrichter an Gleichspannungs-Zwischenkreis ( $U_{netz} < 2kV$ ) mit 4,5 KV Userr ( $U_{netz} < 4kV$ ) mit 6,5 KV Userr	2 Punkt-Pulswechselrichter an Spannungszwischenkreis und 2- Quadranten- Eingangssteller ( $U_{netz} > 2kV$ )	Pulswechselrichter an Spannungszwischenkreis und 4 Quadranten- Eingangssteller
			3 Punkt Schaltungen	4 Quadranten- Eingangssteller
<b>Drehstrom-synchronmotor</b>		2 in Reihe geschaltete 2 Punkt Wechselrichter auf 2*3 strängigen Asynchronmotor		netzgeführter Stromrichter maschinengeführter Stromzwischenkreisumrichter

# Elektrische Auslegung

## 3.4.3 Triebfahrzeuge mit Gleich- und Mischstrommotoren

Unabhängig von der Schaltung der Feldwicklung gilt für den Gleichstrommotor:

$$U_A = E + R_A I_A + 2 U_{\text{Bürste}}$$

$U_{\text{Bürste}}$  Bürstenspannungsabfall (vernachlässigt)

$$E = k_1 n \Phi$$

$k_1$  dimensionsloser Faktor aus Wicklungsaufbau

$$\Phi = k_2 I_{\text{Feld}}$$

$k_2$  [Vs/A] Daten des magnetischen Kreises

$$M_i = \frac{k_1}{2\pi} \Phi I_A$$

$M_i$  inneres Moment

$$n = \frac{U_A}{k_1 k_2 I_{\text{Feld}}} - \frac{R_A I_A}{k_1 k_2 I_{\text{Feld}}}$$

Zur Kompensation der Stromwende- und der Bewegungsspannung dient die vom Ankerstrom durchflossene Wendepolwicklung (G-H,  $R_w$ ,  $L_w$ ). Die Richtung des Wendepolfeldes ist in Ankerfeldrichtung, d.h. um  $90^\circ/2p$  gegenüber dem Erregerfeld (E-F,  $R_E$ ,  $L_E$ ) gedreht.

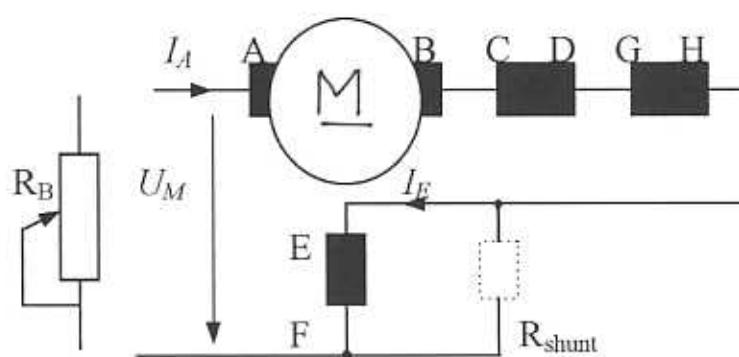
Die Ankerrückwirkung erhöht an der auflaufenden und erniedrigt an der ablaufenden Hauptpolkante die Flußdichte  $B$  der Hauptpole. Entsprechend verhält sich die Lamellenspannung zwischen den Kommutatorlamellen. Durch die Sättigung verringert sich der Gesamtfluß  $\Phi = B A_{\text{pol}}$ . Daher werden Bahnmotoren i.A. mit der aufwendigen Kompensationswicklung (C-D,  $R_K$ ,  $L_K$ ) ausgeführt. Diese Wicklung wird ebenfalls vom Ankerstrom durchflossen. Die Richtung des Kompensationsfeldes entspricht der des Ankerfeldes.

Die geometrischen Beziehungen werden bei der Darstellung der Wicklungen berücksichtigt. In der Spannungsgleichung der kompensierten Maschine ist dann  $U_A$  durch  $U_M$  und  $R_A$  durch  $R_{cu} = R_A + R_w + R_K + R_E$  zu ersetzen.

Der Mischstrommotor für oberschwingungsbehaftete Ströme ist im Gegensatz zum Gleichstrommotor voll geblecht ausgeführt, damit werden die Wirbelstromverluste verringert und höhere Stromanstiegsgeschwindigkeiten ermöglicht.

Für die Reihenschlußmaschine mit  $I_{\text{Feld}} = I_A$  folgt ohne Berücksichtigung der Sättigung:

$$M_i = \frac{k_1 k_2}{2\pi} I_A^2$$



Eigenerregte Widerstandsbremse auf  $R_B$  durch Remanenz (Anker umpolen)  
Schnittpunkt der Widerstandsgraden von  $R_B$  mit der drehzahlabhängigen Spannungskurve  $U=f(I_A)$  ergibt den Ankerstrom.

# Elektrische Auslegung

## 3.4.3.1 Konventionelle DC Schaltwerksfahrzeuge

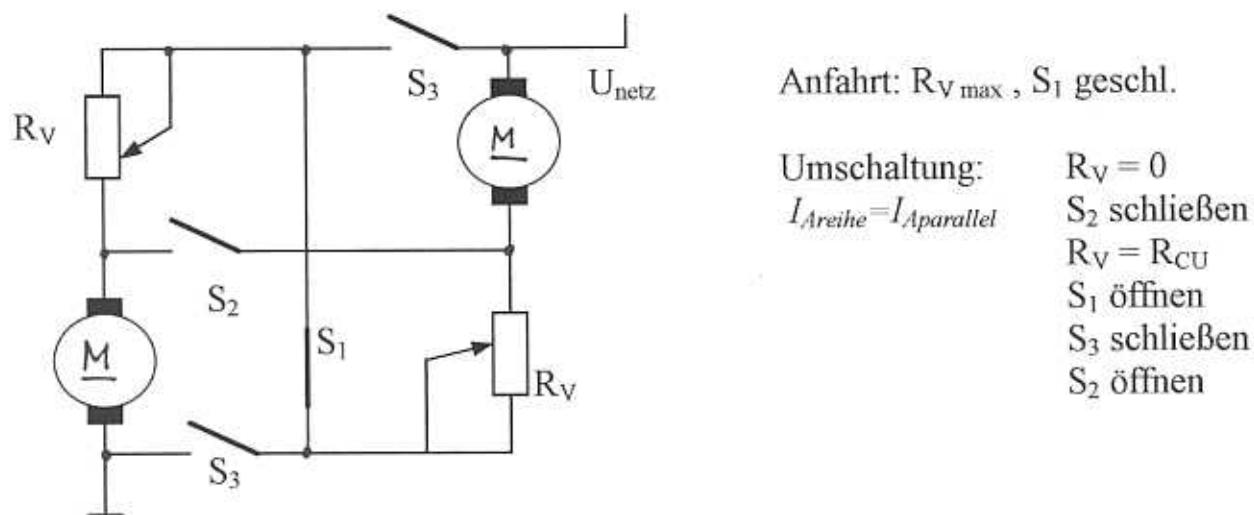
Richtungswechsel durch Umpolen des Ankerkreises

Variation der Ankerspannung durch Reihen- und Parallelschaltung

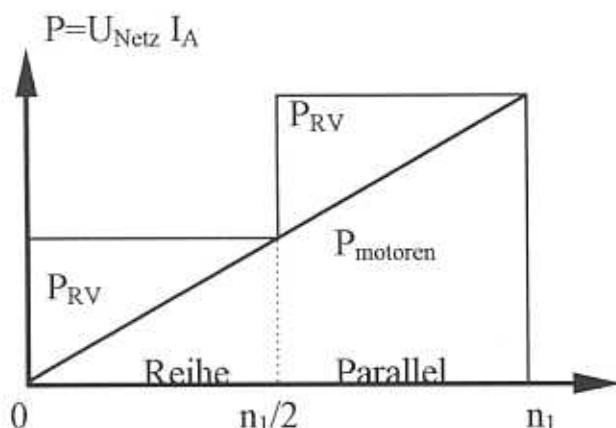
Vorwiderstände (stufig) im Ankerkreis

Feldschwächung durch Feldshunt auf minimal 50%, (Sonderfälle 25%)

Ankerspannungssteuerung bis  $n_1$



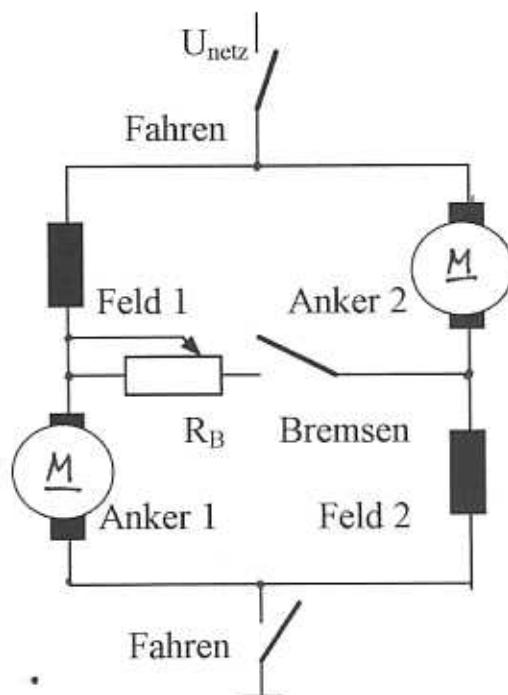
Aufteilung der aufgenommenen Leistung bei Anfahrt mit konstantem Ankerstrom



## Bremsschaltung mit parallelen Motoren

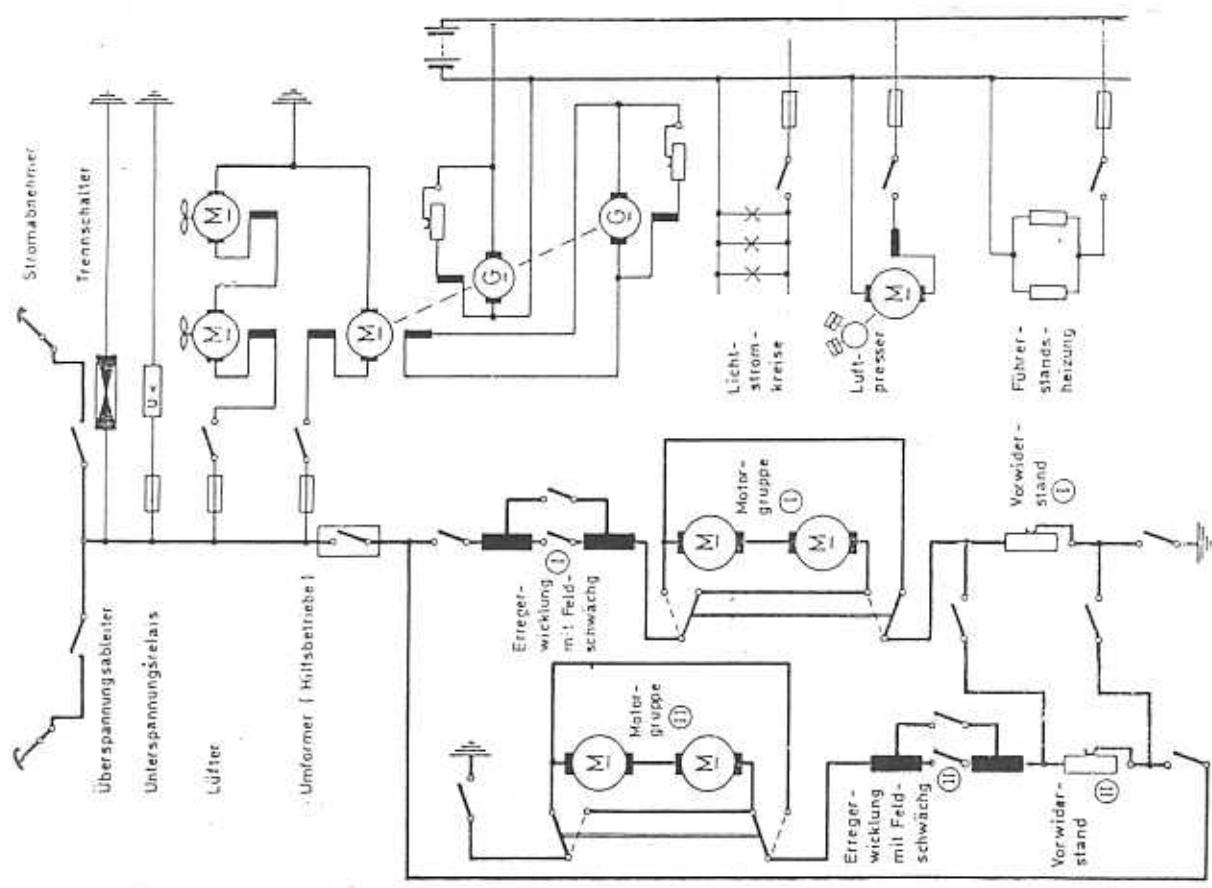
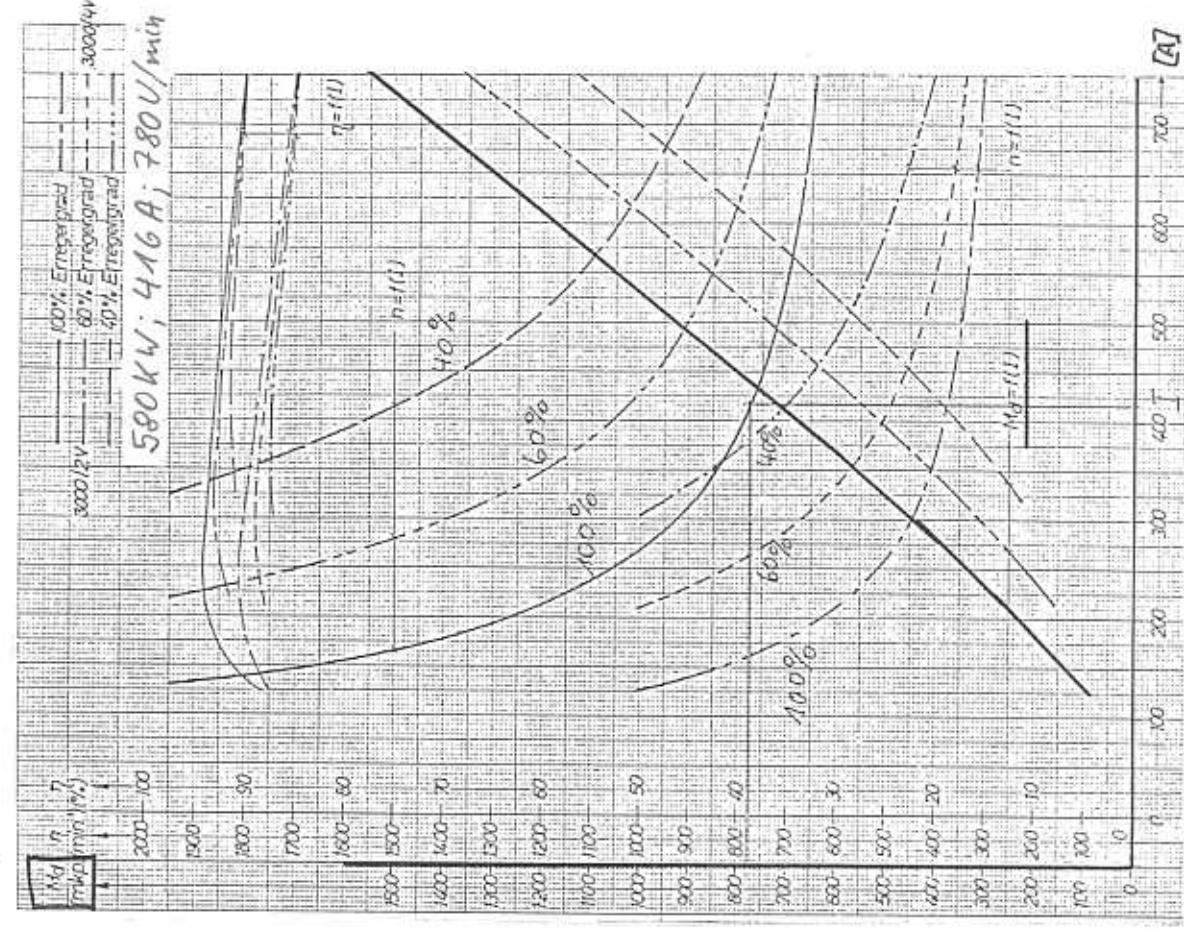
Feldkreuzung zur Symmetrierung notwendig  
 Viereckschaltung für Fahren/Bremsen ergibt  
 minimalen Schützaufwand

Die Größenordnung der elektrische Bremsleistung  
 beträgt  $3 P_{fahren}$ , bei  $I_{Fmax} = I_{Bmax}$  tritt im  
 Bremsen die 3-fache Motorspannung auf.



## Elektrische Auslegung

Schaltplan und Motorkennlinien einer vierachsigen 3kV DC Lok

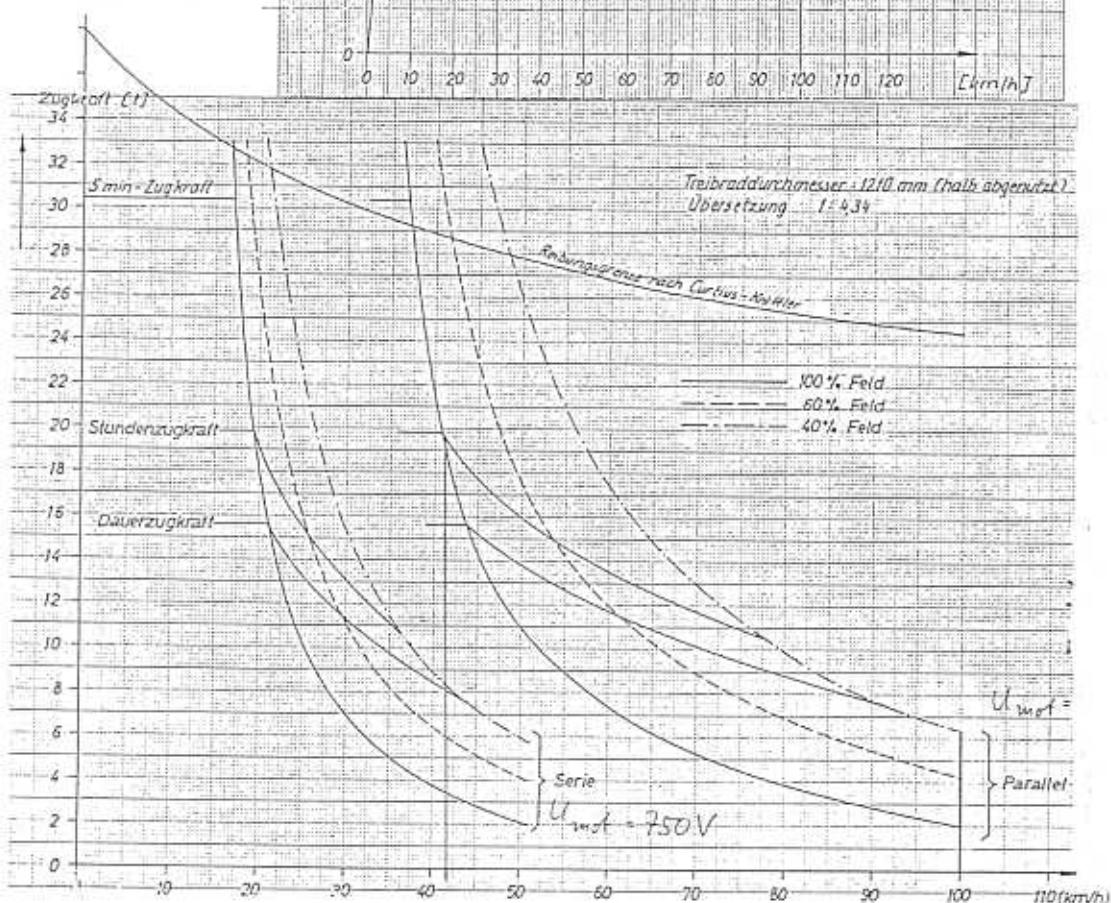
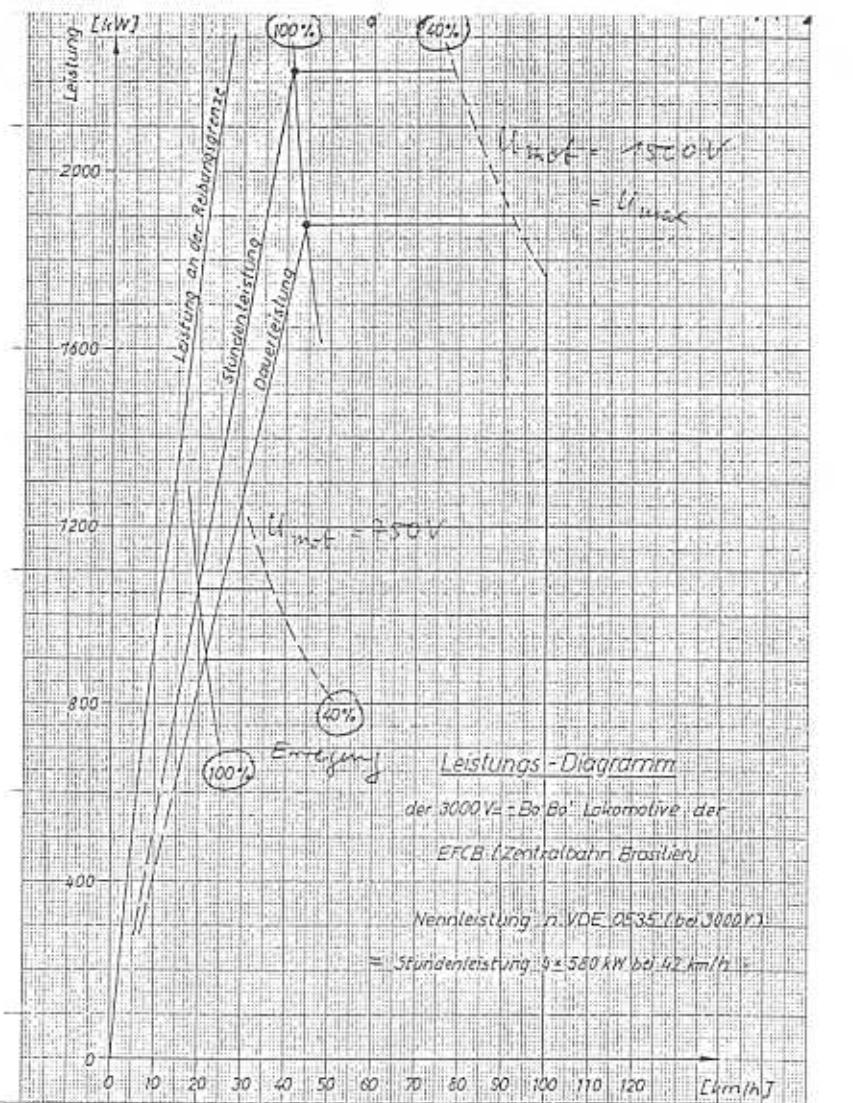


# Elektrische Auslegung

Leistungsdiagramm und

Z/v Kennlinien einer

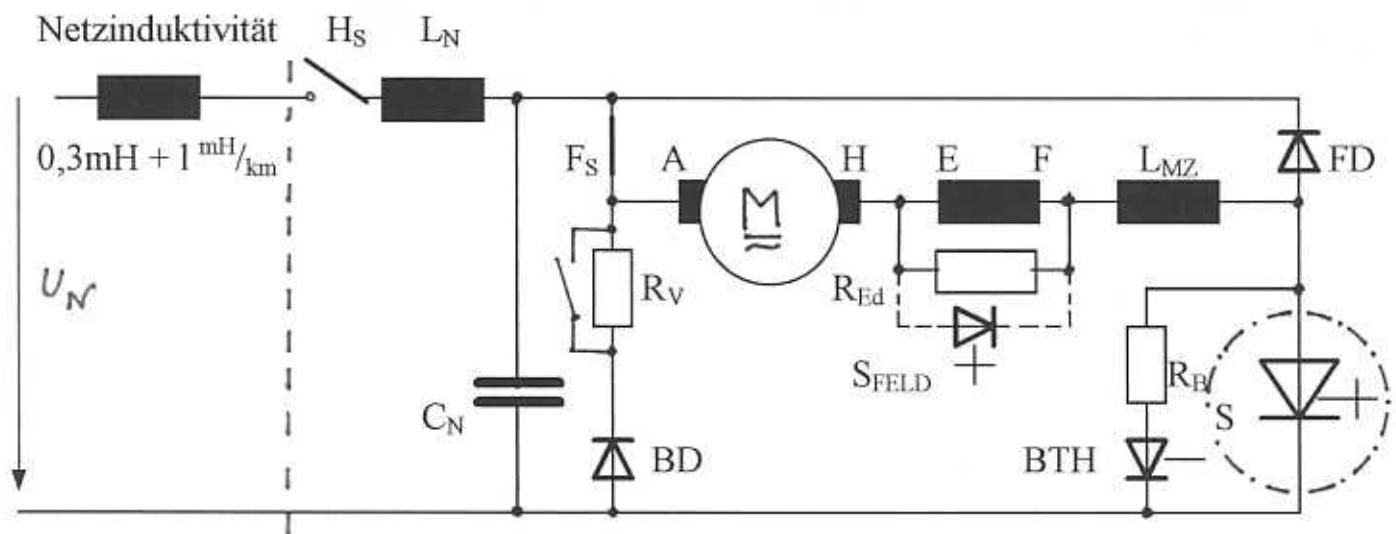
vierachsigen 3kV DC Lok



# Elektrische Auslegung

## 3.4.3.2 Anker- und Feldspannungssteuerung über Gleichstromsteller (Chopper)

Prinzipielle Anordnung von Netzfilter, Fahrzeugmotor und Chopper



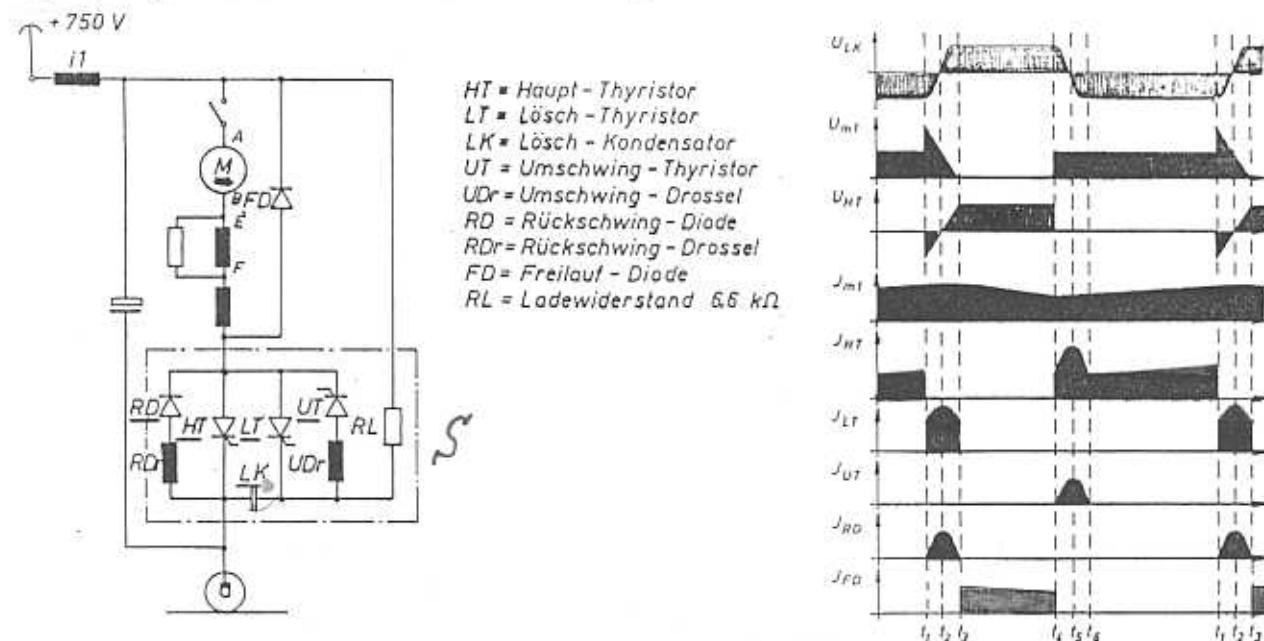
Das Netzfilter  $L_N$ ,  $C_N$  entkoppelt mehrere im Netz fahrende Fahrzeuge und dient zur Abschwächung der vom Steller verursachten Stromober schwingungen.

Die Motorzusatzdrossel  $L_{MZ}$  dient zur Glättung der Motorstromwelligkeit.

Der Gleichstromsteller (Chopper) besteht aus dem elektronischen Schalter S und der Freilaufdiode FD. Der Schalter S wird durch Thyristoren mit Löschkreis ( $f_{max} = 300\text{Hz}$ ), Gate-turn-off Thyristoren ( $f_{max} = 500\text{Hz}$ ) oder IGBT ( $f_{max} = 1\text{kHz}$ ) realisiert.

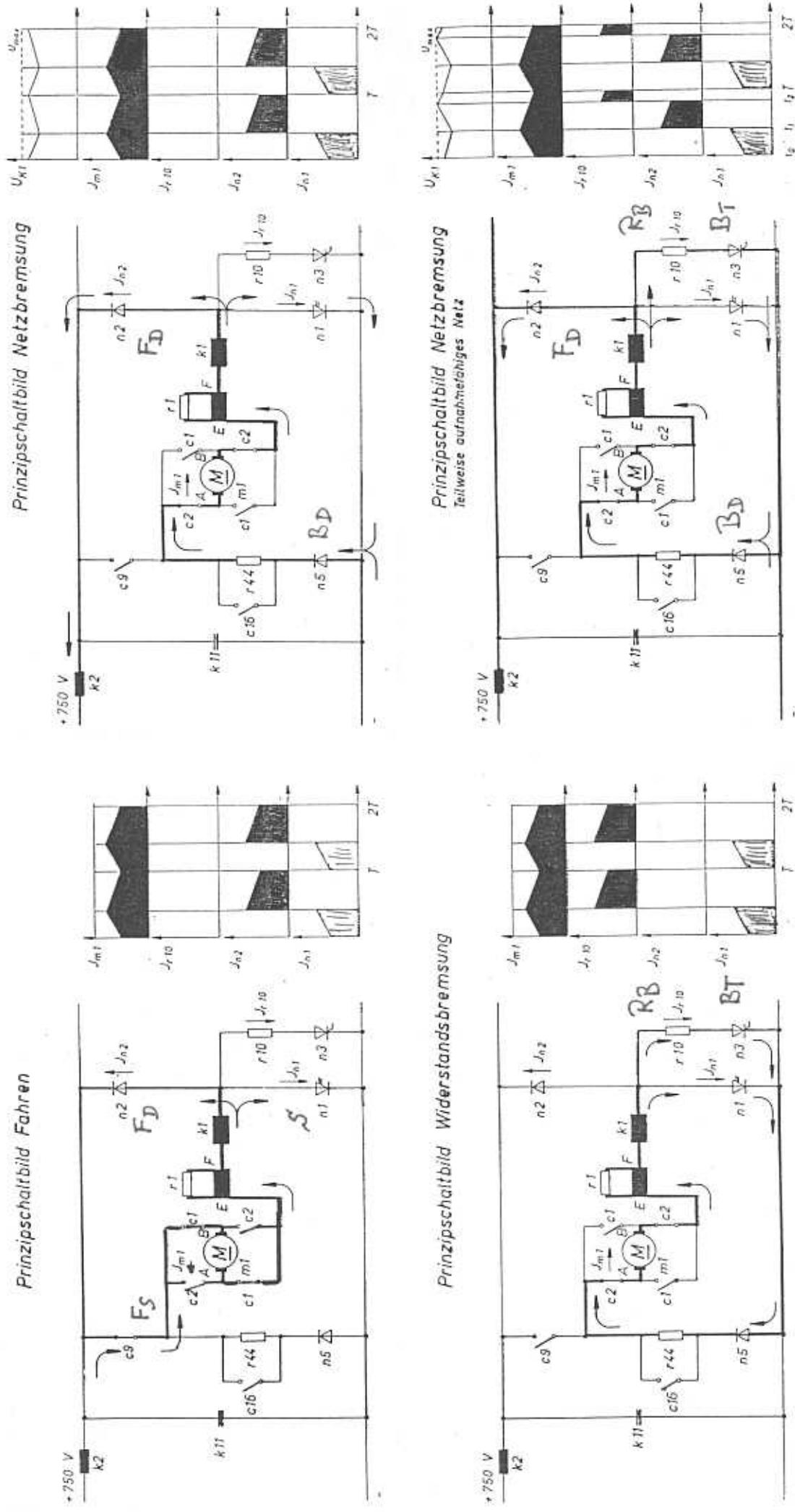
Die spannungsabhängige Netz- bzw. Widerstandsbremse wird nach dem Öffnen des Fahr-Bremsschützes  $F_S$  durch den Gleichstromsteller (S, FD), den Bremswiderstand  $R_B$ , den Bremsthyristor BTH sowie den Bremsvorwiderstand und die Bremsdiode BD ermöglicht.

## Spannungs - und Stromverläufe am Thyristor-Gleichstromsteller



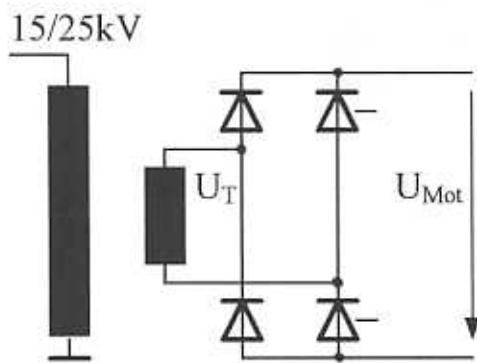
# Elektrische Auslegung

Prinzipschaltbild Fahren, Netz- und Widerstandsremse bei DC Triebfahrzeug mit Gleichstromsteller



# Elektrische Auslegung

## 3.4.3.3 Wechselstrom-Triebfahrzeuge mit Mischstrom-Reihenschlußmotoren



unsymmetrisch halbgesteuerte Brücke ( $B2H2$ )

$$U_{\text{mot}} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_r (1 + \cos \alpha)$$

kein Nutzbremsen ins Netz möglich  
Einsparung von Blindleistung  
halber Thyristoraufwand  
geringere Thyristorbelastung  
Freilaufzweig vorhanden

### Definition des totalen Leistungsfaktors $\lambda$

$$S = U_{\text{eff}} I_{\text{eff}}$$

im Netz auftretende Scheinleistung

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{\sum_{v=1}^{\infty} I_v^2}$$

Allgemeine Definition des Effektivwertes

$$P_v = U_v I_v \cos \varphi_v$$

Wirkleistung der Komponenten gleicher Frequenz  $v$

$$Q_v = U_v I_v \sin \varphi_v$$

Grundschwingungsblindleistung

$$D = \sqrt{\sum_{\mu=1}^{\infty} U_{\mu}^2 \sum_{v=1}^{\infty} I_v^2}$$

$v \neq \mu$  Verzerrungsblindleistung bei nichtsinusförmigen Größen

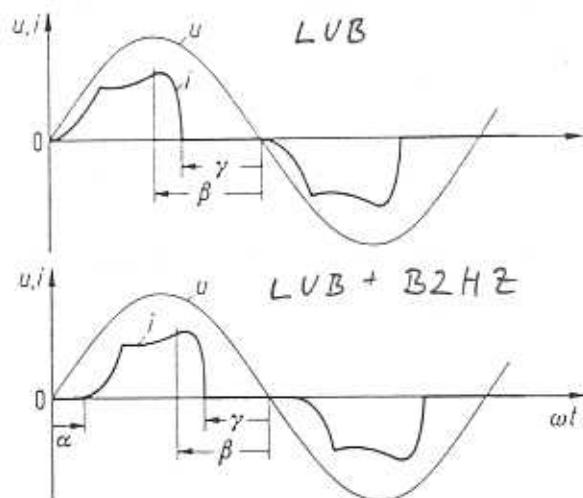
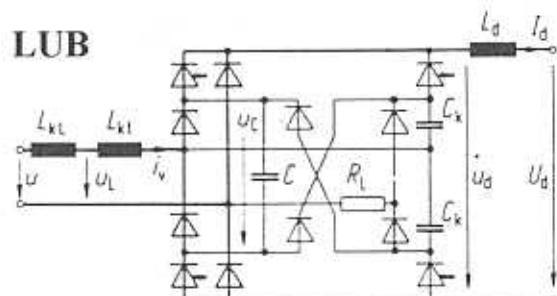
Bei sinusförmiger Netzspannung vereinfacht sich  $U_{\text{eff}}$  zu  $U_I$  und nur Komponenten mit  $f_I$  erzeugen Wirkleistung. Der Grundschwingungsgehalt (des Stromes) ist  $g_i = I_{I_{\text{eff}}} / I_{\text{eff}}$ :

$$\lambda = \frac{P}{S} = g_i \cos \varphi_i$$

Definition des totalen Leistungsfaktors

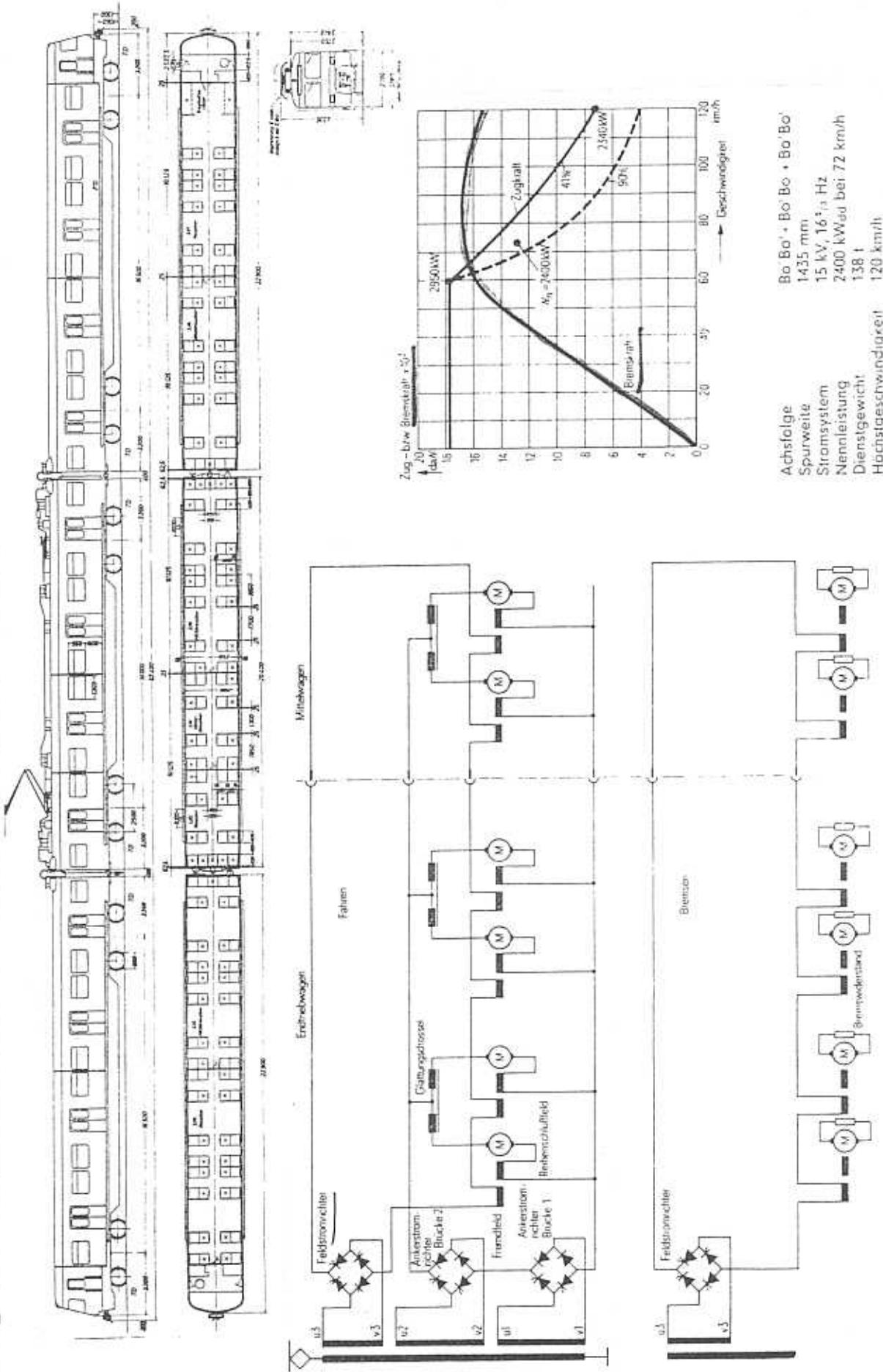
Bei netzgeführten Stromrichtern entsteht Grundschwingungsblindleistung durch die Verschiebung des Zündzeitpunktes beim Phasenanschnitt und durch die Kommutierung. Verringert werden kann diese Blindleistung durch Reihenschaltung von Stromrichtern.

Wird eine löscharbare Brückenschaltung (Prinzip des Phasenabschnittes) in Reihe mit einer konventionellen Brücke geschaltet so kann die Grundschwingungsblindleistung vermieden werden.



# Elektrische Auslegung

Prinzipschaltung eines Wechselstrom-Triebfahrzeugs mit Mischstromfahrmotoren



S-Bahntriebzug ET 420  
der Deutschen Bundesbahn

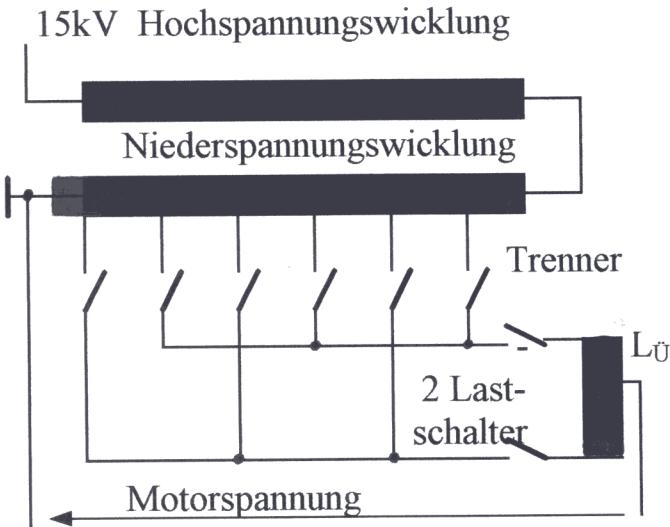
# Elektrische Auslegung

## 3.4.4. Triebfahrzeuge mit Einphasenwechselstrom- Kommutatormotoren

### Variation der Motorspannung durch Transformatanzapfungen

Angabe der Nennleistung bei 90% der höchsten Trafoleerlaufspannung

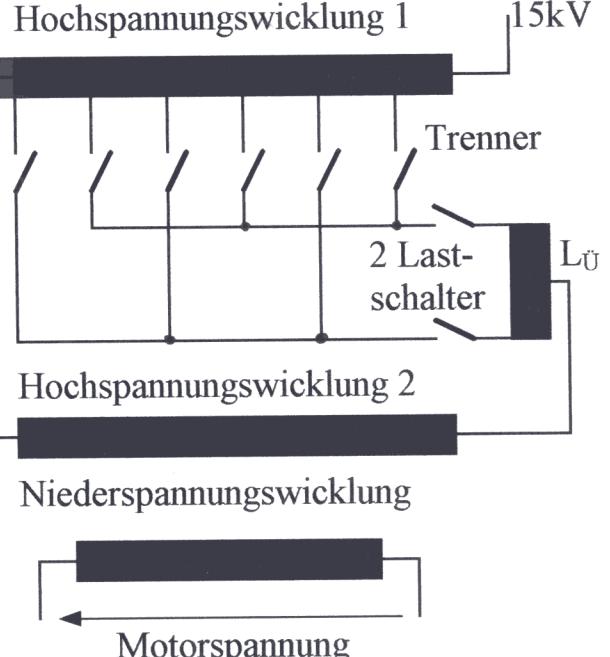
Niederspannungssteuerung



wenige Stufen

Erhöhung durch 3 Überschaltwiderstände  $L_U$

Hochspannungssteuerung



viele Stufen (bis 40) möglich

Trafo mit magnetischem Rückschlussschenkel  
( $\Phi_1$  constant,  $\Phi_2$  variabel )

### AC-Kommutatormotor („Bahnmotor“)

Dieser Motor entspricht in seinem prinzipiellen Aufbau dem Mischstrommotor, er ist immer voll gebleibt und mit Kompensationswicklung zur Sicherstellung eines günstigen  $\cos \varphi$  ausgeführt.

In der Zweiachsen-Darstellung, welche aus der räumlichen Anordnung der Wicklungen die Kopplung ableitet, wird die d-Achse durch  $X_E$  und die q-Achse durch  $X_A + X_K + X_W$  gebildet. Da das Erregerfeld senkrecht zur Ankerwicklung steht wird keine transformatorische Spannung in Anker induziert. Die Amplitude der in der q-Achse gerichteten EMK beträgt

$$\vec{E}_q = k_1 n \vec{\Phi} \quad k_1 \text{ dimensionsloser Faktor aus Wicklungsaufbau}$$

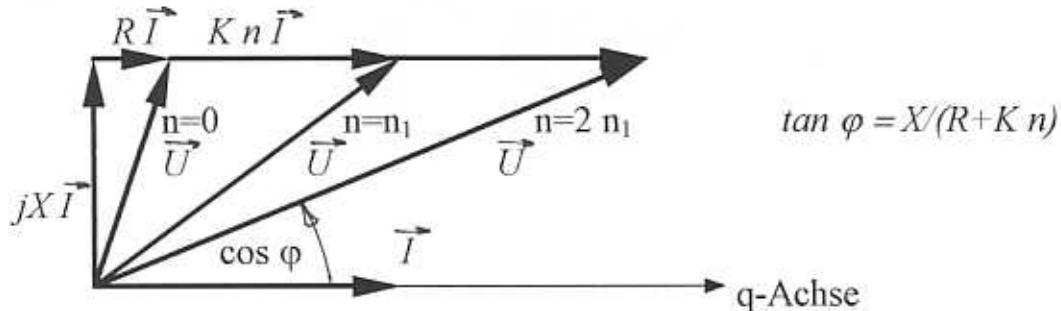
$$\vec{\Phi} = \frac{L_E}{W_E} \sqrt{2} I \quad \Phi, I \text{ und } E \text{ in q-Achse}$$

$$\vec{E}_q = K n \vec{\Phi} \quad K = \frac{2}{\pi} \frac{w_A}{w_E} \frac{p X_{Eh}}{f_1}$$

$$\vec{U} = (R_{Cu} + K n + j X) \vec{I} \quad (X = X_E + X_A + X_K + X_W) \quad (R = R_{Cu} = R_E + R_A + R_K + R_W)$$

# Elektrische Auslegung

Spannungsdiagramm bei konstantem Motorstrom



Aus dem Diagramm ist der ungünstige  $\cos \varphi$  beim Anfahren (bzw. kleine Motorspannungen) erkennbar. Die Auslegung zielt daher auf ein großes K durch hohe Polpaarzahl p= 6-14 und niedrige Frequenz  $f_1$ .

Der zeitliche Mittelwert des Drehmomentes ergibt sich aus der Leistungsbilanz

$$M_i = \frac{K}{2\pi} I^2 \approx U^2 \quad m(t) = M_i (1 - \cos 4\pi f_1 t) \quad M_i \quad \text{inneres Moment}$$

$$n = \frac{X U \cos \varphi}{\sqrt{2\pi K} \sqrt{M_i}}$$

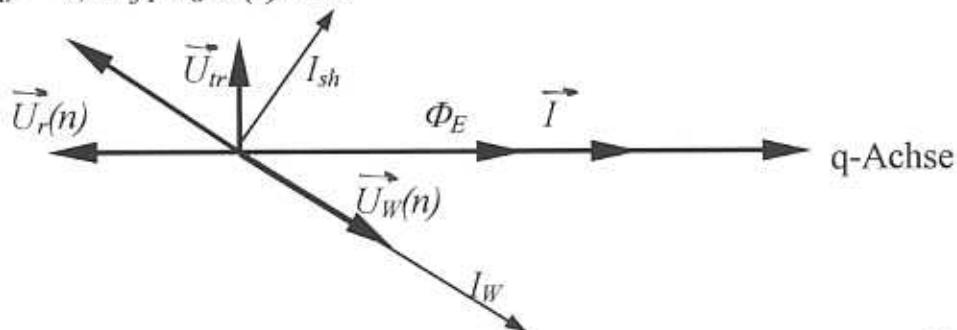
Gegenüber einem Mischstrommotor sind die Kennlinien bei kleiner Spannung abgesunken, d.h. das abgebare Moment ist verringert.

Feldschwächung ist aufgrund der transformatorischen Kopplung der Erregerwicklungen nicht möglich.

**Gleichstrom Widerstandsbremsung** durch Fremderregung des Feldes mit Gleichstrom. Netzbremsung durch Kunstschaltungen ( Behn-Eschenburg) möglich

## Das Sonderproblem der Kommutierung

Zu der in die -q-Achse gerichteten Stromwende- und Bewegungsspannung  $U_r(n)$  addiert sich vektoriell die transformatorisch in die kommutierende Ankerwindung induzierte Spannung  $U_{tr} = -d\Phi/dt$  durch den (voll verketteten) sinusförmigen Erregerfluß  $\Phi$ .  $U_{tr} + U_r(n)$  kann durch ein gegenüber dem Fluß um den Winkel  $\beta$  phasenverschobenes Wendepolfeld  $U_W$  kompensiert werden. Die Verschiebung erfolgt durch einen Parallelwiderstand zur Wendepolwicklung. Da  $U_{tr}$  unabhängig von der Drehzahl  $n$  ist, ist kann nur in einem Punkt vollständig kompensiert werden. Bei  $n=0$  tritt daher die maximale Lamellenspannung  $U_{tr} = 4,44 f_1 w_a \Phi(I)$  auf.



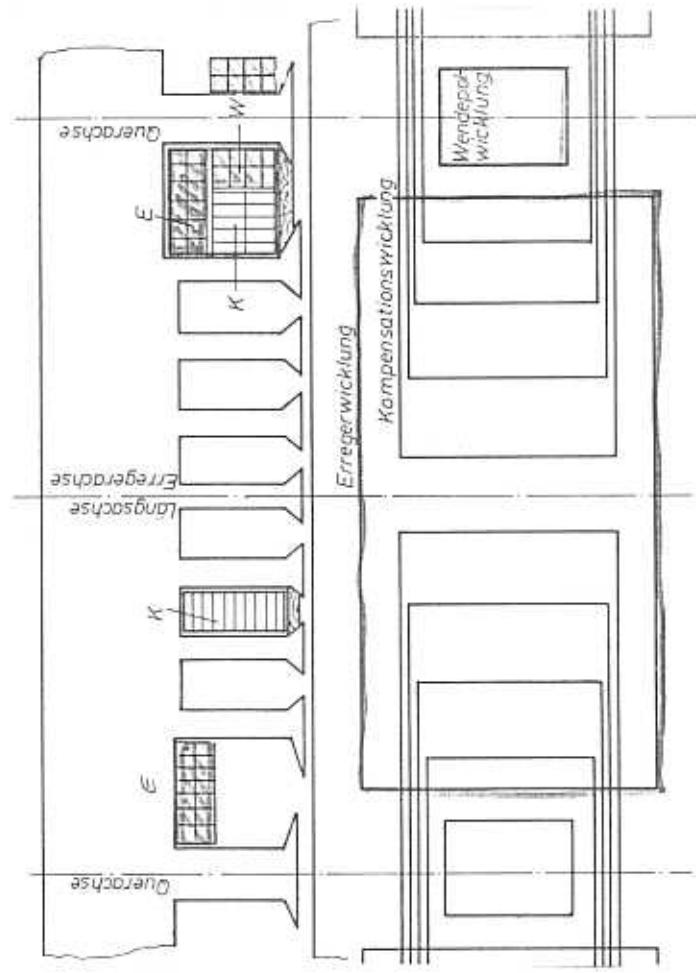
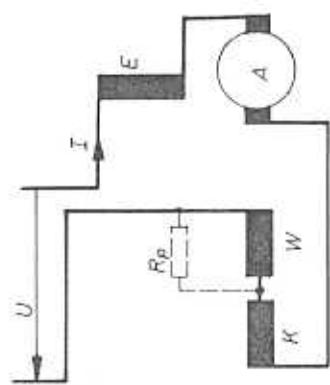
# Elektrische Auslegung

## Wicklungsanordnung und Kennlinien eines Einphasen-Reihenschluß-Motors

$$\frac{R_d}{R_w} = \frac{R_d}{R_w + 2000}$$

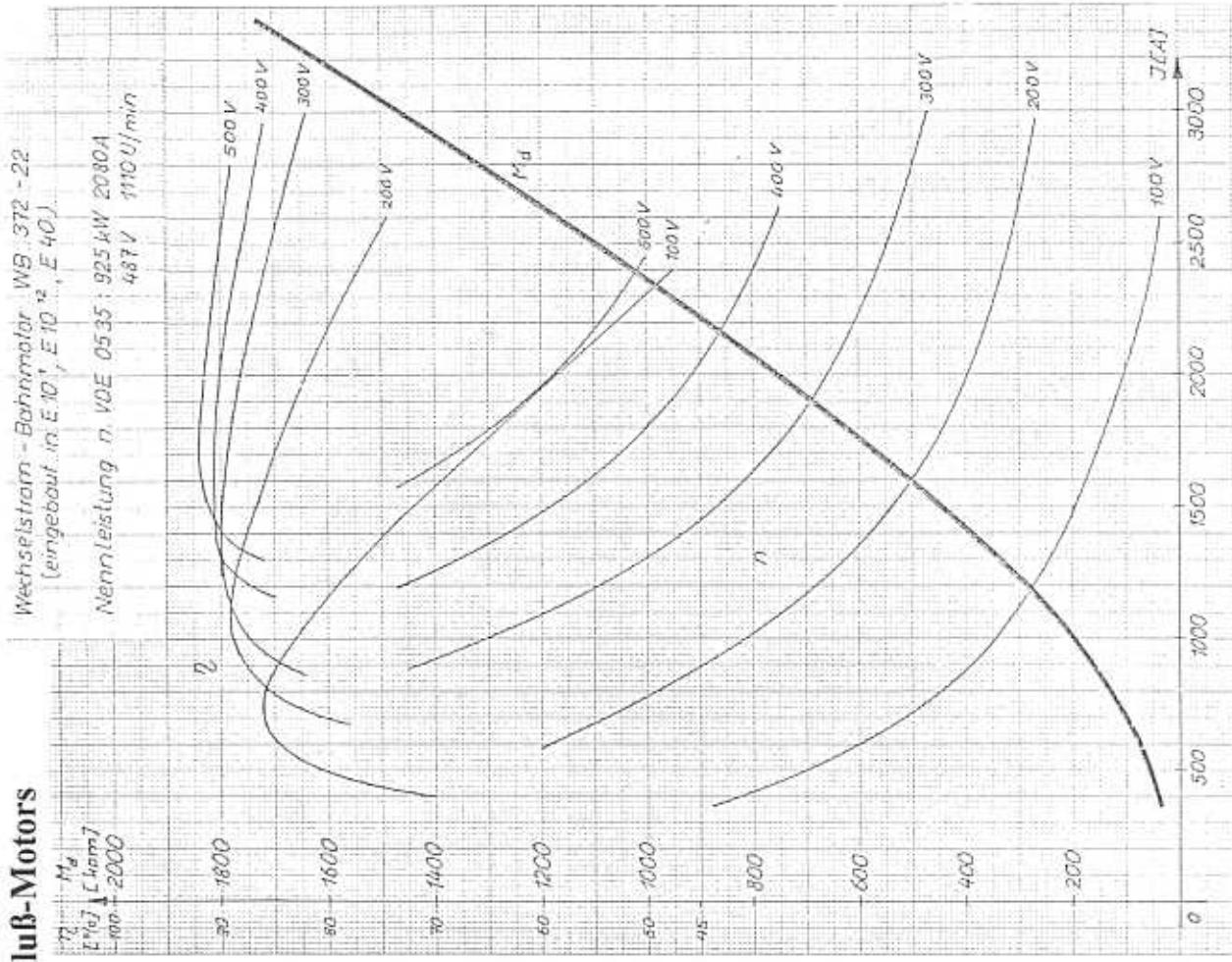
$$R = R_E + R_A + R_K + R_W$$

$$X = X_E + \underbrace{X_{E\sigma} + X_{A\sigma}}_{X_d} + \underbrace{X_{K\sigma} + X_{W\sigma}}_{X_q}$$



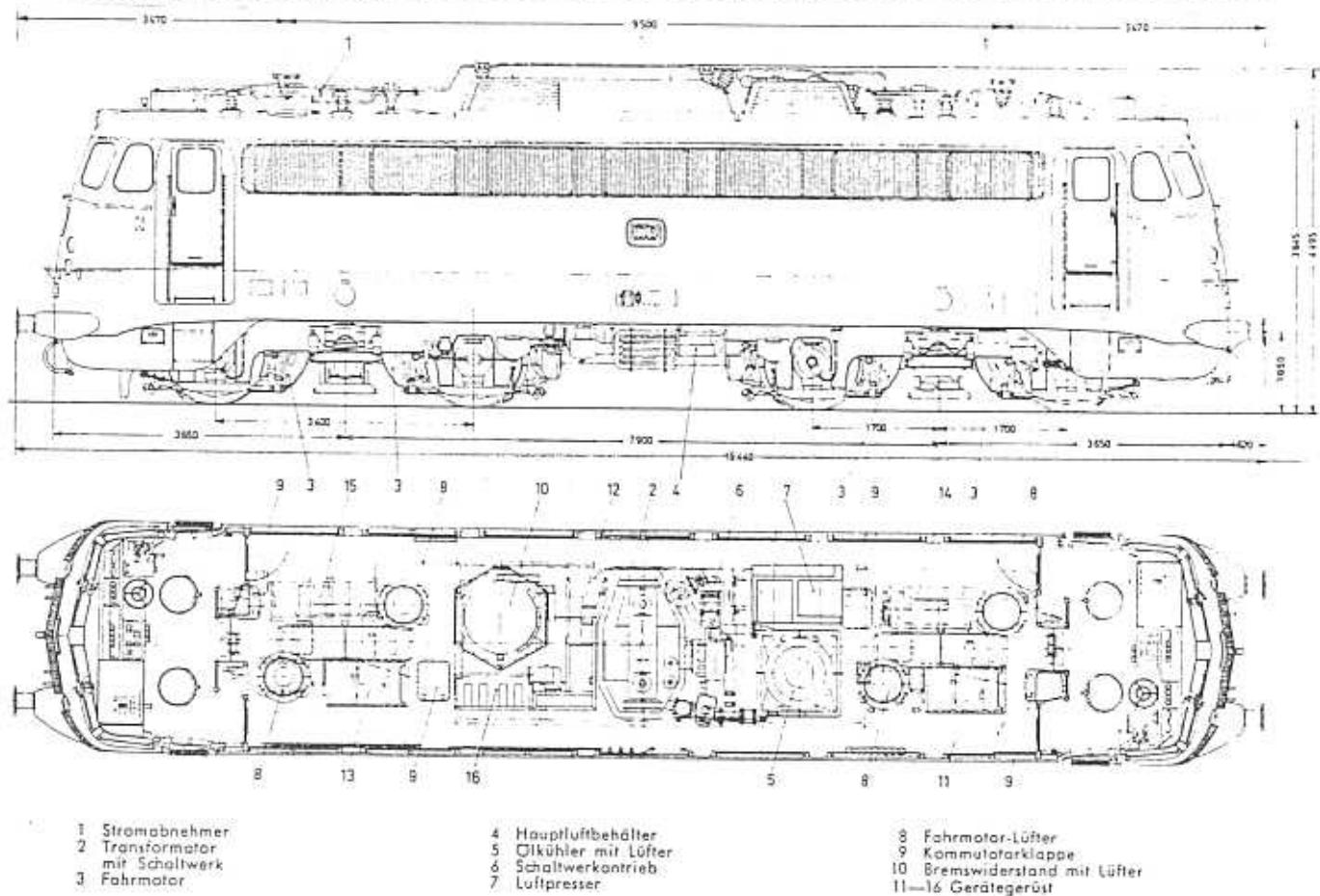
Wechselstrom - Bahnmotor WB 372 - 22  
(eingebaut in E.W. 12, E 40 J.)

Nennleistung n. VDE 0535: 925 kW 2080 A  
487 V 110 U/min



# Elektrische Auslegung

## Elektrische Lokomotive BR 110 mit $16\frac{2}{3}$ Hz Einphasen-Reihenschluß-Motoren



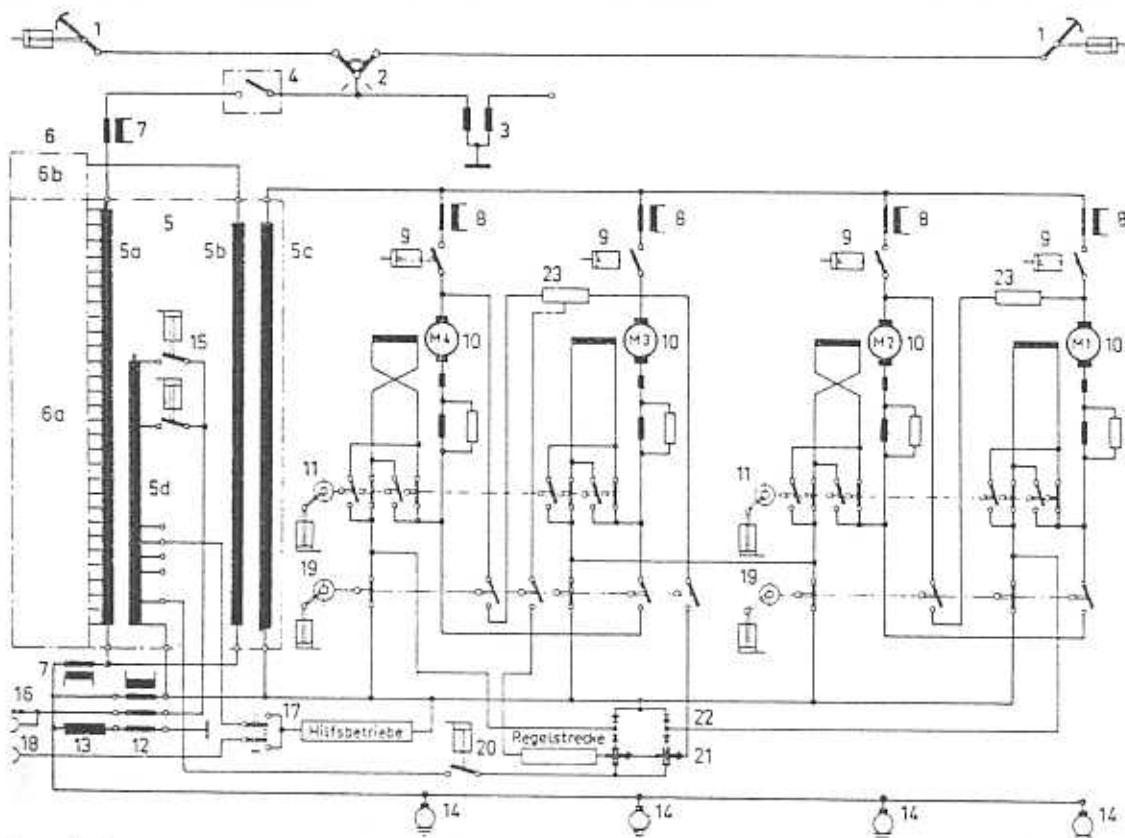
### Allgemeine Angaben

#### Kenndaten:

Stromsystem	Einphasen-Wechselstrom 15 000 Volt, $16\frac{2}{3}$ Hz
Nennleistung (n. VDE 0535 v. 1. 55)	
bei einer Geschwindigkeit von 120 km/h	3 700 kW
Größte zulässige Geschwindigkeit	150 km/h
Größte zulässige Anfahrzugkraft	28 t
Anzahl der Fahrstufen	28
Anzahl der Fahrmotoren	4
Polzahl der Fahrmotoren	14
Antriebsart	Gummiringfederantrieb mit zweiseitigem Stirnradgetriebe
Übersetzung des Zahnradgetriebes	1 : 2,111
Dienstgewicht = Reibungsgewicht	86 t
Länge über Puffer	16 440 mm
Drehzapfenabstand	7 900 mm
Achsstand der Drehgestelle	3 400 mm
Gesamtachsstand	11 300 mm
Treibraddurchmesser neu	1 250 mm
Kleinster befahrbarer Krümmungshalbmesser	100 m
Kleinster befahrbarer Scheitelhalbmesser von Ablaufbergen	200 m
Bauart der Bremsen	
Druckluftbremse:	Einlösige Knorr-Einkammer-Druckluftbremse mit geschwindigkeitsabhängiger Bremsdruckregelung und mit Zusatzbremse (KS m Z)
Elektrische Bremse	Gleichstrom-Widerstandsbremse
Handbremse	Eine Spindelhandbremse je Führerraum, wirkt auf das Bremsgestänge des nächstgelegenen Drehgestells (1 Radsatz)

# Elektrische Auslegung

## Prinzipschaltplan der elektrischen Lokomotive BR 110

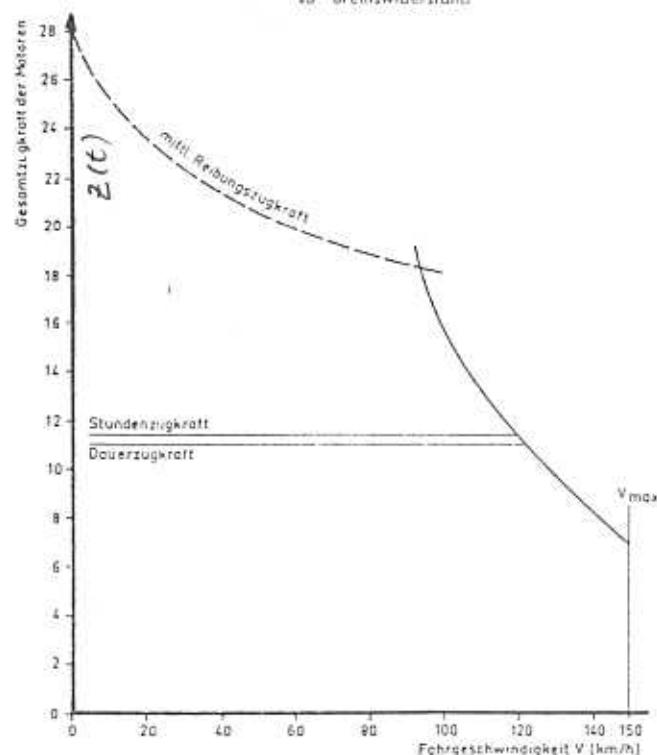


- 1 Stromabnehmer  
 2 Dachtrennschalter  
 3 Oberspannungswandler  
 4 Druckluftschneidschalter  
 5 Haupttransformator  
 5a Stufenwicklung  
 5b Oberspannungswicklung  
 5c Unterspannungswicklung  
 5d Hilfswicklung  
 6 Hochspannungsschaltwerk

- 6a Lastschalter  
 7 Oberstromwandler  
 8 Fahrstromwandler  
 9 Fahrmotortrennschutz  
 10 Fahrmotor  
 11 Richtungswender  
 12 Kompensierter Erdstromwandler  
 13 Schutzdrossel  
 14 Raderde

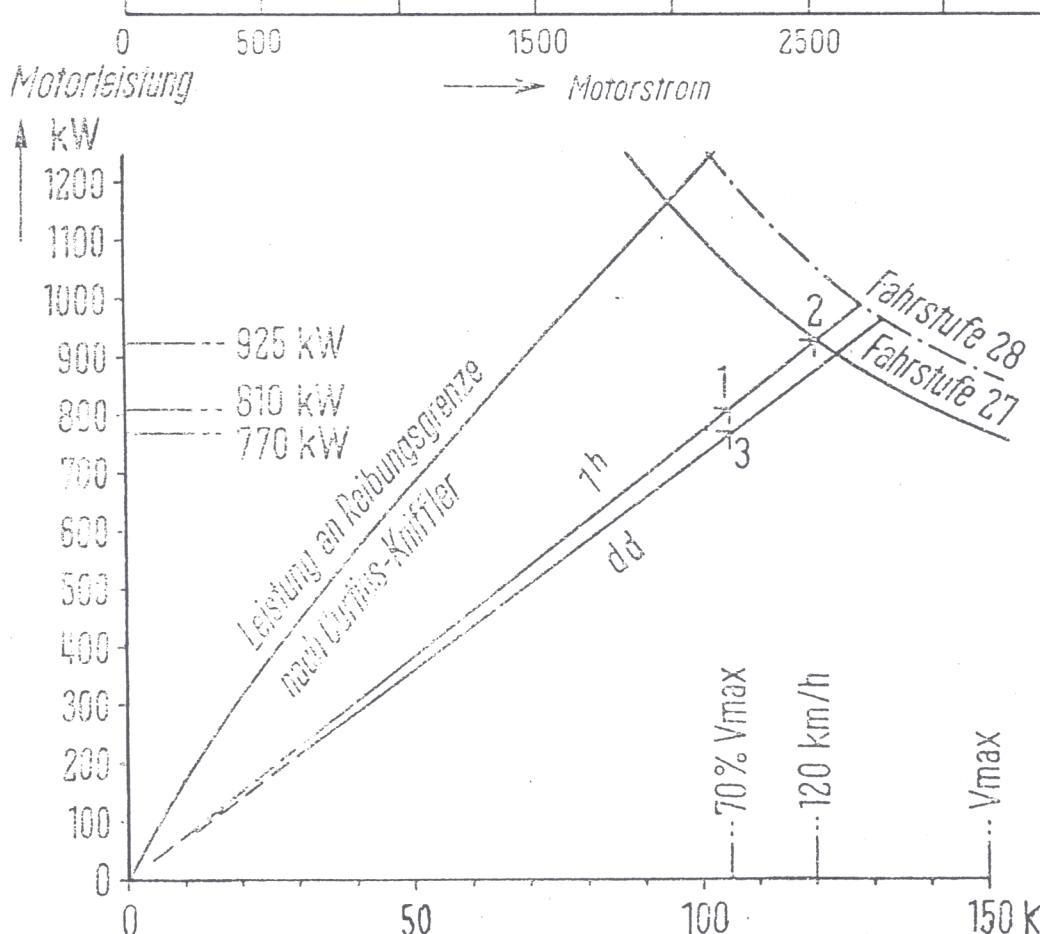
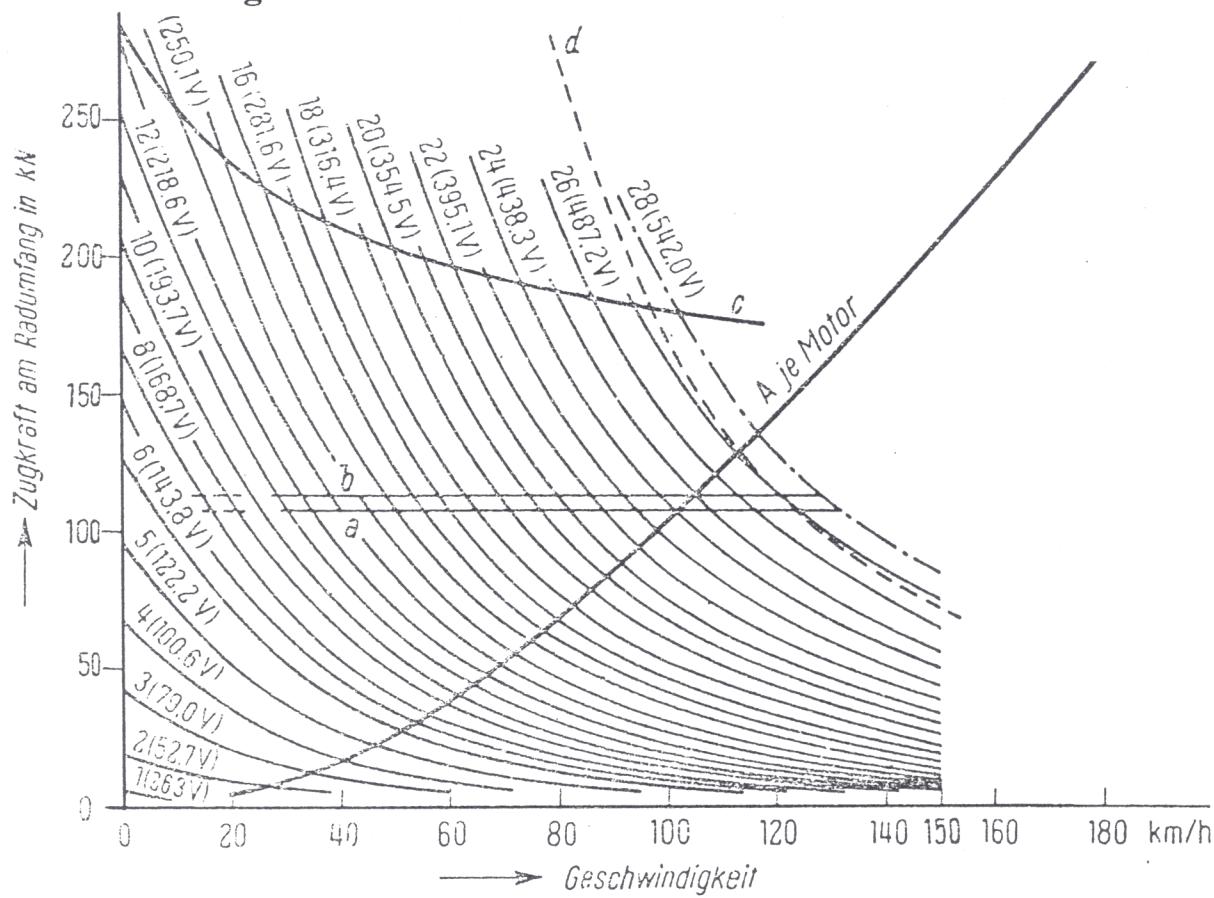
- 15 Heizschütz für Zugheizung  
 16 Heizkupplung für Zugheizung  
 17 Prüfumschalter für Hilfsspannung  
 18 Prüfkupplungsdose für stationäre Prüfung der Hilfsbetriebe  
 19 Führbremswender  
 20 Bremsereggerschutz  
 21 Magnetverstärker für Bremseregung  
 22 Gleichrichter für Bremseregung  
 23 Bremswiderstand

Anhängelast	Steigung	Beharrungsgeschwindigkeit
Schnellzugdienst		
855 t	0 ‰	150 km/h
430 t	5 ‰	150 km/h
560 t	5 ‰	140 km/h
355 t	10 ‰	140 km/h
Güterzugdienst		
1 300 t	0 ‰	105 km/h
1 310 t	5 ‰	70 km/h
1 115 t	5 ‰	80 km/h
1 100 t	10 ‰	50 km/h



# Elektrische Auslegung

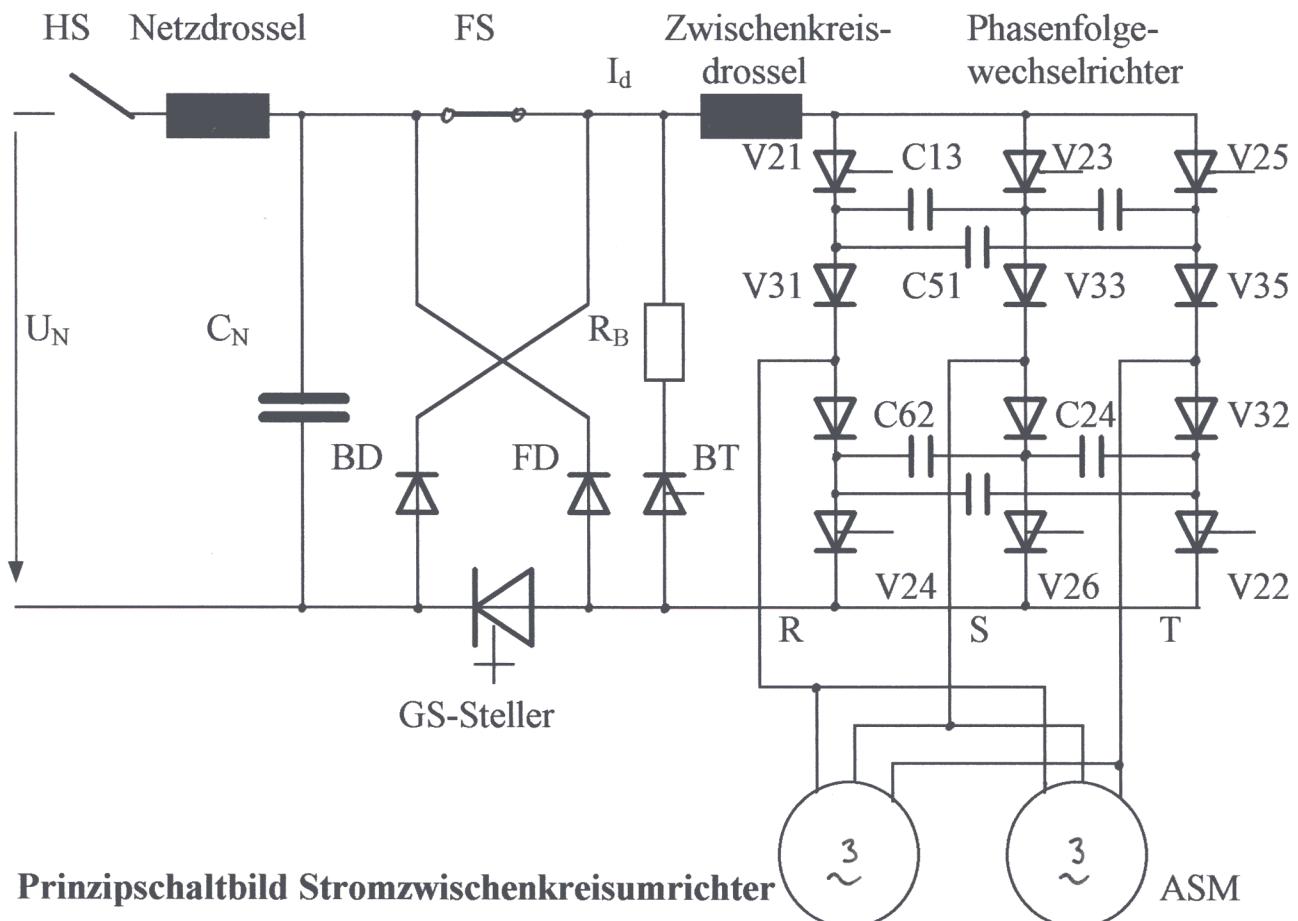
## Z/v und P/v Diagramme der elektrischen Lokomotive BR 110



# Elektrische Auslegung

## 3.4.5 DC-Triebfahrzeuge mit Steller, I-Umrichter und Drehstromfahrmotoren

Bei dieser seit Anfang 80er Jahre realisierten Technik ist der DC-Motor eines Chopper-Fahrzeugs durch einen Phasenfolgewechselrichter (I-WR) zur Speisung der Asynchronmaschine mit variabler Statorstromfrequenz  $f_1$  ersetzt worden. Sinngemäß übernimmt der I-WR die Funktion des mechanischen Kommutators und der Wendeschütze. Die Amplitude des Zwischenkreisstromes wird über die Aussteuerung des Gleichstromstellers gesteuert.



Prinzipschaltbild Stromzwischenkreisumrichter

Durch zyklisches Weiterschalten wird ein Drehfeld in der ASM erzeugt. Dabei bilden V21, V23, V25 und V22, V24, V26 jeweils eine Kommutierungsgruppe. Zu Beginn werden die zugeordneten Kommutierungskondensatoren  $C_K$  ( $C_{13}, C_{35}, C_{51}$ ) bzw. ( $C_{24}, C_{46}, C_{62}$ ) über Widerstände vorgeladen. Der Zwischenkreisstrom  $I_d$  fließt nach Zünden von V21 und V22 in die Motorphase R hinein und aus der Phase T heraus. Zum Weiterschalten des Zwischenkreisstromes auf den nachfolgenden Strang ist eine dreischrittige Kommutierung notwendig. Für die Drehfeldfolge RST wird V23 gezündet und im ersten Schritt über den Kommutierungskondensator  $C_{13}$  der Thyristor V21 gelöscht. Der Strom  $I_d$  fließt dann über die Kondensatoren  $C_{13}, C_{35}, C_{51}$  und die Diode V31 während des zweiten Schrittes weiter in die Phase R. Dabei werden die Kondensatoren umgeladen, bis sich die Spannung an der Diode V33 umgepolt hat und sich ein LC Schwingkreis mit den Größen  $1,5 C_K$  und  $2 L_\sigma$  (Maschinenstreuinduktivität) bildet. Der Schwingkreisstrom  $I_K$  des dritten Schrittes ist dem Strom  $I_d$  in der Diode V31 entgegengesetzt gerichtet. Erreicht der Kommutierungsstrom  $I_K$  den Wert  $I_d$ , verlöscht V31 und der Zwischenkreisstrom hat von Phase R auf S gewechselt.

# Elektrische Auslegung

Während der Kommutierung wird auf die zugehörige sinusförmige Motorklemmenspannung  $U_{RT}$  die Kommutierungsspannung  $U_K$  aufgesattelt.

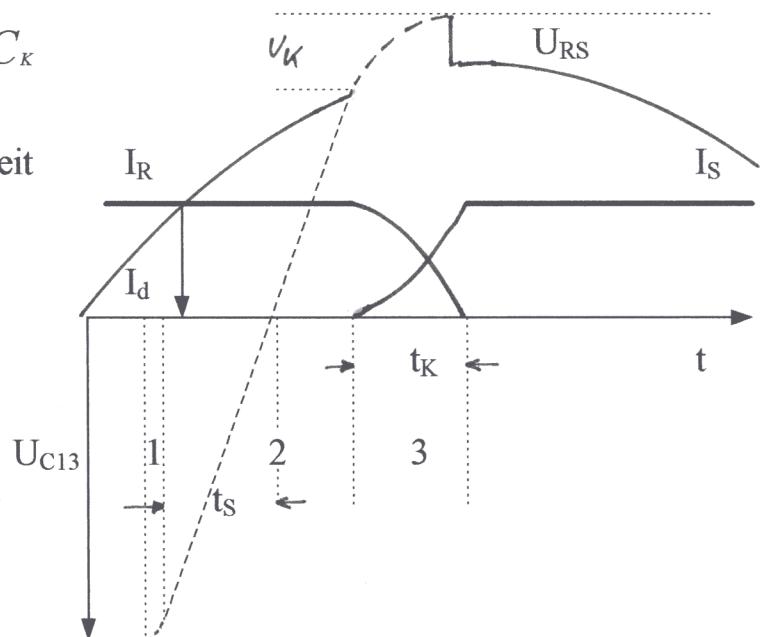
$$U_K = I_d \sqrt{2L_\sigma/C_{res}} \quad C_{res} = \frac{3}{2} C_K$$

$$t_K = \frac{\pi}{2} \sqrt{2L_\sigma C_{res}} \text{ Kommutierungszeit}$$

$$t_s = \frac{U_K + U_M}{I_d} C_{res} \text{ Schonzeit}$$

$$U_{RS} = U_R - U_S$$

$$I_{1eff} = 0,78 I_d \quad \text{eff. Strangströme}$$



## Charakteristiken des Stromzwischenkreisumrichters

Kommutierung über die Maschinenstreuinduktivität  $L_\sigma$ ; Maschine mit kleinem  $\sigma$  wählen.

Spannungsbelastung der Komponenten erfordert große Kommutierungskapazitäten  $C_K$ .

resultierende Schonzeit erfordert nur mittelschnelle Thyristoren (Freiwerdezeit  $t_q < 50\mu s$ ).

$120^\circ$  blockförmige Maschinenströme bewirken Pendelmomente niedriger Frequenz.

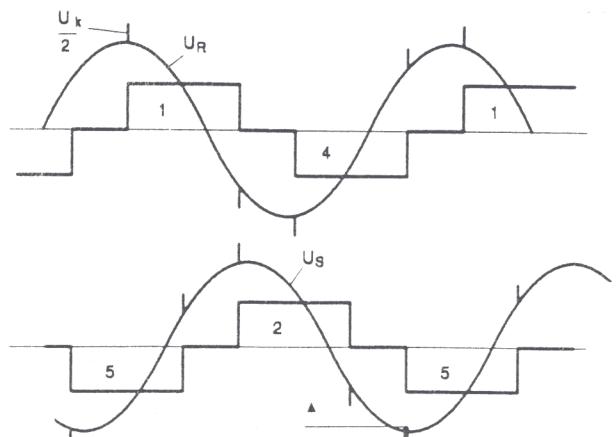
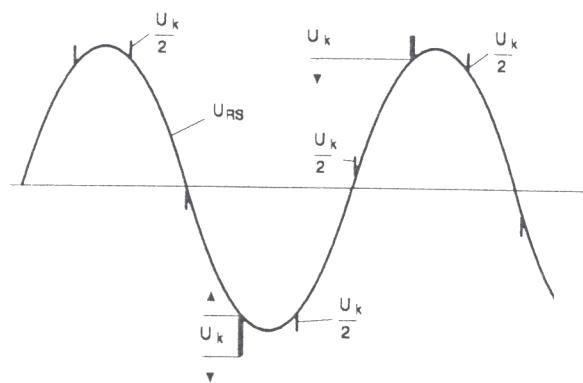
Pulsbetrieb durch Vor- und Zurückschalten nur im Anfahrbereich möglich.

Antakten nur im Stand ohne innere Maschinenspannung, da Vorladung nur für V21, V22.

Im Rollen (ohne Moment) muß der Magnetisierungsstrom weiterhin fließen.

Feldschwächbetrieb durch Erhöhung der Statorstromfrequenz bei gleichbleibender innerer Maschinenspannung durch sinkenden Magnetisierungsstrom

## Spannungs- und Stromverläufe



# Elektrische Auslegung

## Darstellung der Asynchronmaschine im d,q System.

Die Darstellung der ASM im Zweiachsensystem der Raumzeiger ermöglicht z.B die einfache Behandlung von Ausgleichsvorgängen und der feldorientierten Regelung.

Voraussetzungsgemäß sind die Impedanzen der drei Stränge identisch und der Sternpunkt ist nicht angeschlossen (kein Nullsystem). Dann wird die ASM beschrieben durch:

$$\vec{U}_1^s = R_1 \vec{I}_1^s + \frac{d}{dt} \vec{\Psi}_1^s \quad \text{Statorsystem (Index S)}$$

$$0 = R_2' \vec{I}_2^r + \frac{d}{dt} \vec{\Psi}_2^r \quad \text{Rotorsystem (Index R)}$$

Beide Systeme sind über die Flußgleichungen gekoppelt, die Lageabhängigkeit der Koppelinduktivität  $L_H$  wird durch den zeitabhängigen elektrischen Winkel  $\beta(t)$  beschrieben:

$$\vec{\Psi}_1^s = L_1 \vec{I}_1^s + L_H e^{j\beta L} \vec{I}_2^r$$

$$\vec{\Psi}_2^r = L_2 \vec{I}_2^r + L_H e^{-j\beta L} \vec{I}_1^s$$

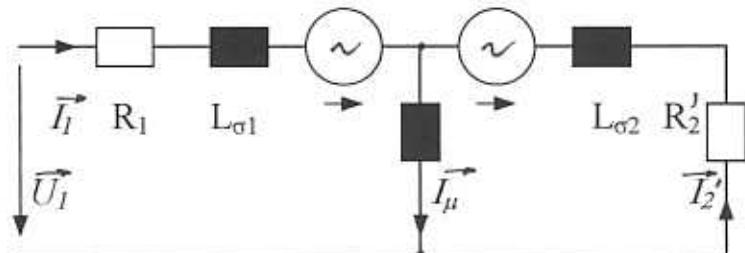
$\vec{I}_1^s = \vec{I}_1^K e^{j\beta K}$  allgemeine Transformation in das K System

$$\vec{U}_1^K = R_1 \vec{I}_1^K + \frac{d}{dt} \vec{\Psi}_1^K + j\omega_K \vec{\Psi}_1^K$$

$$0 = R_2' \vec{I}_2^K + \frac{d}{dt} \vec{\Psi}_2^K + j\omega_2 \vec{\Psi}_2^K$$

$$\vec{\Psi}_1^K = L_H (\vec{I}_1^K + \vec{I}_2^K) + L_{\sigma 1} \vec{I}_1^K$$

$$\vec{\Psi}_2^K = L_H (\vec{I}_1^K + \vec{I}_2^K) + L_{\sigma 2} \vec{I}_2^K$$



Durch Verschiebung der rotorseitigen Streuinduktivität auf die Statorseite entfällt die feldschwächende Ankerrückwirkung der Rotorströme. Dabei werden die Größen:

$$\vec{I}_T = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 \frac{L_2}{L_H} \quad L_T = \left( \frac{L_2}{L_H} \right)^2 = L_1 (1 - \sigma) \quad \vec{I}_2^r = \vec{I}_2 \frac{L_2}{L_H} \quad R_2^T = R_2 \left( \frac{L_H}{L_2} \right)^2$$

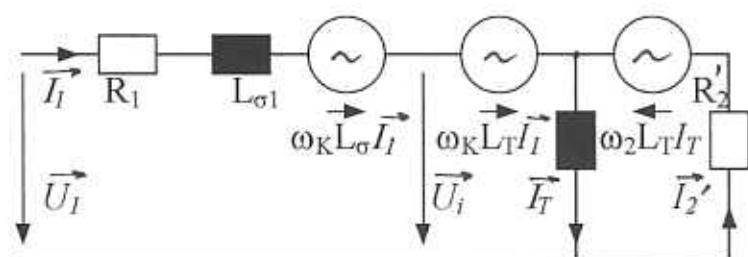
definiert.

$$\vec{U}_1 = R_1 \vec{I}_1 + L_\sigma \frac{d}{dt} \vec{I}_1 + L_T \frac{d}{dt} \vec{I}_T + j\omega_K (L_\sigma \vec{I}_1 + L_T \vec{I}_T)$$

$$0 = R_2^T (\vec{I}_T - \vec{I}_1) + L_T \frac{d}{dt} \vec{I}_T + j\omega_2 L_T \vec{I}_T$$

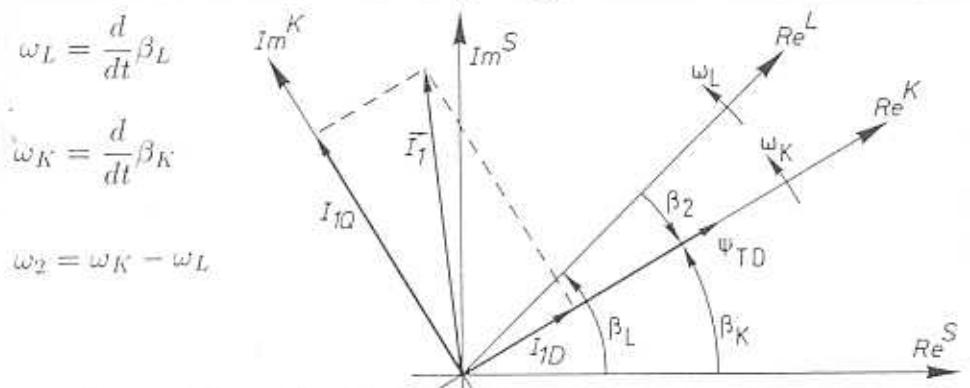
innere Maschinenspannung

$$\vec{U}_i = L_T \frac{d}{dt} \vec{I}_T + j\omega_K L_T \vec{I}_T$$



# Elektrische Auslegung

Orientierung der stator-, rotor-, und flußfesten Koordinatensysteme



Alle Raumzeiger werden am mit  $\omega_K$  rotierenden d/q Koordinatensystem zerlegt und als Bezugsachse für den Flußvektor wird die d-Achse gewählt ( $I_{Tq}=0$ ):  
 $I_{Td}$  stellt damit die feldbildende Komponente dar.

$$U_{1d} = R_1 I_{1d} + L_\sigma \frac{d}{dt} I_{1d} + L_T \frac{d}{dt} I_{Td} - j\omega_K L_\sigma I_{1q}$$

$$U_{1q} = R_1 I_{1q} + L_\sigma \frac{d}{dt} I_{1q} + L_T \frac{d}{dt} I_{Tq} + j\omega_K L_\sigma I_{1d}$$

$$0 = R_2 (I_{Td} - I_{1d}) + L_T \frac{d}{dt} I_{Td}$$

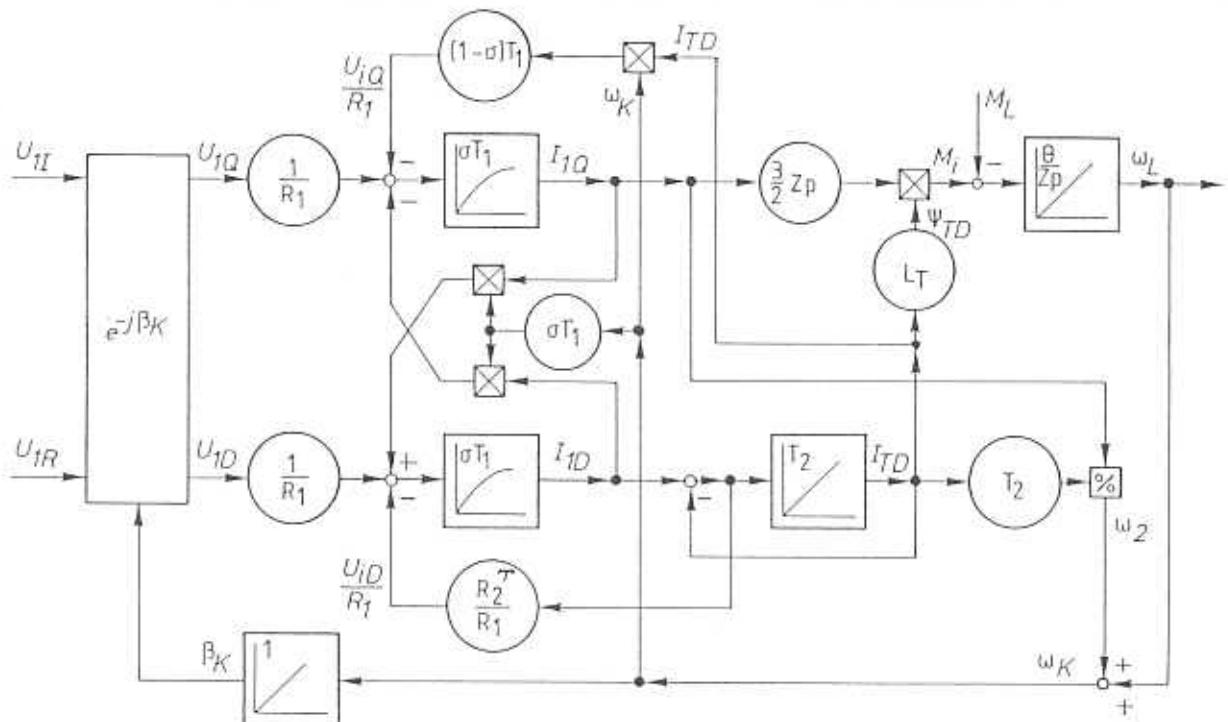
$$0 = -R_2^T I_{1q} + j\omega_2 L_T I_{1d}$$

Das innere Moment der ASM ergibt sich unabhängig vom Bezugssystem durch das Skalarprodukt des Statorflusses mit dem konjugiert komplexen Rotorfluß:

$$M_i = \frac{3}{2} Z_p \frac{L_H}{\sigma L_1 L_2} \Im\{\psi_1 \psi_2^*\} = \frac{3}{2} Z_p L_T I_{Td} I_{1q} \quad I_{1q} \text{ Wirk- Stromkomponente}$$

$$\sigma T_1 = \frac{L_\sigma}{R_1} \quad T_2 = \frac{L_2}{R_2} \quad \text{Zeitkonstanten}$$

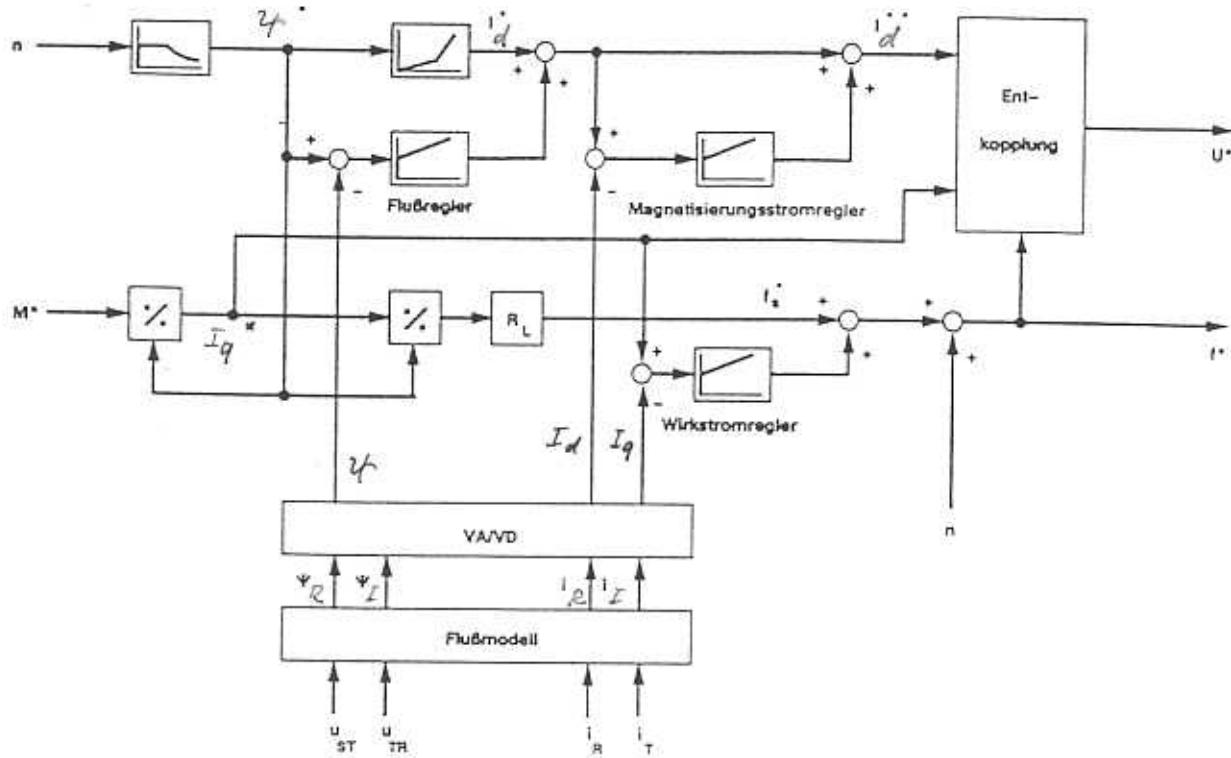
Blockschaltbild der ASM bei Spannungseinprägung



# Elektrische Auslegung

Struktur der feldorientierten ASM Regelung mit spannungseinprägendem Wechselrichter.

Eingangsgrößen sind Sollmoment  $M^*$  und Flußsollwertkennlinie, mit der gemessenen Motordrehzahl  $n$  ist damit jeder Punkt innerhalb des Z/v Diagrammes fahrbar.



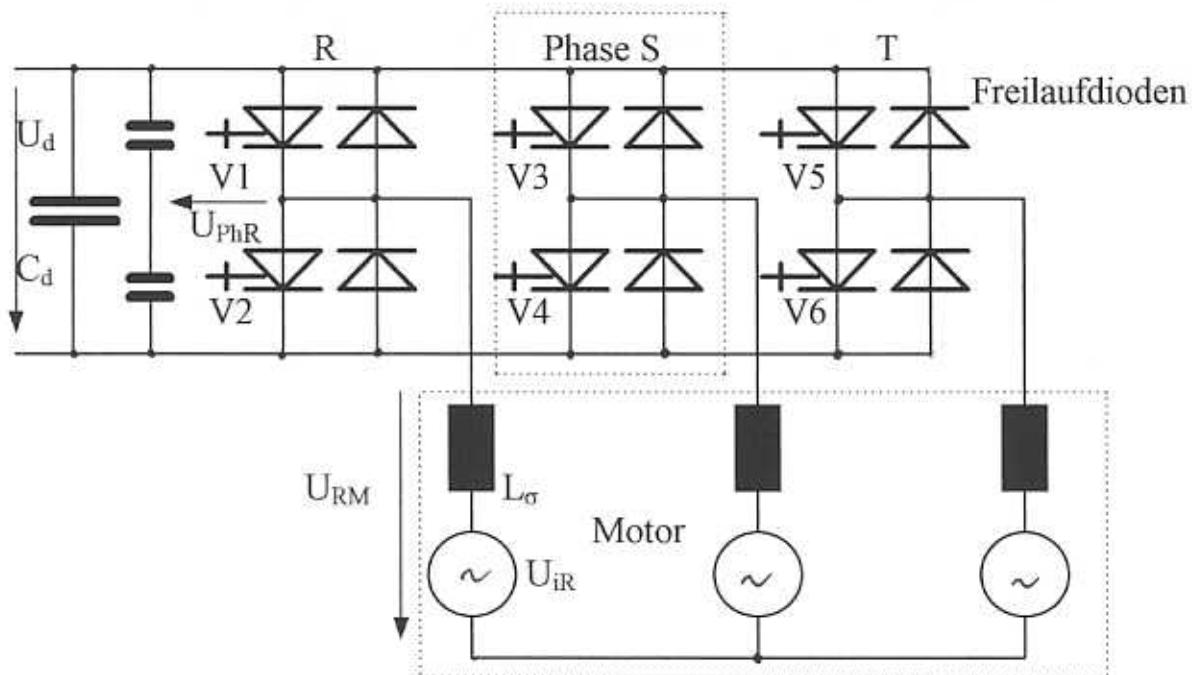
Nicht meßbare innere Maschinengrößen, der Rotorflußvektor  $\Psi$ , die Wirk- und Magnetisierungsstromkomponente, werden über Maschinenmodelle aus den meßbaren Größen der Statorströme und -spannungen, sowie der Rotordrehzahl errechnet.

Die Entkopplung kann als inverse Struktur der ASM betrachtet werden.

Stellgrößen für den Steuersatz des Leistungsteiles sind Amplitude  $U$  und Frequenz  $f_1$  der erforderlichen PWR Ausgangsspannung.

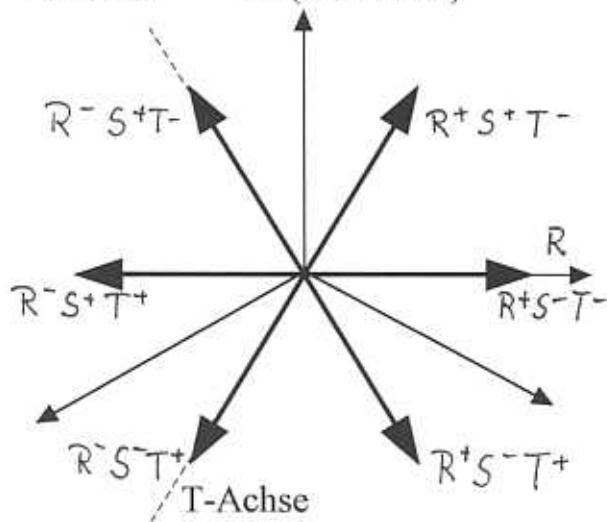
# Elektrische Auslegung

Prinzipschaltbild des selbstgeführten Spannungszwischenkreisumrichters ( PWR )



Schaltzustände im R/I Raumzeigersystem

S-Achse      Im (ST-Achse)

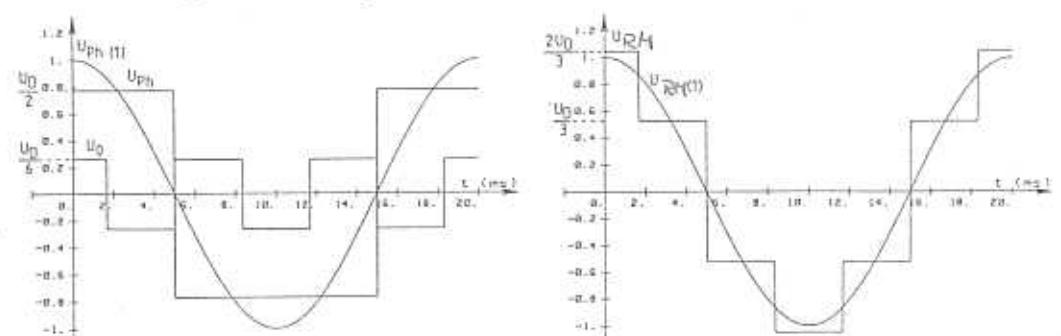


Die Ausgangsklemme einer Phase kann nur positives oder negatives Zwischenkreispotential annehmen, damit sind 8 Kombinationen darstellbar, davon 2 Nullzustände. Aus der gewünschten Ausgangsfrequenz  $f_1$  ergibt sich die Periodendauer  $T = 1/f_1$  nach der sich die Schaltzustände zyklisch wiederholen. Das Umschalten einer Phase entspricht einem Winkelschritt von  $60^\circ$ . Erfolgt innerhalb einer Grundschwingungsperiode  $T$  nur eine Umschaltung in jeder Phase, liegt Grundfrequenztaktung vor.

Spannungsverläufe bei Grundfrequenztaktung

$$U_1 = \frac{2}{\pi} U_d e^{j2\pi f_1 t}$$

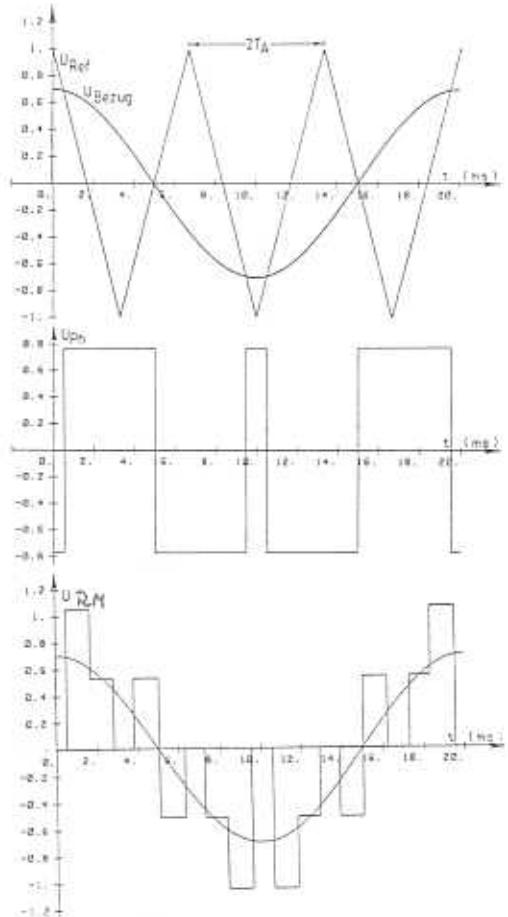
Maximalwert der Grundschwingungsamplitude



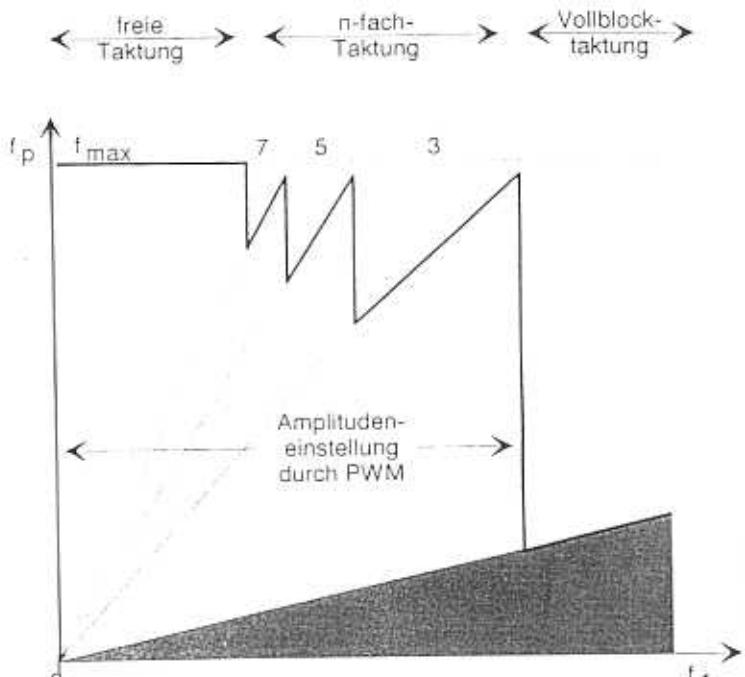
Im Feldschwächbereich wird im Interesse einer hohen Ausnutzung des Leistungsteiles immer Grundfrequenztaktung angewandt.

# Elektrische Auslegung

Im Grunddrehzahlbereich muß die Ausgangsspannung entsprechend der drehzahlproportionalen inneren Maschinenspannung reduziert werden, dazu dienen verschiedene Modulationsverfahren. Gemeinsam ist diesen Verfahren, daß innerhalb der  $180^\circ$  Spannungsblöcke in einer Phase mehrfach umgeschaltet wird. Die Anzahl der Umschaltungen ist als Pulszahl  $p$  definiert. Die maximale Schaltfrequenz der Halbleiter ( $p f_1$ ) begrenzt die mögliche Pulszahl, zur Verringerung des Stromoberschwingungen und der auftretenden Spitzentströme ist aber eine hohe Pulszahl erwünscht.



Beispiel: Pulsmustererzeugung nach dem Unterschwingungsverfahren



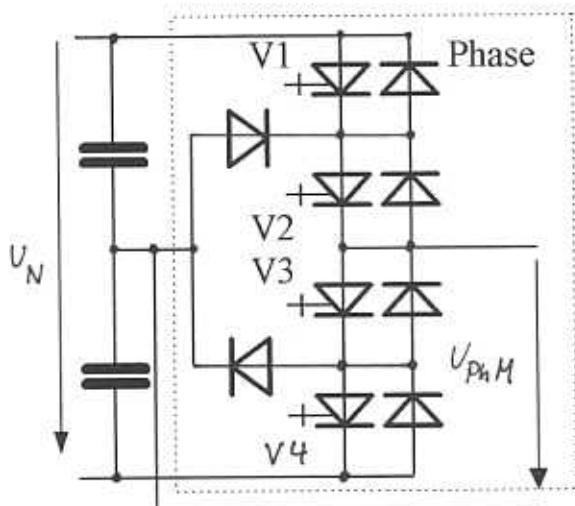
Die Pulszahl als Funktion der Statorfrequenz

Die Einspeisung des Pulswechselrichters kann bei DC-Triebfahrzeugen bis ca.  $2000\text{V}_{\text{DC}}$  über den Hauptschalter und eine Reihendrossel direkt aus dem Fahrdräht erfolgen.

Für höhere Zwischenkreisspannungen wird der **Dreipunkt-Wechselrichter** verwendet.

Über die Mittelpunktdioden ist die Spannungsaufteilung definiert

$U_{\text{PhM}}$	V1	V2	V3	V4
$+U_D/2$	Ein	Ein	Aus	Aus
0	Aus	Ein	Ein	Aus
$-U_D/2$	Aus	Aus	Ein	Ein



# Elektrische Auslegung

## Triebfahrzeuge für 3kV DC Netze

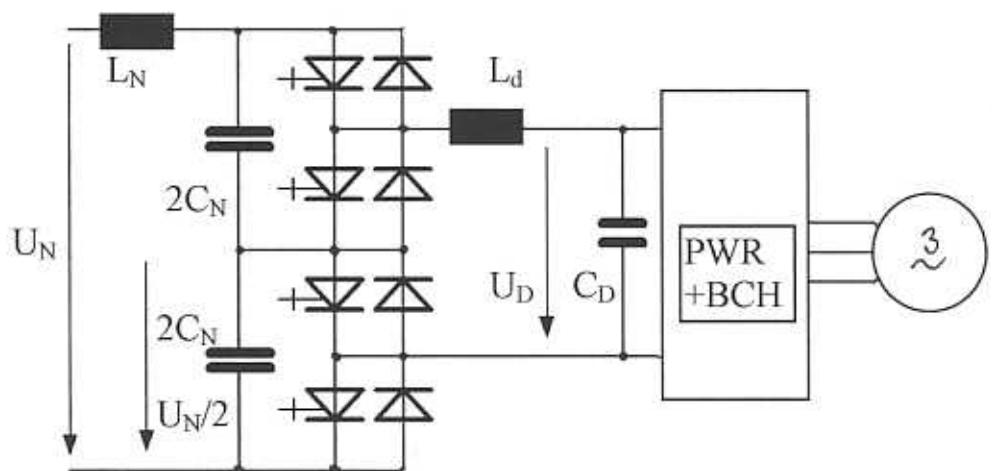
Die maximale Zwischenkreisspannung beträgt 2,8kV bei 4,5kV Sperrspannung der Halbleiter. Daher sind für 3kV  $+40\%/-30\%$  Netze bis zur Serienreife von 6,5 kV Halbleitern Sonderschaltungen erforderlich. Alle Schaltungen ermöglichen Energierückspeisung.

Zweistufenchopper  
(RENFE 447 S-Bahn)

An  $L_d$  doppelte  
Chopperschaltfrequenz

bis ca. 2,4 MW

Parallelschaltung der  
vier Fahrmotoren

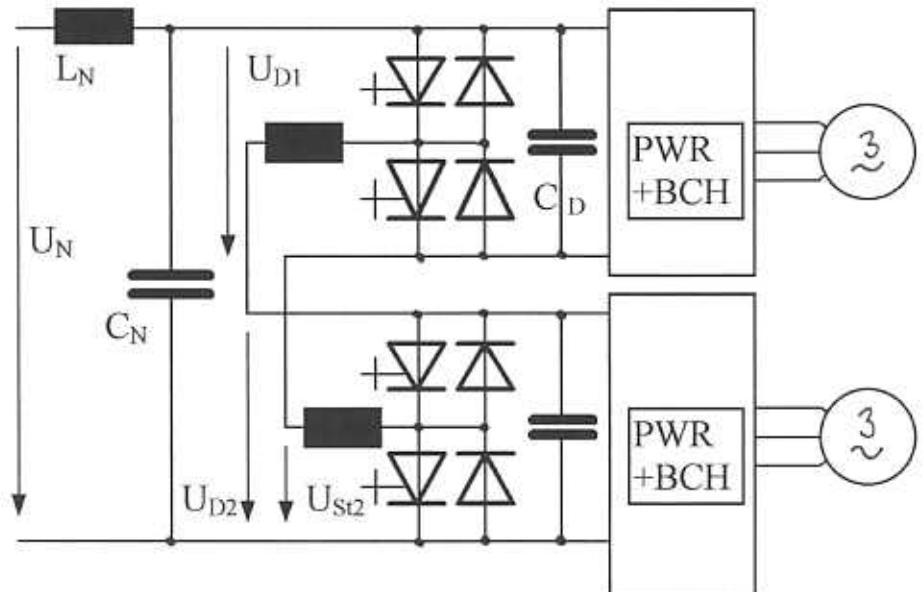


Reihen/ Parallelschaltung  
von zwei Zwischenkreisen  
über 2-Quadrantsteller  
(RENFE 252 Bo'Bo' Lok)

2,8 MW je Drehgestell

Einzelachsantrieb

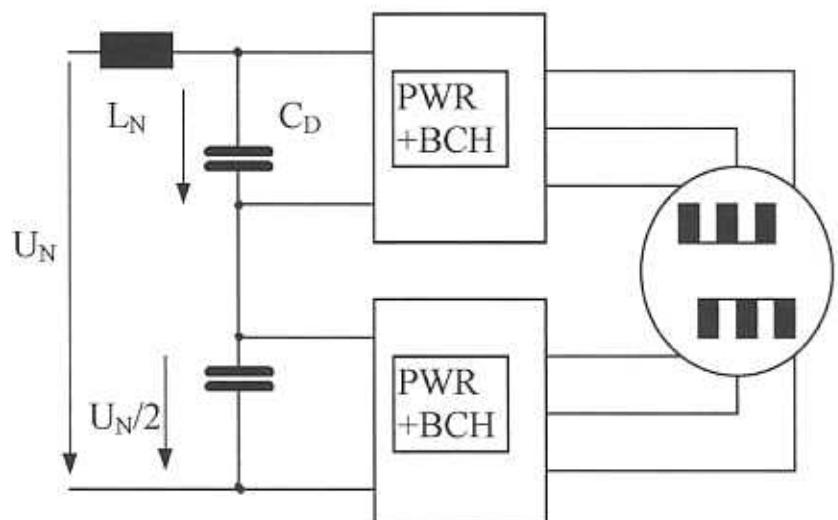
unsymmetrische  
Leistungsaufteilung  
möglich



Reihenschaltung von zwei PWR  
über eine 6-strängige Maschine  
(FS 412 Bo'Bo' Lok)

3 MW je Drehgestell

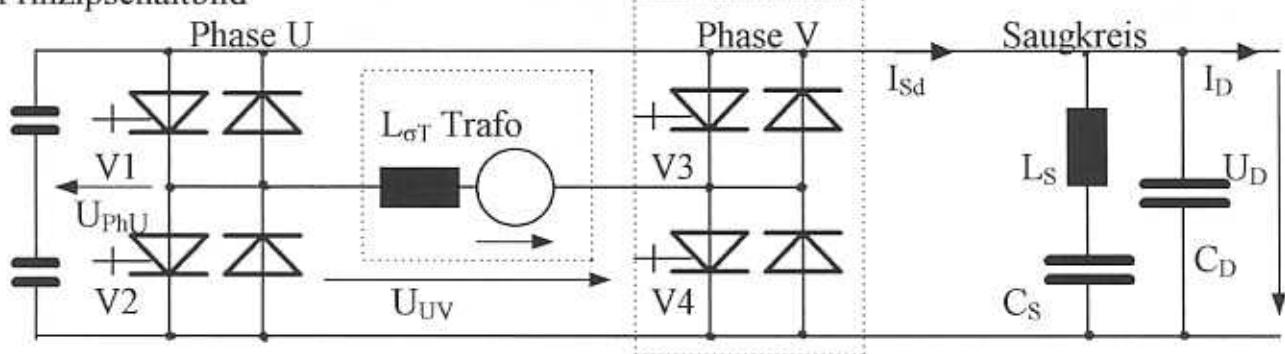
Parallelschaltung der  
zwei Fahrmotoren



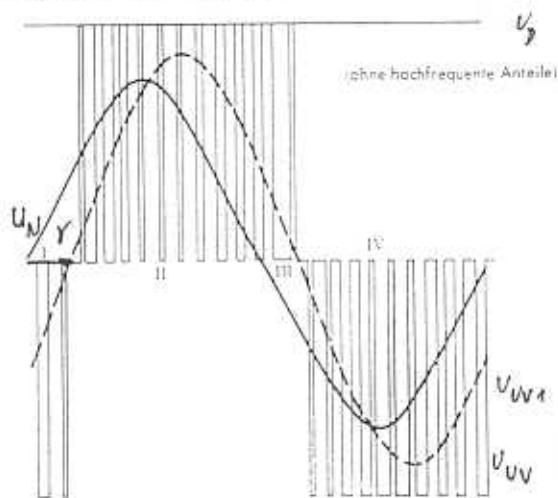
# Elektrische Auslegung

Der 4- Quadranten -Einspeisestromrichter (4QS) für AC Triebfahrzeuge

Prinzipschaltbild



Spannungsverläufe

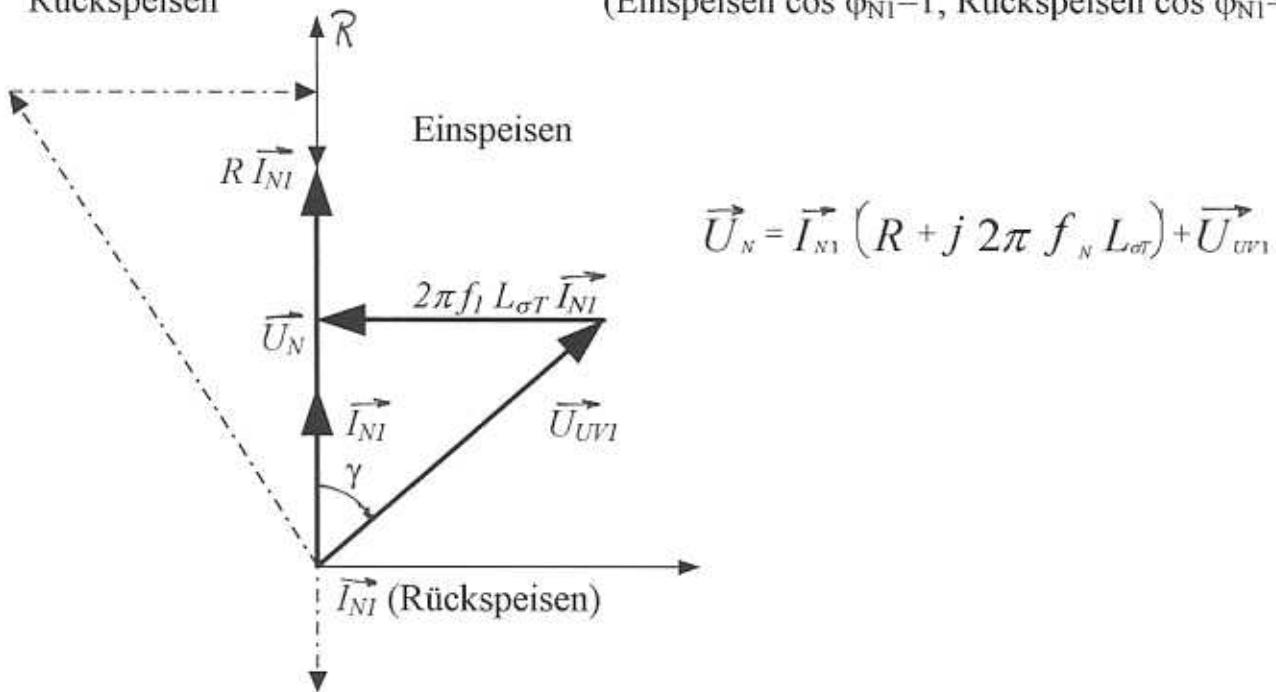


Entsprechend der Steuerimpulse der beiden Phasen nimmt die verkettete Ausgangsspannung  $U_{UV}$  die Werte  $+U_D$ ,  $0$ ,  $-U_D$  an.  
Durch Modulation kann die Amplitude verkleinert werden.  
Die Phasenlage  $\gamma$  zur Netzspannung  $U_N$  wird durch den Blockbeginn festgelegt.

Zeigerdiagramm der Grundschatzschwingungsgrößen

Rückspeisen

(Einspeisen  $\cos \varphi_{NI}=1$ , Rückspeisen  $\cos \varphi_{NI}=-1$ )



# Elektrische Auslegung

Der 4QS verhält sich analog einer Synchronmaschine, er kann mit voreilendem (kapazitiven) Netzstrom auch zur Kompensation der Fahrleitungsinduktivität dienen.

Die dem Netz entnommene Augenblicksleistung  $p(t)$  ohne Berücksichtigung der Oberschwingungsströme pendelt mit doppelter Netzfrequenz um den Mittelwert  $U_{Neff} I_{Neff} \cos\varphi$ .

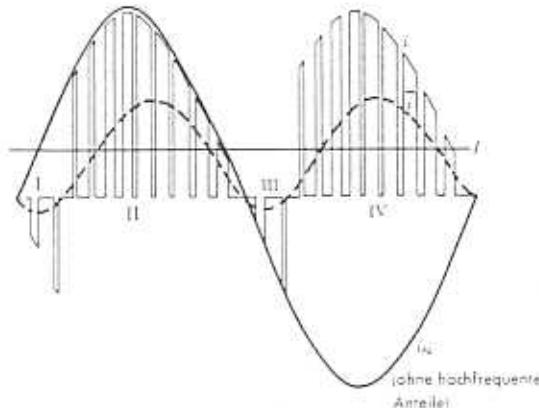
$$p_N(t) = \Re \{ U_N e^{j2\pi f_N t} \cdot I_{N1} e^{j2\pi f_N t - \varphi} \} = \Re \{ U_N I_{N1} e^{j4\pi f_N t - \varphi} \}$$

Die in der Trafostreuung  $L_\sigma$  auftretende Blindleistung wird mit dem Zwischenkreis ausgetauscht. Da der Stromrichter keinen Energiespeicher enthält, sind die wechsel- und gleichspannungsseitigen Augenblicksleistungen identisch.

$$p_s(t) = \Re \{ U_{s1} e^{j2\pi f_N t - \gamma} \cdot I_{N1} e^{j2\pi f_N t - \varphi} \} = \Re \{ U_{s1} I_{N1} e^{j4\pi f_N t - \varphi - \gamma} \} = U_D i_{sd}(t)$$

$$i_{sd}(t) = \frac{U_{s1}}{2 U_D} (\cos(\gamma + \varphi) + \cos(4\pi f_N t - \gamma - \varphi))$$

## Stromverläufe



Unter der Voraussetzung konstanter Zwischenkreisspannung pulsiert der gleichstromseitige Stellerstrom  $i_{sd}$  ebenfalls mit doppelter Netzfrequenz. Da der PWR im stationären Betrieb konstante Leistung mit dem Zwischenkreis austauscht, muß die Energie in einem auf die doppelte Netzfrequenz abgestimmten Saugkreis zwischengespeichert werden. Die maximal am Saugkreiskondensator auftretende Spannung beträgt  $U_{CSmax} = U_D + I_D \sqrt{\frac{L_S}{C_S}}$

Für 50Hz Triebfahrzeuge bis zu mittleren Leistungen wird auf den Saugkreis verzichtet und die wellige Zwischenkreisspannung wird als Eingangssignal auf den PWR-Steuersatz aufgeschaltet. (dead beat control)

Der 4QS erfüllt alle Anforderungen einer netzfreundlichen Einspeisung mit  $\lambda=1$ .

Der Wechsel der Energieflußrichtung erfolgt stetig und kontaktlos

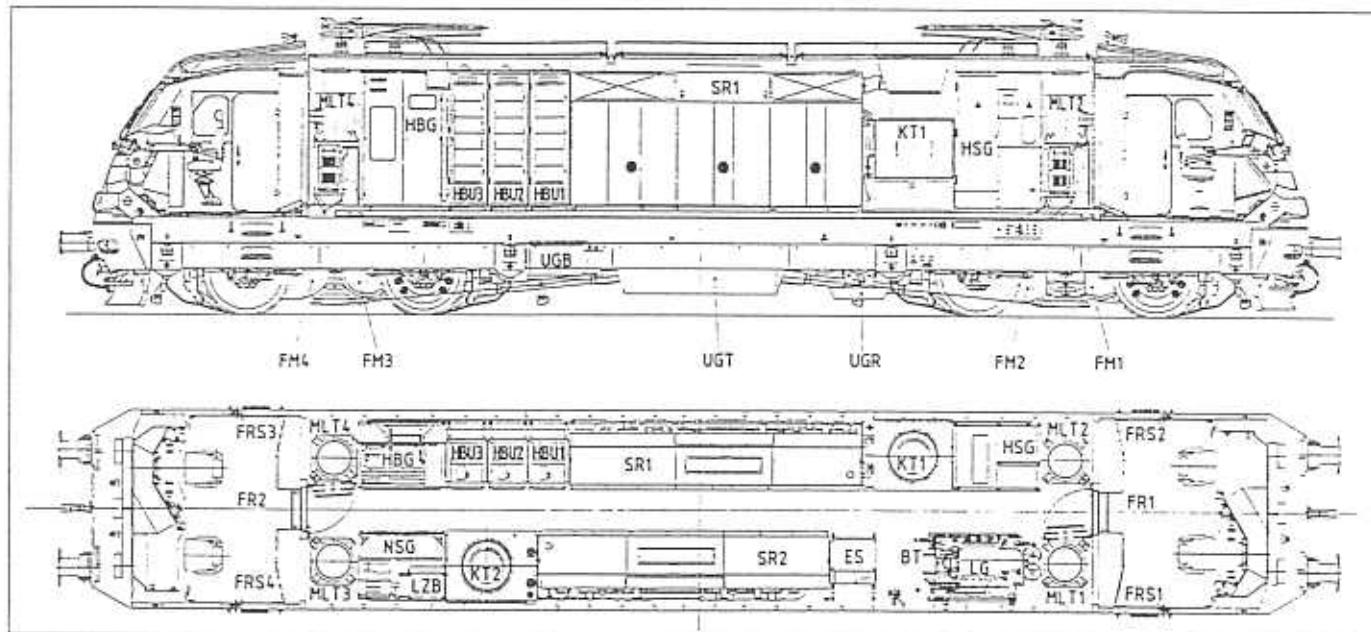
Der Phasenwinkel  $\varphi_N$  zwischen Netzspannung und Netzstrom wird auf 0 geregelt

Durch hohe Taktfrequenz ( $p=11$ ,  $f_S=183,3$  Hz) und versetztes Takten werden

Oberschwingungen in Bereiche hoher Frequenzen verschoben, dort ist die erwünschte Tiefpaßwirkung der Trafostreuung ausgeprägt.

# Elektrische Auslegung

## Elektrische Lokomotive BR 101 mit Drehstrom-Antriebstechnik



Baureihe	101
Inbetriebnahme	1996–1999
Gesamtzahl	Stück 145
davon im Bestand	3
Radsatzanordnung	Bo'Bo'
Dienstmasse	t 83
davon elektrischer Teil	t 41
Höchstgeschwindigkeit	km/h 220
Länge über Puffer	mm 18950
Drehgestellmittendistanz	mm 10950
Drehgestellradstand	mm 2650
Treibraddurchmesser neu	mm 1250
Anfahrzugkraft maximal	kN 300340 21
Anfahrzugkraft dauernd	kN 250 bis km/h 93
Maximalleistung	kW 6600 km/h bei 89...220
Dauerleistung	kW 6400 km/h bei 93...220
elektrische Bremsleistung	kW 6400
elektrische Bremskraft max.	kN 150
Transformatordauerleistung kVA	7600
Traktionsdauerleistung kVA	6400
Antreibsteuerung	MICAS-S mit Einzelradsatzsteuerung

Antriebsart	Integrierter Gesamtantrieb mit Zwischenrad
Getriebeübersetzung	20 : 44 : 79
Bauart der Bremse:	
Druckluftbremse	KE-GPR-EmZ
Bremskraftübertragung	Scheibenbremse
Feststellbremse	Federspeicher
Elektrische Bremse	fahdrahtabhängige Netzbremsen

Bild 4: Komponentenanordnung in der Lokomotive.

BT	Bremstafel
ES	Elektronikschränke
FM	Fahrmotor
FR	Führerraum
FRS	Führerraumrückwandschrank
HBG	Hilfsbetriebegerüst
HBU	Hilfsbetriebsumrichter
HSG	Hochspannungsgerüst
KT	Kühlturm
LG	Luftgerüst
LZB	Zugsicherung
MLT	Fahrmotorlüfterturm
NSG	Niederspannungsgerüst
SR	Stromrichter
UGB	Batterie
UGR	Radar
UGT	Transformator

## Elektrische Auslegung

Z/v Diagramm und Übersichtsschaltplan BR101

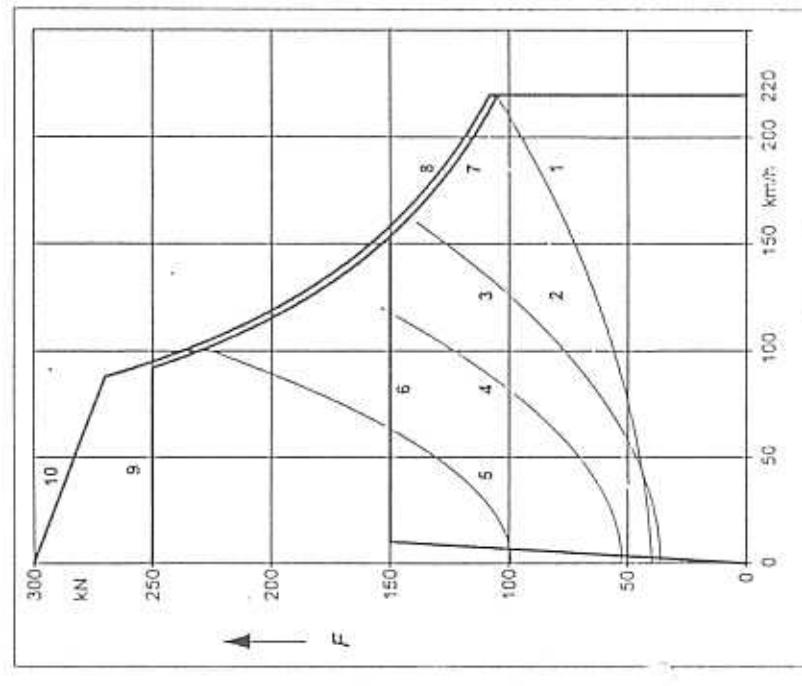
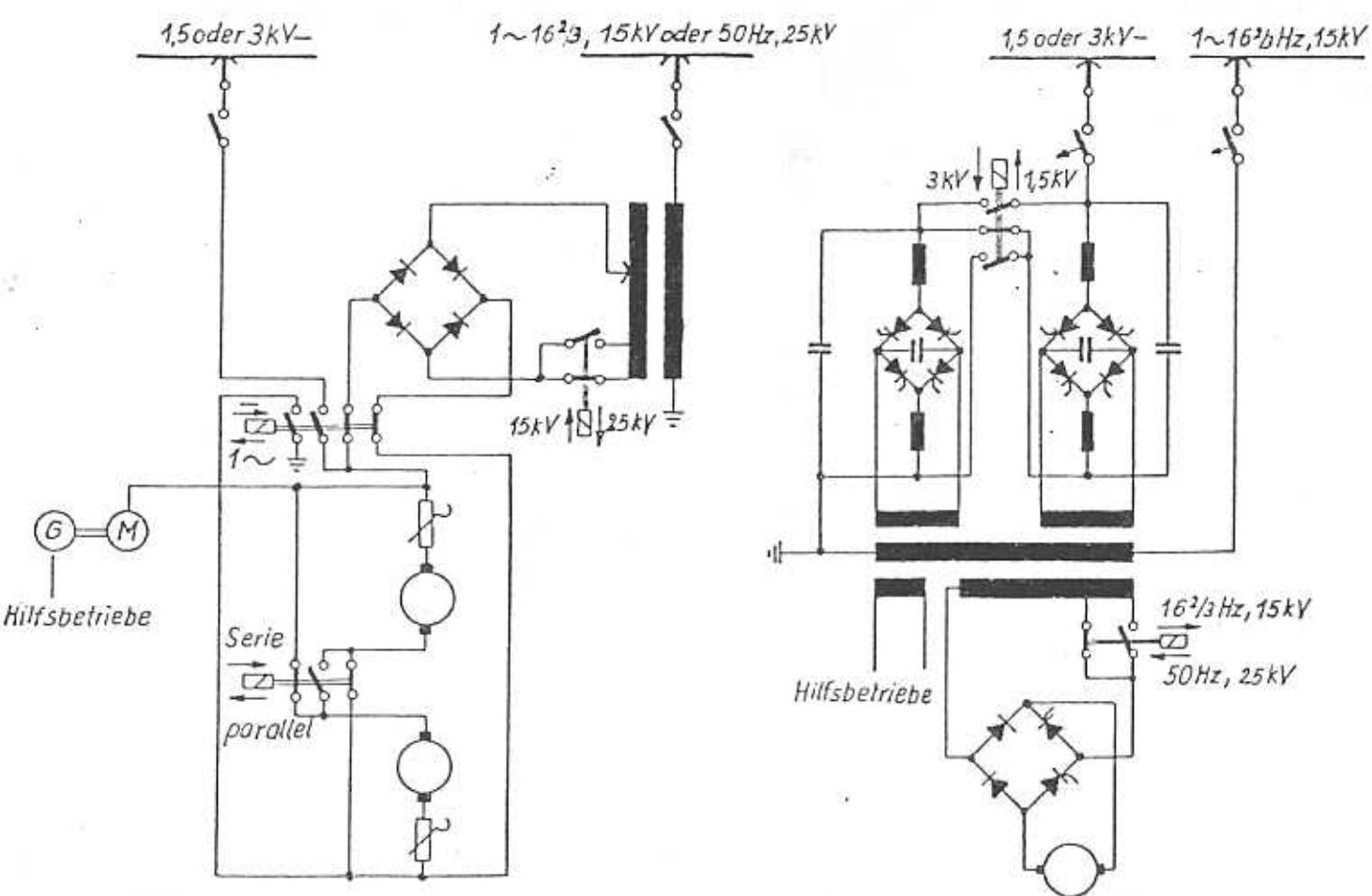


Bild 3: Übersichtsschaltplan.

BLG	Batterieladegerät
CF	Störstromfilterkondensator
FML	Fahrmotorlüfter
FRH	Führerraumheizung
HBU	Hilfsbetriebsumrichter
HBUL	Lüfter für Hilfsbetriebsumrichter
HDL	Hochdrucklüfter
HSG	Hochspannungsgerüst
Klima	Klimagerät
KLL	Kleinlüfter
KTL	Kühlturnlüfter
LF	Störstromfilterdrossel
LP	Luftpresse
L_Saug	Saugkreisdrossel
M	Taktionsmotor
RFA	Dämpfungswiderstand
SR	Stromrichtereinheit
SRKP	Stromrichterkühlmittelpumpe
TKP	Transformatorkühlmittelpumpe
ZSS	1000-V-Zugsammelschiene

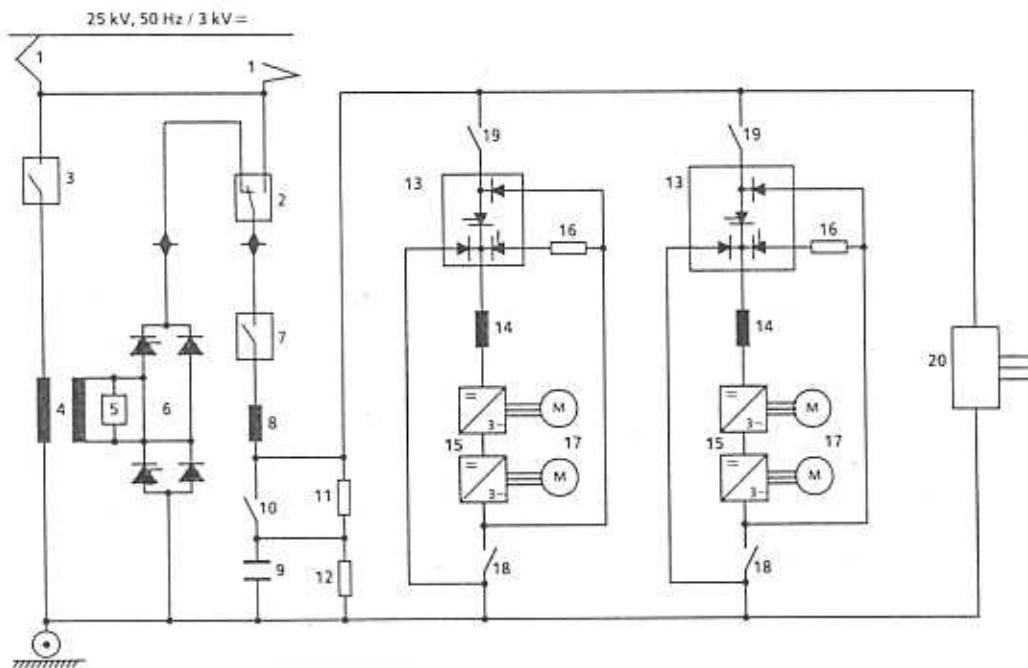
# Mehrsystemtriebfahrzeuge

## 3.5.1 Konventionelle Schaltungen mit Mischstrommotoren



## 3.5.2 Zweisystemfahrzeug mit Stromzwischenkreisumrichter (14E Südafrika 1990)

(Bo'Bo'; m = 92,5 t; P<sub>dd</sub> = 4 MW; v<sub>max</sub> = 160 km/h; Z<sub>A</sub> = 290 kN)

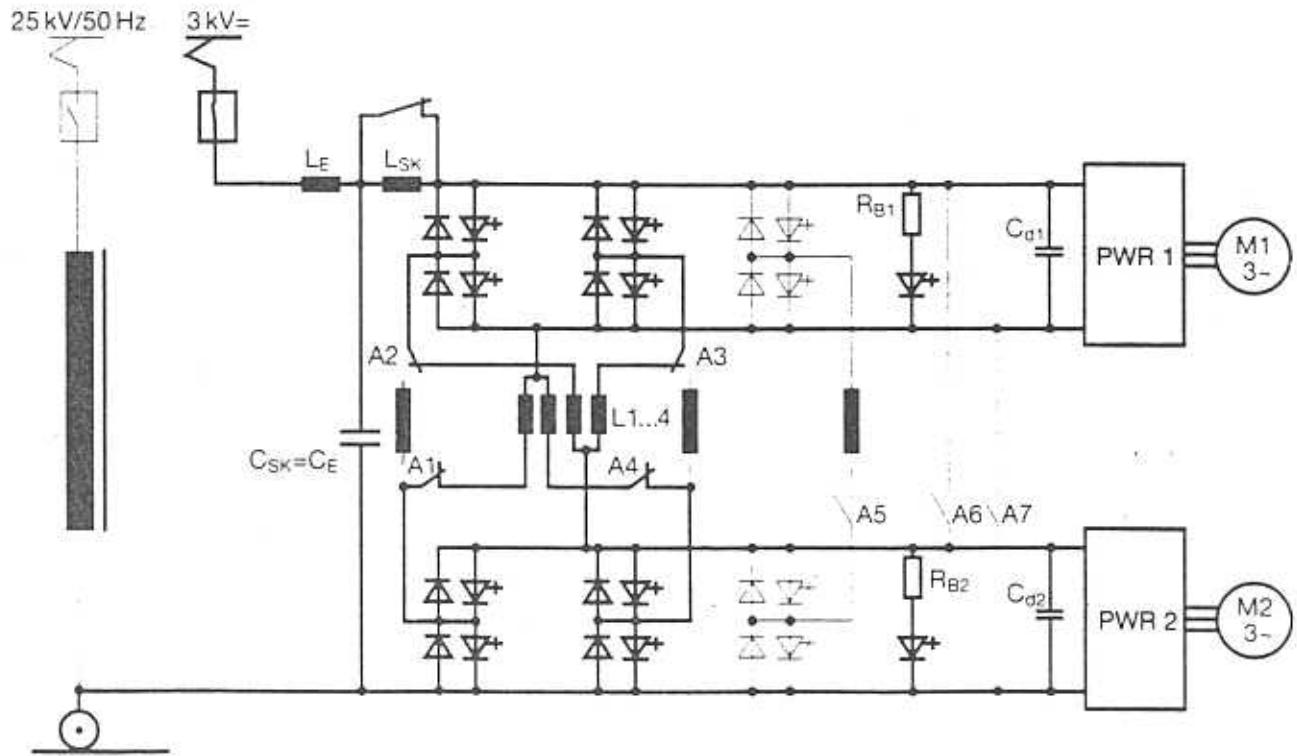


- |    |                            |
|----|----------------------------|
| 1  | Pantograph                 |
| 2  | System-changer switch      |
| 3  | AC-Vacuum circuit breaker  |
| 4  | Main transformer           |
| 5  | AC-filter                  |
| 6  | Thyristor rectifier        |
| 7  | DC-main circuit breaker    |
| 8  | Line filter choke          |
| 9  | Line filter capacitor      |
| 10 | Charging contactor         |
| 11 | Charging resistor          |
| 12 | Discharging resistor       |
| 13 | Chopper                    |
| 14 | DC-Link chokes             |
| 15 | Traction inverters         |
| 16 | Braking resistors          |
| 17 | Traction motors            |
| 18 | Driving-braking contactors |
| 19 | Bogie-isolators            |
| 20 | Auxiliary inverter         |

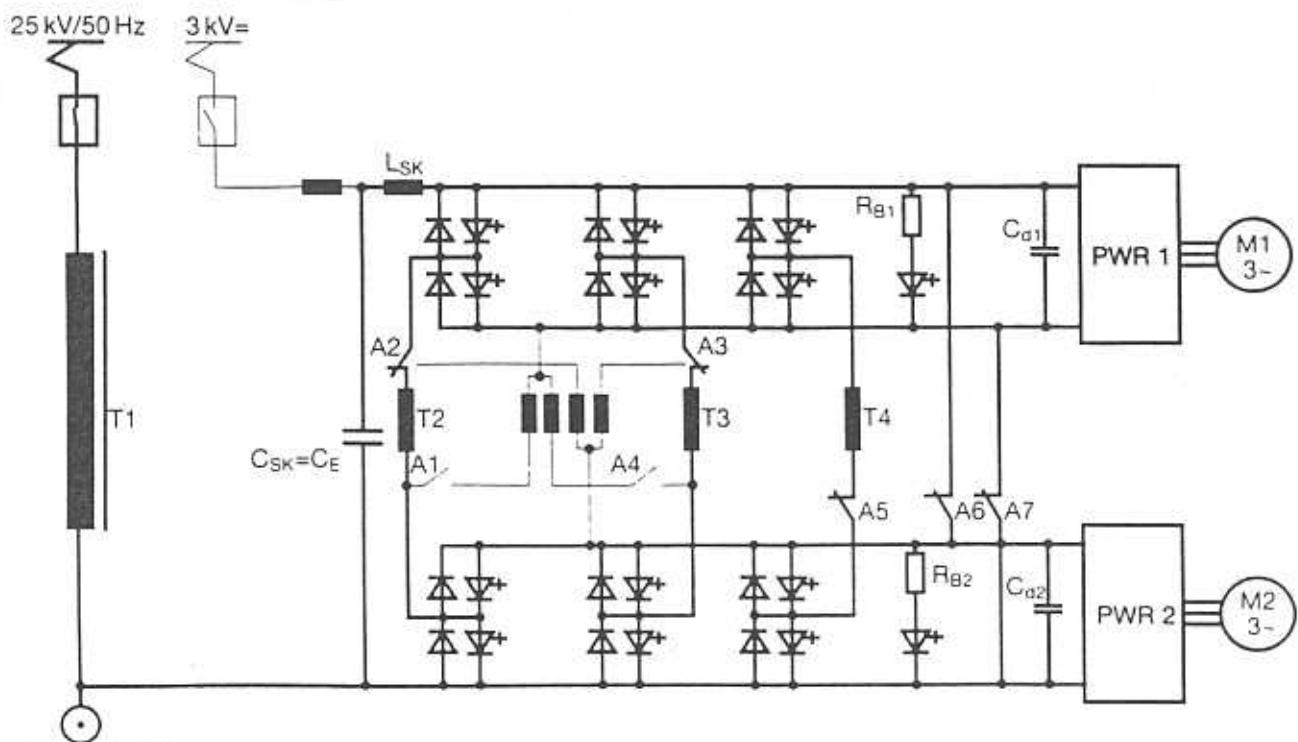
# Mehrsystemtriebfahrzeuge

3.5.3 Schaltung mit PWR am Spannungszwischenkreis für 3kV/25kV (S252 AVE 1991)  
 (Bo'Bo'; m = 90 t; P<sub>dd</sub> = 5,6 MW ; v<sub>max</sub> = 220 km/h; Z<sub>A</sub> = 300 kN)

Gesamtschaltung in Stellung DC Betrieb

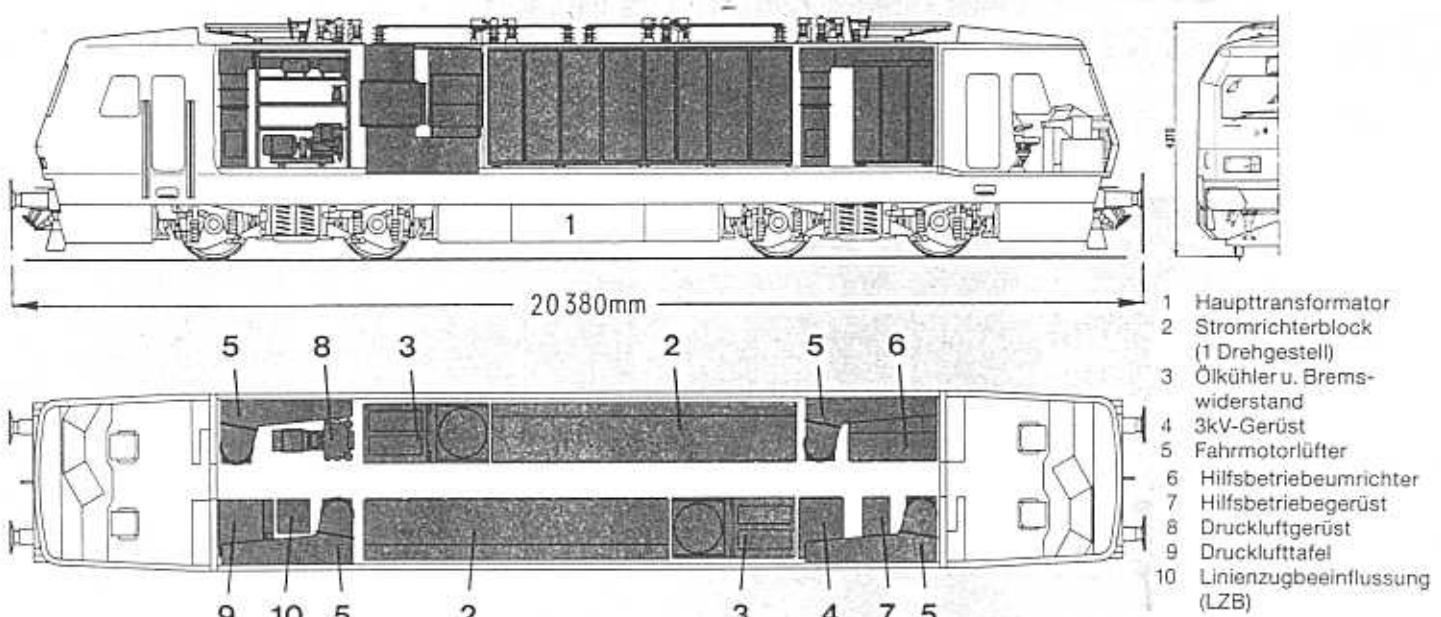


Gesamtschaltung in Stellung AC Betrieb

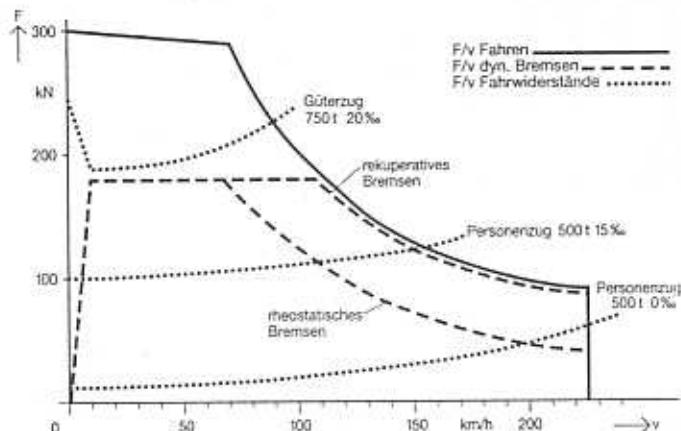


# Mehrsystemtriebfahrzeuge

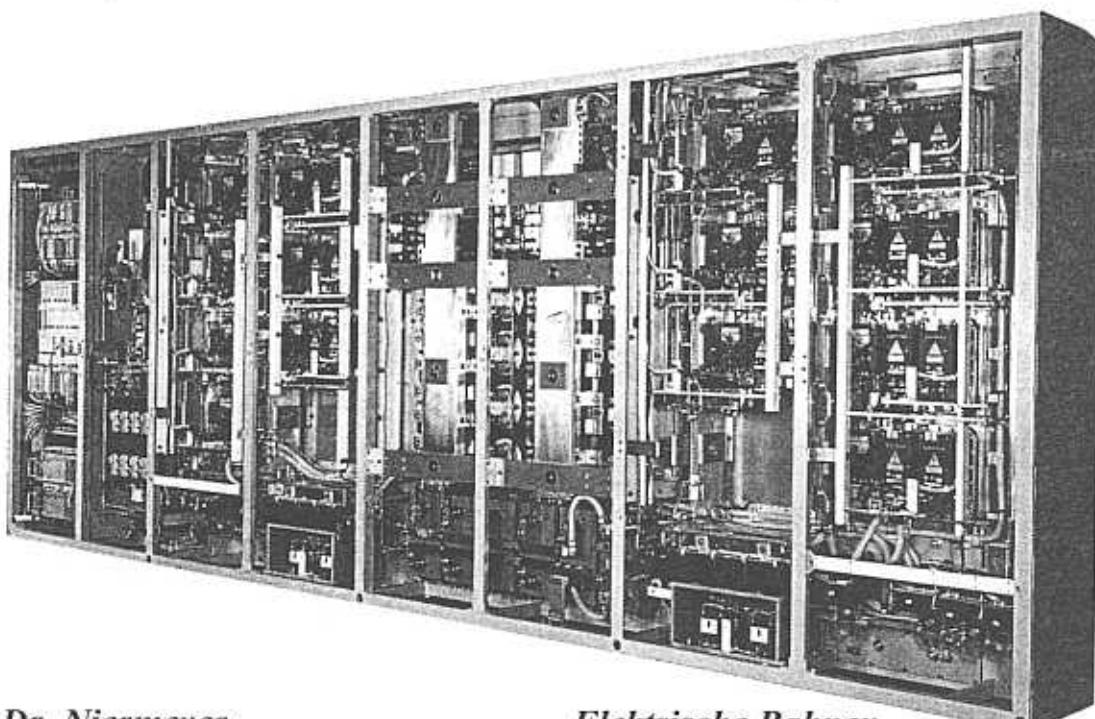
Gesamtansicht und Geräteanordnung S252



Z/v Diagramm Fahren und dynamisches Bremsen (systemunabhängig)

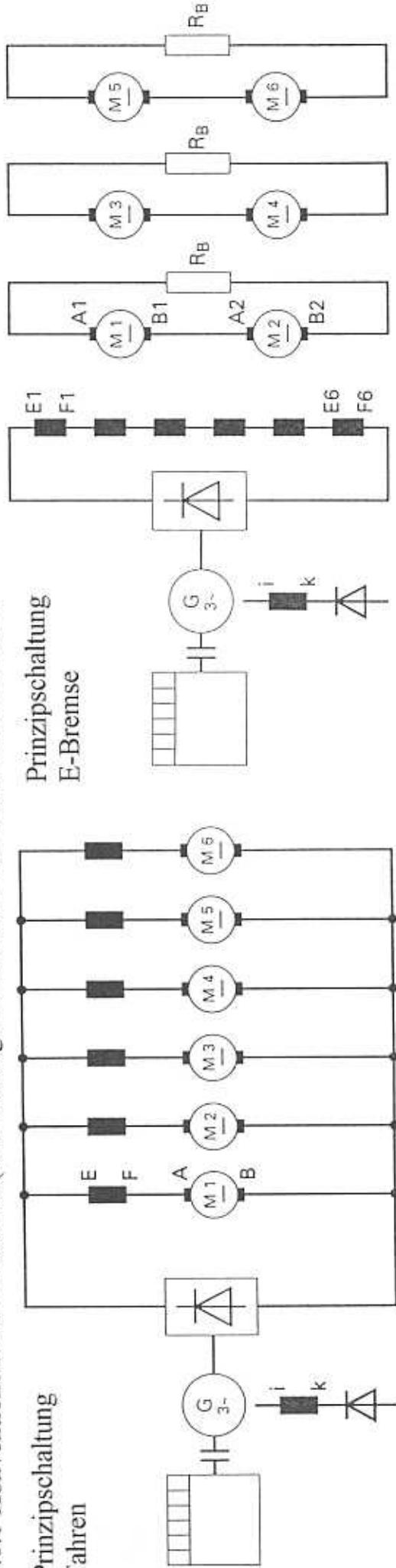


Zentralgerüst mit Traktionsumrichter, Kondensatoren, Systemumschalter und Steuerung

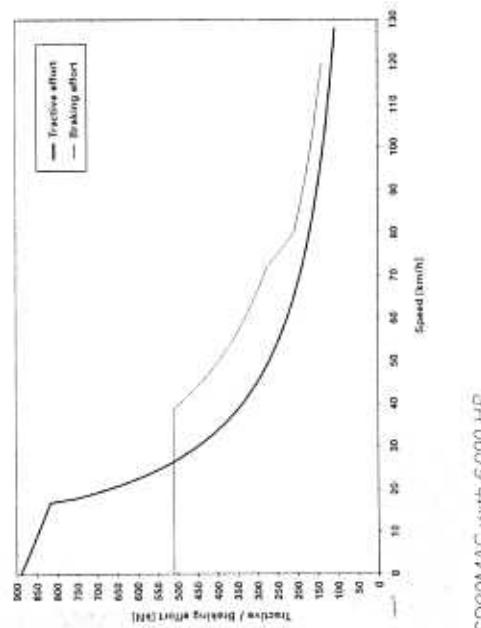
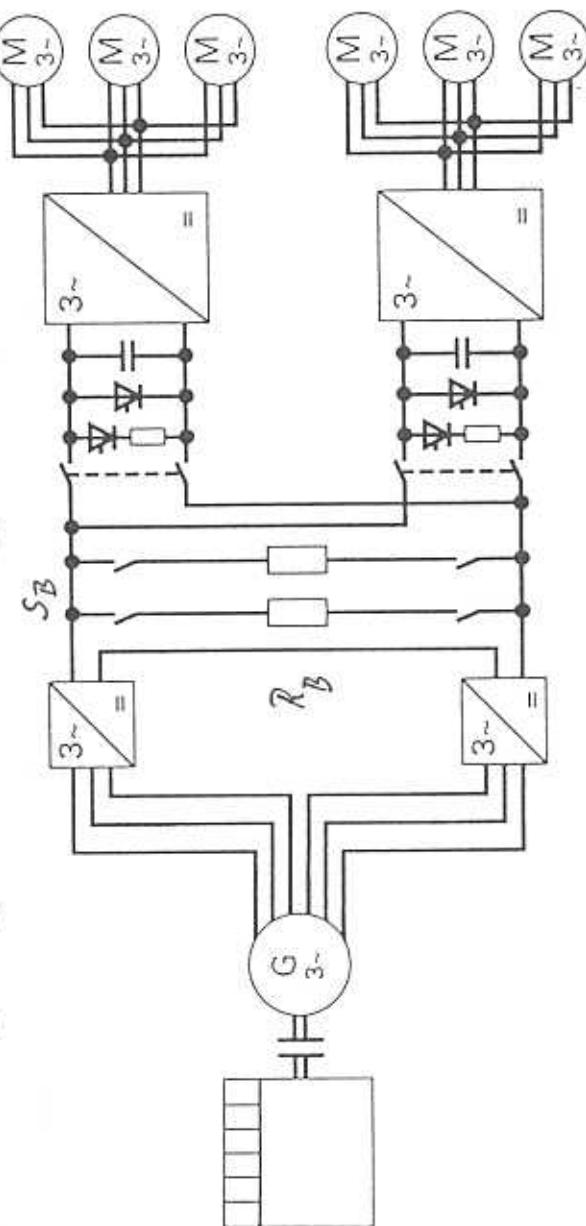


## Dieselektrische Fahrzeuge

3.6.1 Konventionelle DC -Technik (Drehstromgenerator und Gleichstromfahrmotoren)

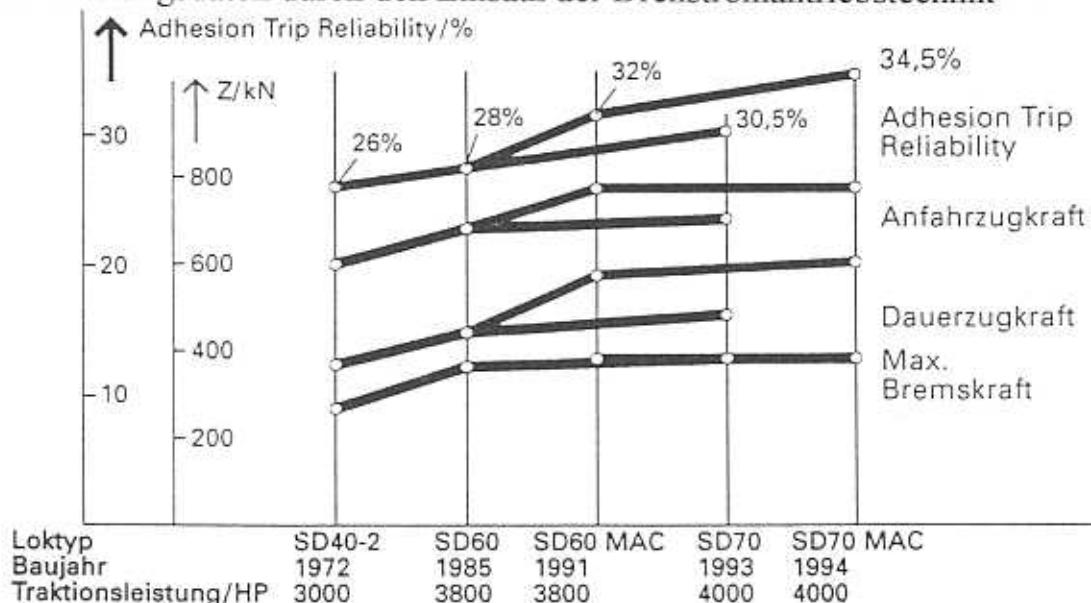


3.6.2 PWR am Spannungszwischenkreis und Gruppenantrieb (EMD/Siemens)



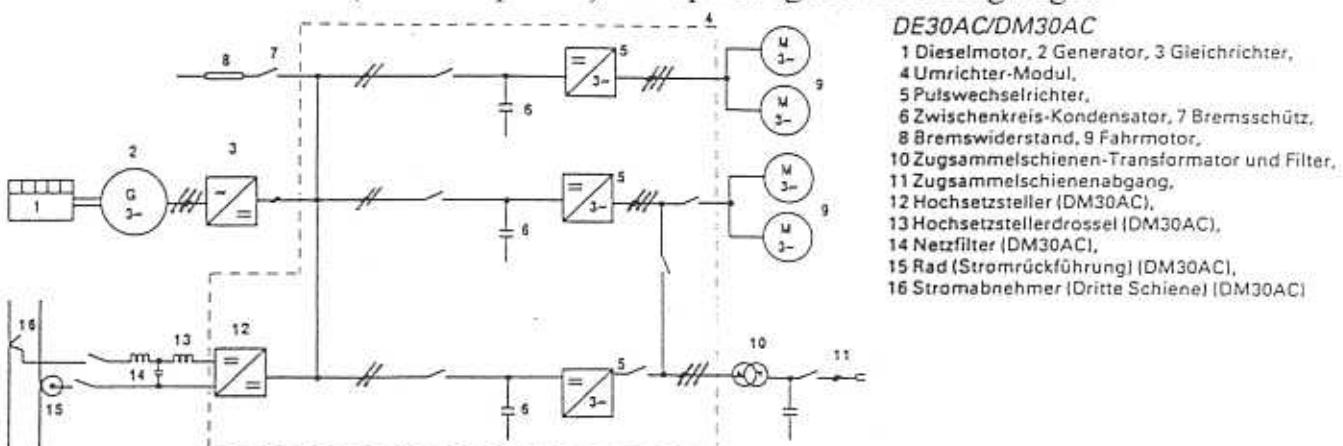
# Dieseletlektrische Fahrzeuge

Anstieg der Leistungsdaten durch den Einsatz der Drehstromantriebstechnik



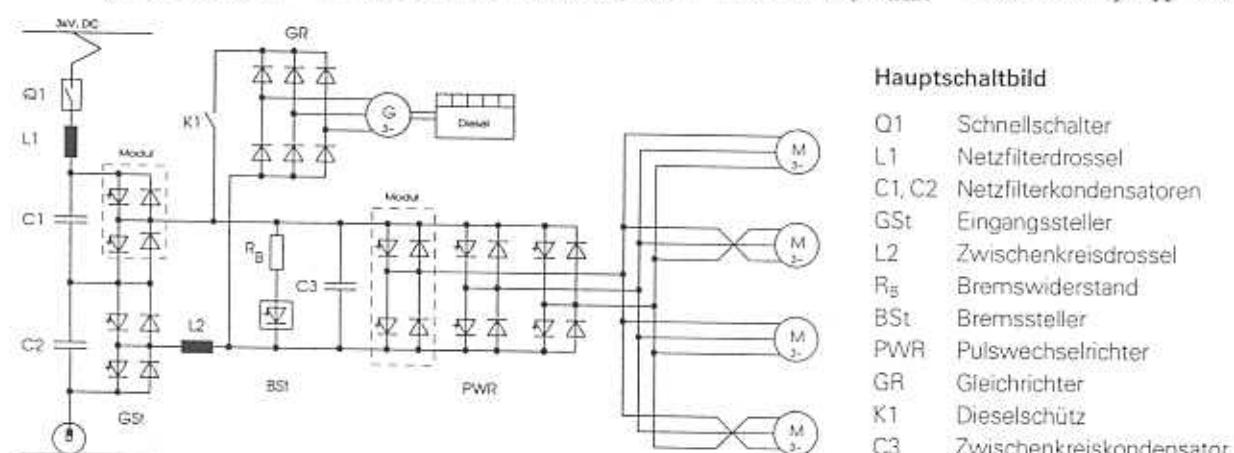
### 3.6.3 Zweikraft-Fahrzeuge, Lokomotiven mit Dieselpgenerator und Netzeinspeisung

650V DC Stromschiene mit Hochsetzsteller (DM 30 AC Long Island Railroad)  
 (Bo'Bo'; m = 128 t; 3000 hP (2150 kW); v<sub>max</sub> = 161 km/h;  
 HEP-Umrichter (heat and power) zur Speisung der Reisezugwagen



3kV Netz mit Zweistufenchopper (Class 38 Südafrika 1993)

(Bo'Bo'; m = 74 t; Diesel 780kW; 3kV 1500 kW; v<sub>max</sub> = 100 km/h; Z<sub>A</sub>=260 kN

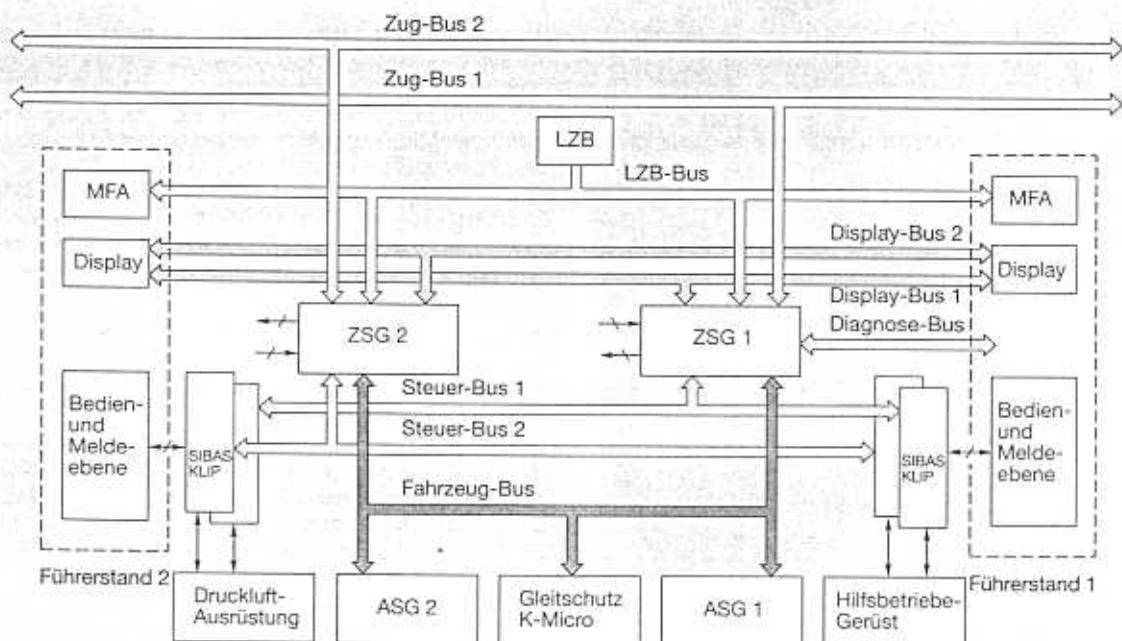


# Leittechnik bei Triebfahrzeugen

Unter der Leittechnik bei Fahrzeugen wird der Datenaustausch der einzelnen Steuerungskomponenten untereinander und mit dem Zug zusammengefaßt.

Die konventionelle Leittechnik erfolgt durch aufwendige Steuerleitungsverkabelung innerhalb des Triebfahrzeugs und extern über ein 110V Steuerkabel nach UIC Norm.

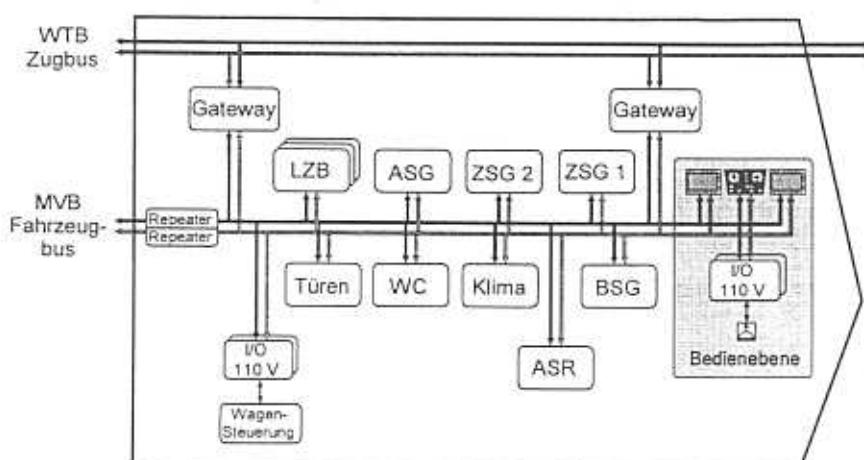
## Datenaustausch über serielle Busverbindungen der digitalen Steuergeräte



## Zwei Ebenen Struktur der Leittechnik bei modernen Triebfahrzeugen (TCN: train communication network)

Basis ist der serielle Fahrzeugbus (MVB: Multi Vehicle Bus) mit dezentralen Rechnern, genormt gemäß RS 485 Standard mit Manchester II Code.

Die zuginterne Kommunikation erfolgt über den redundant aufgebauten Zugbus (WTB: Wired Train Bus, übergangsweise parallel zum UIC Bus der 110V Ebene).

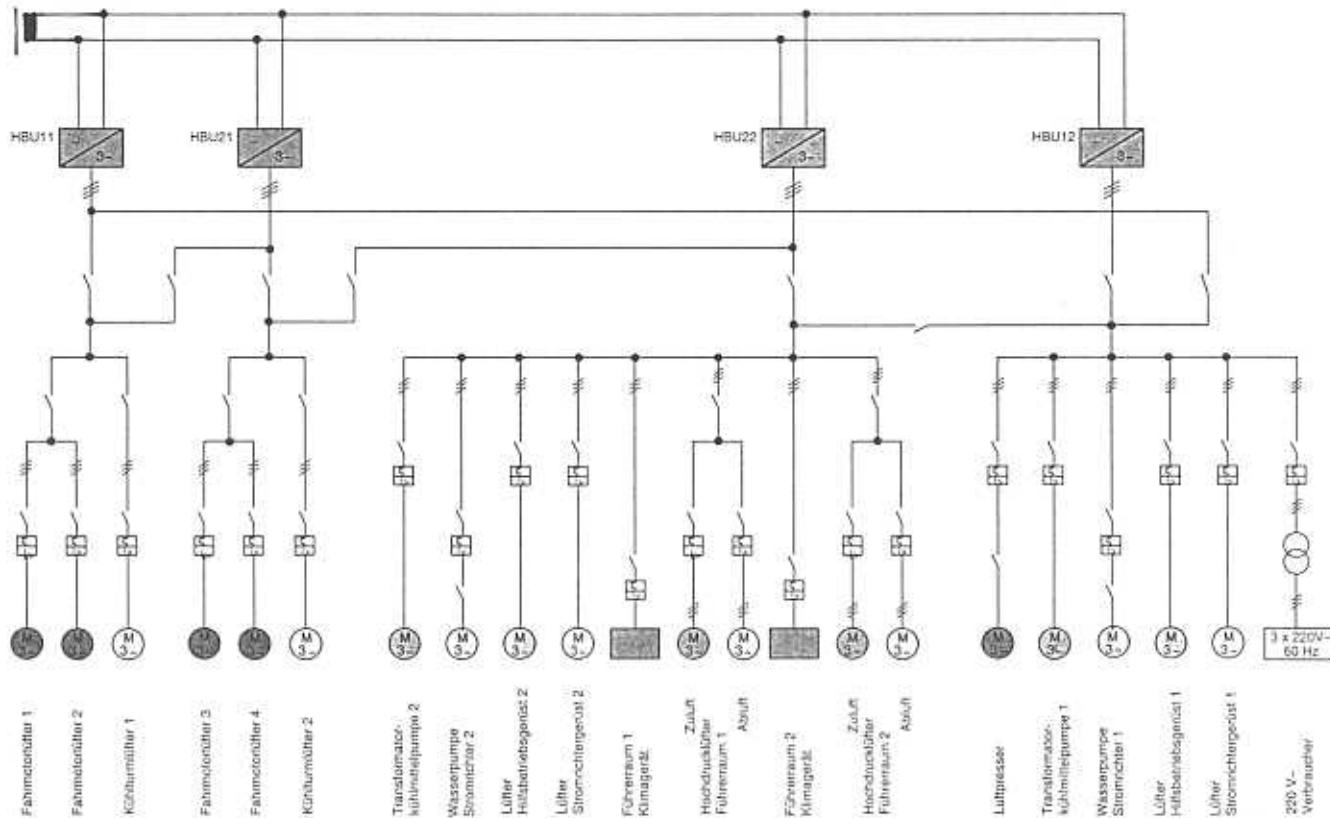


# Bordnetzversorgung

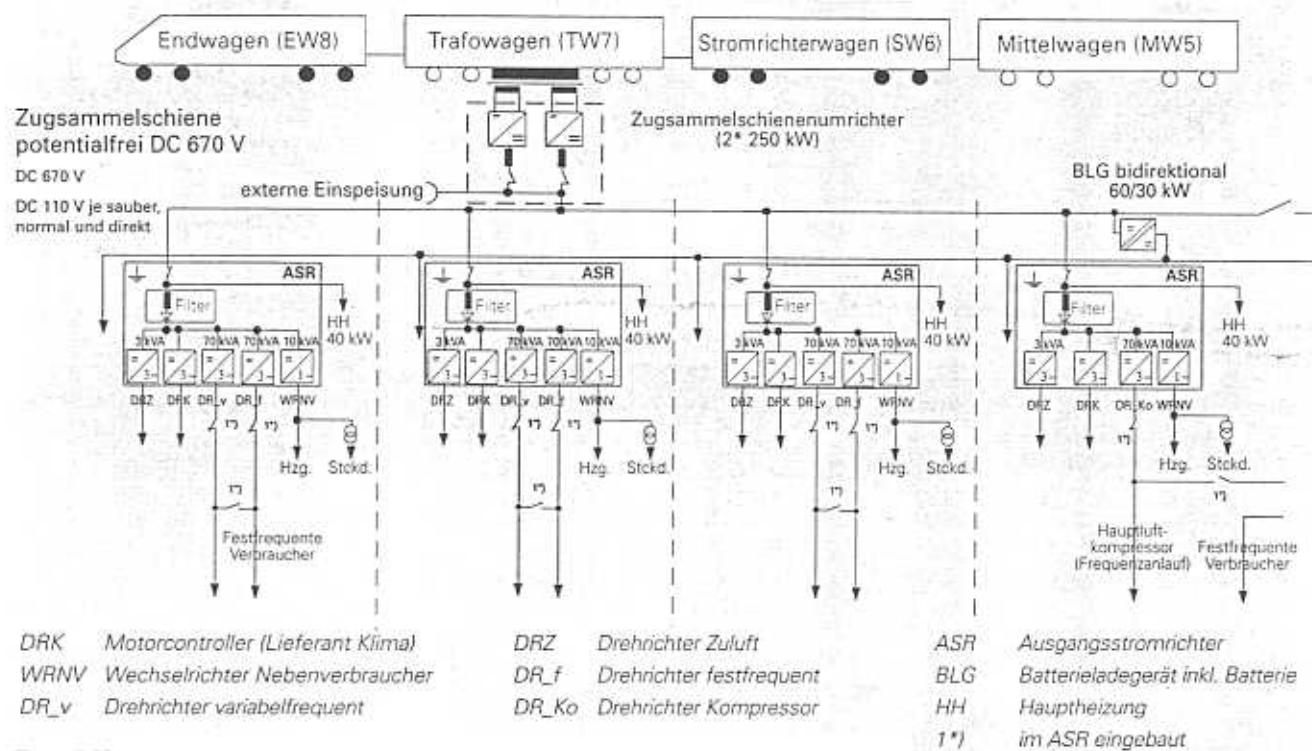
## 4.1 Hilfsbetriebseinrichtungen eines modernen Triebfahrzeugs

Bei AC-Fahrzeugen Speisung über eigenständige Transformatorwicklungen und 4 QS, bei DC Fahrzeugen Einspeisung über Tiefsetzsteller aus der geregelten Traktionszwischenkreisspannung.

Aufteilung in drehzahlvariable und festfrequente Netze. (Nennwerte 60Hz, 440V)  
Redundanz durch Überdimensionierung und Umschaltmöglichkeiten.



## 4.2 Elektrisch betriebene Komfortheinrichtungen in Reisezugwagen



# Interaktionen Netz-Fahrzeug

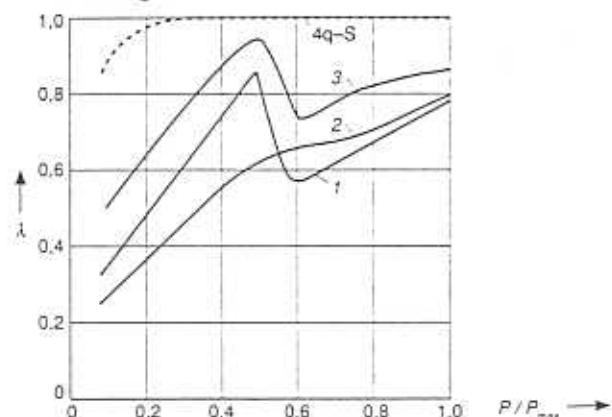
## 5.1. Netzrückwirkungen

Unter Netzrückwirkungen werden bei AC Netzen die Grundschwingungs-Blindleistung und allgemein die Oberschwingungsströme zusammengefaßt.

Kenngröße ist der totale Leistungsfaktor  $\lambda$ .

$$\lambda = \frac{P}{S} = g_i \cos \varphi_i$$

- Totaler Leistungsfaktor verschiedener Netzstromrichter
- Kurve 1: zwei halbsteuerbare Brücken in Folgesteuerung
  - Kurve 2: wie Kurve 1, mit wechselstromseitiger Folgeschaltung in Sparschaltung
  - Kurve 3: wie Kurve 1, eine Brücke lösbar (LUB)
  - Kurve 4q-S: Vierquadrantsteller



Von signaltechnischen Einrichtungen (Gleisbesetzmelder, Achszähler, etc.) benutzte Frequenzen müssen stark unterdrückt werden. Weit verbreitet sind 100Hz Kreise.

Entstehung: Unsymmetrische Trafo-Magnetisierung; in-rush Ströme; Bügelspringen.

Modulationsprodukte bei welliger Zwischenkreisspannung.

Abhilfe: Die 100Hz Stromamplitude wird primärseitig gemessen und über die 4QS Steuerung zu 0 geregelt.

## 5.2. Psophometrische Störströme

Unter diesem Begriff fallen alle (induktiven) Einkopplungen des Triebfahrzeugstromes auf parallel verlaufende Telefonleitungen und -kabel. Daher werden die einzelnen Störanteile in ihrer Auswirkung auf die Sprachverständlichkeit gewichtet ( $p_f$ ) und zu einem Ersatzstrom  $I_{pe}$  der Frequenz 800Hz zusammengefaßt.

Störquellen sind im wesentlichen die Eingangsstromrichter auf dem Triebfahrzeug, d.h. Gleichstromsteller, gesteuerte Gleichrichter oder 4QS Stromrichter. Die Amplituden sind abhängig vom Aussteuergrad und aufgenommener Leistung.

Bei DC-Bahnen entscheidend sind die Spannungs-Oberschwingungen der Netzspannung durch die Gleichrichtung im Unterwerk, diese führen durch die Fahrzeugimpedanz zu leistungsunabhängigen Oberschwingungsströmen.

Netzkonfiguration und Fahrzeugort erhöhen über Parallelresonanzen den Störstrom.

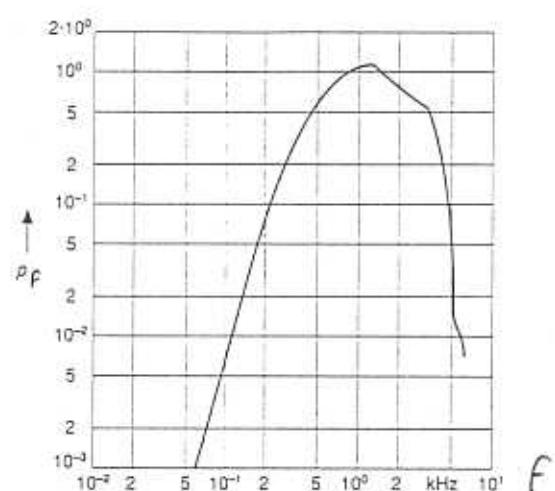
$I_{Fv}$  v te Oberschwingungsamplitude

$h_v=1$  Kopplungsnachbildung

$p_f$  Störgewicht (frequenzabhängig)

$I_{pe}$  Ersatzstörstromamplitude

$$I_{pe} = \sqrt{\sum_v (h_v p_f I_{Fv})^2}$$



# Magnetschweben

## Vorteile der berührungsfreien Fahrtechnik

Reibungsunabhängig, höhere Beschleunigung und Verzögerung

Anpassungsfähigkeit an Geländeverhältnisse, z.B. Steigung bis 10% möglich

Immissionsarm, nur aerodynamische Geräusche

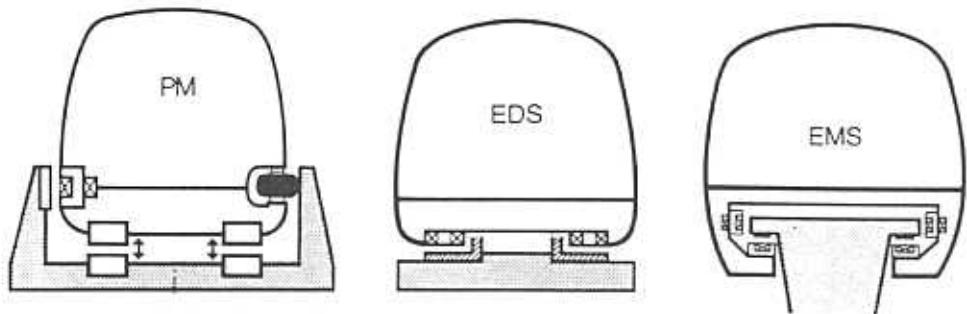
Absolut entgleisungssicher

## 6.1. Systeme der Magnetschwebetechnik

Permanentmagnetisch PM: abstoßende Kräfte zweier Dauermagnete

Elektrodynamisch EDS: abstoßende Kräfte durch induzierte Wirbelströme in Fahrbahnplatten bei Relativbewegung, Gleichfelderzeugung durch supraleitende Spulen.

Elektromagnetisch EMS: anziehende Kräfte auf magnetische Reaktionsschienen  
Fahrzeug umfaßt die Schiene  
nur mit Abstandsregelung stabil



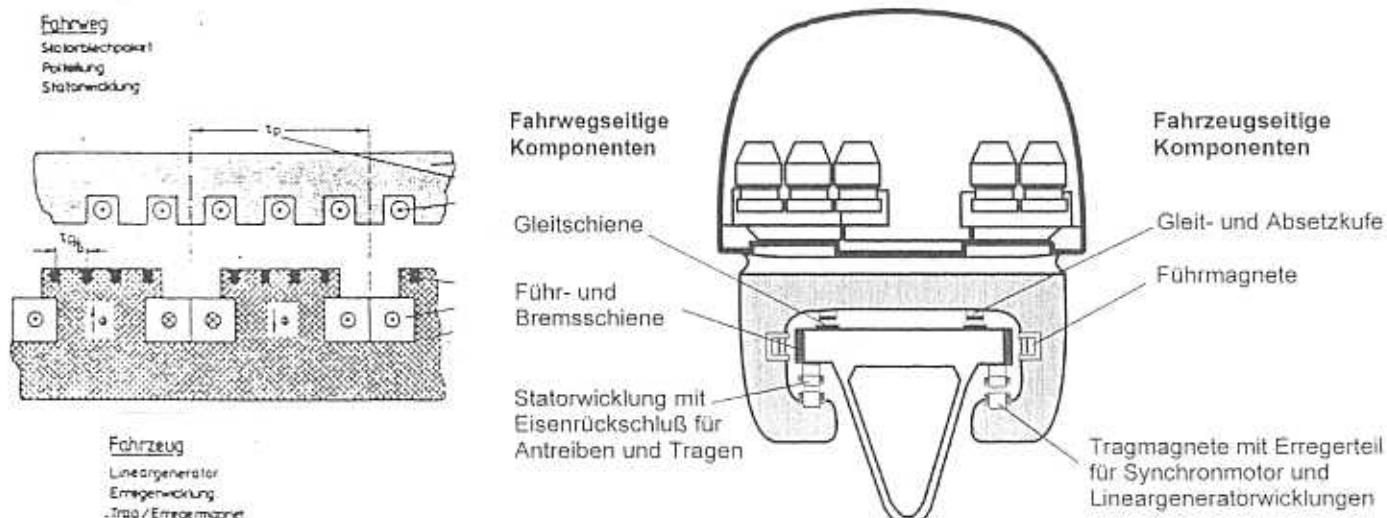
7 Prinzip des Schwebens mit Permanentmagneten; Tragfunktion durch abstoßende Dauermagnete, Seitenführung durch geregelte Magnete und Rollen; Tragen und Führen ist mit Dauermagneten allein nicht möglich.

8 Prinzip des elektrodynamischen Schwebens mit abstoßenden Elektromagneten.

9 Prinzip des elektromagnetischen Schwebens mit geregelten anziehenden Elektromagneten.

Die Schuberzeugung erfolgt durch einen Linearmotor, der dreiphasige gespeiste Teil wird als Stator bezeichnet. Ein Kurzstator ist Teil des Fahrzeuges, ein Langstator ist ortsfest und Teil des Fahrweges. Der Rotor wird bei der asynchronen Ausführung durch leitfähige Reaktionsplatten gebildet. Synchronmotoren benötigen geregelte Gleichstrommagnete, diese können auch die Trag und Führungsfunktionen übernehmen.

Das Transrapid-Fahrzeug basiert auf dem Langstator-Synchronmotor mit Eisen.

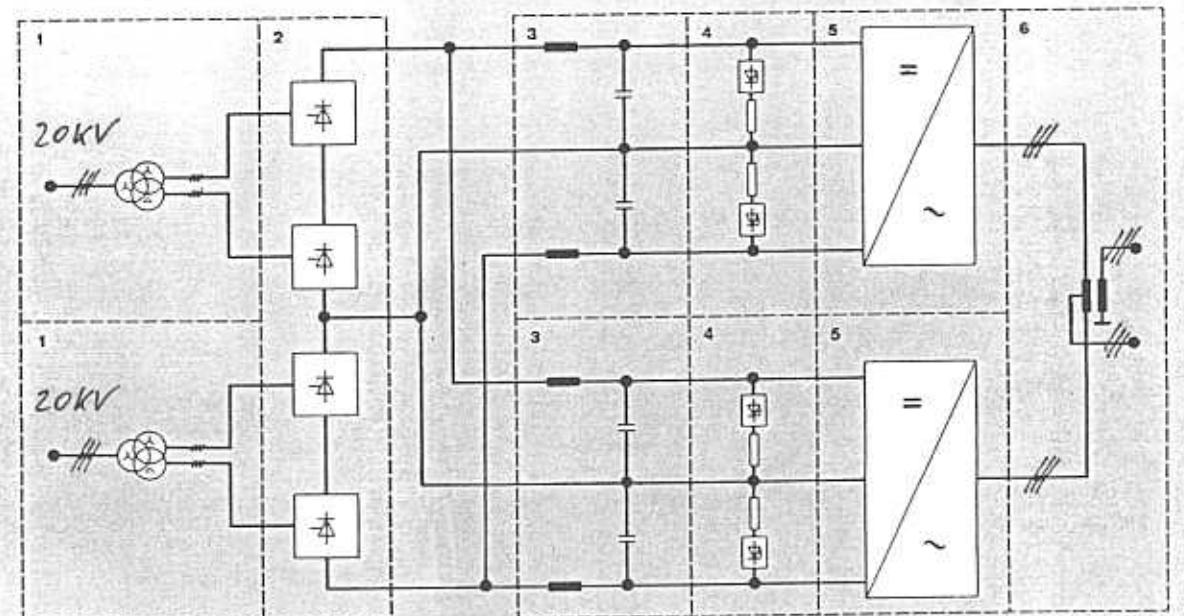


# Magnetschweben

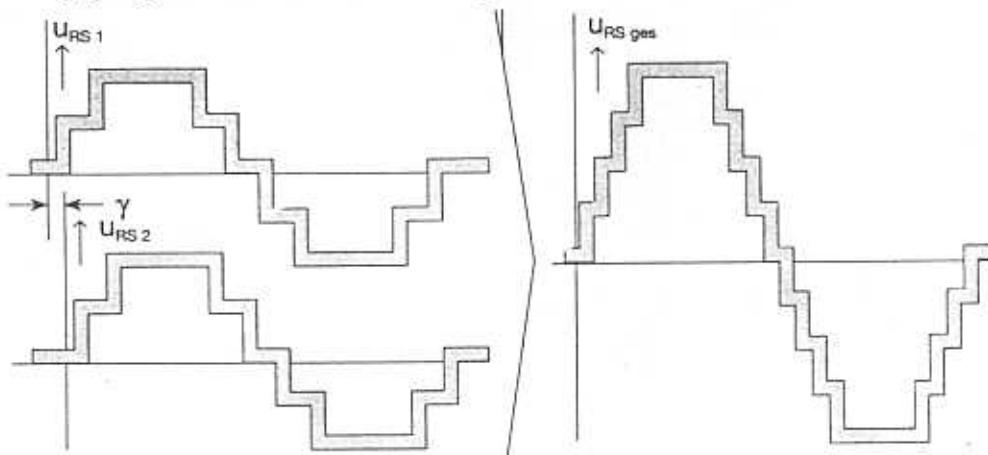
## 6.2. Stationäre Einrichtungen

Die beiden rechts und links im Fahrweg versetzt angeordneten Statoren werden aus zwei separaten Umrichtersystemen gespeist. Aufgrund der hohen benötigten Leistung (14 MVA je System) ist die verkettete Umrichterausgangsspannung zu 10kV gewählt.

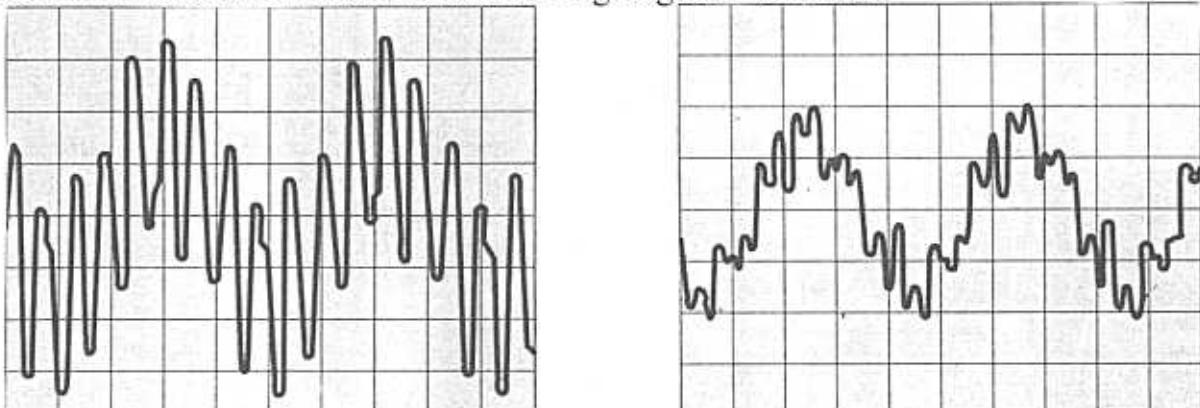
Prinzipschaltbild eines Umrichtersystems



Addition der Einzelspannungen mit variablem Schwenkwinkel zur Minimierung der ausgeprägten Resonanzen der Speiseabschnitte.

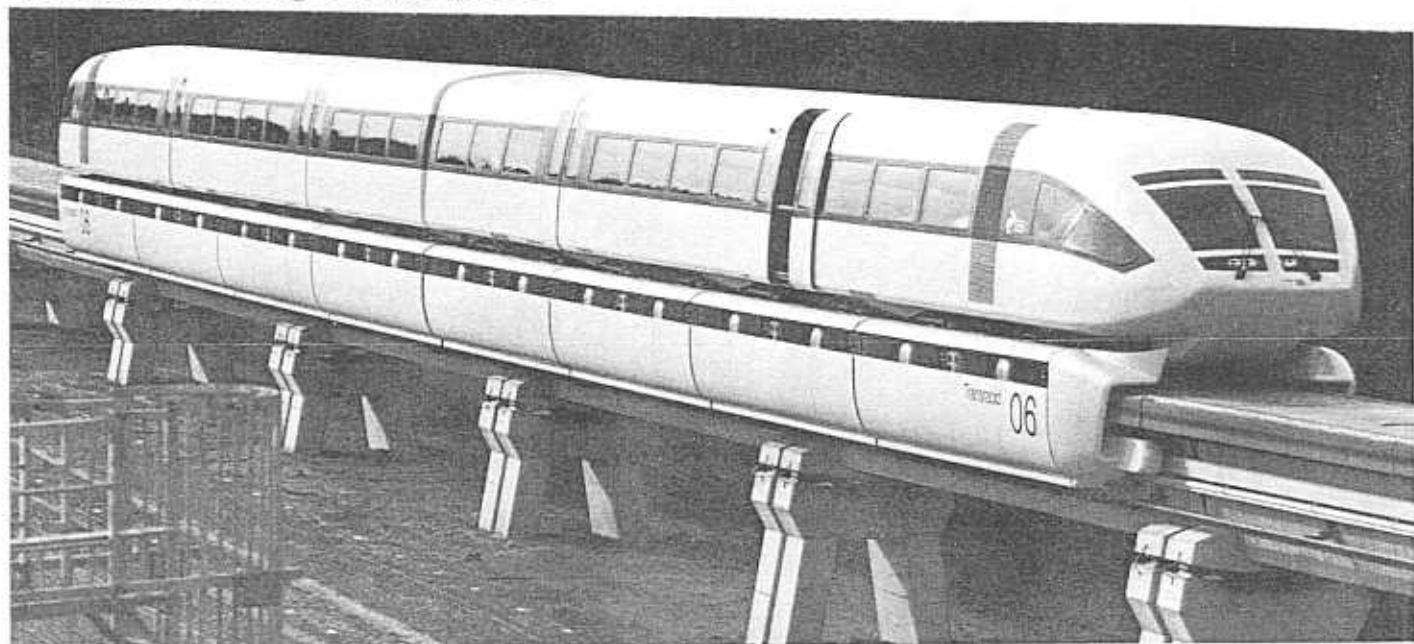


Wechselrichterstrom im Resonanzfall und geregeltes Minimum



# Magnetschweben

## 6.3. Das Fahrzeug Transrapid 06



### Bundesrepublik Deutschland

Fahrzeug-Bezeichnung:  
Transrapid 06

Hersteller des Fahrzeugs  
Transrapid E.M.S.

Hersteller der Antriebsausrüstung:  
AEG-Telefunken, Brown, Boveri & Cie,  
Siemens AG, Thyssen Industrie AG  
Henschel

Baujahr: 1983  
Tag der Inbetriebnahme: Juni 1983

Fahrzeug  
Länge 54,2 m  
Breite 3,7 m  
Höhe 4,2 m  
Eigengewicht leer 102,4 t  
Nutzlast 20,0 t  
Höchstes  
Gesamtgewicht 122,4 t  
Anzahl der Plätze  
für Personen 192<sup>1)</sup>

Trag- und Führsystem:  
elektromagnetisch<sup>2)</sup>  
Schwebehöhe (Luftspalt) 10 mm  
Antrieb: Synchron-  
Langstator-Linearmotor  
mit Eisen

Antriebsleistung kW  
Maximale Antriebskraft 85 kN  
Maximale  
Anfahrbeschleunigung 0,8 ms<sup>-2</sup>

Nenngeschwindigkeit 400 km/h

Teststrecke: Transrapid-  
Versuchsanlage im Emsland

Fahrweg  
Länge 31500<sup>3)</sup> m  
Material des Fahrwegs:  
Beton und Stahl  
Höhe der Aufständerung 5–6 m  
Kleinster Kurvenradius 1000<sup>4)</sup> m

<sup>1)</sup> 4 weitere Plätze für Bedienungspersonal  
<sup>2)</sup> Trag- und Führfunktion getrennt

<sup>3)</sup> Gesamtlänge der Transrapid-Versuchs-  
anlage Emsland; erster Bauabschnitt  
20300 m

<sup>4)</sup> in der Südschleife (zweiter Bauab-  
schnitt); im ersten Bauabschnitt klein-  
ster Kurvenradius 1690 m