

Fakultät Verkehrswissenschaften „FRIEDRICH LIST“
Professur für Technik spurgeführter Fahrzeuge /
Professur für Elektrische Bahnen

Triebfahrzeugtechnik

Antriebskonfigurationen

Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan / Manuskript: Dr.-Ing. Martin Kache // Sommersemester 2023



Inhalte

Vorlesung Triebfahrzeugtechnik (Antriebskonfigurationen)

7. Leistungsauslegung von Triebfahrzeugen
8. Dieselmotor und andere Verbrennungskraftmaschinen
9. Leistungsübertragungsanlagen

9.4 Elektrische Leistungsübertragung

10. Hilfs- und Nebenbetriebe
11. Leittechnik (Überblick)
12. Fallstudien unkonventionelle Triebfahrzeuge

9. Leistungsübertragungsanlagen

9.4.0 Aufbau elektrische Leistungsübertragungen

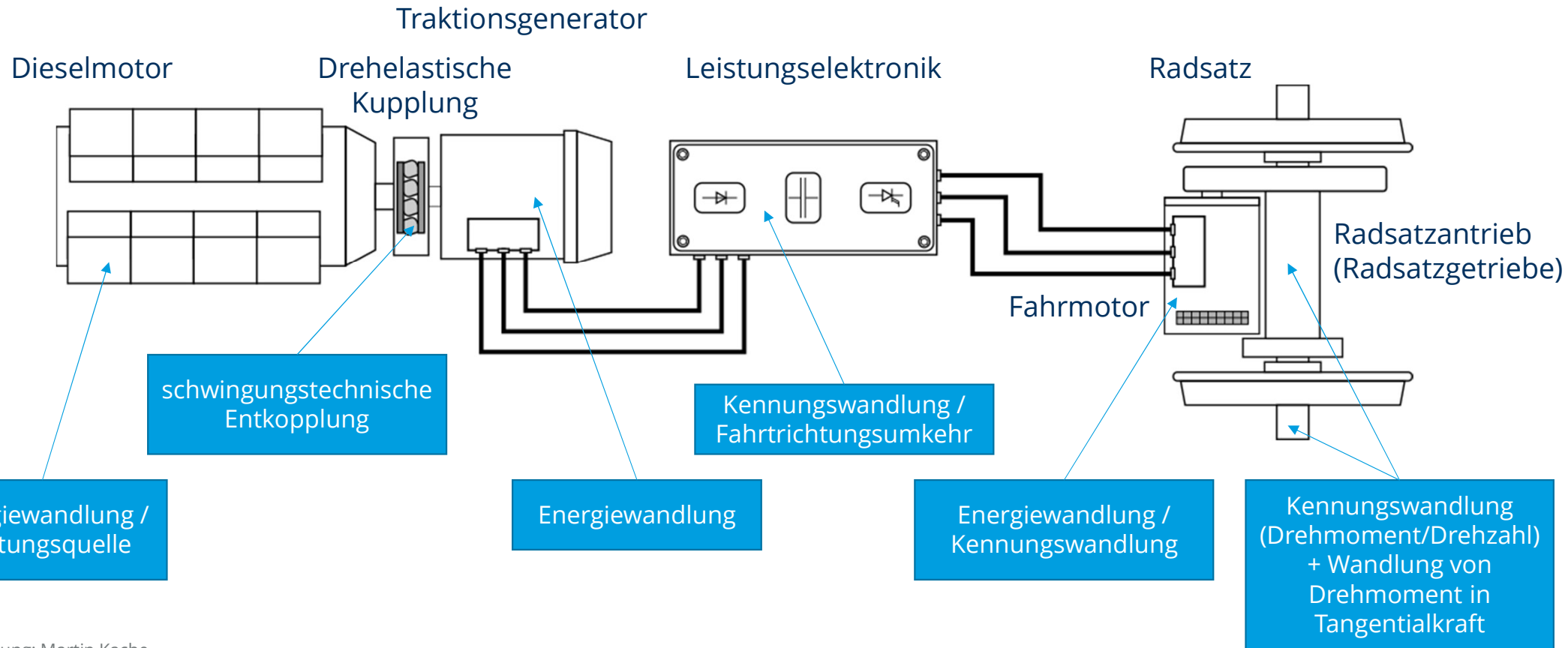
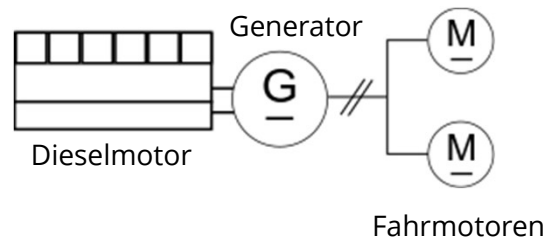


Abbildung: Martin Kache

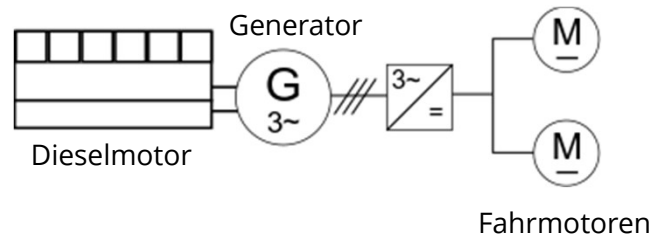
9. Leistungsübertragungsanlagen

9.4.0 Aufbau elektrische Leistungsübertragungen - Topologien

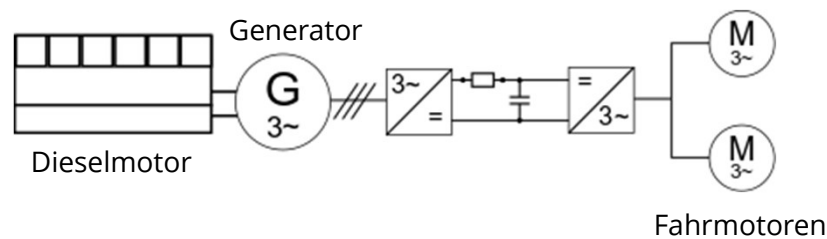
Fotos: Martin Kache



DC-DC



AC-DC

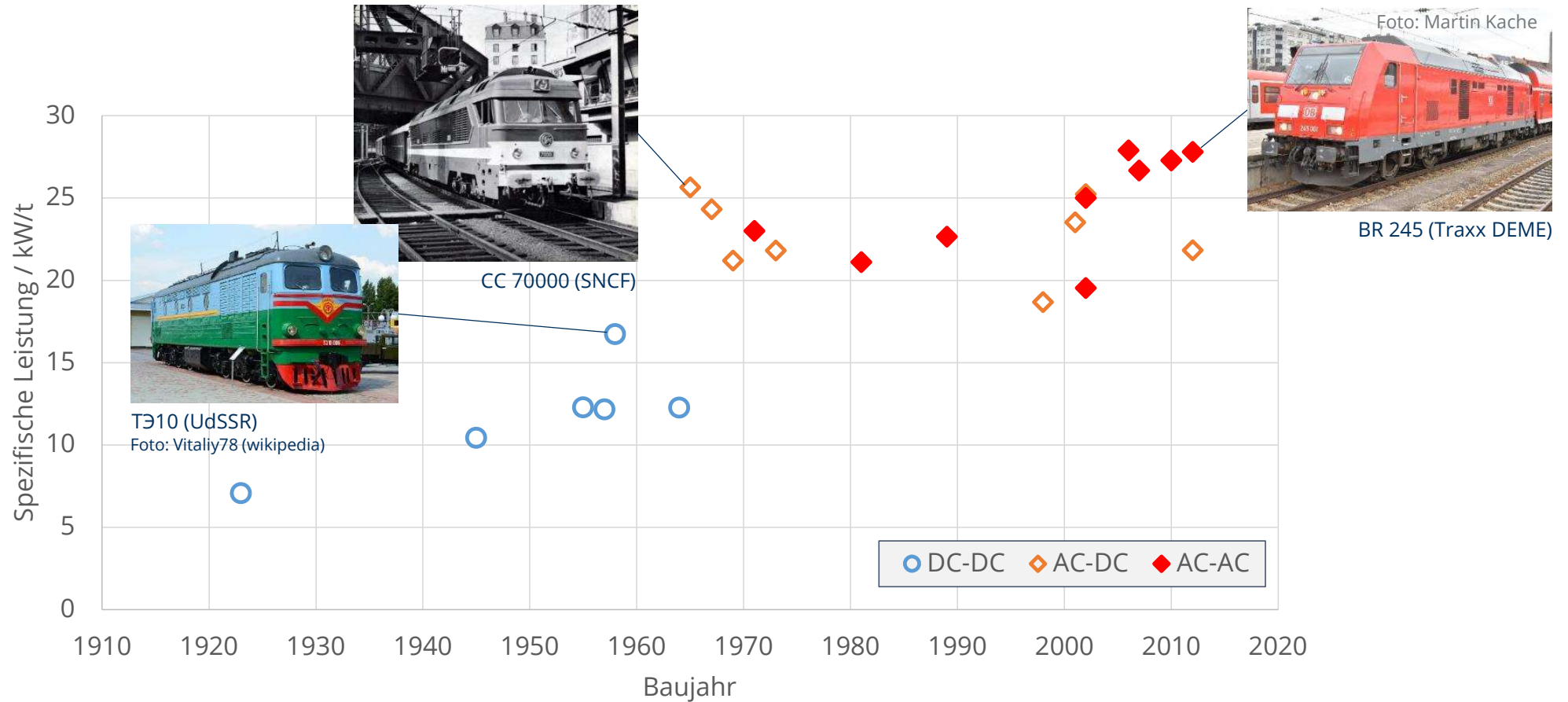


AC-AC



9. Leistungsübertragungsanlagen

9.4.1 Leistungsdichte DE-Lokomotiven



9. Leistungsübertragungsanlagen

9.4.1 Leistungsdichte DE- vs. DH-Lokomotiven



Vossloh G2000 BB
2700 kW/90t



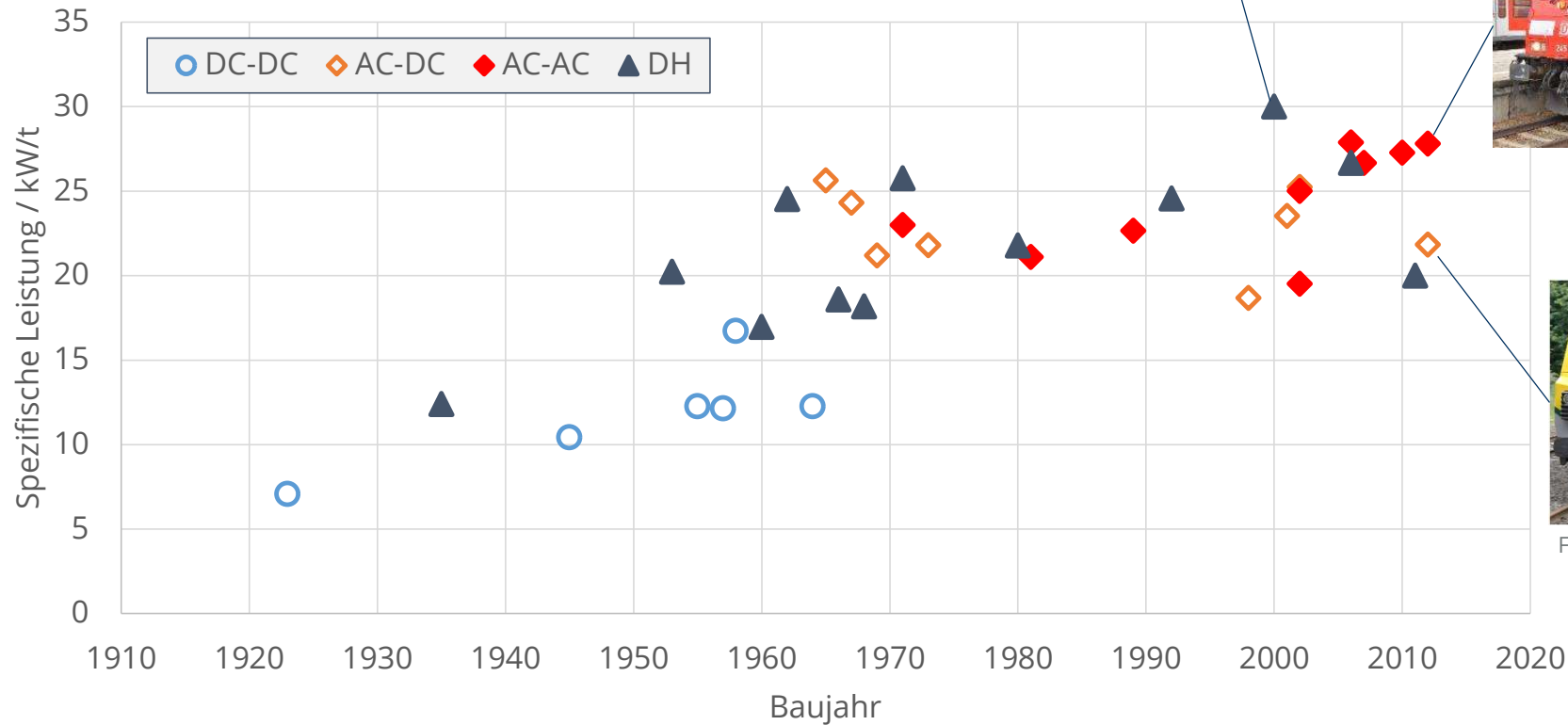
Foto: Martin Kache

BR 245 (Traxx DEMA)
2252 kW/81t



class 70
2750 kW/129t

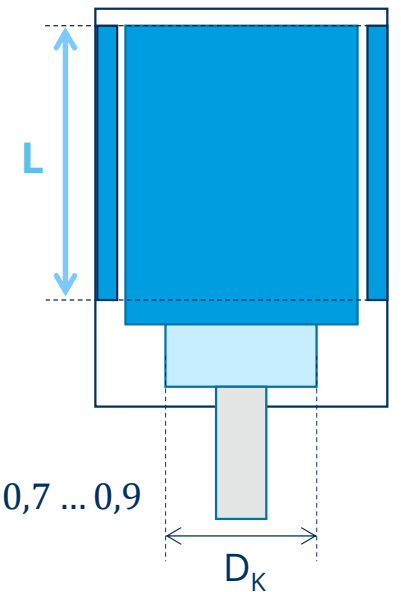
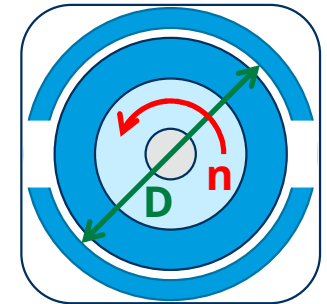
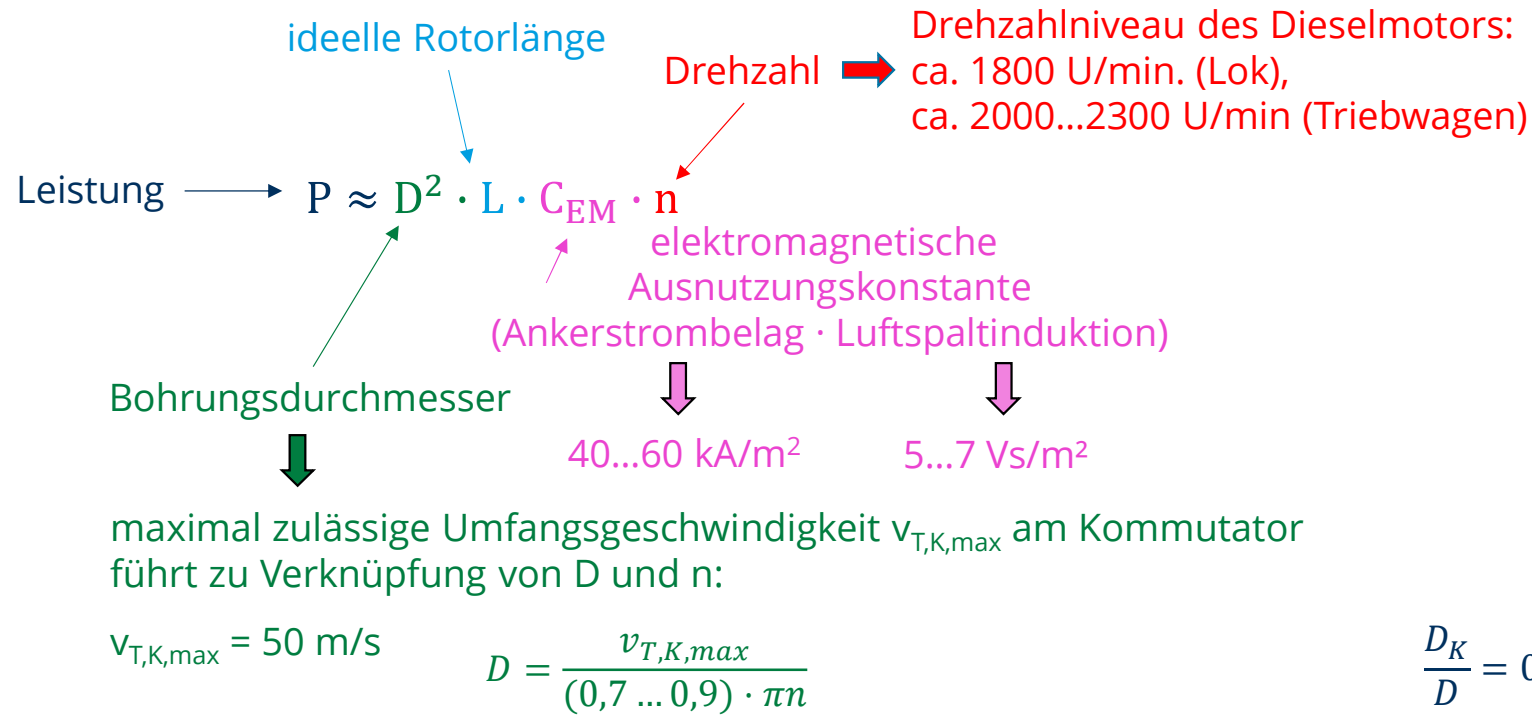
Foto: Martin Kache



9. Leistungsübertragungsanlagen

9.4.2 Auslegungsgrundlagen elektrische Maschinen

Entwurfsgleichung für elektrische Maschinen:



9. Leistungsübertragungsanlagen

9.4.2 Auslegungsgrundlagen elektrische Maschinen

Beispielrechnung für Gleichstromgenerator:

$$P \approx D^2 \cdot L \cdot C_{EM} \cdot n$$

Dieselmotor:

Nennleistung: 1500 kW,
Nenndrehzahl: 1800 U/min

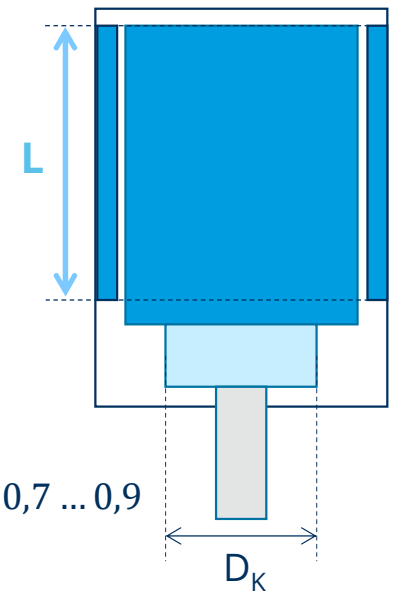
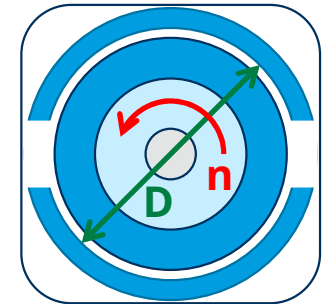


Generator:

Eingangsleistung: 1300 kW
Eingangsdrehzahl: 1800 U/min

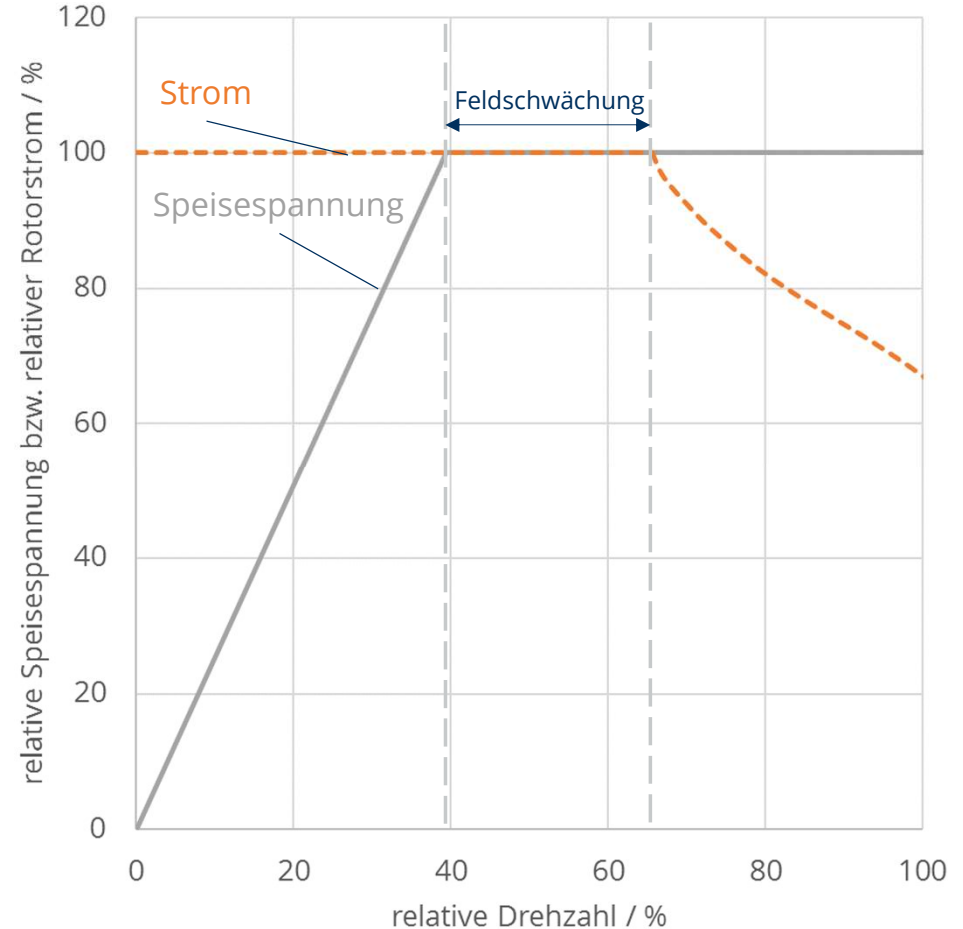
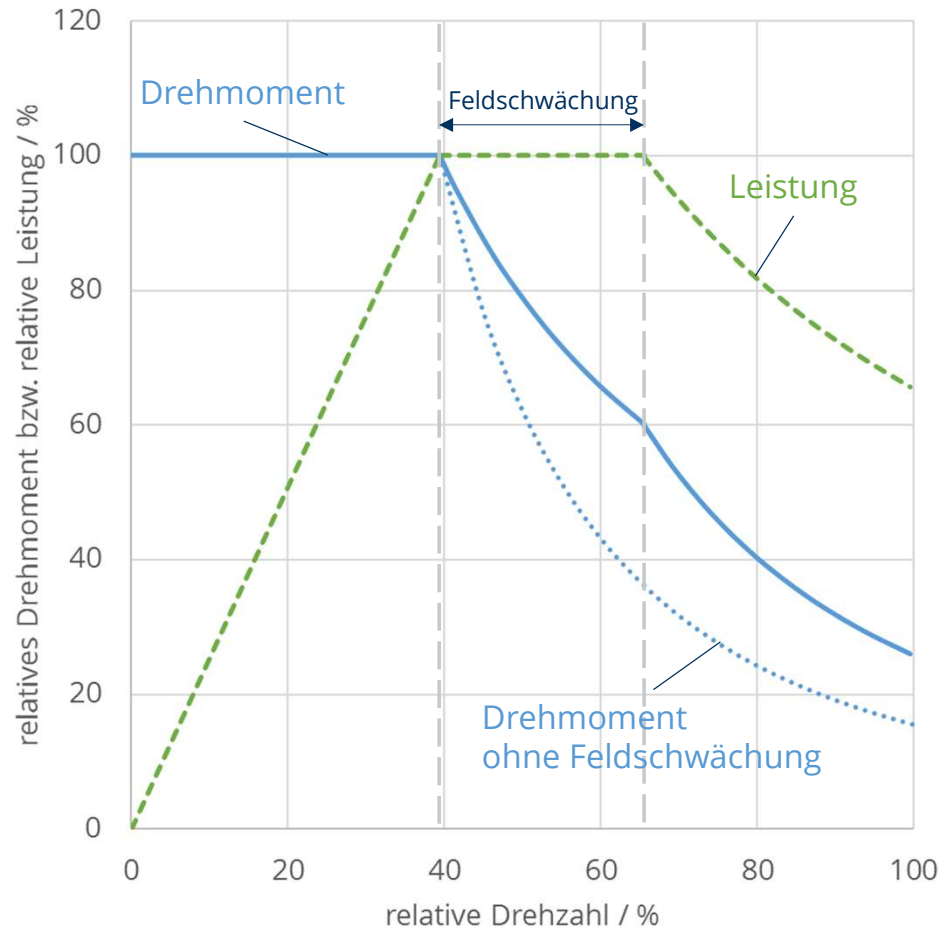
$$D = \frac{50 \frac{m}{s}}{(0,7 \dots 0,9) \cdot \pi \cdot 30 \frac{1}{s}} = 0,59 \dots 0,76 \text{ m}$$

$$L = \frac{P}{D^2 C_{EM} n} = \frac{1300 \text{ kW}}{(0,59 \dots 0,76)^2 \text{ m}^2 \cdot 50 \frac{kA}{m} \cdot 6 \frac{Vs}{m^2} \cdot 30 \frac{1}{s}} = 0,415 \dots 0,250 \text{ m}$$



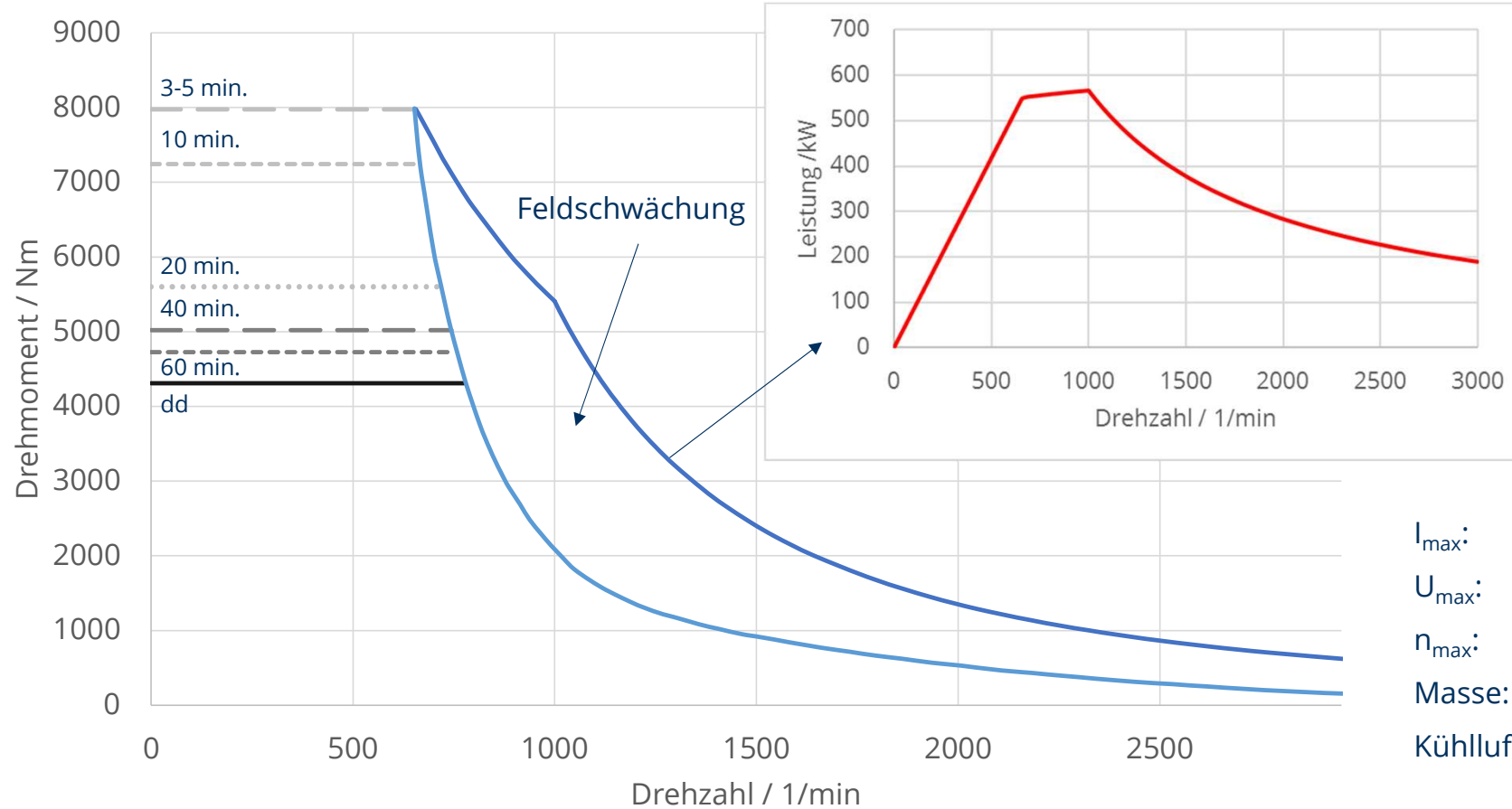
9. Leistungsübertragungsanlagen

9.4.3 Charakterisierung Gleichstromreihenschlussmotor



9. Leistungsübertragungsanlagen

9.4.3 Charakterisierung Gleichstromreihenschlussmotor

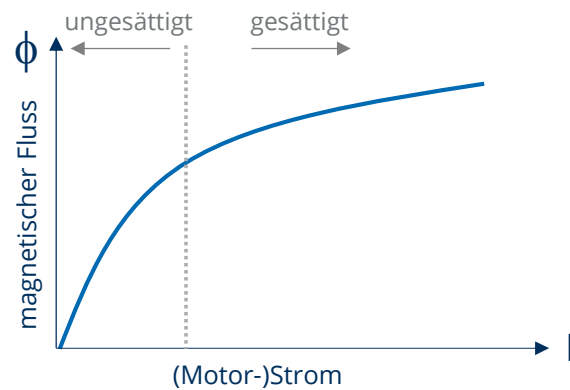


I_{\max} : 540 A
 U_{\max} : 1150 V
 n_{\max} : 2950 U/min
Masse: 2060 kg
Kühlluft: 1,25 m³/s

9. Leistungsübertragungsanlagen

9.4.3 Charakterisierung Gleichstromreihenschlussmotor

- vergleichsweise (andere Kollektormotoren) kompakt und robust
- vergleichsweise einfache Drehzahlstellung (Variation der Klemmspannung)
- Reihenschluss-Charakteristik günstig für Traktionszwecke
 - hohes Anfahrtdrehmoment,
 - begrenzter Drehmomentabfall beim Schleudern,
- Unabhängigkeit des Drehmomentes von Spannung und Drehzahl



Grundgleichungen:

$$M = k_2 \phi(I) \cdot I \quad n = \frac{U_{Kl}}{k_1 \phi(I)}$$

k_1, k_2 Maschinenkonstanten
 Φ magnetischer Fluss
 I (Motor-)Strom
 U_{Kl} Speisespannung

$$k_1 = \frac{z_A p}{a} \quad k_2 = \frac{k_1}{2\pi}$$

Fotos: Martin Kache



z_A
 p
 a

Gesamtzahl der Rotorleiter
 Polpaarzahl
 Anzahl parallel geschalteter Zweige
 der Rotorwicklung

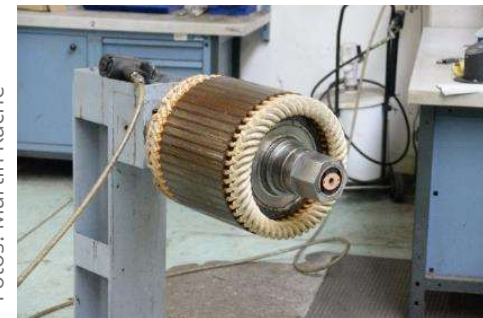
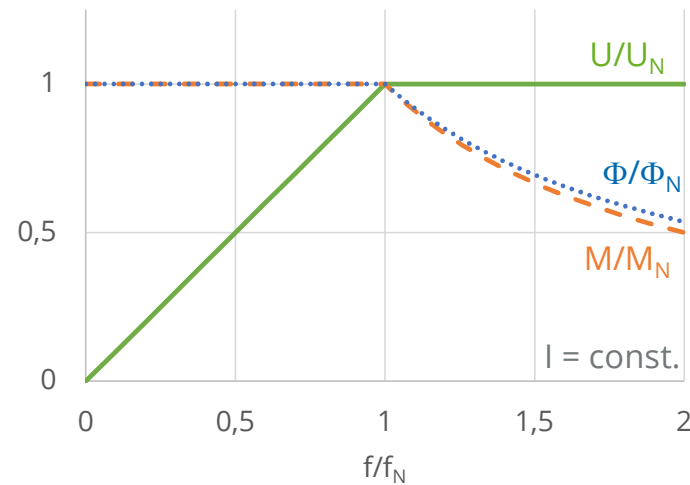
9. Leistungsübertragungsanlagen

9.4.2 Charakterisierung Drehstromasynchronmotor

- einfacher Aufbau und große Robustheit
- wartungsarm
- kleine Abmessungen und Massen
- keine Kommutierung nötig (Käfigläufer) – größere effektivere Eisenlänge
- höhere zulässige Drehzahlen

Betriebskennlinien für $I = \text{const.}$:

Bedingung:
stufenlose Einstellbarkeit von
Speisespannung und -frequenz



Fotos: Martin Kache

9. Le
9.4
We



Bauraum

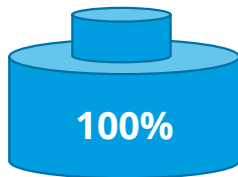
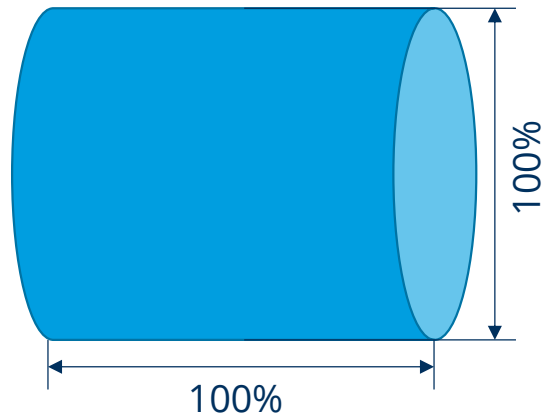
Masse

Foto: Martin Kache

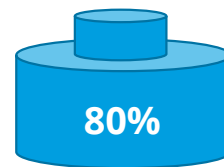
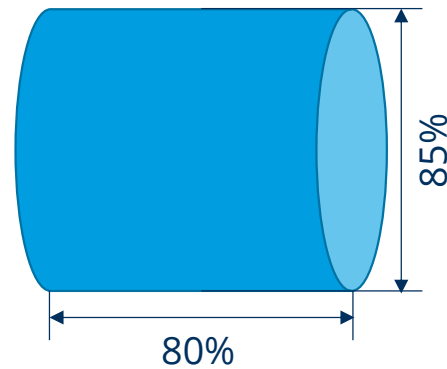
9. Leistungsübertragungsanlagen

9.4.4 Größenvergleich Elektrische Maschinen

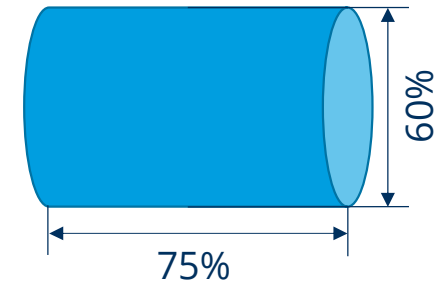
Wechselstrom-Reihenschluss-Maschine für 16 2/3 Hz



Gleichstrom-Reihenschluss-Maschine



Drehstrom-Asynchron-Maschine



Bauraum

Masse

9. Leistungsübertragungsanlagen

9.4.5 Beispiele Fahrmotoren

BR 143



Fahrmotortyp: ECFB 1110-127
Dauerleistung: 930 kW
Nennspannung: 560 V
Nennstrom: 2000 A
Nenndrehzahl: 1270 U/min
Leistungsfaktor: 0,98
Masse: 3660 kg
spez. Leistung: 0,254 kW/kg

Einphasen-Reihenschluss-
Wechselstrom-Maschine

BR 101



Fahrmotortyp: 4FIA 7067
Dauerleistung: 1632 kW
Nennspannung: 2186 V
Nennstrom: 528 A
Max. Drehzahl: 3810 U/min
Leistungsfaktor: 0,91
Masse: 2220 kg
spez. Leistung: 0,735 kW/kg

Drehstromasynchronmaschinen

BR 185



Fahrmotortyp: BAZU 8871/4i
Dauerleistung: 1080 kW
Nennspannung: 1870 V
Nennstrom: 383 A
Nenndrehzahl: 1333 U/min
Leistungsfaktor: 0,91
Masse: 2010 kg
spez. Leistung: 0,537 kW/kg

Fotos: Martin Kache

9. Leistungsübertragungsanlagen

9.4.6 Generatortypen

	<u>Gleichstromgenerator</u>	<u>Drehstromsynchron-Generator</u>	<u>Drehstromasynchron-Generator</u>
<i>Bauarten:</i>	fremderregt	mit Schleifringläufer mit induktiver Erregermaschine und rotierenden Dioden mit Permanenterregung (Rotor)	mit Schleifringläufer mit Käfigläufer
<i>Eigenschaften:</i>	<ul style="list-style-type: none"> • langsam laufend (bis ca. 1500 U/min) • Leistungsgrenze ca. 1850 kW • spez. Bauvolumen ca. 0,8...1,3 dm³/kW • spez. Masse ca. 3,3...3,5 kg/kW 	<ul style="list-style-type: none"> • schnell laufend (bis ca. 2200 U/min) • Leistungsgrenze ≈ 3600 kW/(750 kW)* • spez. Bauvolumen ca. 0,5...0,9 dm³/kW • spez. Masse ca. 1,5...2,2 kg/kW 	<ul style="list-style-type: none"> • schnell laufend (bis ca. 2200 U/min) • geringerer Bauraum und geringere Masse als Synchrongeneratoren • benötigt Blindleistung

*permanenterregt

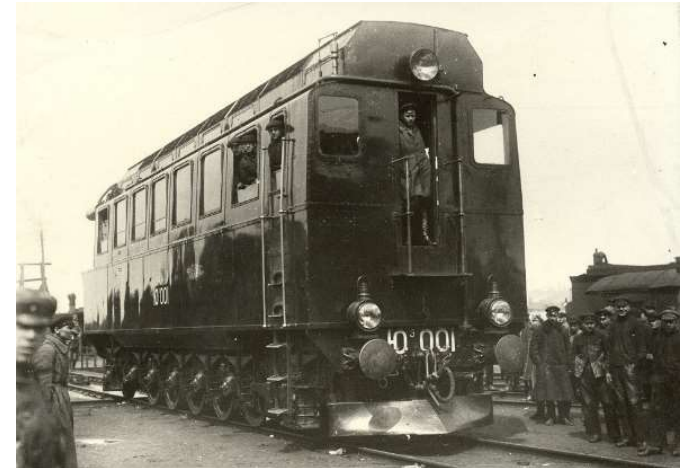
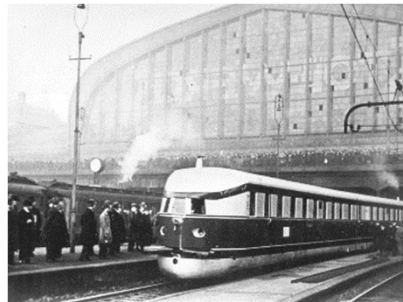
9. Leistungsübertragungsanlagen

9.4.7 Fahrzeuge mit elektrischer Leistungsübertragung (historisch)



1914: DET 1 (Königl. Sächs. Staatseisenbahn)
Gleichstrom-Gleichstrom – Übertragung,
 $P_{DM} = 147 \text{ kW}$

1932: VT 877 (DR)
Gleichstrom-Gleichstrom
– Übertragung,
 $P_{DM} = 2 \times 302 \text{ kW}$



1923/24: Ee12 (Maschinenfabrik Esslingen)
Gleichstrom-Gleichstrom – Übertragung,
 $P_{DM} = 883 \text{ kW}$, $P_T = 800 \text{ kW}$

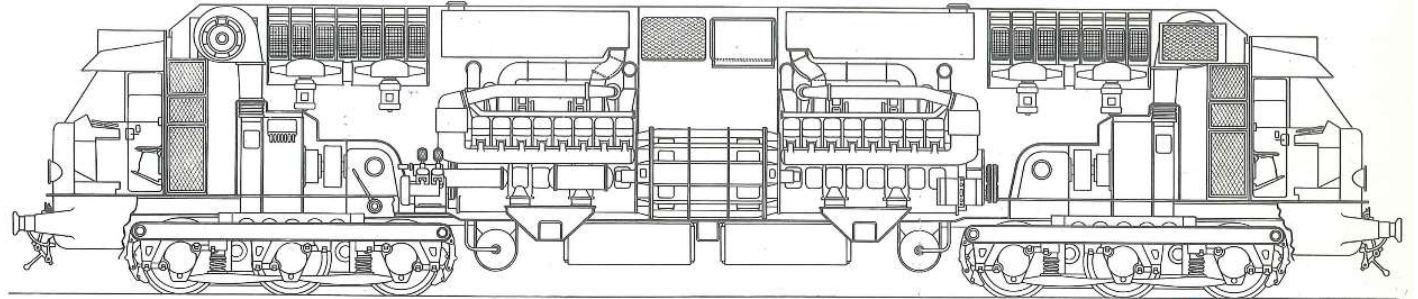
1934: Burlington Zephyr
Gleichstrom-Gleichstrom
– Übertragung,
 $P_{DM} = 448 \text{ kW}$



9. Leistungsübertragungsanlagen

9.4.7 Fahrzeuge mit elektrischer Leistungsübertragung

1965: CC 70 000 der SNCF



- 2 Dieselmotoren Pielstick 2 16 PA4-185 mit jeweils 1766kW @ 1500 U/min
- DS-Synchron-Generator in „Bi-Rotor“-Ausführung: Ständer mit DM1 und Rotor mit DM2 verbunden
- kombinierte Generatordrehzahl: $2 \times 1500 = 3000$ U/min
- 2 Prototypen – aber Entscheidung für einmotorige CC 72 000



9. Leistungsübertragungsanlagen

9.4.7 Fahrzeuge mit elektrischer Leistungsübertragung



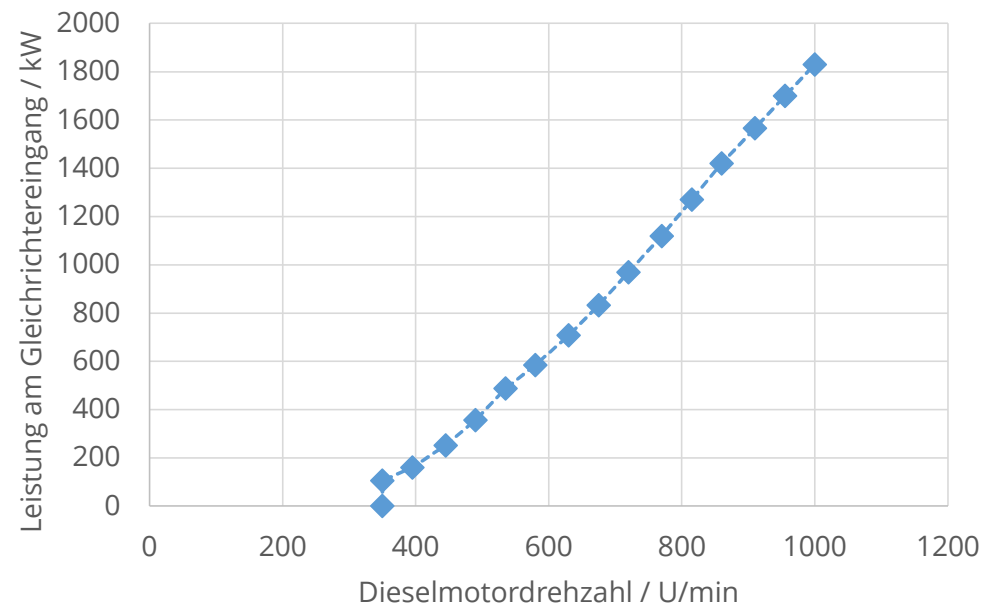
BR 232 der DB AG

Foto: Martin Kache

Dieselmotor 5 D 49: 2232 kW @ 1000 U/min

Generator

- Bauart: 12-poliger, sechsphasiger Drehstrom-Synchrongenerator



9. Leistungsübertragungsanlagen

9.4.7 Fahrzeuge mit elektrischer Leistungsübertragung



Henschel/BBC DE 2500 (Werksfoto Henschel)

Dieselmotor MTU MA 12 V 956 TB: 1840 kW @ 1500 U/min

202 002: Drehstromsynchrongenerator mit Schleifringen

202 003: Drehstromsynchrongenerator mit Drehstromerregung und rotierendem Gleichrichter

Nennleistung: 1800 kW

Drehzahl: 600...1500 U/min

Frequenz: 40...100 Hz

Nennspannung: 1000 V

Leistungsfaktor: 0,95

Polpaarzahl: 4

Masse: 2400 kg

spez. Masse: 1,33 kg/kW

daraus abgeleitet:



Baureihe ME der DSB

Foto: Martin Kache

9. Leistungsübertragungsanlagen

9.4.7 Fahrzeuge mit elektrischer Leistungsübertragung



Bombardier Traxx DE

Foto: Martin Kache

Dieselmotor MTU 16V 4000 R 41L: 2200 kW @ 1860 U/min

Generator

- Bauart: Drehstrom-Synchron mit integrierter Erregung und rotierenden Dioden
- Nennleistung: 2188 kW
- Nenndrehzahl: 1860 U/min
- Nennspannung: 1404 V AC
- Nennstrom: 906 A AC
- Nennfrequenz: 93 Hz
- Wirkungsgrad: max. 0,96
- Polpaarzahl: 3
- Länge: 1400 mm
- Masse: 3250 kg
- spez. Masse: 1,49 kg/kW

9. Leistungsübertragungsanlagen

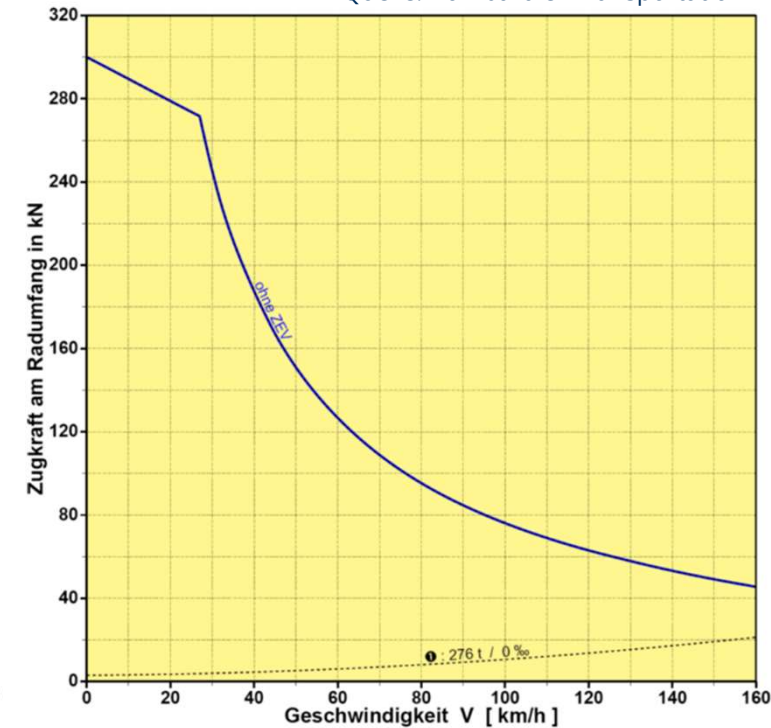
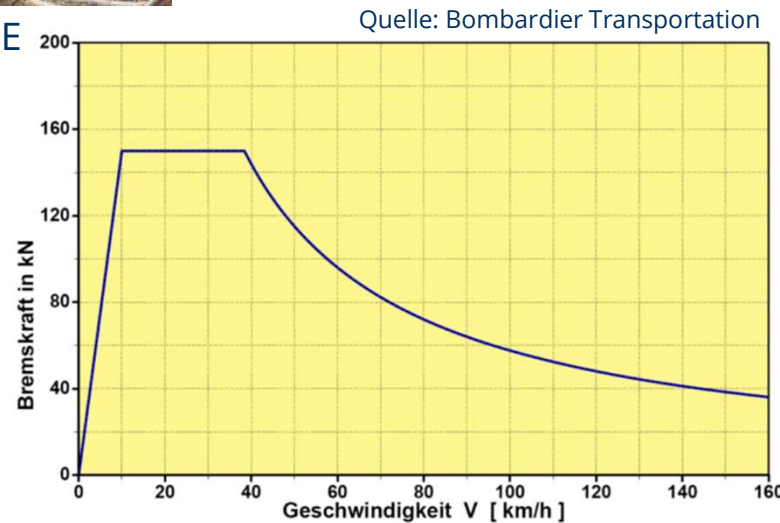
9.4.7 Fahrzeuge mit elektrischer Leistungsübertragung



Bombardier Traxx DEME
BR 245 der DB AG

Dieselmotoren: 4 x CAT C18 ACERT mit je 563 kW @2000 U/min
Generatoren: permanenterregte Synchrongeneratoren mit Wasserkühlung

Quelle: Bombardier Transportation



9. Leistungsübertragungsanlagen

9.4.7 Fahrzeuge mit elektrischer Leistungsübertragung

Foto: Martin Kache



Siemens ER 20 / ÖBB Rh 2016

Dieselmotor MTU 16V 4000 R 41: 2000 kW @ 1800 U/min

Generator

- Bauart: Drehstrom-Synchron (Innenpolmaschine),
bürstenlos mit Drehstromerregwicklung
und rotierendem Gleichrichter
- Nennleistung: 1920 kW
- Drehzahlbereich: 600...1800 U/min
- Spannung: 602...1914 V (Gesamteffektivwert)
- Strom: 906 A AC
- Polpaarzahl: 3
- Frequenz: 30...90 Hz
- Wirkungsgrad: max. 0,96
- Länge: 1250 mm
- Masse: 3175 kg
- spez. Masse: 1,59 kg/kW

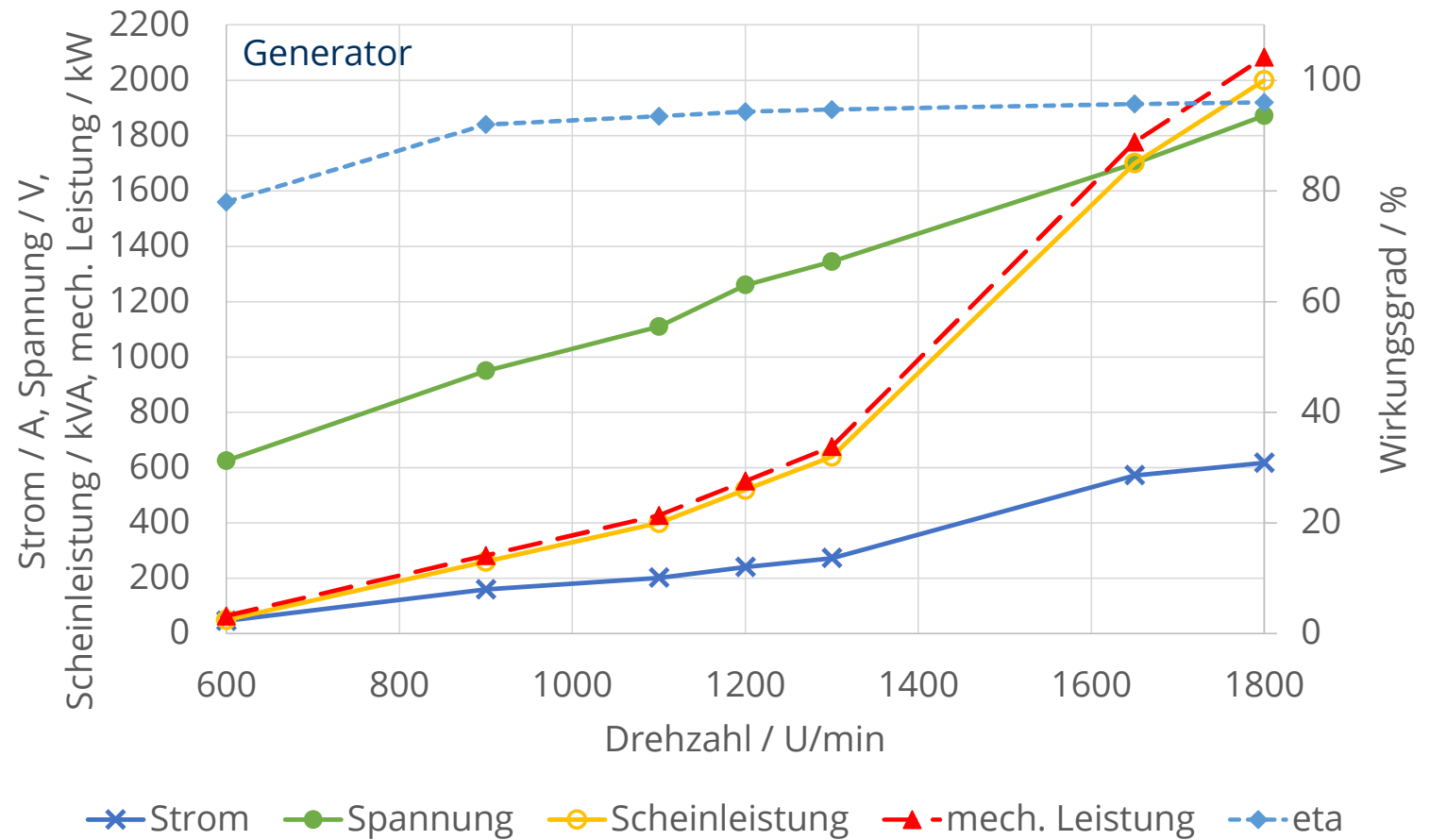
9. Leistungsübertragungsanlagen

9.4.7 Fahrzeuge mit elektrischer Leistungsübertragung



Foto: Martin Kache

Siemens ER 20 / ÖBB Rh 2016

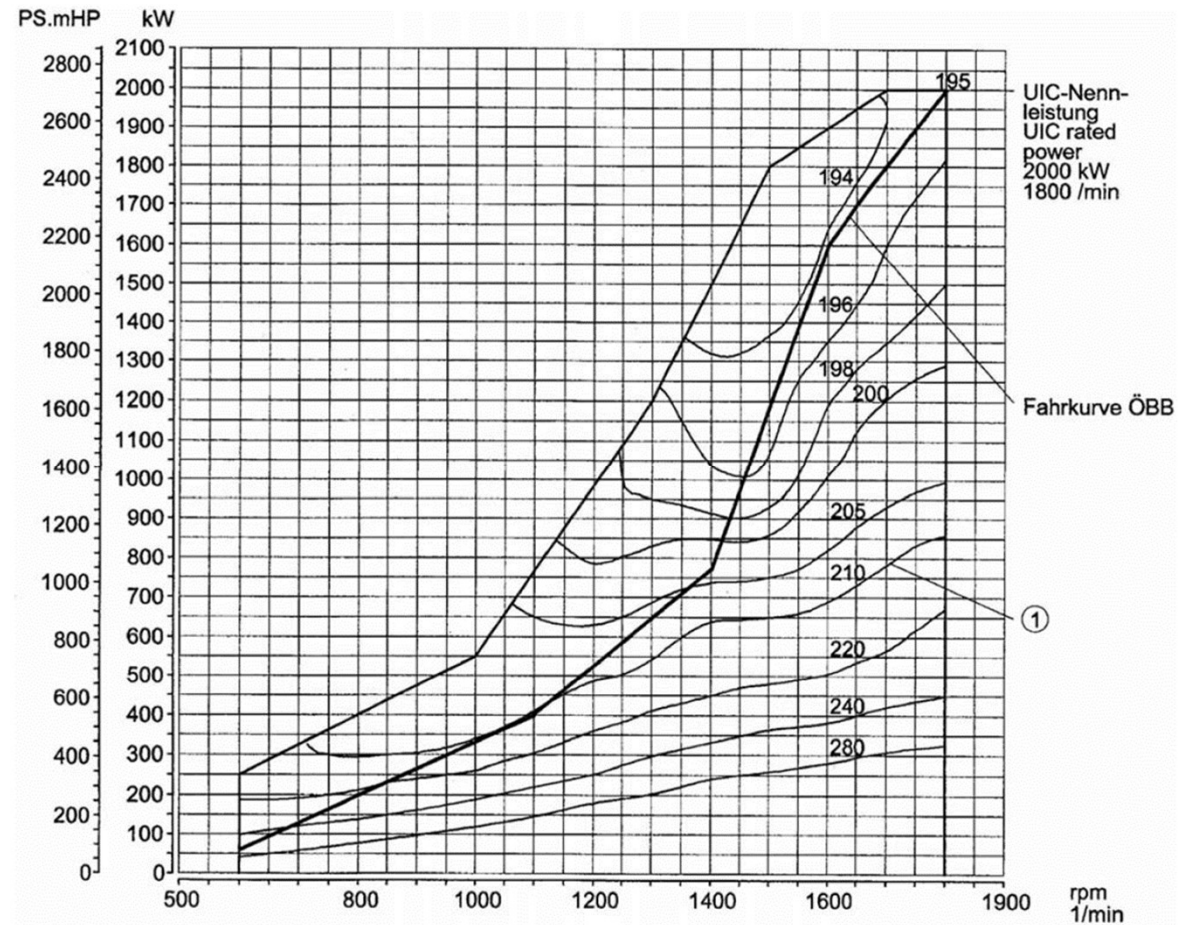


9. Leistungsübertragungsanlagen

9.4.7 Fahrzeuge mit elektrischer Leistungsübertragung



Siemens ER 20 / ÖBB Rh 2016



9. Leistungsübertragungsanlagen

9.4.7 Fahrzeuge mit elektrischer Leistungsübertragung



Bombardier ALP-45 DP



BB 76500 (AGC) der SNCF

Dieselmotoren CAT 3512 C HD: 2 x 1567 kW

Generator

- Bauart: Drehstrom-Asynchrongeneratoren, selbstbelüftet

Dieselmotoren: MAN 2842 LE 606: 2 x 662 kW @ 2100 U/min

Generator

- Bauart: Drehstrom-Asynchrongeneratoren, selbstbelüftet
- Nennleistung: 600 kW @ 2100 U/min

Fotos: Martin Kache

9. Leistungsübertragungsanlagen

9.4.7 Fahrzeuge mit elektrischer Leistungsübertragung



Stadler GTW 2/6 / BR 646

Dieselmotor: MTU 12V 183 TD13
500 kW @ 2100 U/min

Generator: SDVG 67.26-12
Synchron-Generator mit
rotierendem Gleichrichter

Drehzahl: 700...2100 U/min

Leistung: 500 kW

Länge: 1015 mm

Masse: 1350 kg

spez. Masse: 2,7 kg/kW

