

Moderne elektrische Schienentriebfahrzeuge

Prof. Dr. Andreas Steimel, 11.03.2021

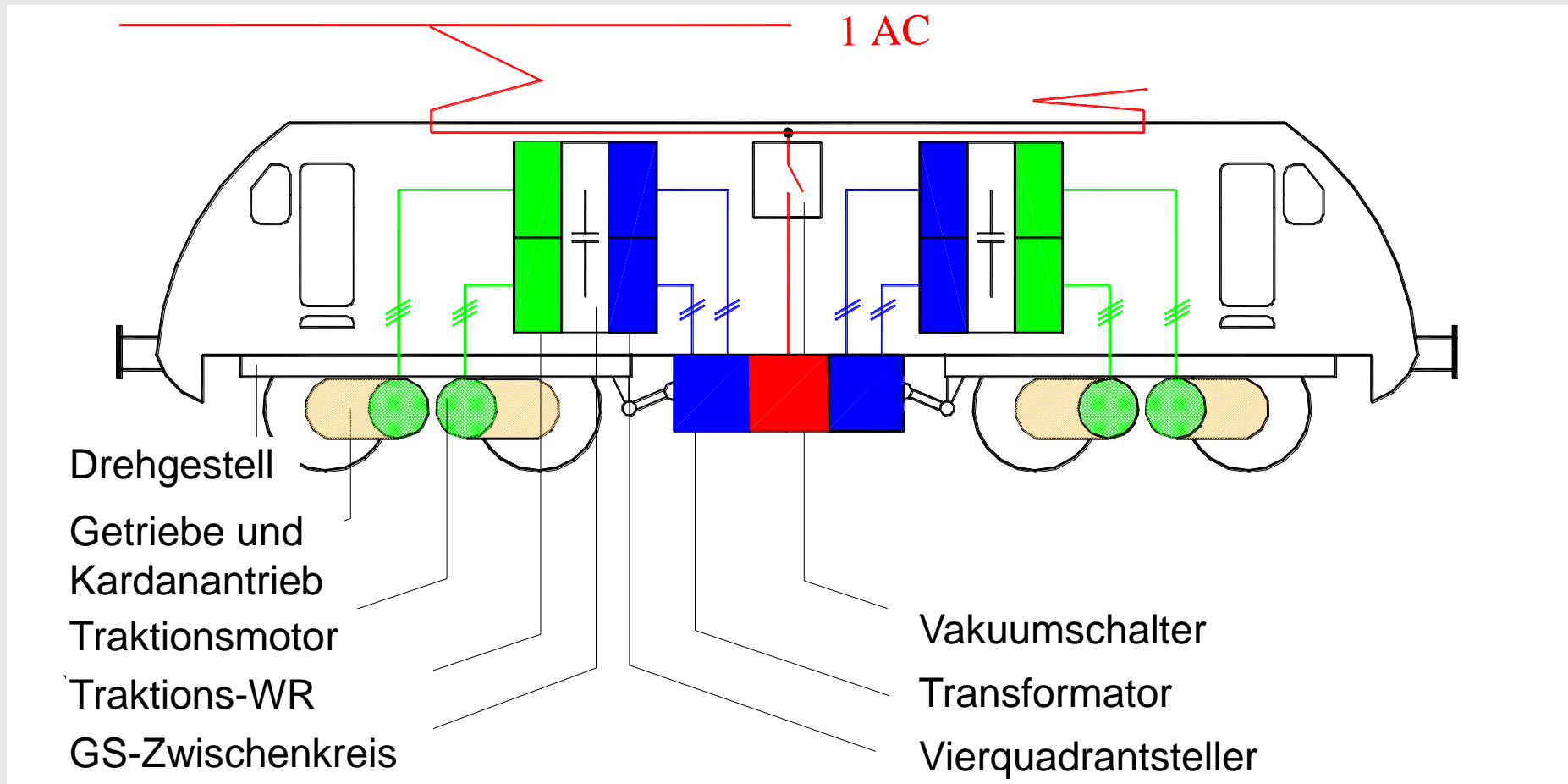
Übersicht

■ Situation der europäischen Bahnen und der Bahnindustrie	3
■ Innovatives Traktionsmaterial	4
■ Europäische Bahnstromsysteme	17
■ Hauptantriebskonzepte	18
■ Leistungselektronik	26
■ Mehrsystemlokomotiven	33
■ Neue Antriebskonzepte	35
■ Zusammenfassung	40
■ Literatur	41

Situation der europäischen Bahnen und der Bahnindustrie

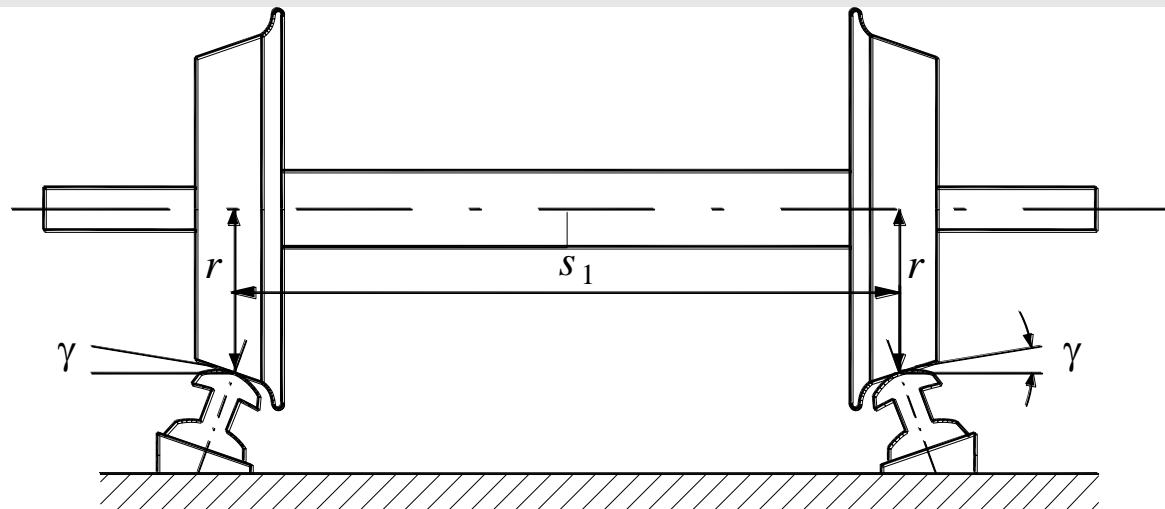
- Deregulierung und Liberalisierung der früheren Staatsbahnen seit 1990
- Aufteilung in privatwirtschaftlich organisierte Eisenbahnverkehrsunternehmen und weiterhin staatliche Infrastrukturunternehmen
- Europaweite Ausschreibung von Rollmaterial nach funktionalen Spezifikationen
- Zunahme des Leasings von Fahrzeugen, Wartung durch Hersteller
- Kostendruck, der zu starker Konzentration auf Herstellerseite führte
- Firmen der Elektroindustrie übernahmen die Systemführerschaft und schließlich auch die Fahrzeugbauunternehmen
- Standardisierte Plattformkonzepte bei Lokomotiven, große Gestaltungs- und Innovationsfreude bei Triebwagen und Straßenbahnen

Innovatives Traktionsmaterial Lokomotiven



Moderne WS-Lokomotive [1]

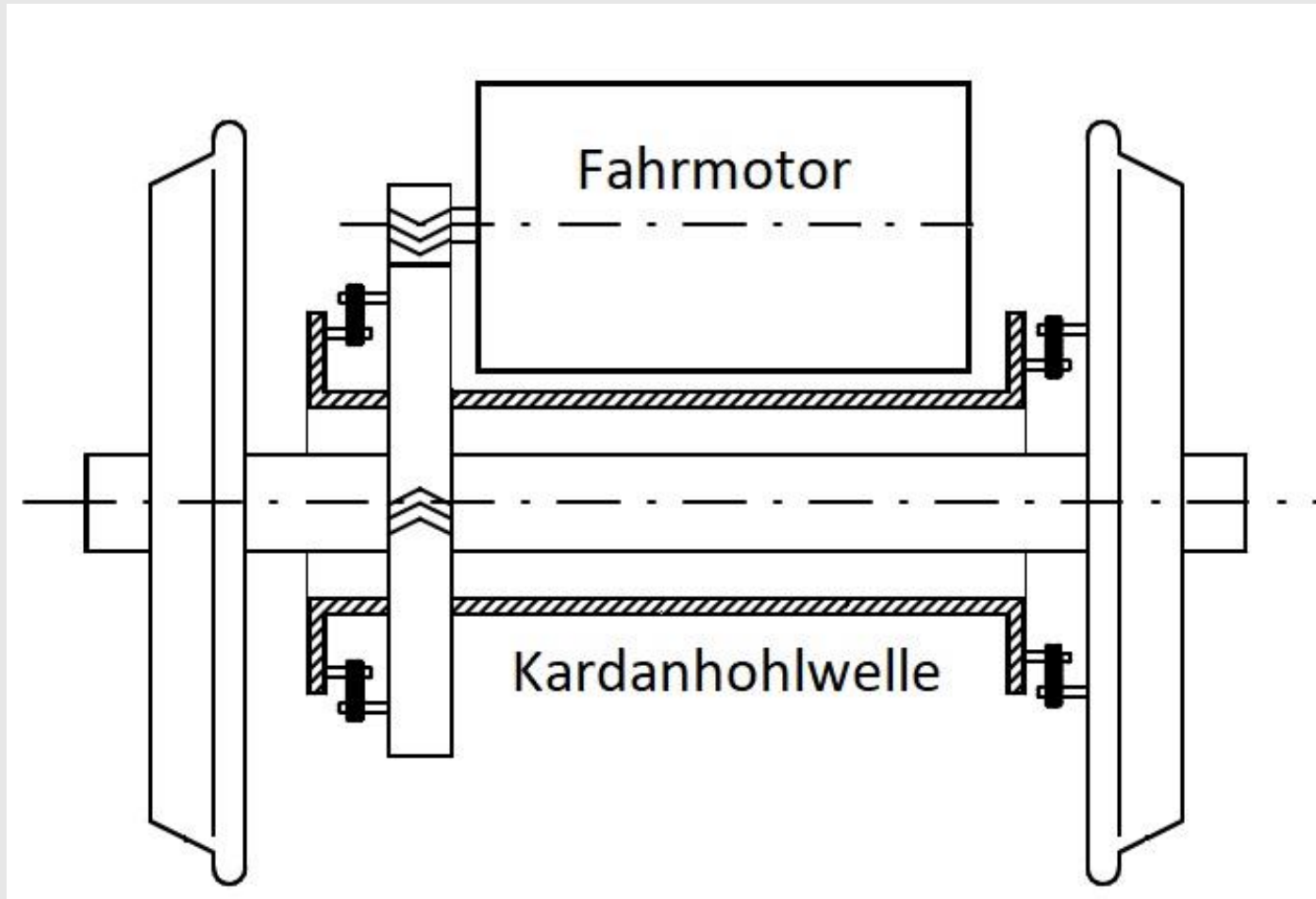
Innovatives Traktionsmaterial Lokomotiven



- Schwingungsanregung des Radsatzes durch Konizität
 $\lambda = 2\pi \cdot \sqrt{s_1 \cdot r} / (2 \cdot \tan \gamma)$, $\gamma = 1,5 \dots 2,5^\circ$; $f_a = v/\lambda$
- Eigenfrequenz $f_e = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{c}{m}}$
- Möglichst geringe Massen bzw. Massenträgheitsmomente
- Entkopplung der schwingfähigen Massen/Dämpfung

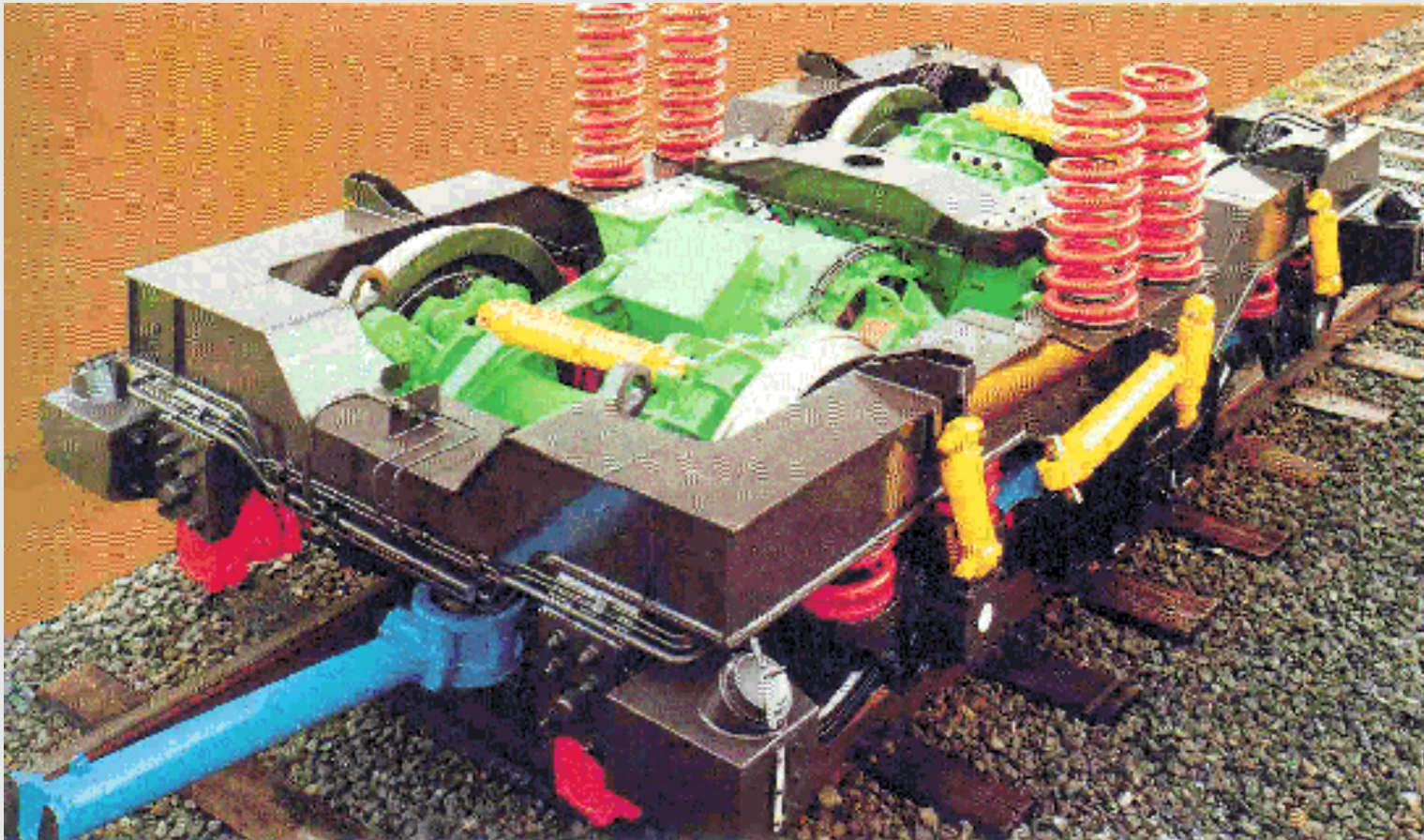
Sinuslauf des Radsatzes [1]

Innovatives Traktionsmaterial Lokomotiven



BBC-Gummigelenk-Kardanhohlwellenantrieb [1], [2]

Innovatives Traktionsmaterial Lokomotiven

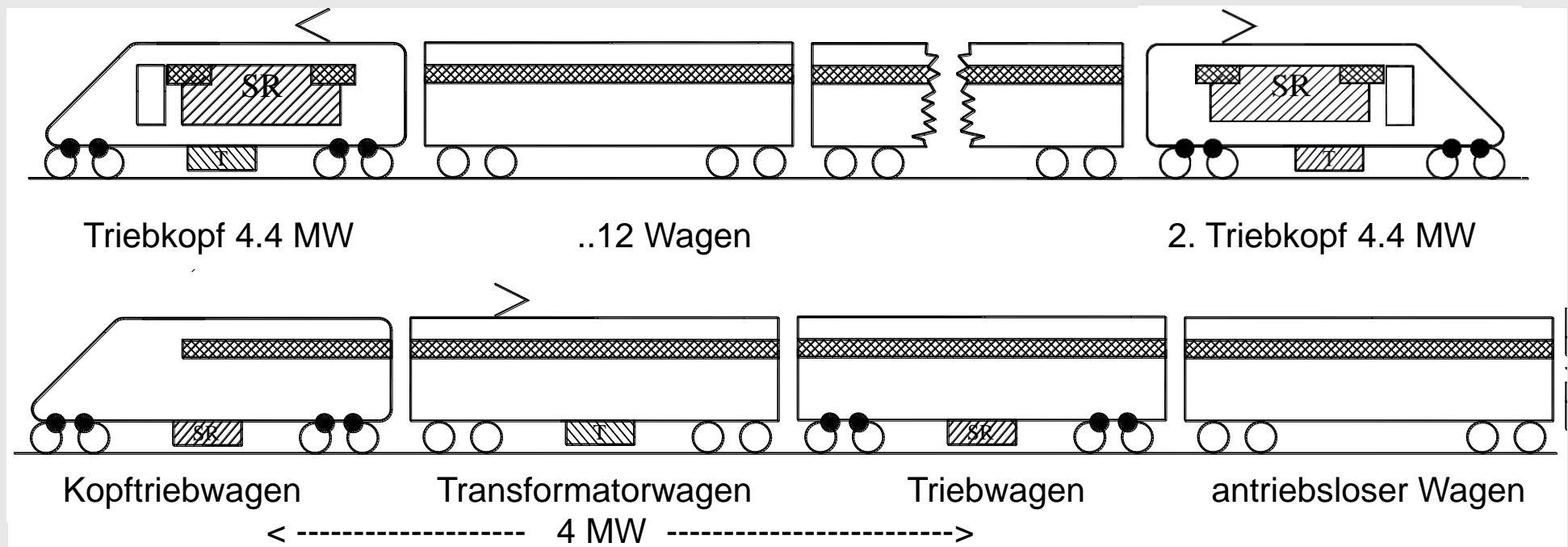


[ADtranz]

Flexifloat-Drehgestell der BR 101 mit Integriertem Gesamtantrieb

Innovatives Traktionsmaterial

Hochgeschwindigkeitszüge



Übergang vom Triebkopfkonzept des ICE 1 und TGV zum Triebwagenkonzept:
Mindestens die Hälfte aller Radsätze angetrieben (ICE 3, AGV)

Innovatives Traktionsmaterial Hochgeschwindigkeitszüge

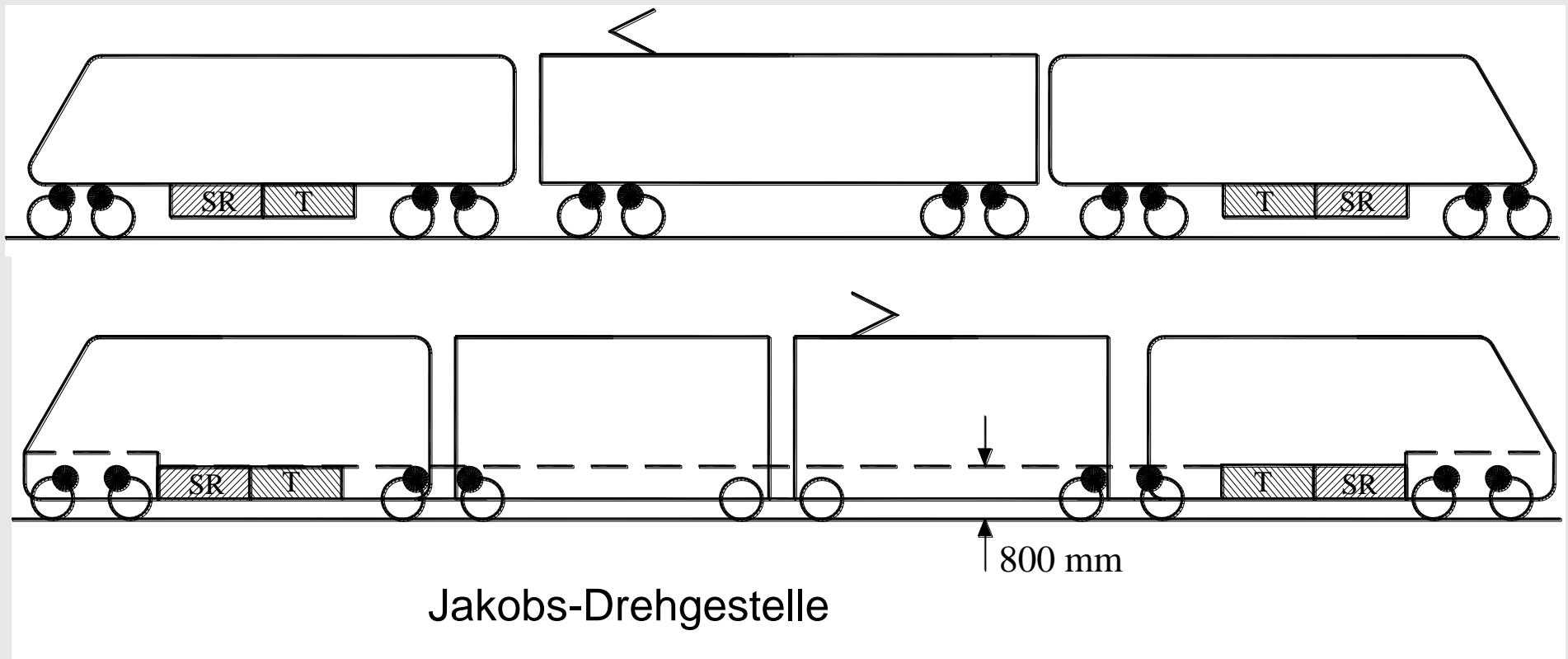


[Dr. Ch. Foerth]

**Beispiel ICE 3 (Siemens) [3]
Triebwagenzugkonzept Voraussetzung für Betriebs-
geschwindigkeiten über 300 km/h**

Innovatives Traktionsmaterial

S- und U-Bahn-Triebwagen



Oben: Klassischer Hochflur-S-Bahn-Triebwagen (teuere Bahninfrastruktur)
Unten: Niederflurbodenhöhe 800 mm, reduzierte Drehgestellanzahl, seit 2005 vermehrt auch Doppelstocktriebzüge

Innovatives Traktionsmaterial S- und U-Bahn-Triebwagen



S-Bahn Hannover BR 424
1998 (Siemens/Adtranz)



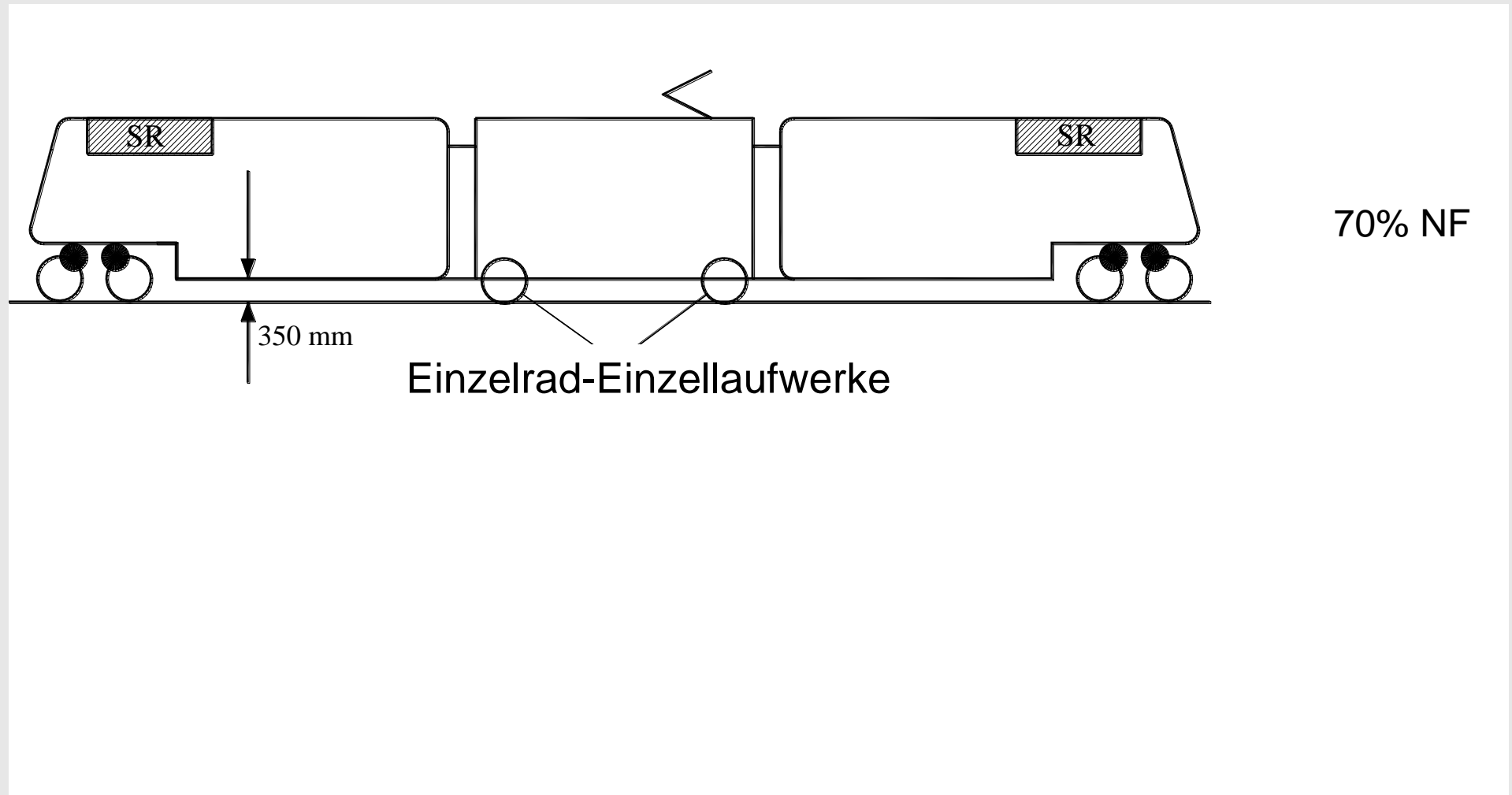
U-Bahn Berlin Kleinprofilzug IK
Ab 2021 (Stadler)



Desiro HC BR 462 für RRX 2018
(Siemens)

de.wikipedia.org

Innovatives Traktionsmaterial Niederflurstraßenbahnen



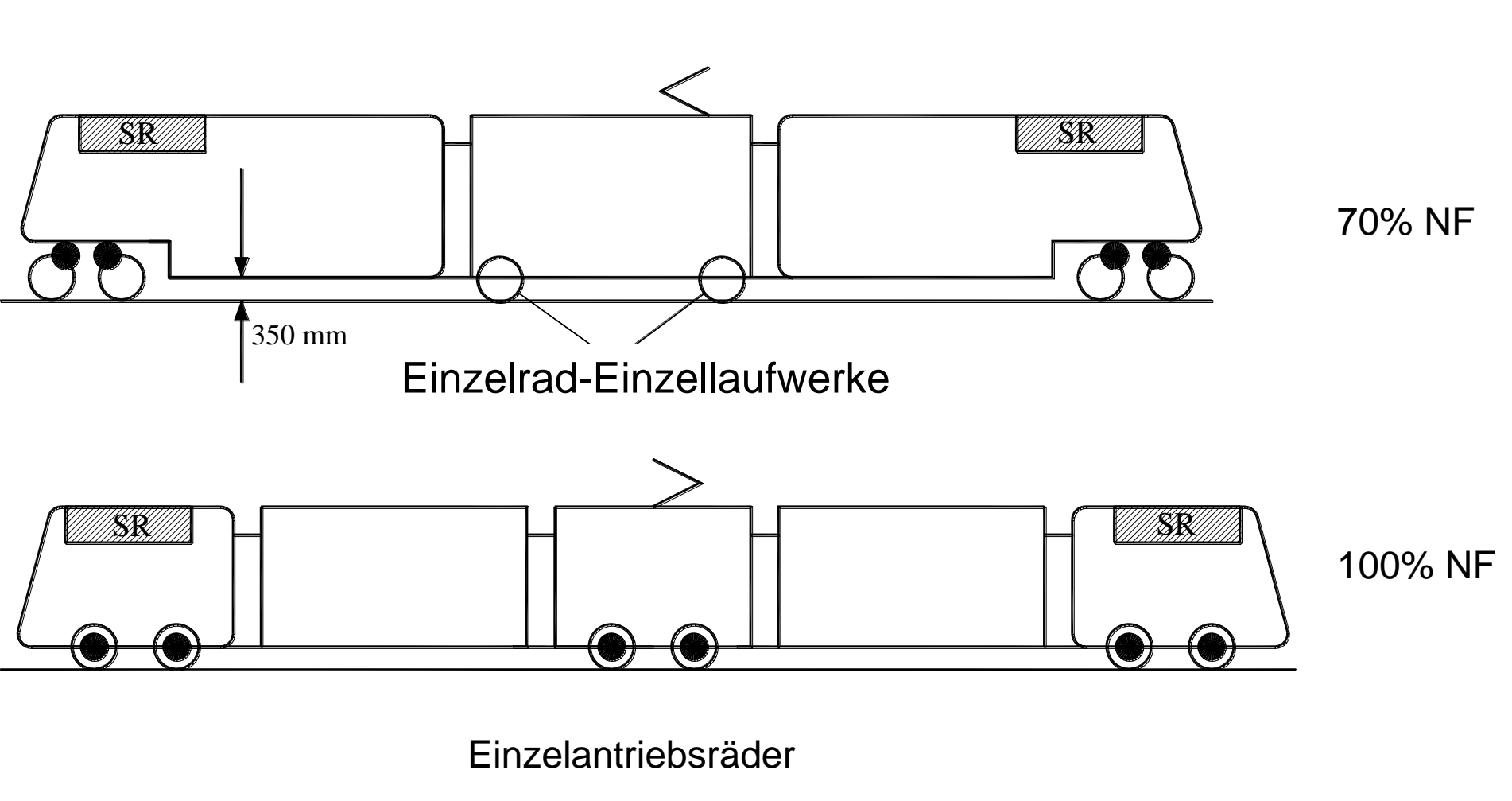
Niederflurfahrzeuge erlauben unbehinderten Einstieg für Passagiere [4]
Problem: Kollision des Fußbodens mit Achsen → Einzelradfahrwerke

Innovatives Traktionsmaterial Niederflurstraßenbahnen



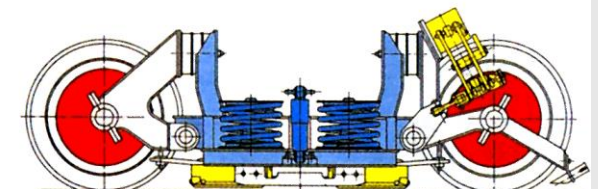
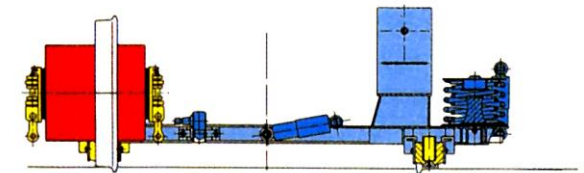
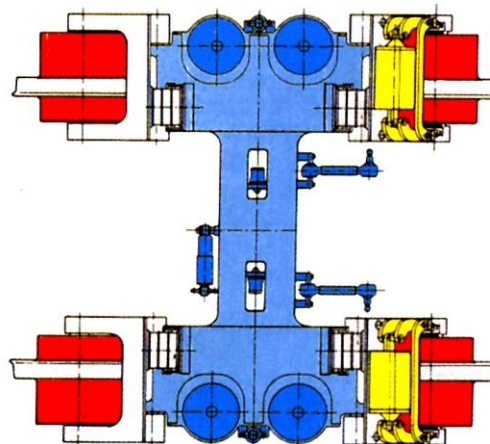
70%-Niederflurfahrzeug: MF6D der Bogestra 1992 (Siemens)

Innovatives Traktionsmaterial Niederflurstraßenbahnen



Bei 100 % Niederflur müssen Einzelräder angetrieben werden!

Innovatives Traktionsmaterial Niederflurstraßenbahnen



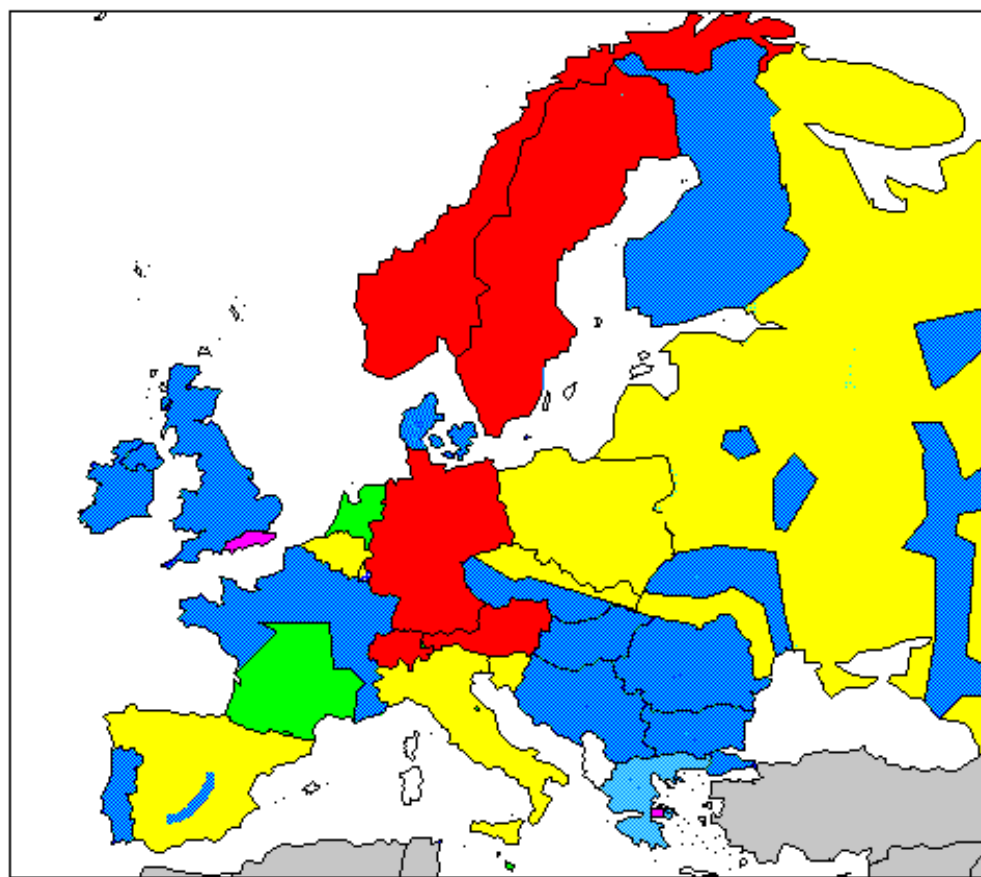
100%-NF: Multigelenkfahrzeug Variotram (Adtranz 1995); auch Bochum
Getriebeloser Außenläufer-Asynchronmotor! [4]

Innovatives Traktionsmaterial Stadtbahnen (Tram-Trains)

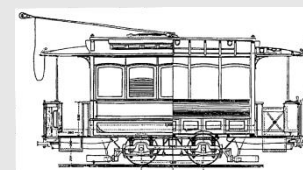


GT 8-100 2S Karlsruhe, mit 750 V DC in der Stadt
oder 15 kV WS aus der DB - Fahrleitung [1]

Europäische Bahnstromsysteme



750 V DC
 1500 V DC
 3000 V DC
 15 kV 16 2/3 Hz
 25 kV 50 Hz



[5]

Hauptantriebskonzepte

WS-Kommutatormotor

- AC 15 kV $16\frac{2}{3}$ Hz
- Reihenschluss-Kommutator-Fahrmotoren
- Spannungsregelung über Transformator mit Hochspannungsschaltwerk und Thyristor-Lastschalter
- 3.700 kW/160 km/h
- Noch im Dienst, aber seit ca. 1984 nicht mehr beschafft



[Bombardier]

Lokomotive BR 111 der DB (1974) [6]

Hauptantriebskonzepte

GS-Kommutatormotor mit Schaltwerk

- DC 750 V ... **1,5** ... 3 kV
- Reihenschluss-Kommutator-Fahrmotoren
- Spannungsregelung über Serien-Parallelschaltung der Fahrmotoren und Vorwiderstände
- 3.850 kW/160 km/h

- Seit ca. 1965 nicht mehr beschafft, nicht mehr im Dienst

<http://www.ferropedia.es/wiki/Archivo:SNCFBB92740rJPVL.JPG>



Lokomotive BB 9200 der SNCF (1957) [7]

Hauptantriebskonzepte

Phasenanschnittsteuerung

- AC 15 kV $16\frac{2}{3}$ Hz
(und AC 25 kV 50 Hz)
- Reihenschluss-Gleichstrom-Kommutator-Fahrmotoren
- Thyristor-Phasenanschnittsteuerung
- 5.400 kW/160 km/h

- Noch im Dienst, aber seit ca. 1990 nicht mehr beschafft



[Bombardier]

Lokomotive Rh. 1044 der ÖBB (1976) [8]

Hauptantriebskonzepte

Gleichstromstellersteuerung

- DC 750 V ... 1,5 ... 3 kV
 - Reihenschluss-Gleichstrom-Kommutator-Fahrmotoren
 - Thyristor-GS-Steller (mit Zwangskommutierung)
 - 4.700 kW/160 km/h
-
- Noch im Dienst, aber seit ca. 1990 nicht mehr beschafft

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4c/Locomotiva_FS_E_633_020_1.jpg



Lokomotive E 633 der Trenitalia (1980) [9]

Hauptantriebskonzepte

Elektrisch erregter Synchronmotor

- DC 1500 und AC 25 kV 50 Hz
- Synchron-Fahrmotoren
- Thyristorumrichter mit lastgeführter Kommutation
- Zwangskommutation im Anfahrbereich
- Netzseitig Thyristoranschnittsteuerung bzw. GS-Steller
- 8.800 kW/300 km/h
- Bei 15 kV $16 \frac{2}{3}$ Hz nur reduzierte Leistung möglich
- Inzwischen durch IGBT-WR und ASM-Antriebe abgelöst



[Alstom]

SNCF TGV-A (1988) [10]

Hauptantriebskonzepte

Asynchronmotor, 1. Generation

- WS 15 kV 16 $\frac{2}{3}$ Hz
- Asynchron-Kurzschlussläufer-Motoren hoher Leistungsdichte
- Zwangskommutierte Spannungs-Zwischenkreisumrichter mit Thyristoren
- Netzfrendliche Vierquadrantsteller
- 5.600 kW/200 km/h



[BBC]

DB 120 Prototypen (1979) [2]

Hauptantriebskonzepte

Asynchronmotor und IGBT-WR, 4. Generation



Alle
Loks
6,4 MW
160 km/h
für
Güter-
züge

VECTRON (Siemens) [11]



TRAXX 2, 3 (BT) [12]



ICE 4
12 MW
249 km/h

ICE 4 (Siemens, BT) [14]



PRIMA (Alstom) [13]

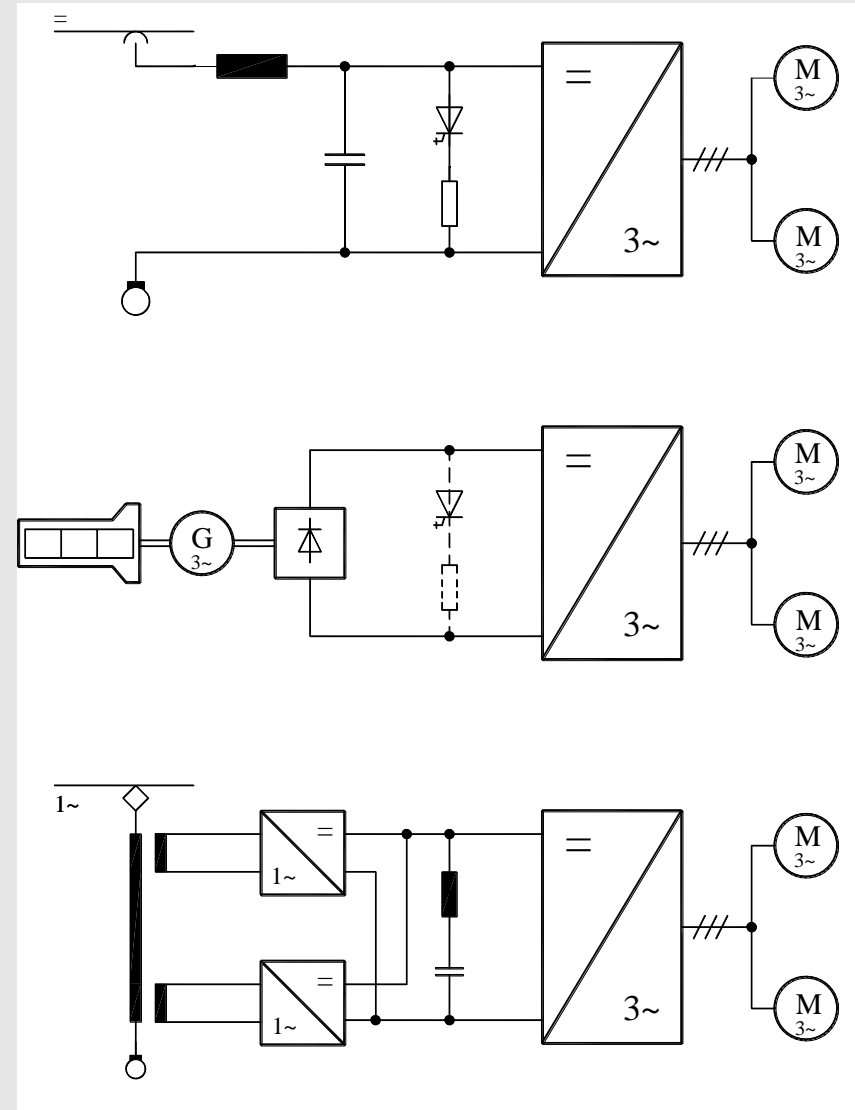
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4f/ICE_4_at_Nuremberg_Hbf.jpg

de.wikipedia.org

Hauptantriebskonzepte

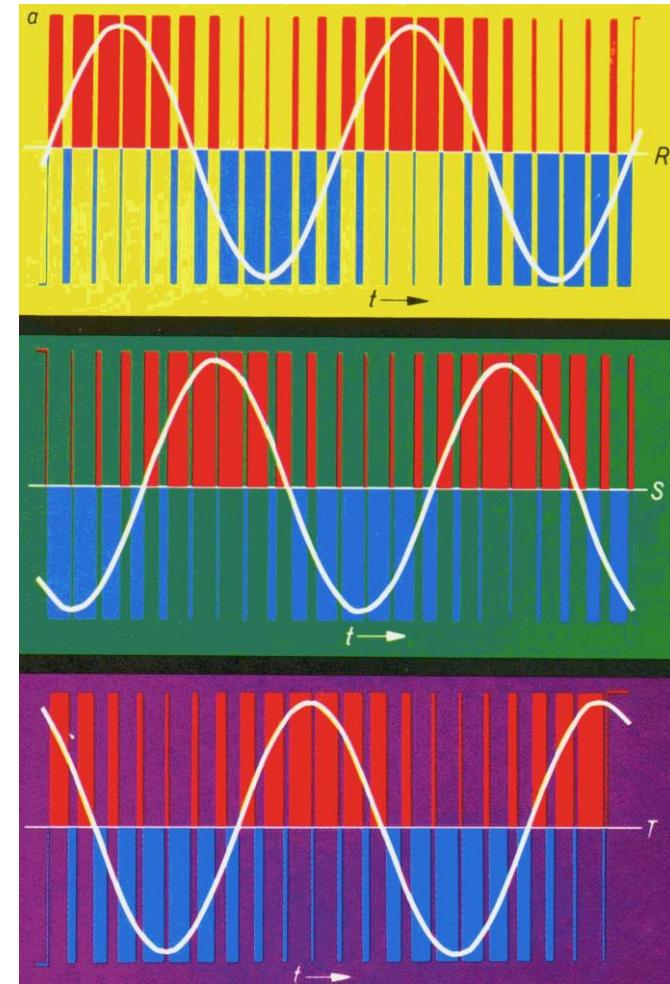
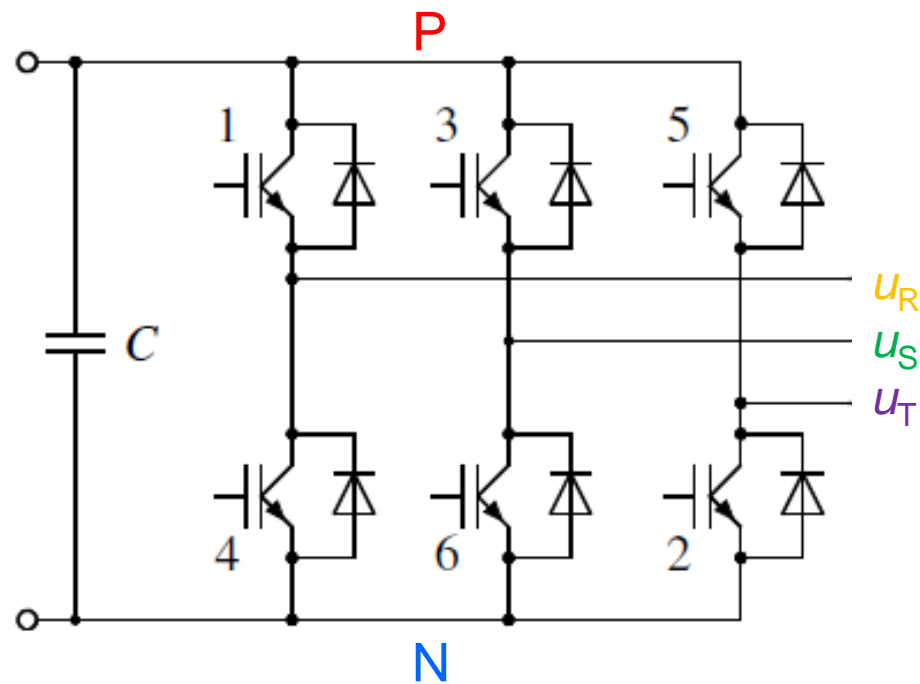
Standardisierung durch Drehstromantrieb

- Straßen- oder U-Bahn, direkt aus dem Gleichstromfahrdrabt gespeist
- Dieselelektrische Lokomotive
- WS-Fahrdrabt-Lokomotive mit zwei Vierquadrantstellern (4q-S)



Leistungselektronik

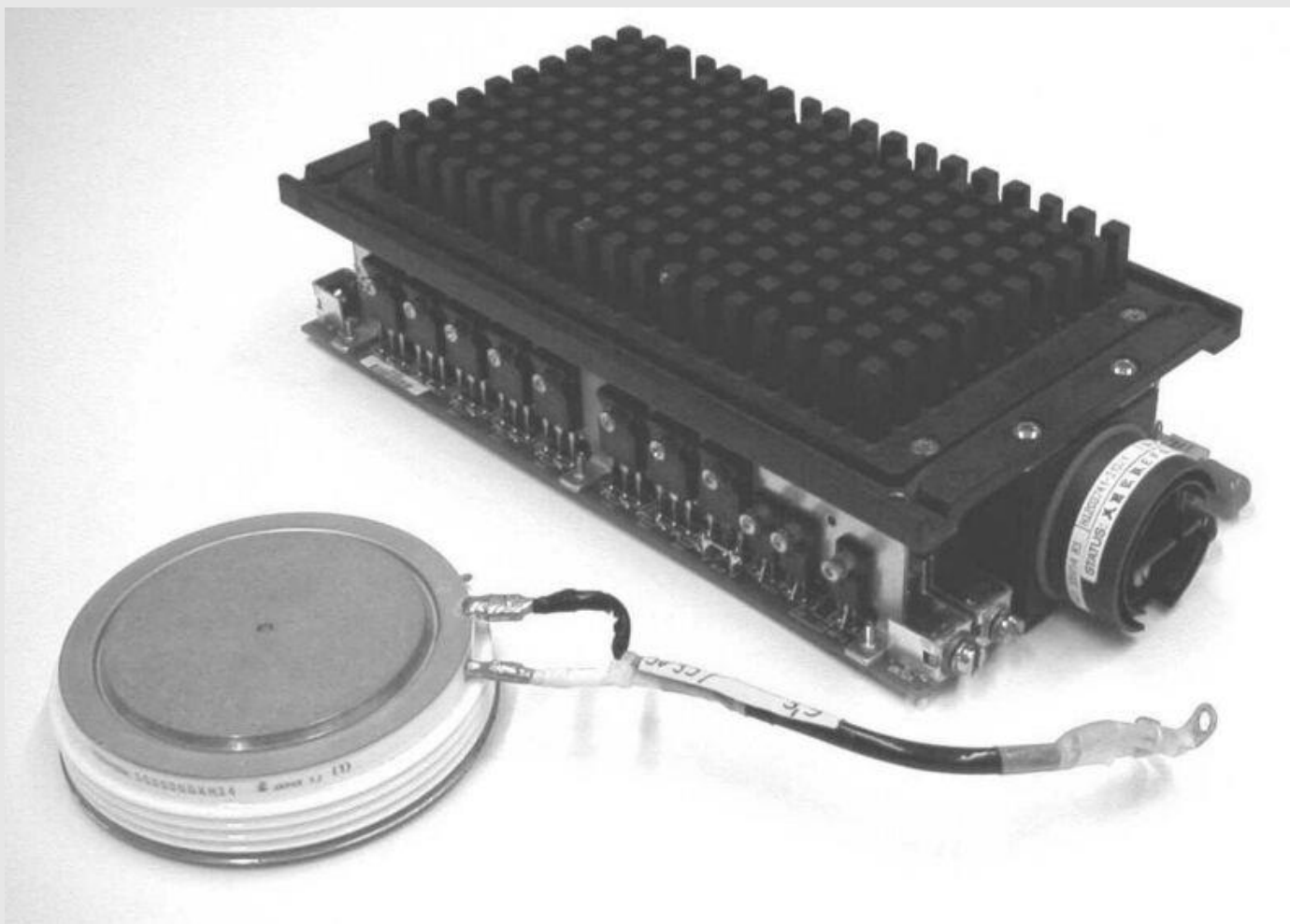
Pulswechselrichter



**Aufbau und Funktion des dreisträngigen (IGBT)-Pulswechselrichters
(WR-Ausgangsspannungen)**

Leistungselektronik

Halbleiterbauelemente



[ABB]

Gate Turn-Off- (GTO-) Thyristor 4,5 kV/3000 A (mit Gate Unit)
Ende der 80er-Jahre

Leistungselektronik

Halbleiterbauelemente

Fahrdraht-, ZK- und IGBT-Nennspannungen		
U_{FN}/V (GS)	U_{ZKN}/V	U_{CESN}/V *
750	(900)	1700
1500	1800	3300
-	2400 – 2800	4500
3000	3600	6500

* Standard-Zweipunkt-WR

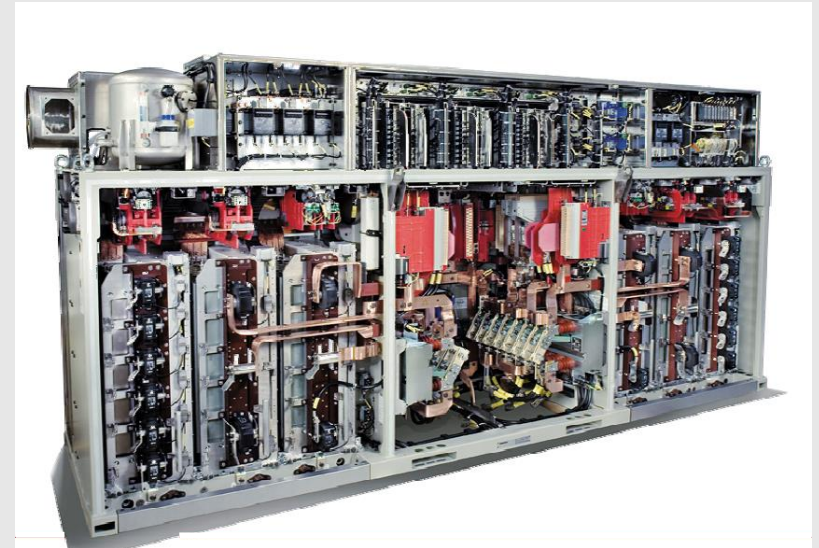
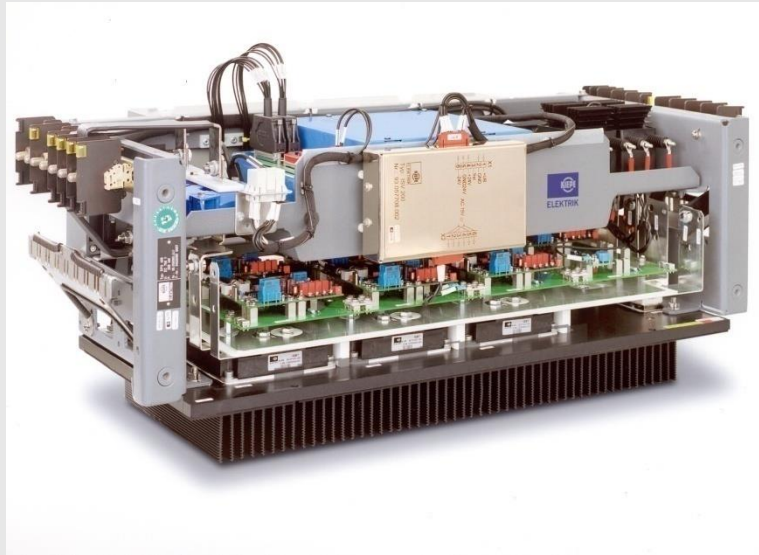


[Infineon]

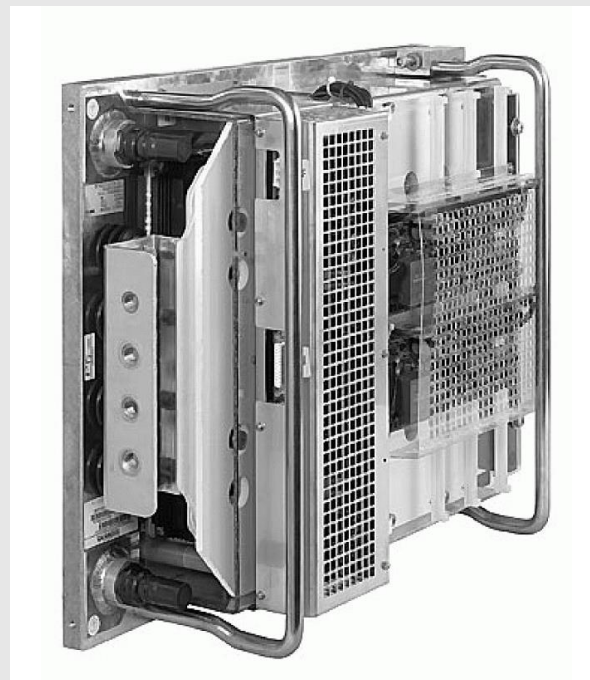
IGBT 6,5 kV - 750 A in HIV-Gehäuse, 2000...

Leistungselektronik

IGBT Umrichter



Straßenbahnen:
DPU 409 Vossloh Kiepe

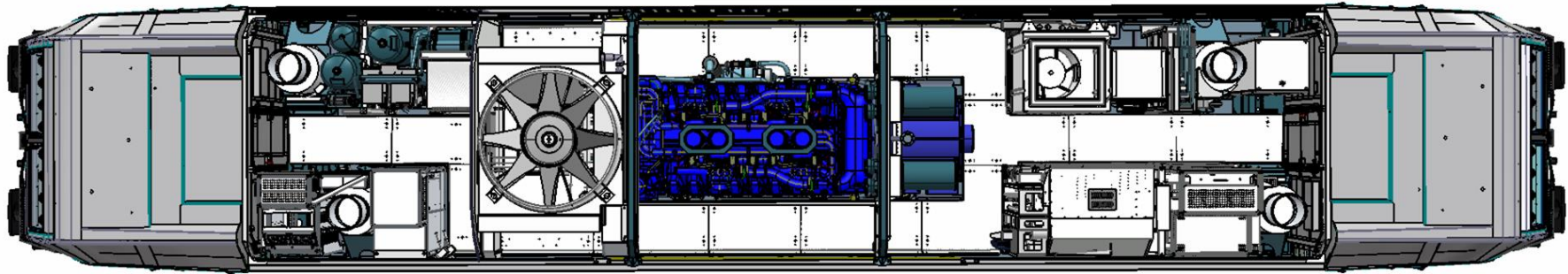


Loks und HGV-Triebwagen:
6,5-kV-IGBT-Phasenbaustein
Siemens

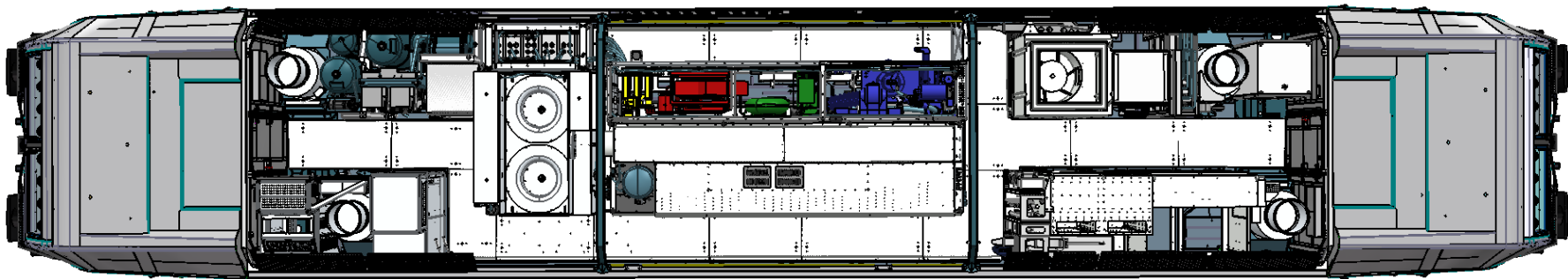
Lokomotiven:
TC 3300 Bombardier
5.6 MW MS

Hauptantriebskonzepte

Standardisierung II



Diesel-elektrische BR 246 LN mit "D-PowerPackage" 2200 kW

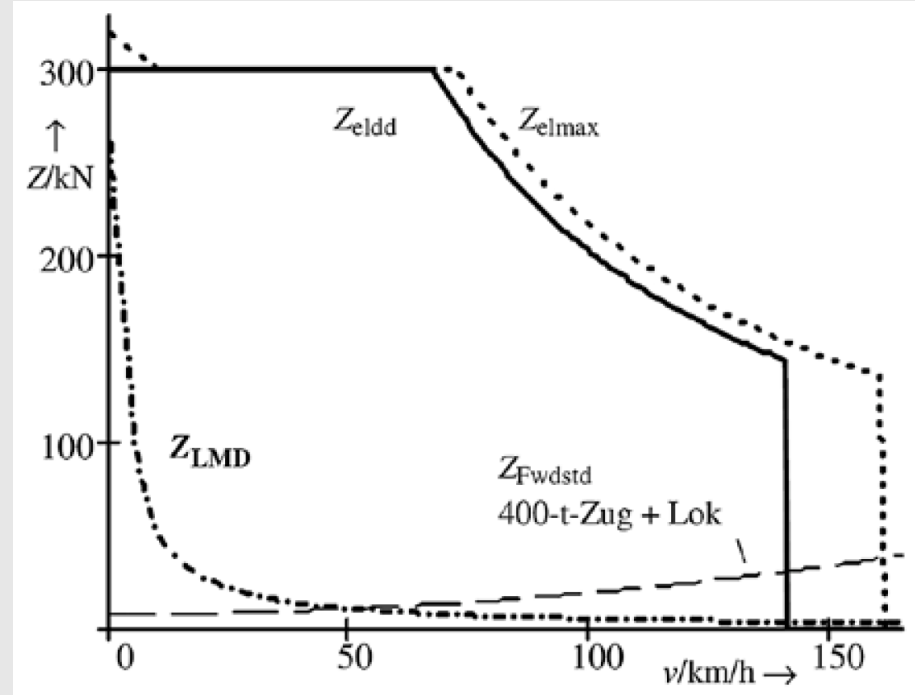


Viersystem-Lokomotive mit "E-PowerPackage" (bis 6,4 MW) (Bombardier, [12])

Hauptantriebskonzepte Zweikraftlokomotiven

Last-Mile Diesel

Diesel-Generator-Set 250...300 kW
Zusätzlich Batterie, über einen 4q-S
als Hochsetzsteller an Zwischenkreis
angekoppelt [15]



Stadler Euro-Dual BR 159

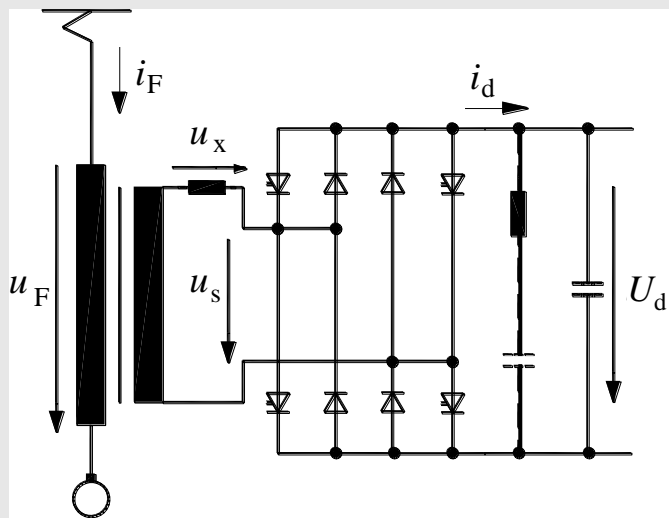
15 kV 16 $\frac{2}{3}$ Hz: 6150 kW

Diesel: 2800 kW

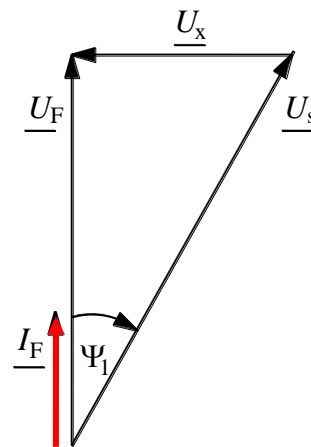
$Z_A = 500 \text{ kN}$ $v_{\max} = 120 \text{ km/h}$ [16]

Leistungselektronik

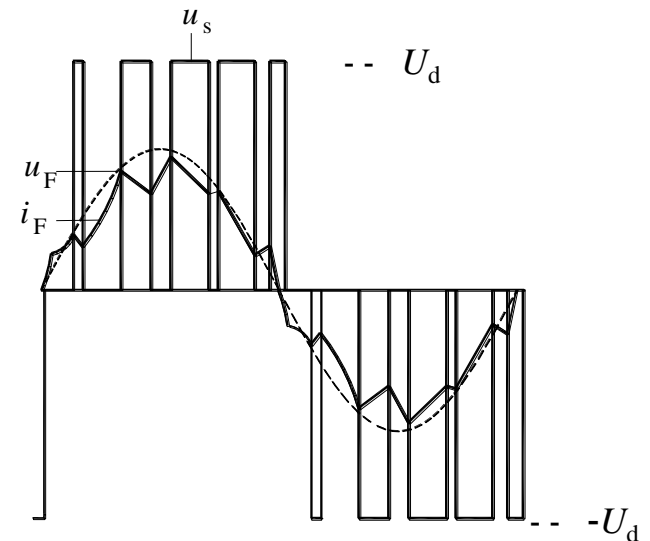
Vierquadrantsteller



Ersatzschaltbild



Zeigerdiagramm

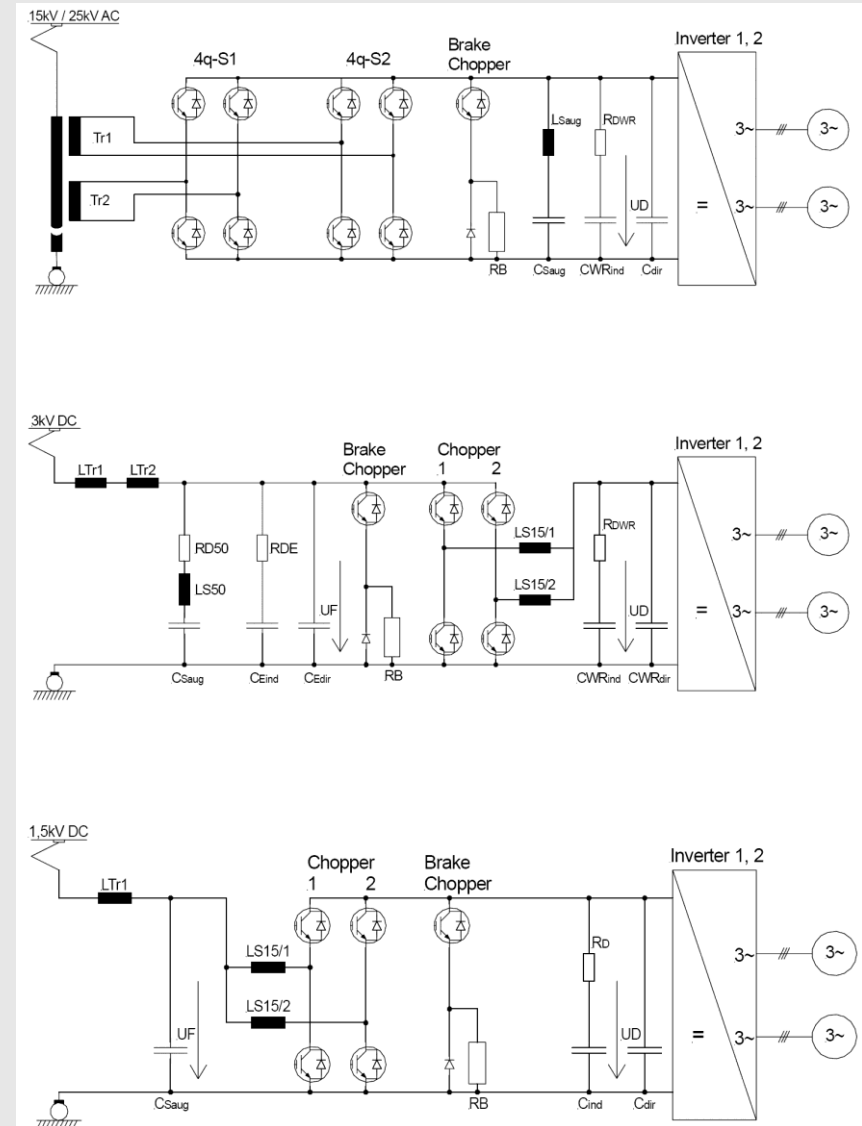
Spannung u. Strom ($\cos \varphi_1 = +1$) auf der WS-Seite

Immer Betrieb mit optimalem Leistungsfaktor
sowie ideale Rekuperation beim Bremsen
Saugkreis $2 f_{\text{Netz}}$ für Pendelleistung des Einphasennetzes [17]

Leistungselektronik

Mehrsystem-Lokomotiven I

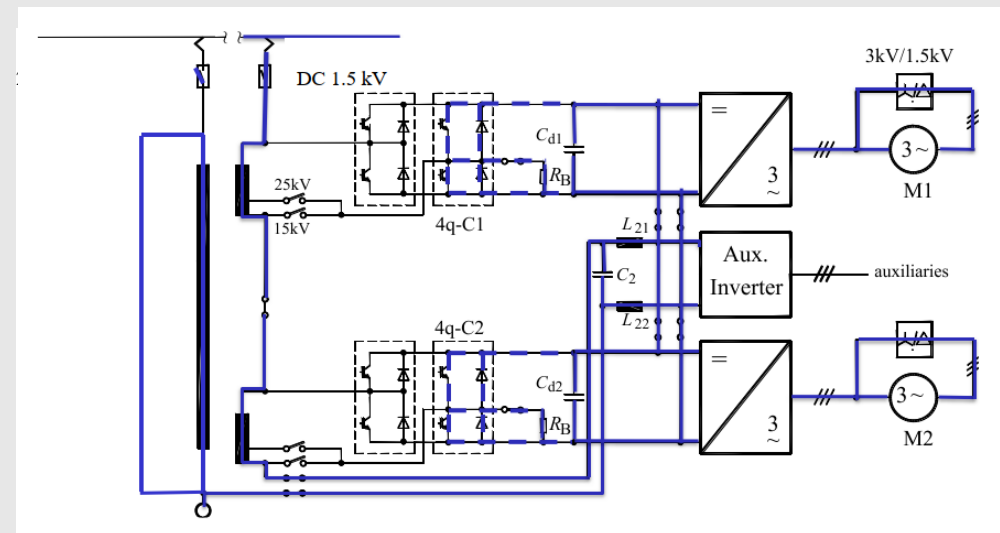
- Zwei 4q-S und Saugkreis am 2,8-kV-Zwischenkreis pro Drehgestell (2,8 MW) für WS-Betrieb
- Bei GS 3000 V werden die 4q-S als Tiefsetzsteller umgruppiert; 6,5-kV-IGBT nötig
- Bei GS 1500 V werden die 4q-S als Hochsetzsteller umgruppiert
- Saugkreisdrossel als Stellerdrosseln und Streuinduktivität des (primärseitig kurzgeschlossenen) Trafo als Netzfilterdrossel bei GS
- Konstante Zwischenkreisspannung erlaubt günstige Motorauslegung
- Synergie mit Standard-WS-Loks



Leistungselektronik

Mehrsystem-Lokomotiven II

- Zwei 4q-S und zwei WR pro DG
- GS direkt zum WR-Zwischenkreis geführt
- Transformator-Streuinduktivität dient als GS-Filterinduktivität
- 4q-S als Bremssteller benutzt
- Variable Zwischenkreisspannung führt zu höherer Motorbeanspruchung und höheren Motorverlusten
- Stern-Dreieck-Umschaltung für DC 1,5 kV
- Hilfsbetriebe müssen vom ZK gespeist werden



4-System-Lokomotive BR 189 (Siemens [19])

Neue Antriebskonzepte PM-erregte Synchronmotoren



[Alstom]



[Alstom]

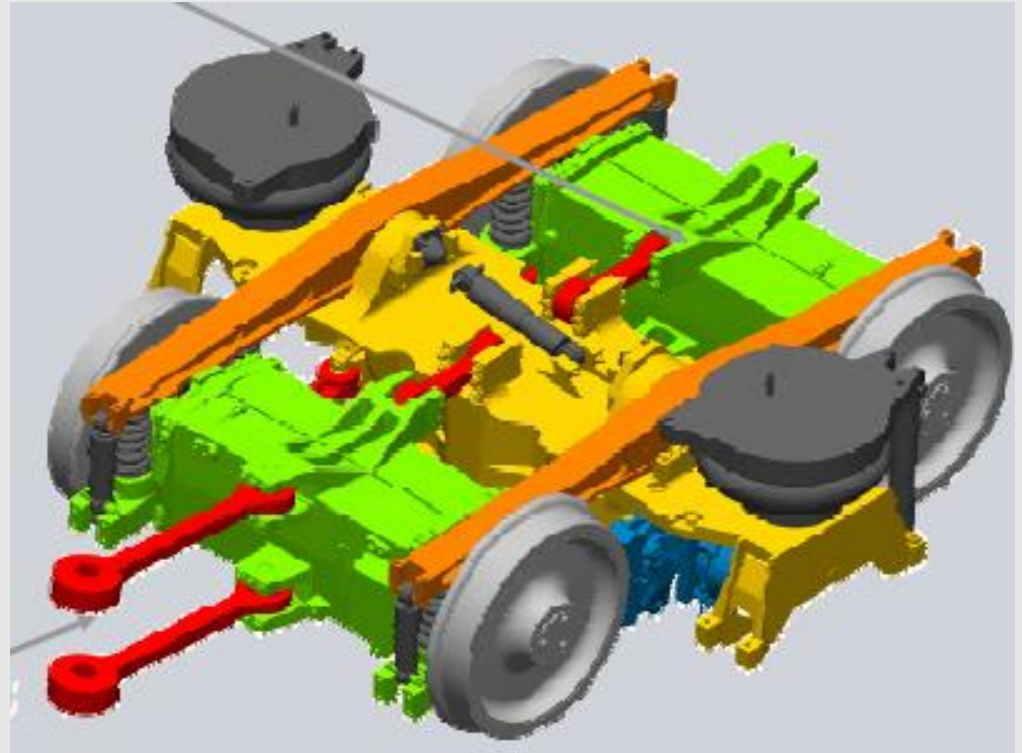
Hochgeschwindigkeitstriebwagenzug
.Italo für NTV, Italien 2011
(ALSTOM [20])
Gewicht PMSM ca. 30...40% geringer als ASM, Verluste ebenso!
Komplexer Schutz!

Motor 900 kW, nur 775 kg

Neue Antriebskonzepte

PM-erregte Synchronmotoren

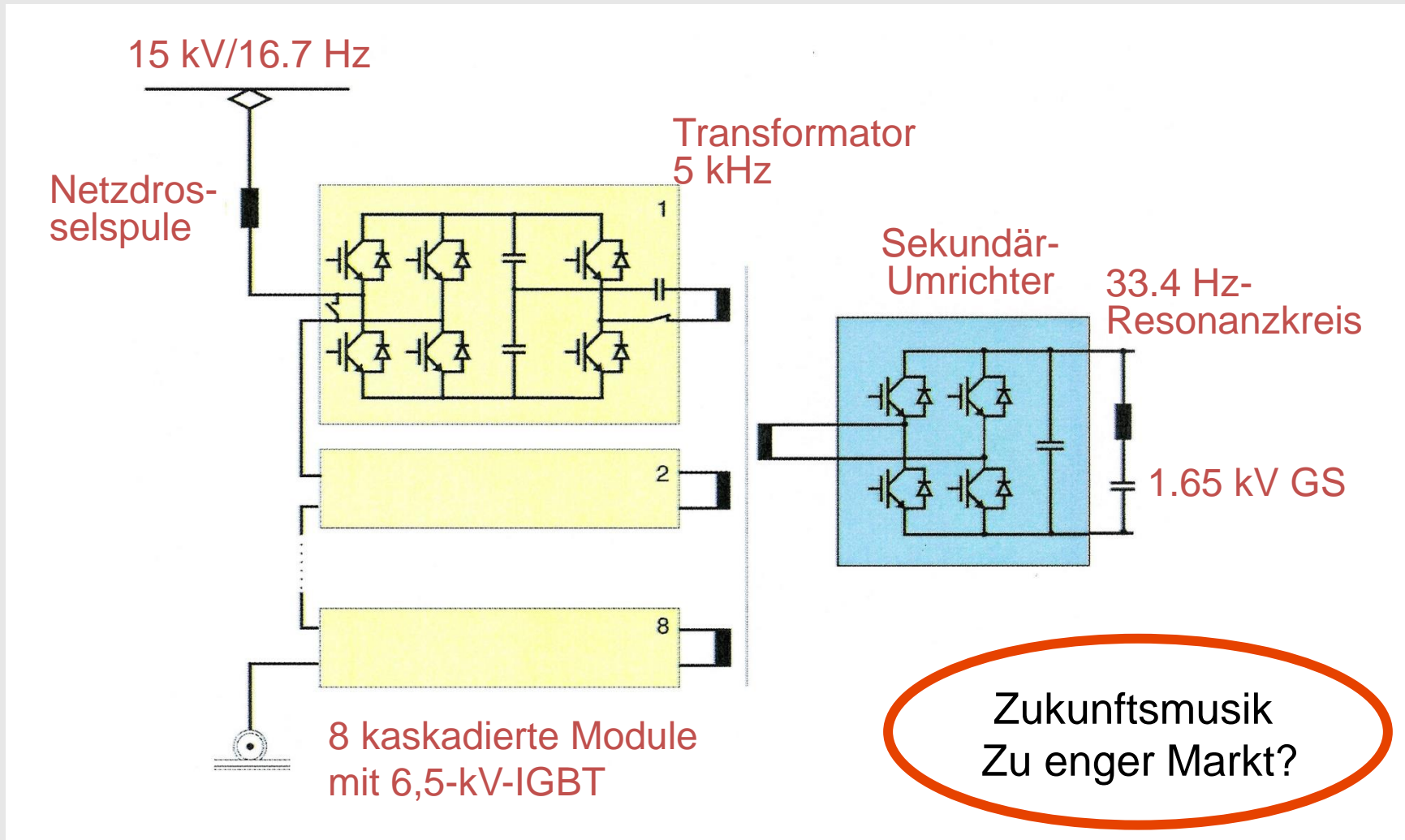
- SYNTEGRA getriebeloser 150-kW PMSM-Antrieb (ölgefülltes Getriebe fällt weg!)
- Motoren direkt an Drehgestell-Wiegenträger angekoppelt, damit nur geringe Achsentlastung
- Prototyp wassergekühlt
- Motorabtrennung bei Umrichterfehler notwendig
- Konnte sich bisher nicht durchsetzen



SYNTEGRA Integrierter getriebeloser PMSM-Antrieb
(Siemens [21])

Neue Antriebskonzepte

Mittelfrequenz-Transformator



Transformatorgewicht stark (auf ~50%) reduziert
(Prototyp ALSTOM LHB 2006 [22]; Prototyp ABB [23])

Neue Antriebskonzepte Energiespeicher



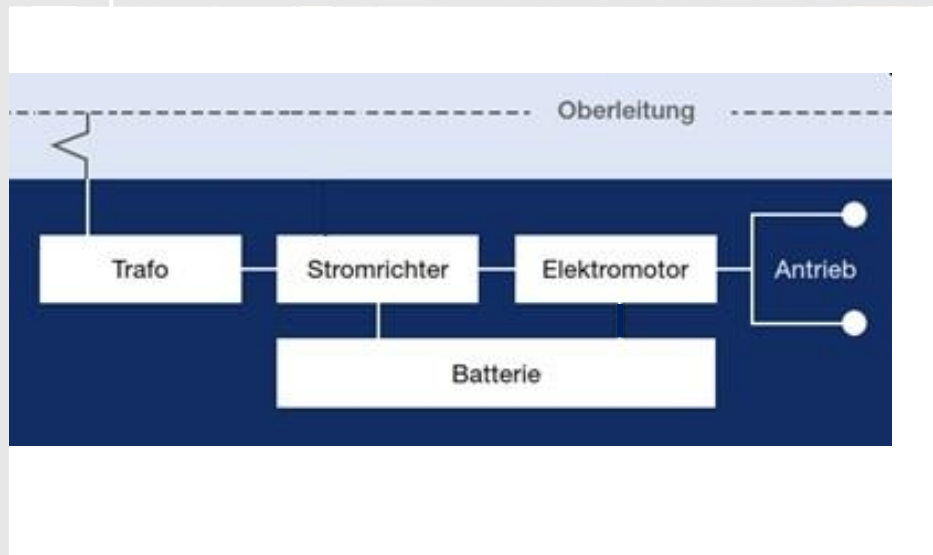
ETA 178
Preußen 1907
Bleibatterie
118 kg/kWh

MITRAC Energy Saver
(Bombardier) 2003
SuperCap
450 kg, 1 kWh [24]



Neue Antriebskonzepte

Vollbahn-Triebwagen mit Speichern



ÖBB Cityjet Eco 4746 049

< 2600 kW

15 kV 16 $\frac{2}{3}$ Hz über 4q-S

LTO-Batterie 528 kWh / 80 km

12...15 kg/kWh

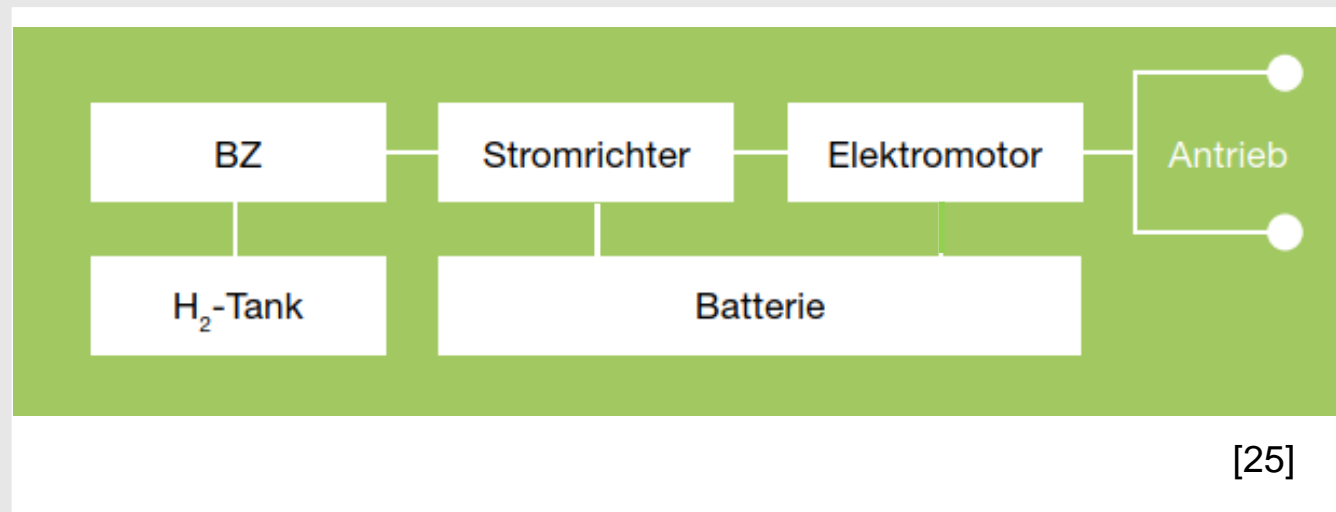
Ankopplung über DC-DC-Wandler

ALSTOM iLINT 54

2 x 277 kW

H₂-BZ 2 x 200 kW

Tank 260 kg 1000 km



[25]

Zusammenfassung

- Wettbewerb nach Deregulierung und Liberalisierung der Eisenbahnmärkte führt zu neuen technischen Lösungen
 - Attraktiver und komfortabler für den Fahrgast
 - Wirtschaftlicher für den Betreiber durch starke Standardisierung sowie Energieeinsparung
- Innovative Fahrzeugs- und Antriebskonzepte
- die durch umrichter gespeiste Asynchronmaschinen ermöglicht werden
- IGBT-Umrichter erlauben bisher unbekannte Freizügigkeit bei Fahrzeuggestaltung und beim Betrieb in den unterschiedlichen Bahnstromnetzen
- Moderne hochdynamische flussorientierte Motorregelungsverfahren
- Permanenterregte Synchronmotoren erlauben weitere Leistungssteigerung
- Moderne Energiespeicher erlauben wirtschaftlich CO₂-freien Betrieb auf nicht-elektrifizierten Strecken

Literatur

- [1] Steimel, A.: Elektrische Triebfahrzeuge und ihre Energieversorgung. InnoTech Medien GmbH, Augsburg, 4. Auflage 2017
- [2] 120 – Elektrische Lokomotive in Drehstromtechnik der Deutschen Bundesbahn. Sonderheft "Elektrische Bahnen" Oldenbourg Verlag GmbH, München, 1984.
- [3] Kurz, H.; Weschta, A. (Hrsgb.): ICE T, BR 411, 415 und 605. Hestra-Verlag Darmstadt, 2000
- [4] –: Fünf Jahre ÖPNV-Niederflur-Schienenfahrzeuge. Stadtverkehr – spezial 1993. EK-Verlag Freiburg, 1993
- [5] Gladigau, A.: Historische Entwicklung und Stand der Bahnstromsysteme. Elektrische Bahnen 85 (1987), H.12, S. 383–390
- [6] Katzer, G.: Die elektrische Ausrüstung der Lokomotive Baureihe 111 der DB. ZEV-Glasers Annalen 99 (1975), H. 12, S. 351–353
- [7] Peters, A.: Neue elektrische Gleichstromlokomotive der SNCF. Elektrische Bahnen 29 (1958), H. 5, S. 125
- [8] Kühner, F. and Mojzis, K.: Die österreichische Thyristorlokomotive ÖBB Reihe 1044. Eisenbahntechnik 10 (1975), S. 71-83
- [9] Ferrazzini, P.: Die elektrischen, mit Gleichstromsteller ausgerüsteten Vollbahnlokomotiven der Reihen E 632/E 633 der Italienischen Staatsbahnen, Teil 2: Elektrischer Teil. ZEV-Glasers Annalen 107(1983), S. 288–296
- [10] Schönfisch, J.: Hochgeschwindigkeitszüge in Frankreich. Elektrische Bahnen 100 (2002), Nr. 1/2, S. 86–74
- [11] Fösel, U.; Hammer, W.; Thoma, Ch.; Höscheler, B.: Auslegung der elektrischen Vectron-Lokomotiven. Elektrische Bahnen 110 (2012), H.1 / 2, S. 12-20
- [12] Buscher, M.; Köck, F.; Trotsch, P.; Bikle, U.: TRAXX: Integrale Plattform zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit des Schienenverkehrs. ETR–Eisenbahntechnische Rundschau 9/2006
- [13] –: Neue 6-MW-Prima-Lokomotive von Alstom. Eisenbahn-Revue 2004, H. 10, S. 449–451
- [14] –: Der ICx kommt - Neuer Fernverkehrszug der Deutschen Bahn. Eisenbahn-Magazin 2011, H. 7, S. 31–38
- [15] Schätzer, Ch.; Hetzelt, P.; Still, L.: Last Mile – die neue Funktion der TRAXX AC3-Lokomotiven. Elektrische Bahnen 110 (2012), H. 8/9, S. 432–442
- [16] –: Zweikraftlokomotive für den schweren Güterverkehr. Elektrische Bahnen 115 (2017), H. 5, S. 265
- [17] Kehrmann, H.; Lienau, W.; Nill, R.: Vierquadrantensteller – eine netzfreundliche Einspeisung für Triebfahrzeuge mit Drehstromantrieb. Elektrische Bahnen 45 (1974), S.135–142
- [18] Gerster, C.; Skarpetowski, G.; Sommer, H.; Still, L.: Advanced multisystem traction chain for locomotives and power heads.10. EPE-PEMC Riga 2004
- [19] Kießling, B.; Thoma, C.: Europalokomotive 189 – Die Mehrsystemlokomotive für den europaweiten Einsatz. ZEVrail "Glasers Annalen" Nr. 126-9/2002,
- [20] Behmann, U.: Hochgeschwindigkeits-Triebzug AGV Italo. Elektrische Bahnen 110 (2012), H. 1/2, S.22–27
- [21] Jöckel, A.; Löwenstein, L.; Teichmann, M.; Hoffmann, Th.; v. Wangelin, F.: *Syntegra* – Innovativer Prototyp einer nächsten Triebfahrwerk-Generation. Elektrische Bahnen 104 (2006), Nr. 8/9, S. 360–369
- [22] Engel, B.; Victor, M.; Bachmann, G.; Falk, A.: 15 kV/16.7 Hz Energy Supply System with Medium Frequency Transformer and 6.5 kV IGBTs in Resonant Operation. 10th EPE Toulouse 2003
- [24] Claessens, M., Duijjo, D., Canales, F., Steinke, J. K., Stefanutti, P.; Vetterli, C.: Kleiner, leichter, effizienter – Ein leistungselektronischer Traktionstransformator (PETT). ABB-Technik 2012, H. 1, S. 11–17
- [23] Steiner, M., Scholten, J.: Energy storage onboard of railway vehicles, 11. EPE Dresden 2005
- [25] VDE-Studie „Bewertung klimaneutraler Alternativen zu Dieseltriebzügen“ Juni 2020