

Dipl.-Ing. Tobias Bregulla
Professur für Elektrische Bahnen

Fahrdynamik für Verkehrsingenieure

VL 05: Leistungsauslegung

Sommersemester 2022



Zugkraftherzeugung bei elektrischen Triebfahrzeugen



Fahrdynamische Charakterisierung der Elektrotraktion

„Altbau“-Fahrzeuge

Gleichstrom-
Reihenschluss-Motoren



Mischstrom-Motor



Wechselstrom-
Reihenschluss-Motor



- Produktionsjahre: 1960 - 1994
- ggf. gestufte Zugkraftregelung
- Kurzzeit- vs. Dauerleistung
- nicht rückspeisefähig
- $F_{T,max}$: ca. 50...75 kN / Radsatz
- Leistung: 0,9...1,3 MW/Radsatz
- keine Leistungskonstanz

vs.

„Neubau“-Fahrzeuge

Drehstrom-
Asynchron-Motor



Drehstrom-
Synchron-Motor



- Produktionsjahre: 1980 - heute
- stufenlose Zugkraftregelung
- Kurzzeit- \approx Dauerleistung
- rückspeisefähig
- hohe Kraftschlussausnutzung
- $F_{T,max}$: ca. 70...80 kN / Radsatz
- Leistung: 1,0...1,6 MW/Radsatz
- Leistungskonstanz erreichbar

höherer Wirkungsgrad
höherer Leistungsfaktor

Zugkraftdiagramm „Altbau“-Fahrzeug

Konventionelle Antriebstechnik, Beispiel BR 143

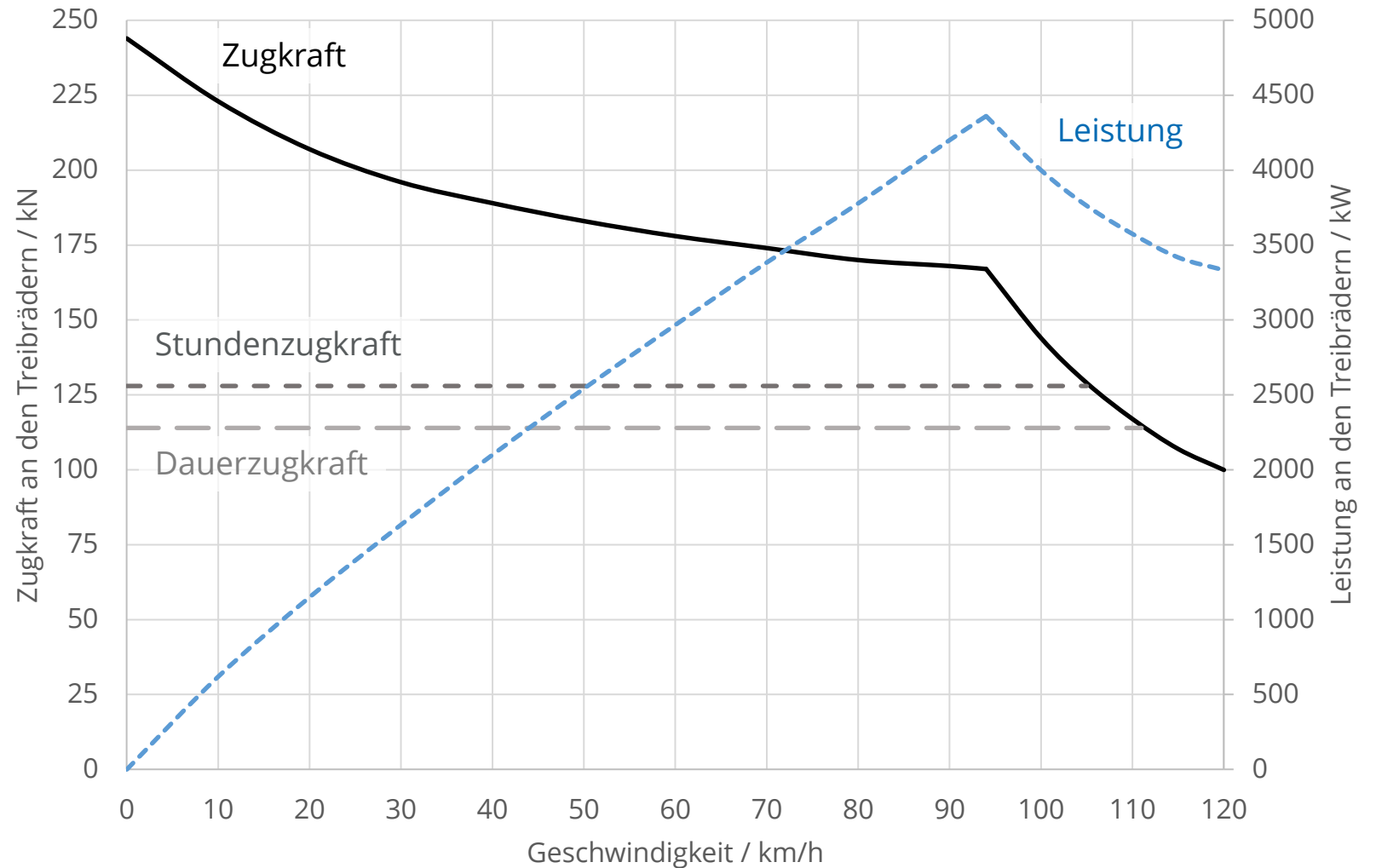


Baujahre: 1982 - 1991

stufenlose Zugkrafteinstellung
durch Thyristor-Anschnitt-
Steuerung

maximale Kraftschlussausnutzung
 $\tau = 0,33$

Nennleistung: 4220 kW
Stundenleistung: 3720 kW
Dauerleistung: 3540 kW



Zugkraftdiagramm „Altbau“-Fahrzeug

Konventionelle Antriebstechnik, Beispiel BR 111

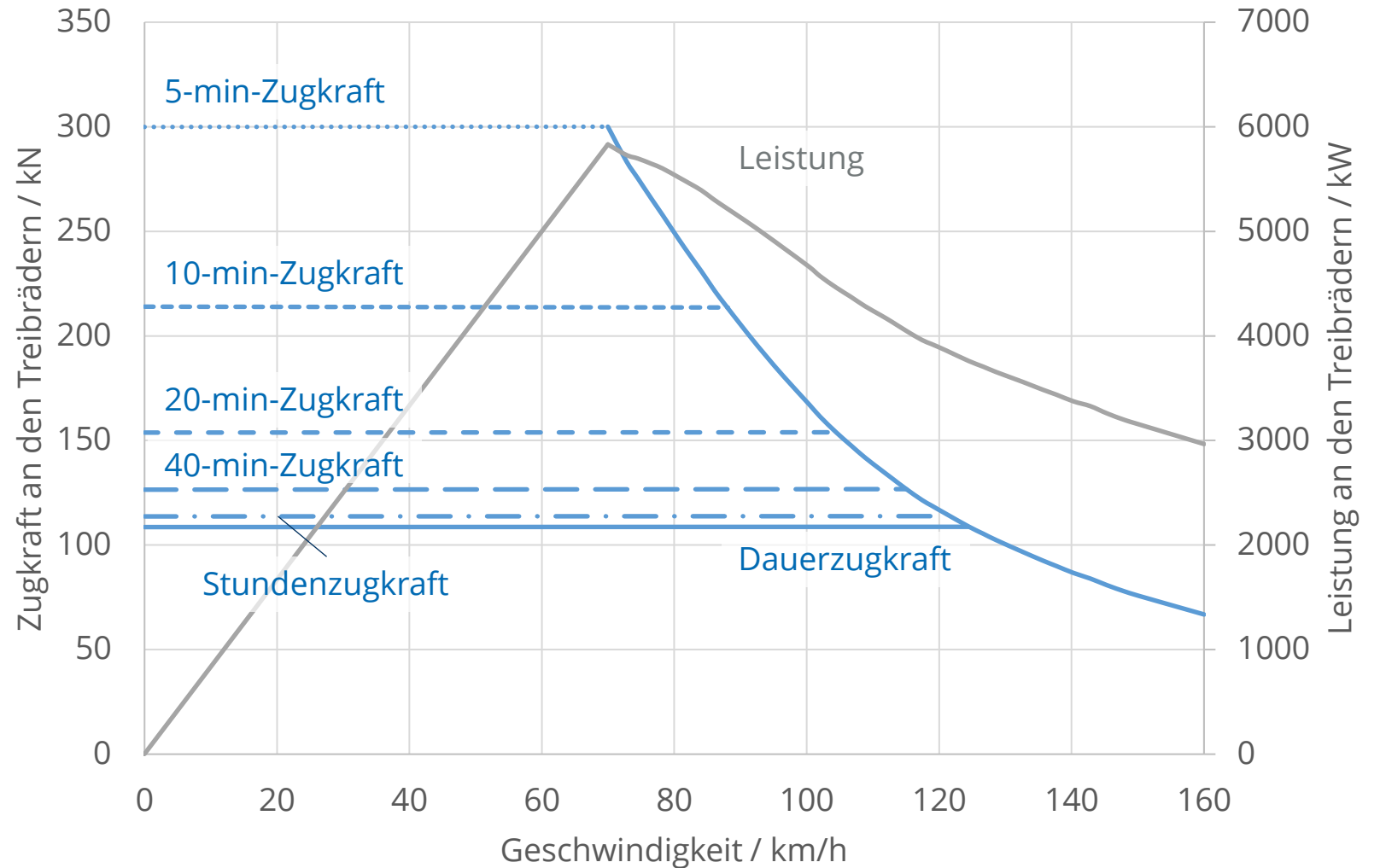


Baujahre: 1974 - 1984

28 Fahrstufen (Schaltwerk)

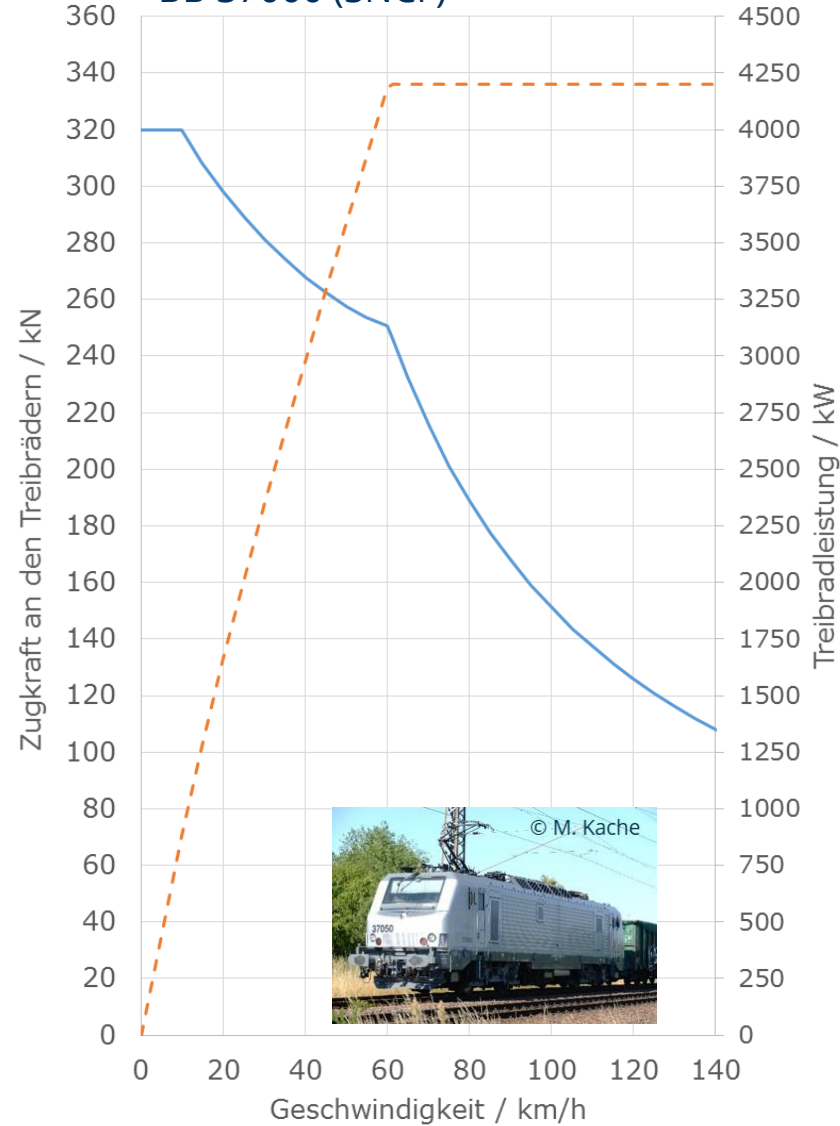
maximale Kraftschlussausnutzung
 $\tau = 0,33$

Stundenleistung: 3700 kW
Dauerleistung: 3620 kW

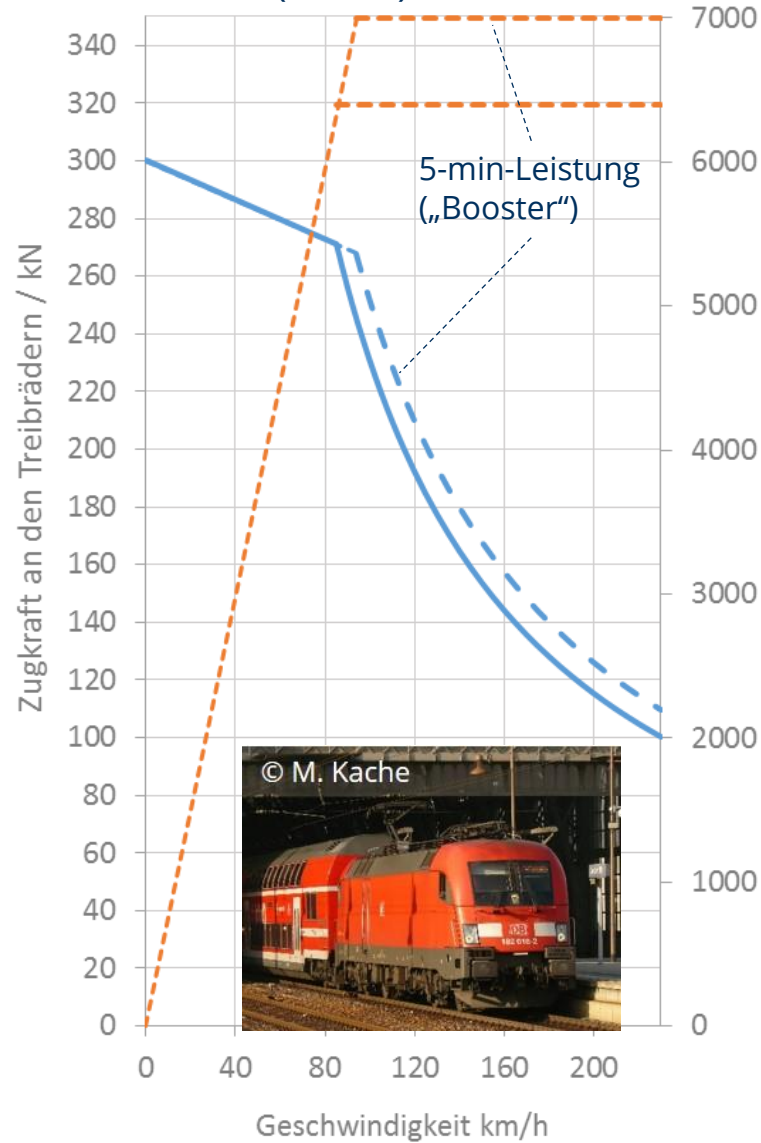


Zugkraftdiagramme Drehstromtriebfahrzeuge

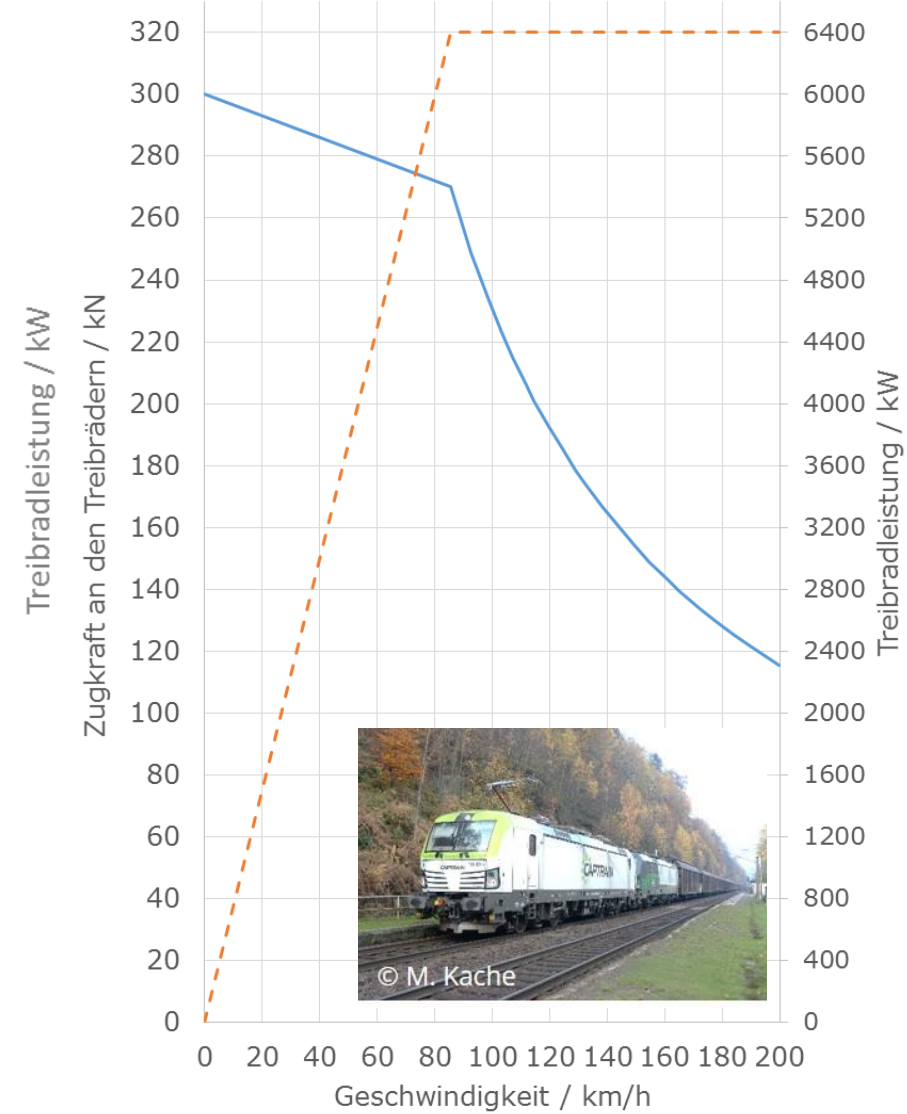
BB 37000 (SNCF)



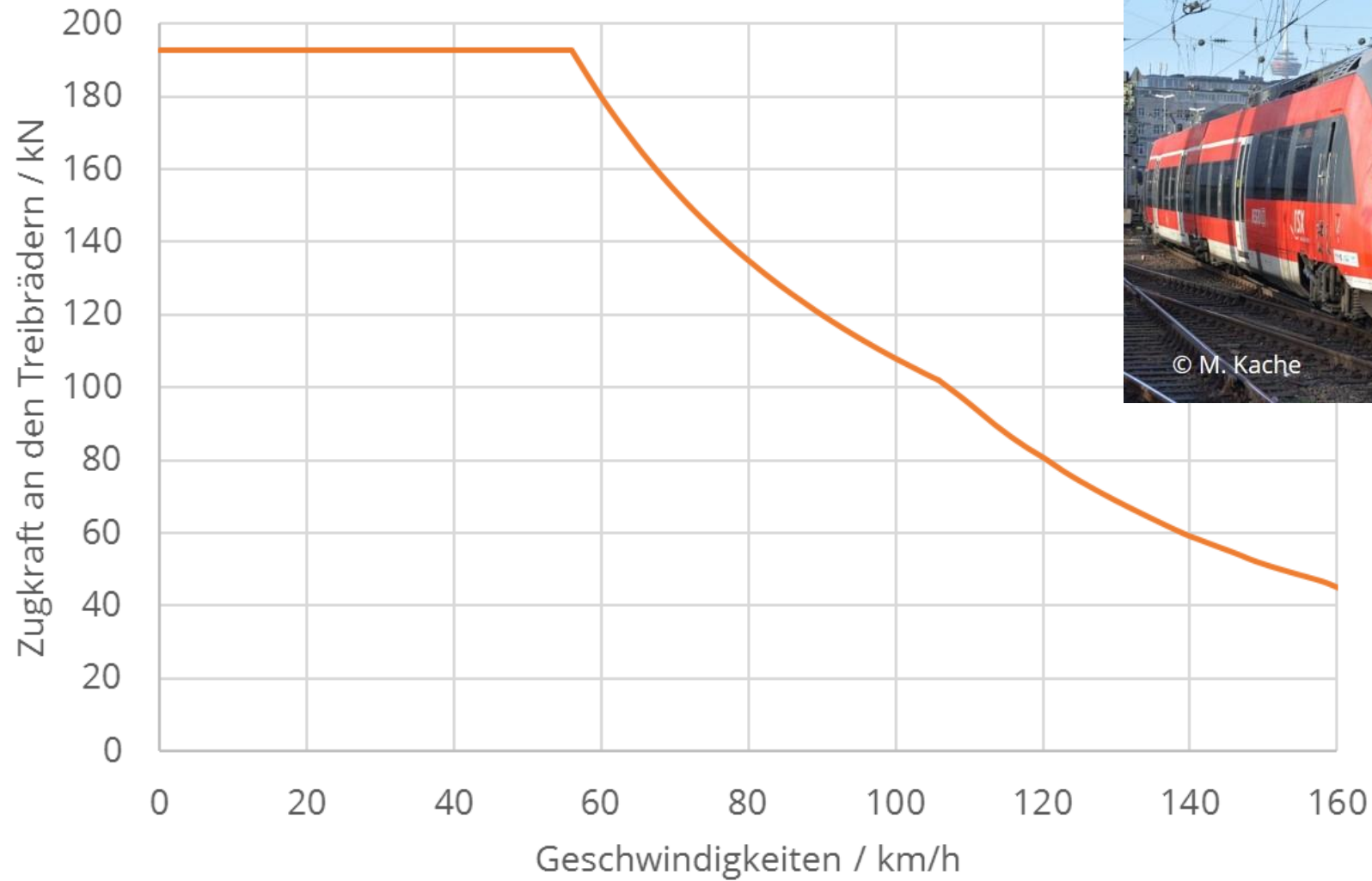
BR 182 (DB AG)



BR 193 (Siemens Vectron)



Zugkraftdiagramme Drehstromtriebfahrzeuge



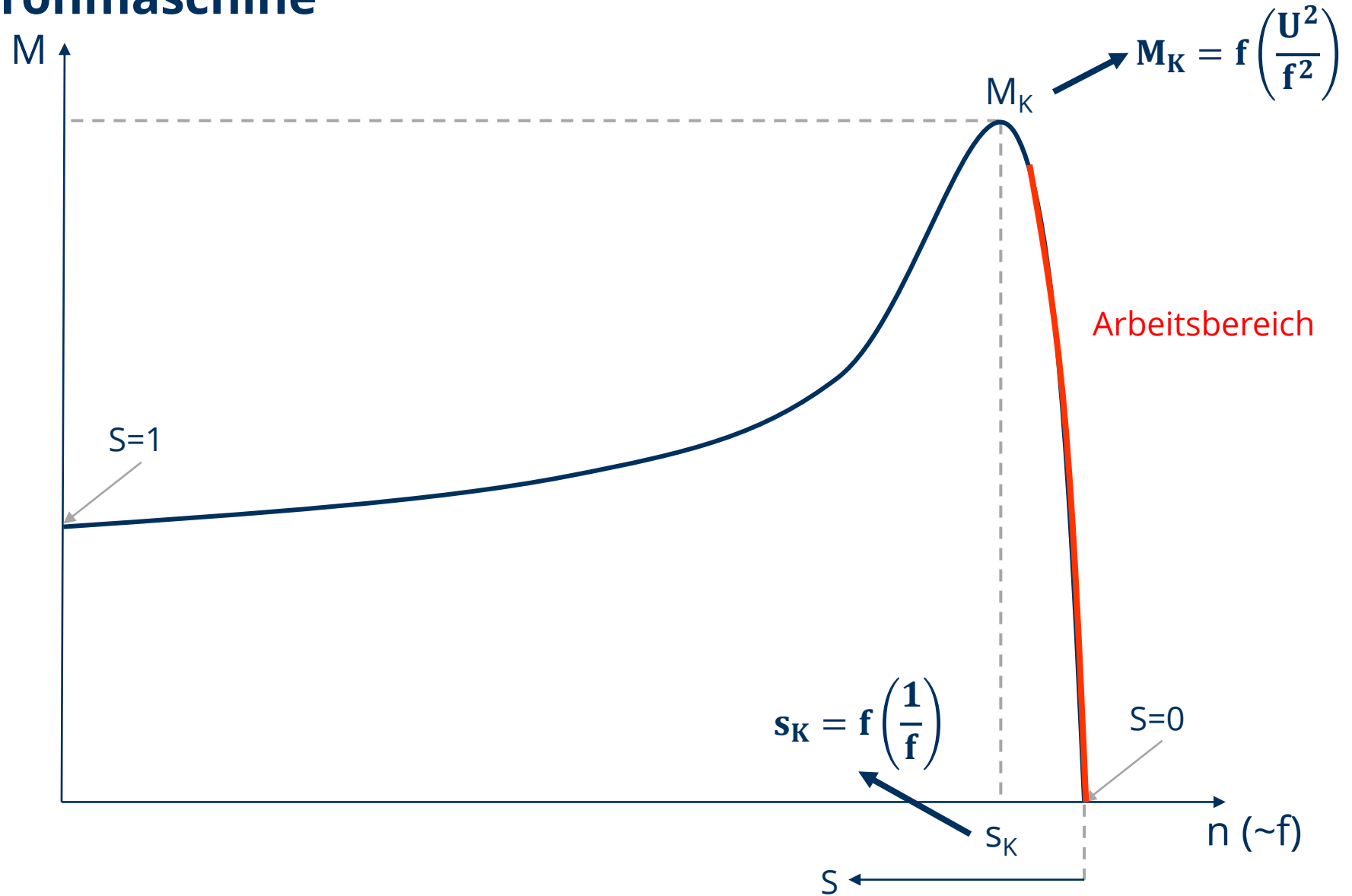
© M. Kache

BR 442.2 (Talent 2, 4teilig.)

Woher kommt die zweite Unstetigkeit im Zugkraft-Verlauf?

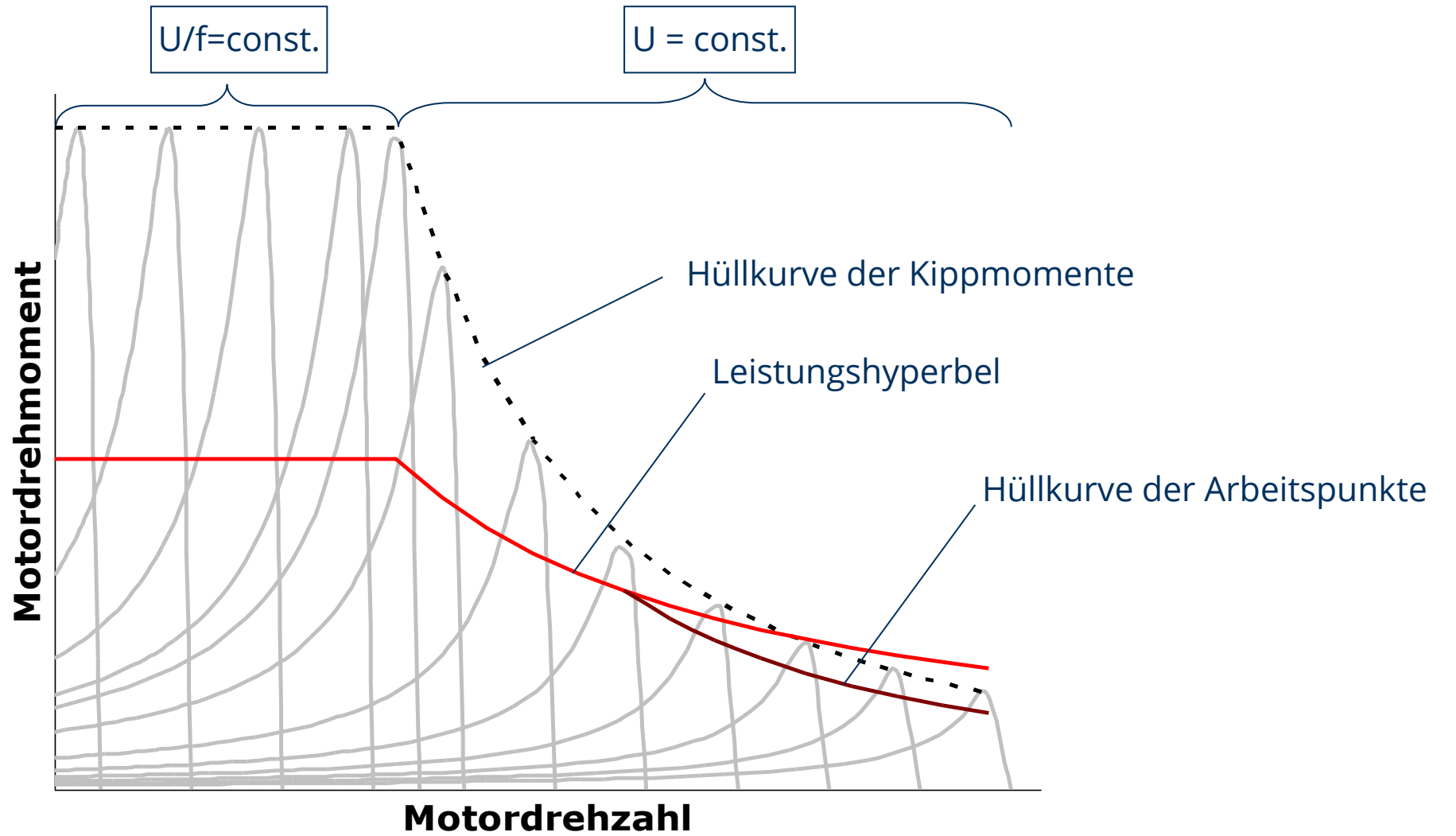
Drehstromasynchronmaschine

Betriebsverhalten



Drehstromasynchronmaschine

Betriebsverhalten



Zugkraftentwicklung von Mehrsystemtriebfahrzeugen

Dreisystem-Zug TGV POS der SNCF



25 kV, 50 Hz:

9,28 MW

15 kV, 16,7 Hz:

6,68 MW

1,5 kV DC:

3,58 MW

Mehrsystem-Ellok BB 22200 der SNCF



25 kV, 50 Hz:

4,4 MW

1,5 kV DC:

4,4 MW

Mehrsystem-Ellok BR 189



25 kV, 50 Hz:

6,4 MW

15 kV, 16,7 Hz:

6,4 MW

3 kV DC:

6,0 MW

1,5 kV DC:

4,5 MW

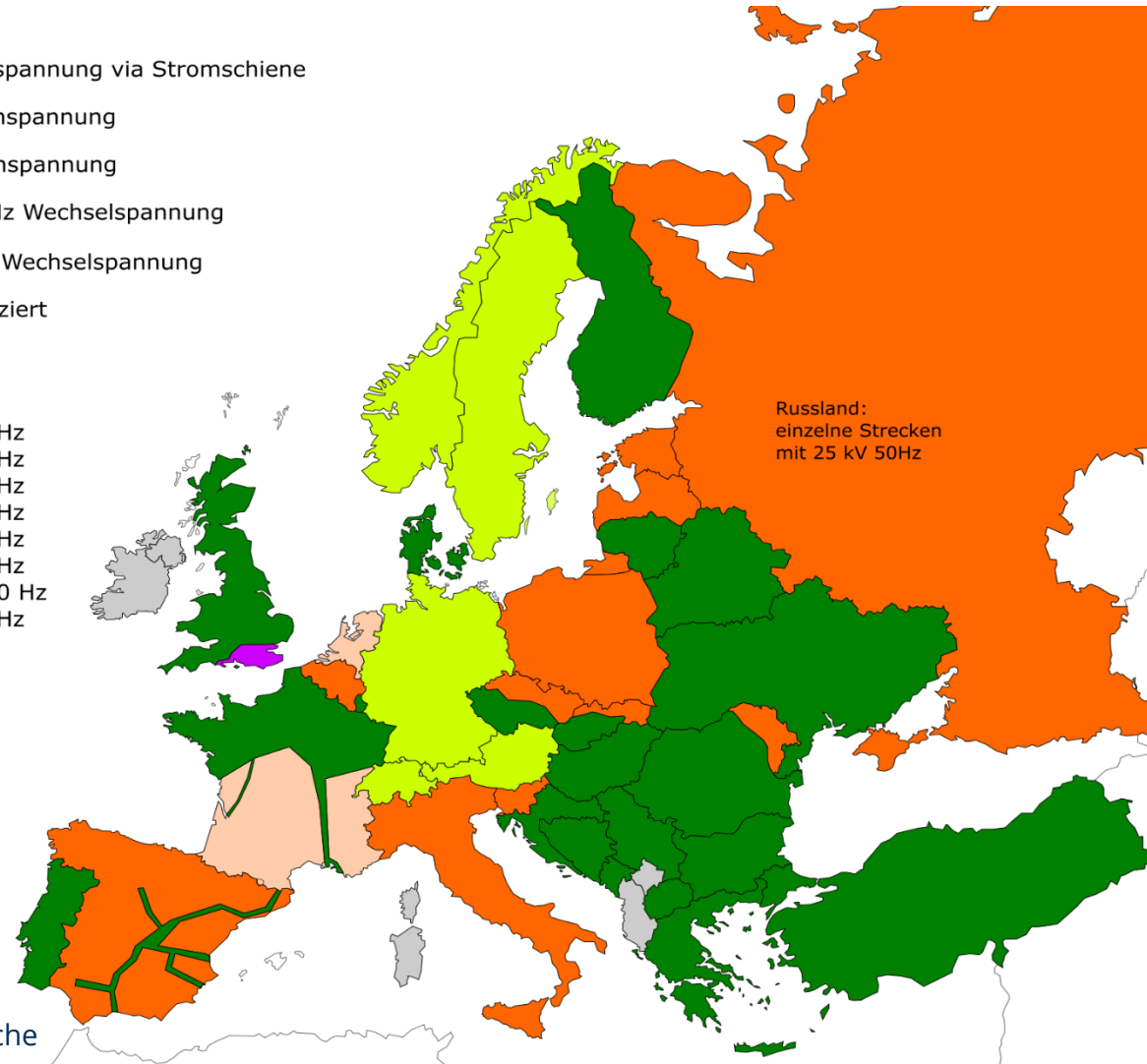
Stromsysteme in Europa

Legende:

- 750 V Gleichspannung via Stromschiene
- 1500 V Gleichspannung
- 3000 V Gleichspannung
- 15 kV, 16,7 Hz Wechselfspannung
- 25 kV, 50 Hz Wechselfspannung
- nicht elektrifiziert

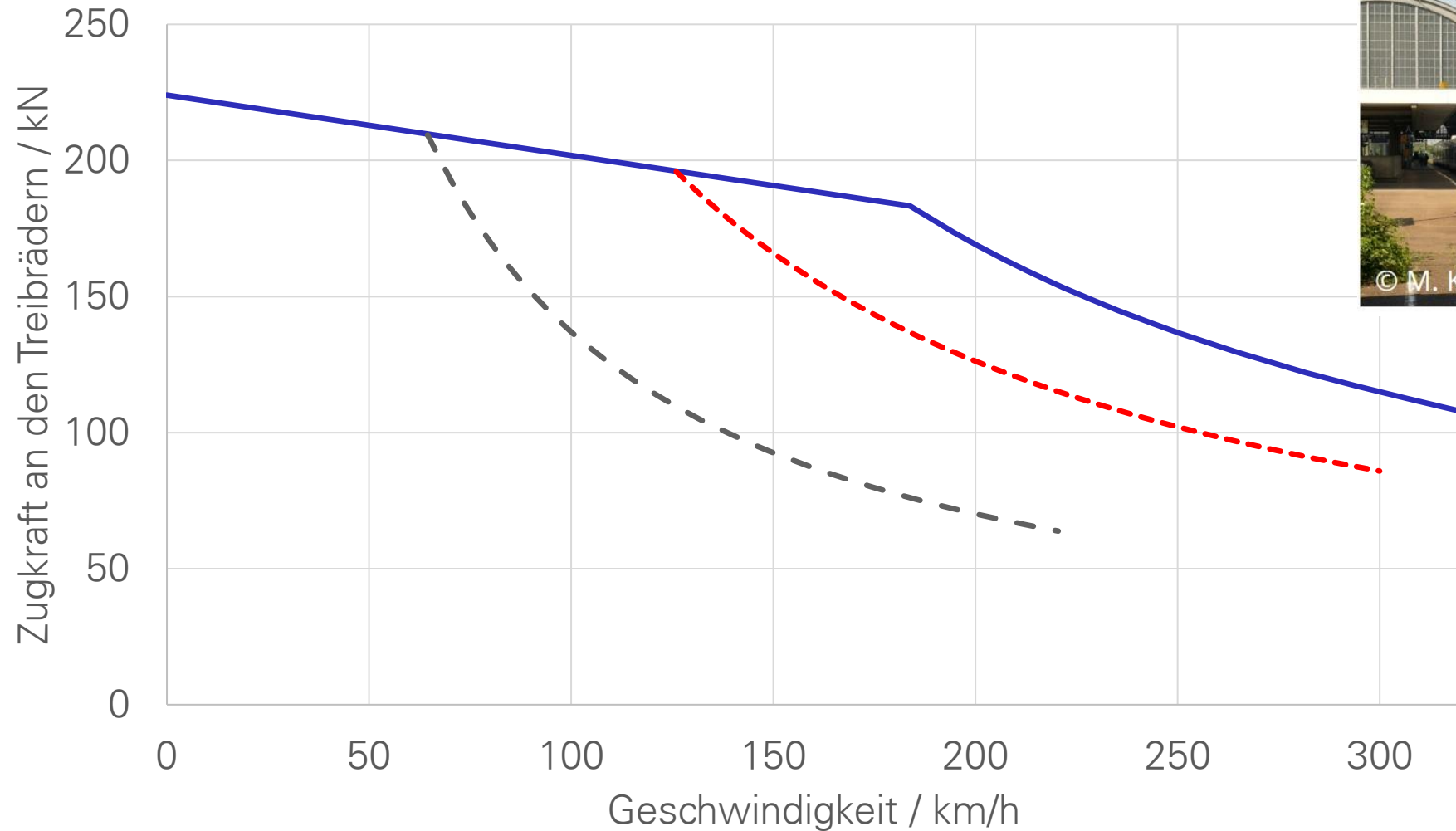
weitere Netze:

- China: 25 kV 50 Hz
- Indien: 25 kV 50 Hz
- Japan: 20 kV 50 Hz
20 kV 60 Hz
25 kV 50 Hz
- USA: 11 kV 25 Hz
12,5 kV 60 Hz
25 kV 60 Hz



Karte: M. Kache

Zugkraftentwicklung von Mehrsystemtriebfahrzeugen



TGV POS

— 25kV/50Hz - - - 15kV/16,7Hz - - - 1,5kV



Zusatz: Zugkraftherzeugung bei unkonventionellen Triebfahrzeugen



Zugkraftdiagramm Zweikraftfahrzeug

Bsp.: BR 187
(Bombardier Traxx 3 Lastmile)

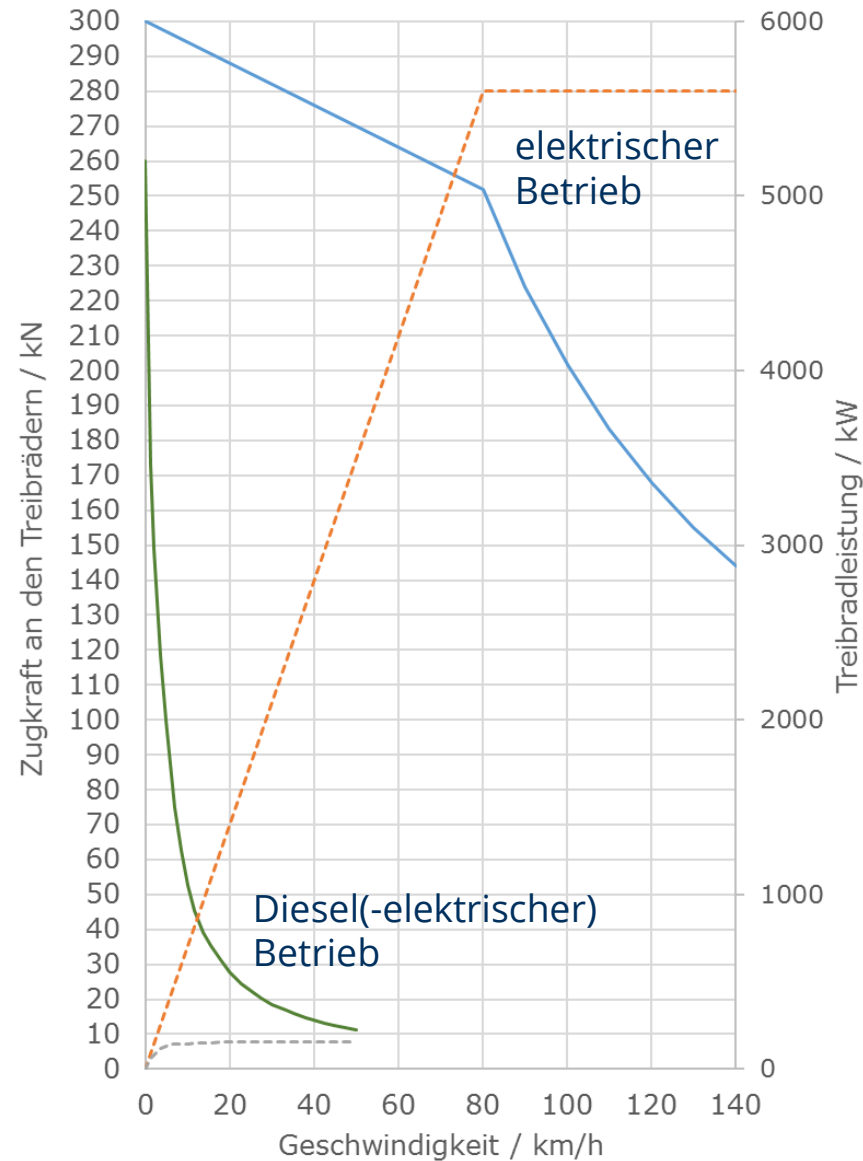


Zweikrafttriebfahrzeug:

Umschaltung zwischen zwei Antriebsmodi möglich

Varianten:

Diesel / Elektrisch
Akku-Elektrisch / Elektrisch



weitere Beispiele:

B 81500 und B82500 (SNCF)



$P_{\text{elektrisch}} = 1,9 \text{ MW}$
 $P_{\text{Diesel}} = 1,3 \text{ MW}$

B 83500, B 84500 + B 85900 (SNCF)



$P_{\text{elektrisch}} = 1,70 \dots 2,6 \text{ MW}$
 $P_{\text{Diesel}} = 0,85 \dots 1,3 \text{ MW}$

Zugkraftdiagramm Zweikraftfahrzeug

Bsp.: Bombardier ALP-45DP



Foto:
Adrian Corus



Foto:
Michael Berry



Foto:
Adrian Corus

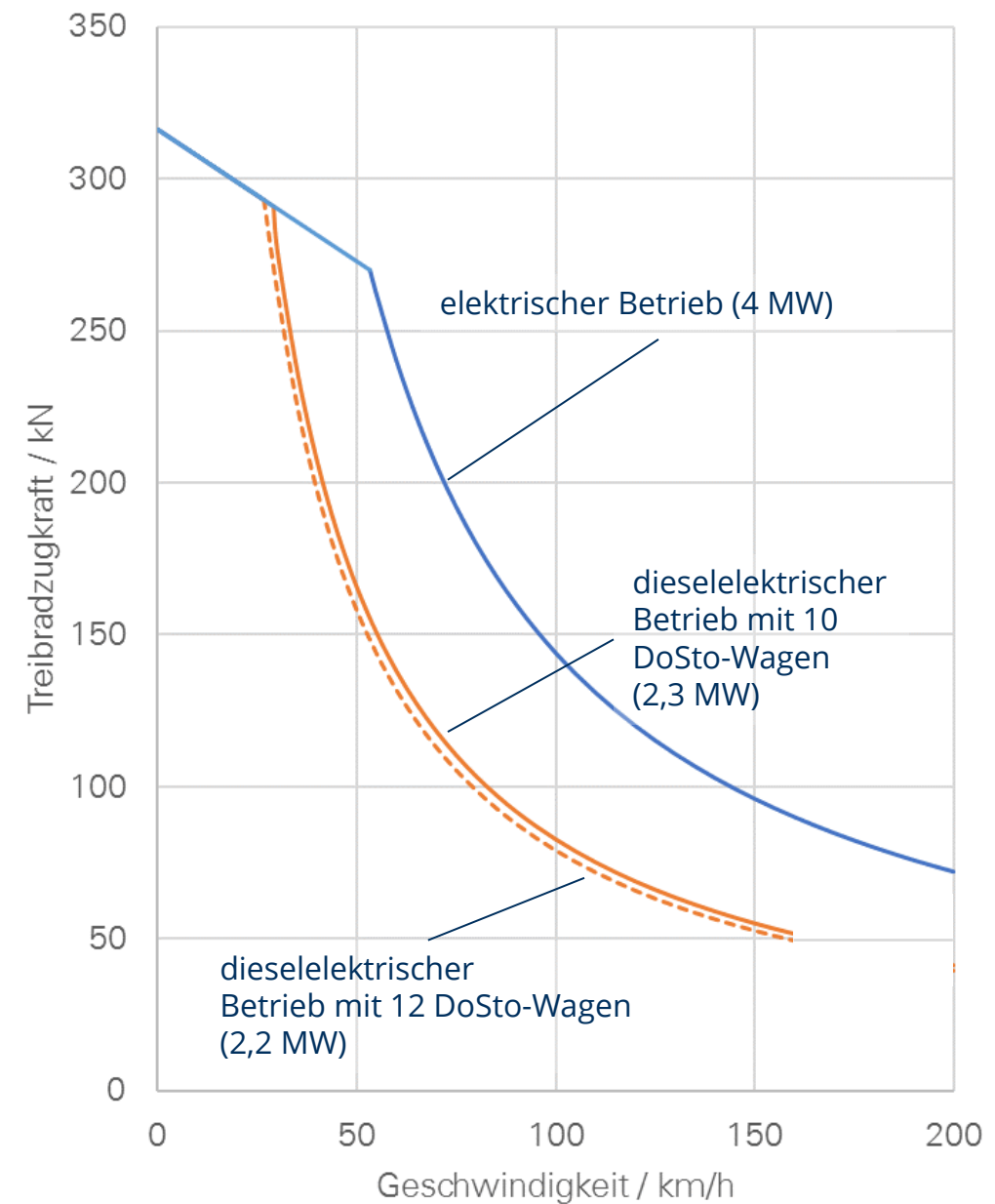


Foto:
Nicolas Houde

Zugkraftdiagramm Zweikraftfahrzeug

Bsp.: Bombardier ALP-45DP

Betreiber:	New Jersey Transit Agence Métropolitaine de Transport (Montréal)
Radsatzanordnung:	Bo' Bo'
Höchstgeschwindigkeit:	200 km/h (elektrisch), 160 km/h (diesel-elektrisch)
Treibradleistung (elektrisch):	4400 kW
Dieselmotorleistung:	2 x 1567 kW = 3134 kW
Gesamtmasse:	128 t
Radsatzfahrmasse:	32 t
Anfahrzugkraft:	316 kN
elektrische Bremskraft:	150 kN
Leistung Bremswiderstand:	1300 kW
Netzspannung:	25 kV/ 60 Hz und 12 kV/ 25 Hz

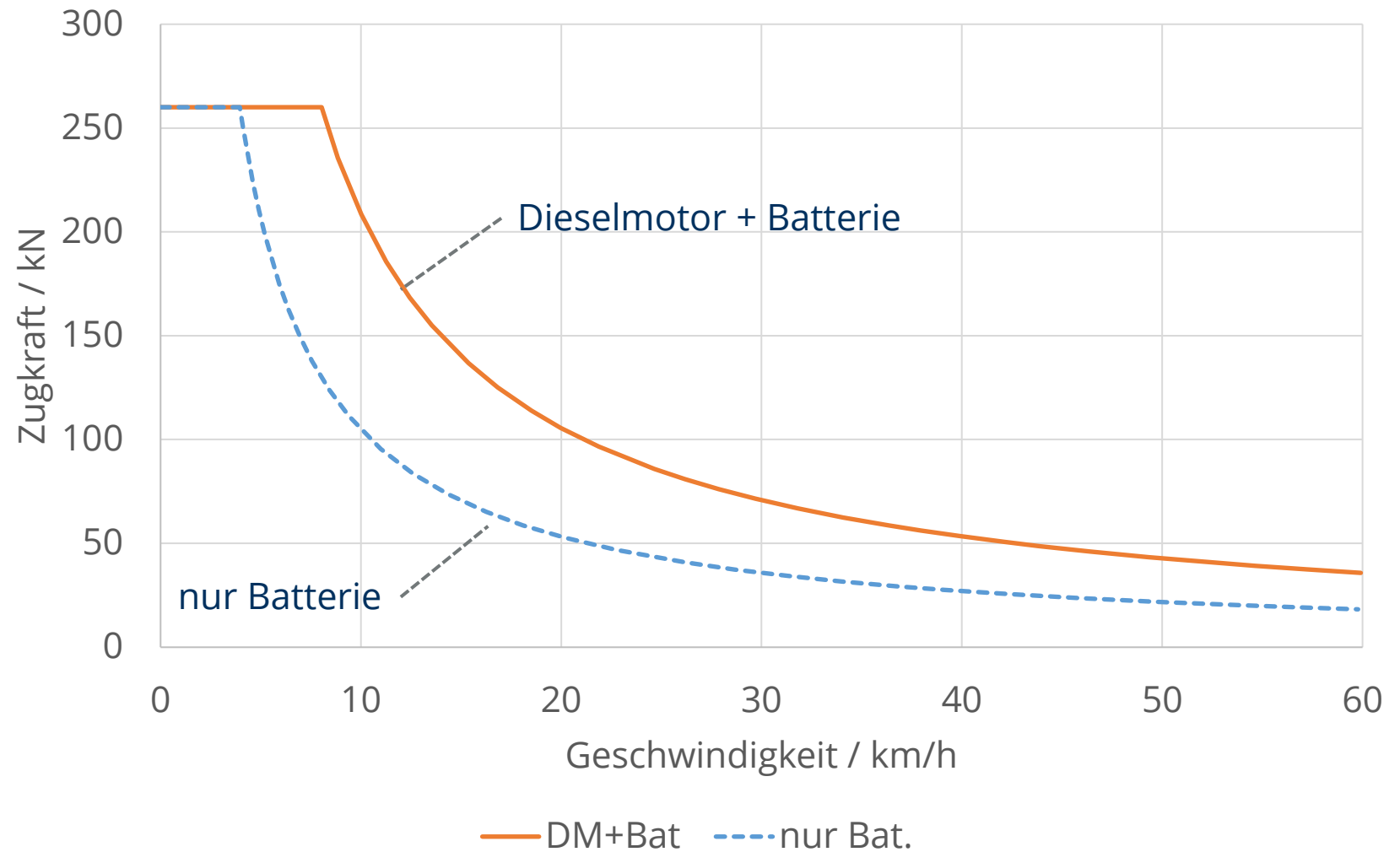


Hybridlok

Beispiel: Gmeinder DE 75 BB Hybrid

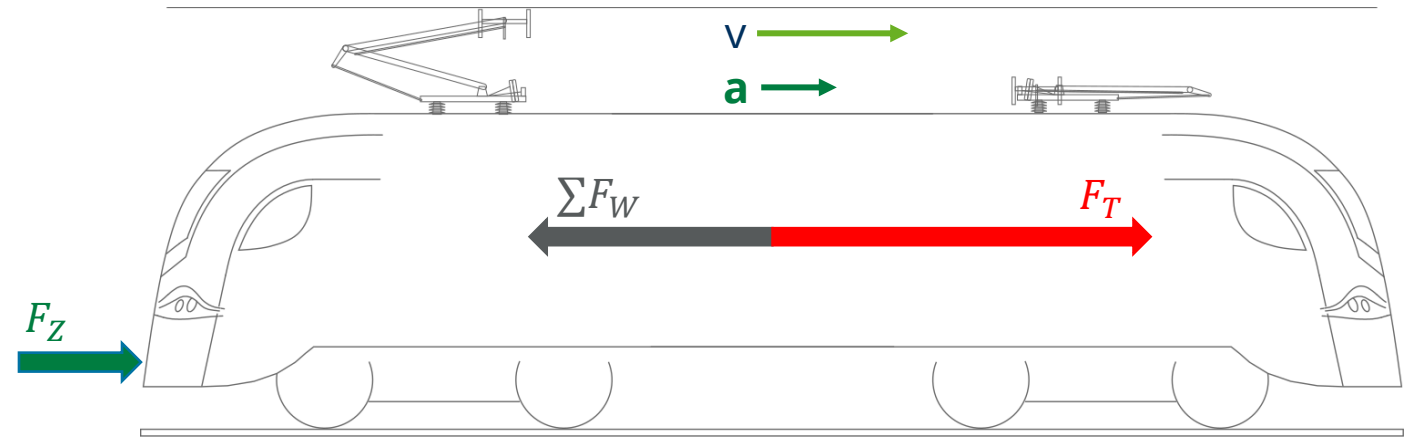


$P_{DM} = 354 \text{ kW}$
 $P_{T,max} = 600 \text{ kW}$
 $P_{T,Bat} = 300 \text{ kW}$



Vorlesungsinhalte (Schwerpunkt: Schienenverkehr)

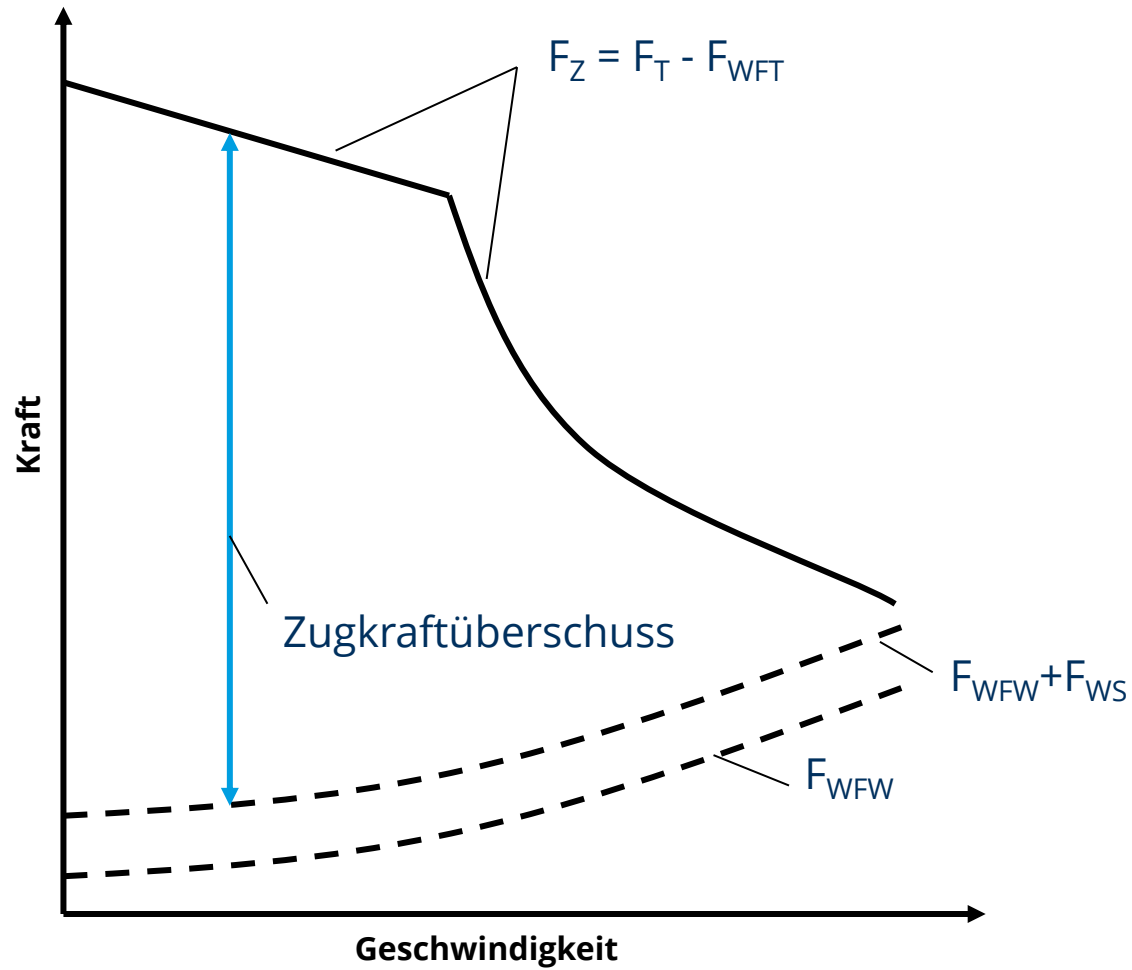
- Einführung
- Grundlagen
- Fahrwiderstandskräfte
- Antriebskräfte
- **Traktionsvermögen**
- Leistungs- und Energiebedarf
- Grundlagen der Fahrzeitberechnung



Beurteilung des Traktionsvermögens

Ausgangspunkt: Fahrdynamisches Grundgesetz

$$0 = -\ddot{x}\xi m + F_T - F_{WFT} - F_{WFW} - F_{WS} - F_B$$



Steigfähigkeit

$$i = \frac{F_Z(v) - F_{WFW}(v) - \xi_Z m_Z a}{m_Z g}$$

spezifischer Zugkraftüberschuss

$$f_a = \frac{F_Z(v) - F_{WFW}(v)}{m_Z} - ig$$

Beschleunigungsvermögen

$$a = \frac{F_Z(v) - F_{WFW}(v) - im_Z g}{\xi_Z m_Z}$$

Schleppvermögen

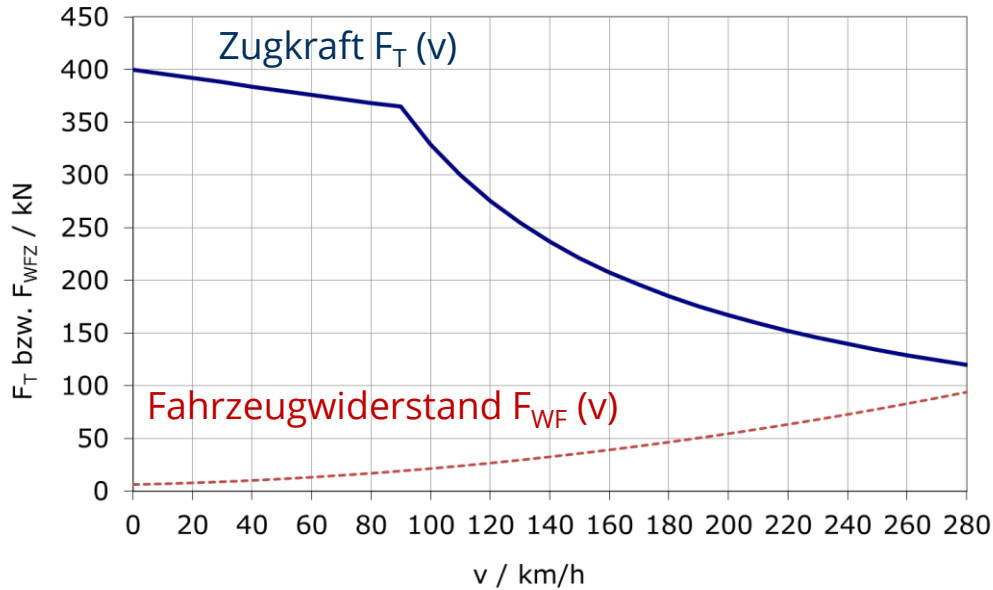
$$m_W = \frac{F_Z(v) - m_T(a\xi_Z + gi)}{a\xi_Z + g(f_{WFW} + i)}$$

Beschleunigungsvermögen

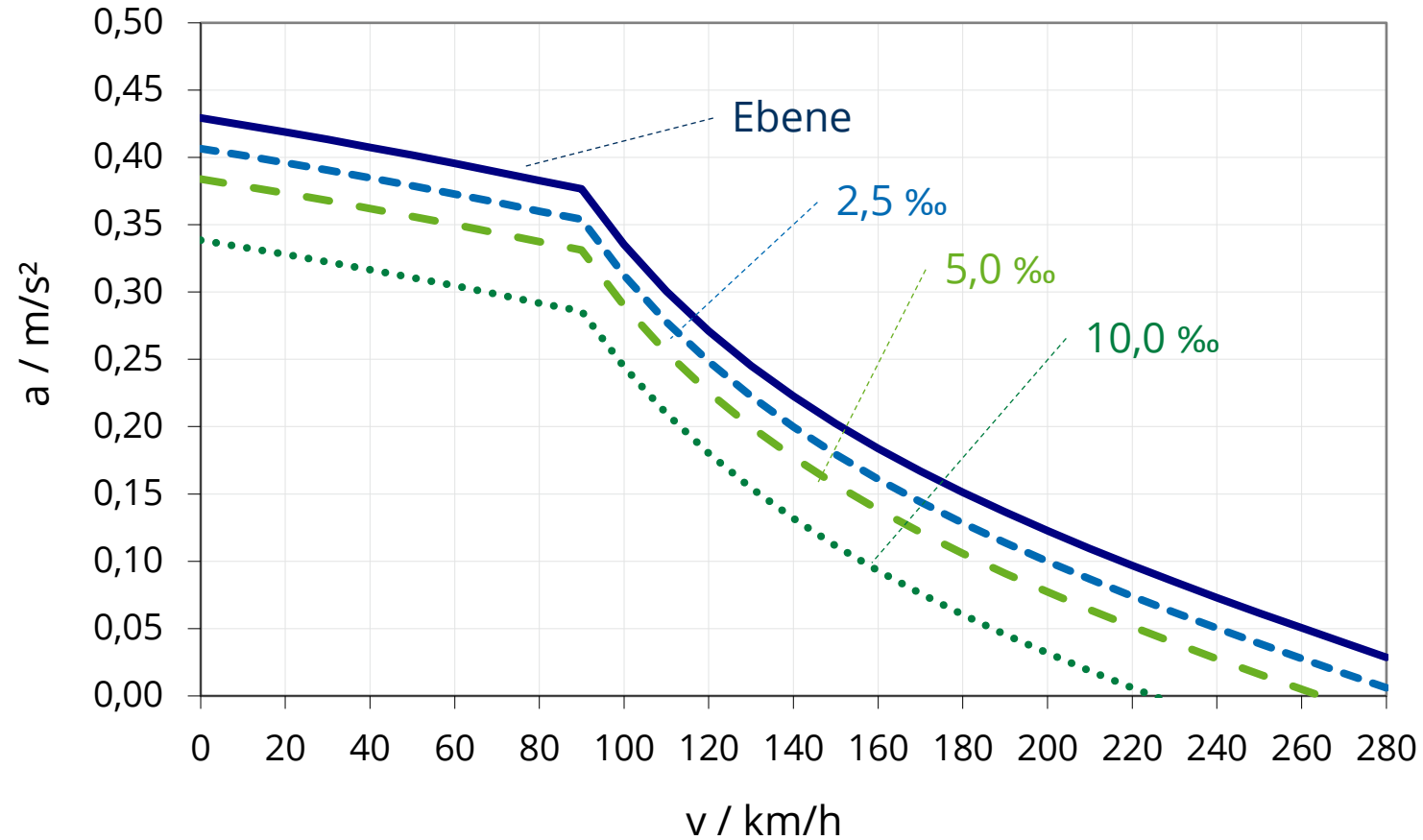
Beispiel ICE 1



$$a = \frac{F_T(v) - F_{WF}(v) - im_z g}{\xi_Z m_Z}$$



Zugmasse: 850 t
 Massenfaktor: 1,08

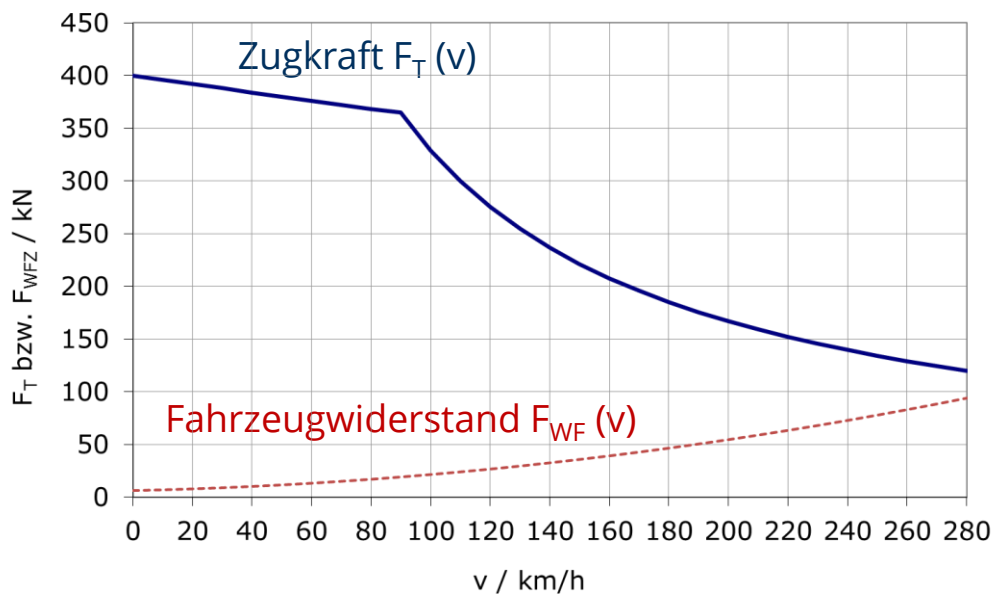


Steigvermögen (in Beharrung)

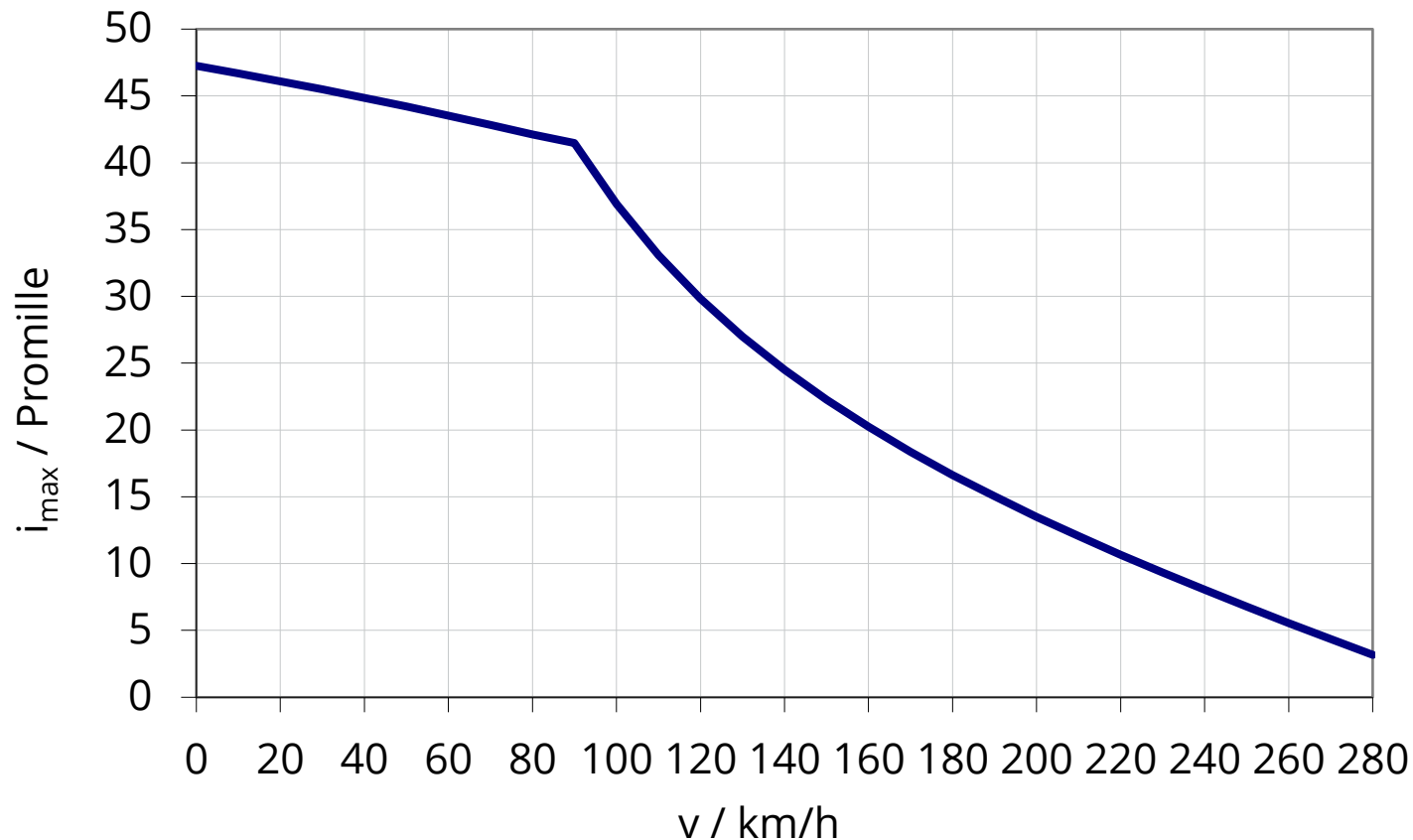
Beispiel ICE 1



$$i = \frac{F_T(v) - F_{WF}(v)}{m_Z g}$$



Zugmasse: 850 t
 Massenfaktor: 1,08

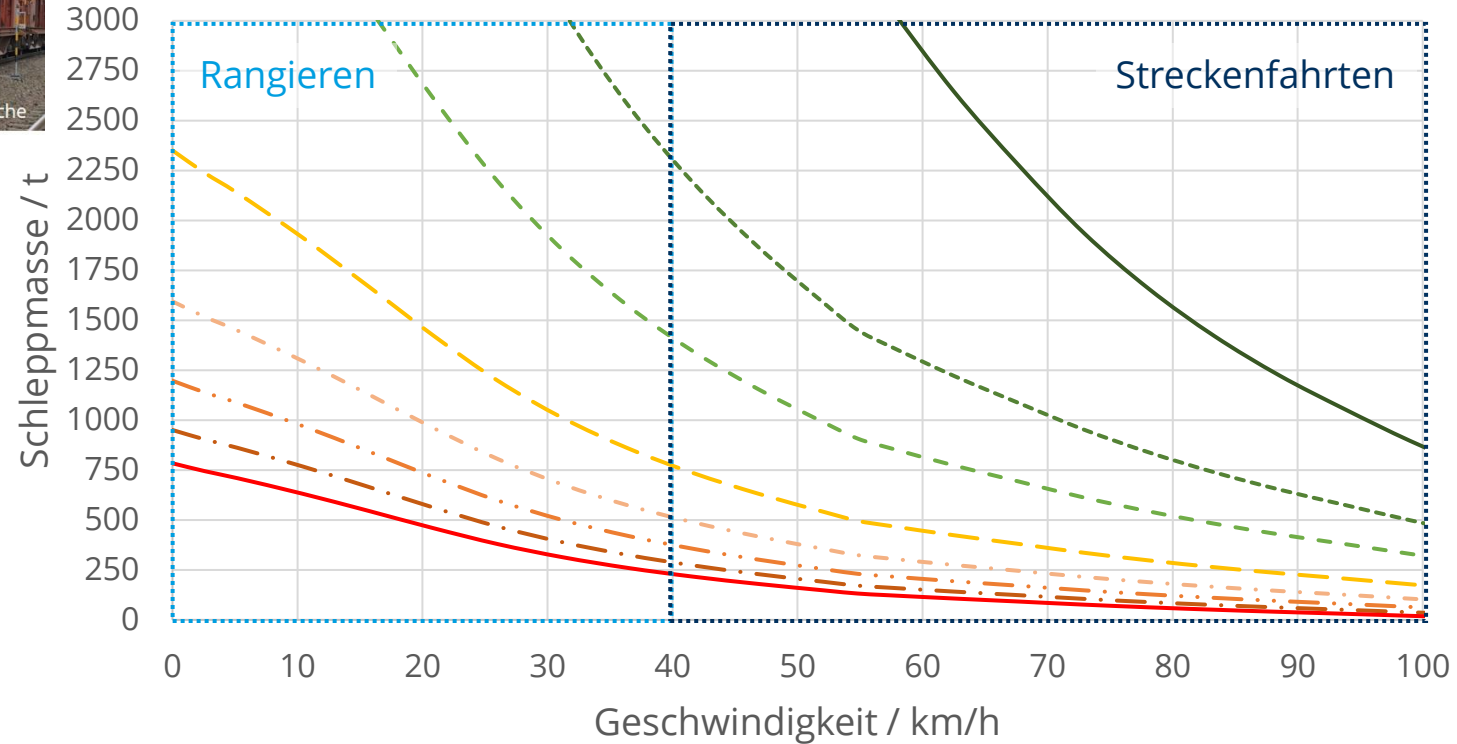
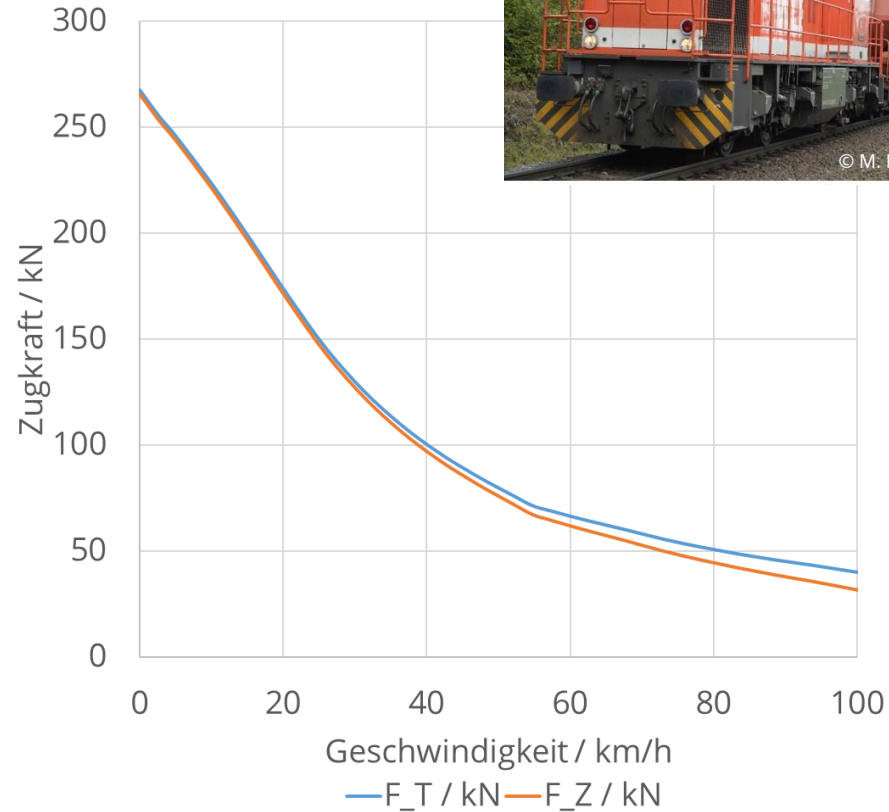


Schleppvermögen (in Beharrung)

Beispiel:
G 1206 + Güterzug



$$m_W = \frac{F_Z(v) - m_T g i}{g(f_{WFW}(v) + i)}$$



spezifischer Wagenzugwiderstand: $f_{WFW} = 0,0011 + 0,0020 \left(\frac{v + 15}{100} \right)^2$

Triebfahrzeugmasse: 88 t

- m_W (0 Promille)
- - - m_W (2.5 Promille)
- - - m_W (5 Promille)
- - - m_W (10 Promille)
- . - . m_W (15 Promille)
- . . - m_W (20 Promille)
- . - . m_W (25 Promille)
- m_W (30 Promille)

Grenzlasten

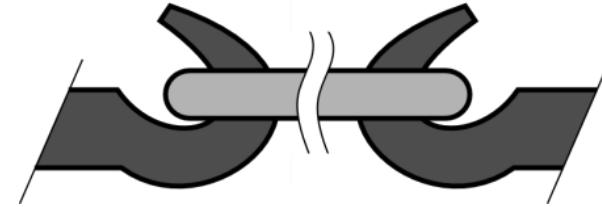


Welche Wagenzugmasse kann von welchem Triebfahrzeug auf welchem Laufweg maximal befördert werden?

Grenzlastarten

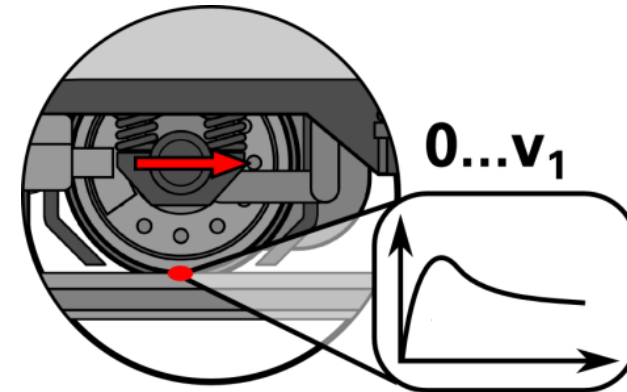
Zughakengrenzlast

Festigkeit der Zugeinrichtung
(Kupplungen)



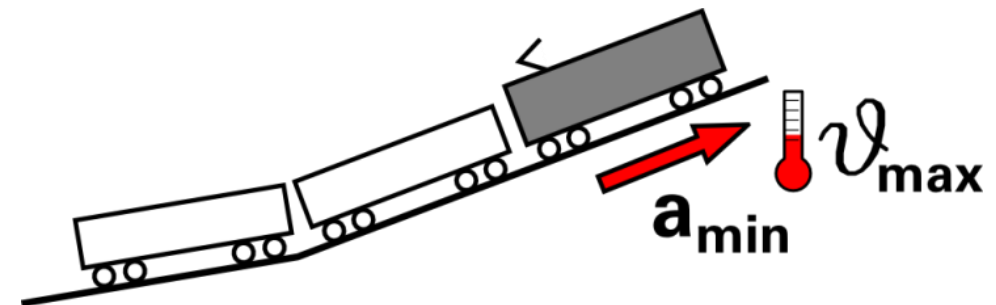
Anfahrrenzlast

Anfahrzugkräfte (Kraftschluss!)
Anfahrwiderstände



Anhängegrenzlast

Mindestgeschwindigkeit
Mindestbeschleunigung
thermische Grenzen

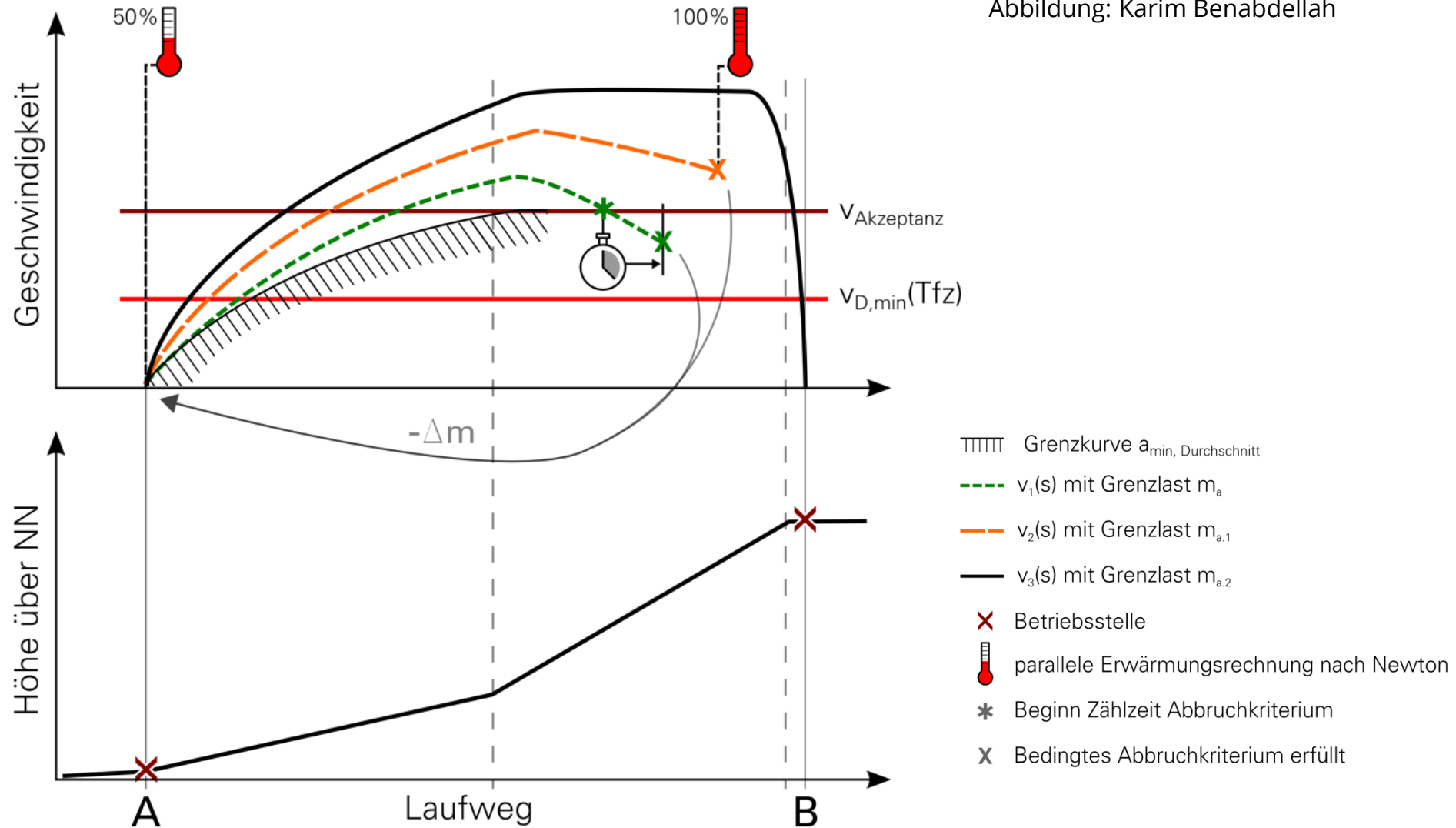


⇒ DB Ril 491.0201

Abbildungen: Karim Benabdellah

Anhängegrenzlast - Randbedingungen

Abbildung: Karim Benabdellah



Grenzlasttabellen

Übersicht der Grenzlasten bis 90 km/h - Brennkrafttriebfahrzeuge -

Strecke: 6212/2 Blatt: 1/2 Dresden-Neustadt Pbf - Görlitz

Streckenabschnitt Betriebsstelle, Signal	Fußnote	Zughaken- grenzlast SK [t]	maximale Druckkraft [kN]	Last bei max Druckkraft [t]	Grenzlast in [t] bei Bespannung mit einem Tfz der Triebfahrzeugbaureihe:												
					202	204	211 LG	211 SG	212 LG	212 SG	216 LG	216 SG	218 LG	218 SG	219	229	232
1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Dre-Neustadt Dre-Klotzsche		1505	120	370	400	500	460	300	590	380	690	400	740	480	650	650	825
Dre-Klotzsche Arnsdorf (b Dre)		2940	120	735	920	1150	1050	600	1150	700	1400	600	1450	800	1350	1350	1650
Arnsdorf (b Dre) Bischofswerda		3785	120	1095	920	1150	1050	600	1150	700	1400	600	1450	800	1350	1350	1650
Bischofswerda Bautzen		5065	120	1350	1800	2000	2000	600	2000	700	2000	600	2000	800	2000	2000	2650
Bautzen Görlitz		2645	120	655	920	1150	1050	600	1150	700	1400	600	1400	800	1350	1350	1650



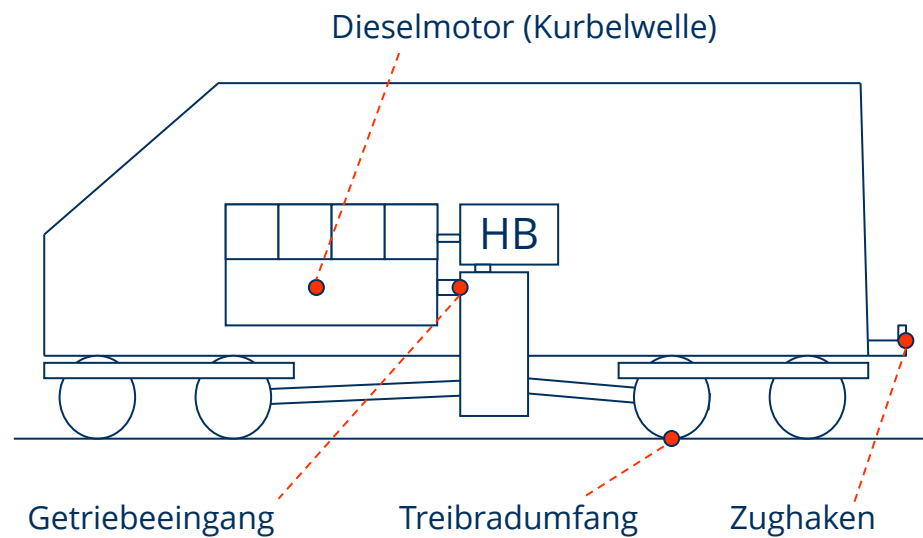
Leistungsbedarf

Vereinfacht gilt: $W = F \cdot s$ und $P = W/t$

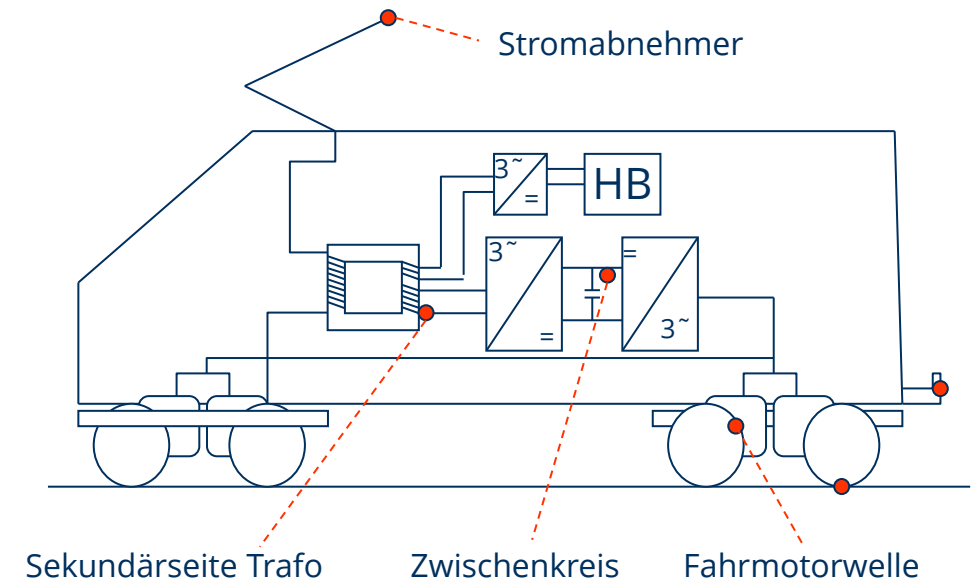
Daraus folgt: $P = F \cdot v$

Bei der Ermittlung des Leistungsbedarfes ist der Bezugspunkt zu beachten!

Dieseltraktion



elektrische Traktion



Beispiele „Zugförderprogramm“



BR 120

Beförderung von Reisezügen mit einer Masse von 700 t
mit einer Geschwindigkeit von 160 km/h

Beförderung von Schnellgüterzügen mit einer Masse von 1500 t
mit einer Geschwindigkeit von 100 km/h

Beförderung von gemischten Güterzügen mit einer Masse von 2200 t
mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h

Beförderung von Güterganzzügen mit einer Masse von 2700 t
mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h

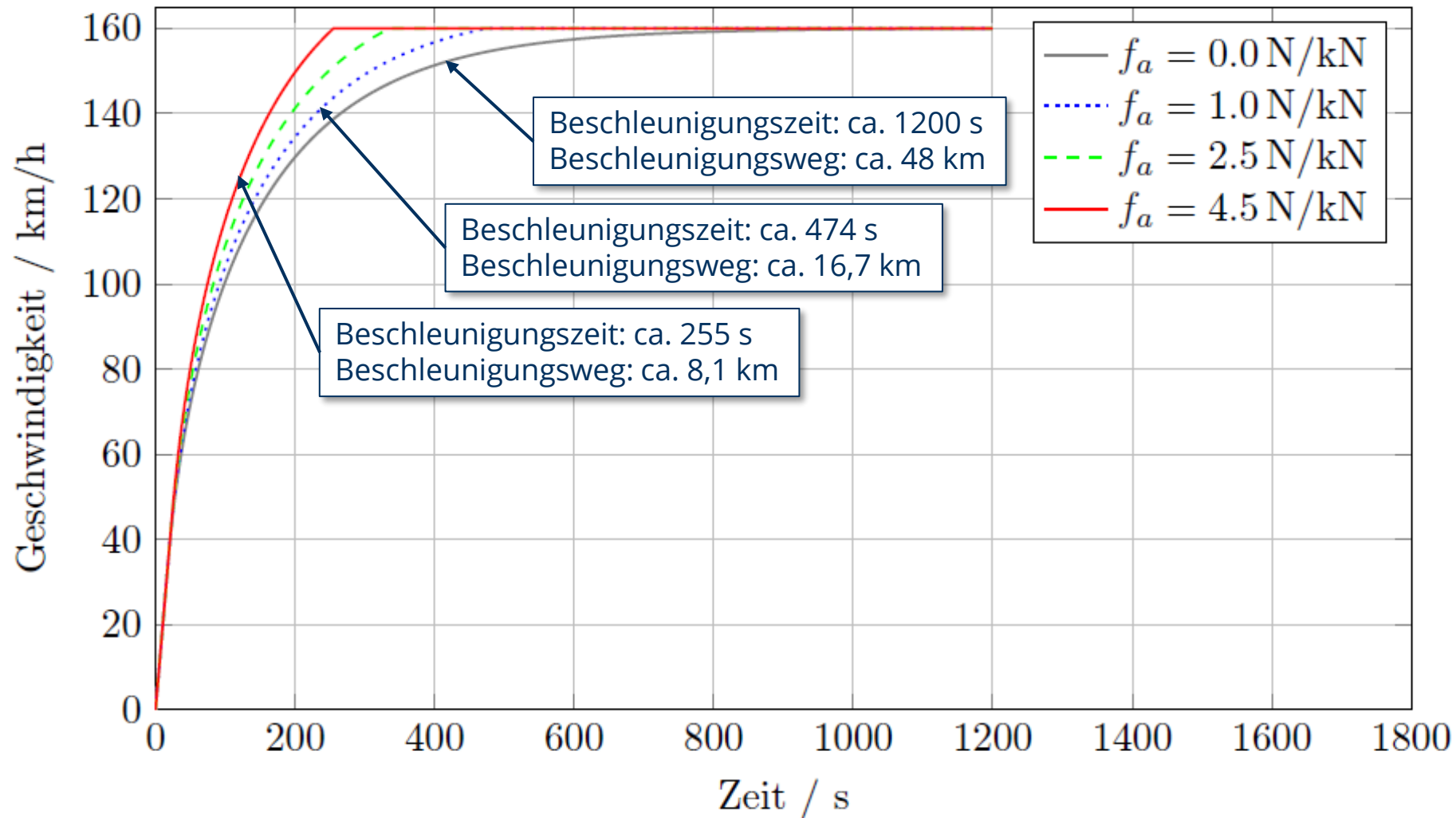


Siemens Vectron

Beförderung von Güterzügen mit einer Masse von 1600 t
mit einer Geschwindigkeit von 120 km/h in der Ebene
bei einem Zugkraftüberschuss von 3 N/kN

Beförderung von Reisezügen mit einer Masse von 550 t
mit einer Geschwindigkeit von 200 km/h in der Ebene
bei einem Zugkraftüberschuss von 5 N/kN

Bedeutung des Zugkraftüberschusses



Fahrdynamischen Leistungsauslegung nach Zugförderprogramm

Herleitung der Auslegungsgleichung:

$$P_T = \sum F_W v$$

$$\sum F_W = F_{WFT} + f_{WFW} m_W g + f_{WS} (m_T + m_W) g$$

Ergänzung um spezifischen Zugkraftüberschuss f_a bei Zielgeschwindigkeit:

$$F_a = f_a (m_T + m_W) g$$

Traktionsleistungsbedarf am Treibrad:

$$P_T = \frac{v}{3,6} (F_{WFT} + f_{WFW} m_W g + f_{WS} [m_T + m_W] g + f_a [m_W + m_T] g)$$

Dieseltriebfahrzeuge: Bestimmung der Dieselmotorleistung (Wirkungsgrad $Lü$, Hilfsleistungsbedarf, Komfortleistung):

$$P_{DM} = P_{DM,T} + P_{ZSS}$$

$$P_{DM} = \frac{P_T}{\eta_{Lü} \cdot (1 - \psi)} + P_{ZSS} = \frac{v}{3,6} \left[\frac{F_{WFT} + f_{WFW} m_W g + (f_{WS} + f_a) \cdot g \cdot (m_T + m_W)}{\eta_{Lü} \cdot (1 - \psi)} \right] + P_{ZSS}$$

ZSS - ZugSammelSchiene



Fahrdynamischen Leistungsauslegung nach Zugförderprogramm

Gleichung für **Dieseltriebfahrzeuge**

(Ziel: Auswahl eines geeigneten Dieselmotors)

$$P_{DM} = \frac{P_T}{\eta_{Lü} \cdot (1 - \psi)} + P_{ZSS} = \frac{v}{3,6} \left[\frac{F_{WFT} + f_{WFW} m_W g + (f_{WS} + f_A) \cdot g \cdot (m_T + m_W)}{\eta_{Lü} \cdot (1 - \psi)} \right] + P_{ZSS}$$

Gleichung für **Elektrotriebfahrzeuge**

(Ziel: Auswahl geeigneter Fahrmotoren)

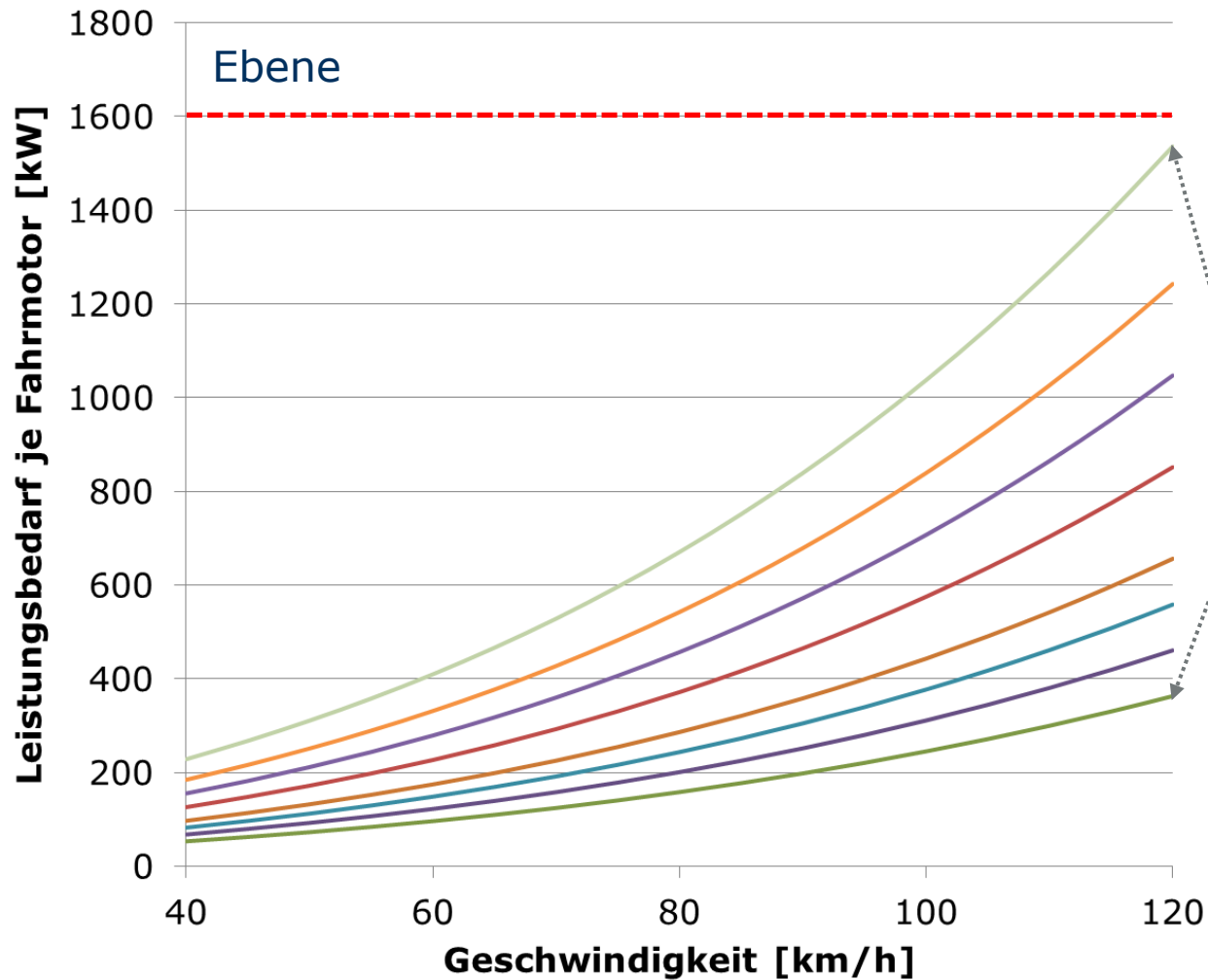
$$P_{FM} = \frac{P_T}{z_{FM} \cdot \eta_{RS}} = \frac{v}{3,6} \left[\frac{F_{WFT} + f_{WFW} m_W g + (f_{WS} + f_A) \cdot g \cdot (m_T + m_W)}{z_{FM} \cdot \eta_{RS}} \right]$$

z_{FM} – Anzahl der Fahrmotoren (z.B. Bo'Bo' = 4)

η_{RS} – Wirkungsgrad des Radsatzantriebes



Leistungsbedarf (Fahrmotoren) einer elektrischen Bo'Bo'-Lokomotive



Annahmen:
 - Güterganzzug
 - $f_a = 0,0010$
 - Masse der Lok: 84 t

- m_W = 600 t
- m_W = 800 t
- m_W = 1000 t
- m_W = 1200 t
- m_W = 1600 t
- m_W = 2000 t
- m_W = 2400 t
- m_W = 3000 t

zum Vergleich:

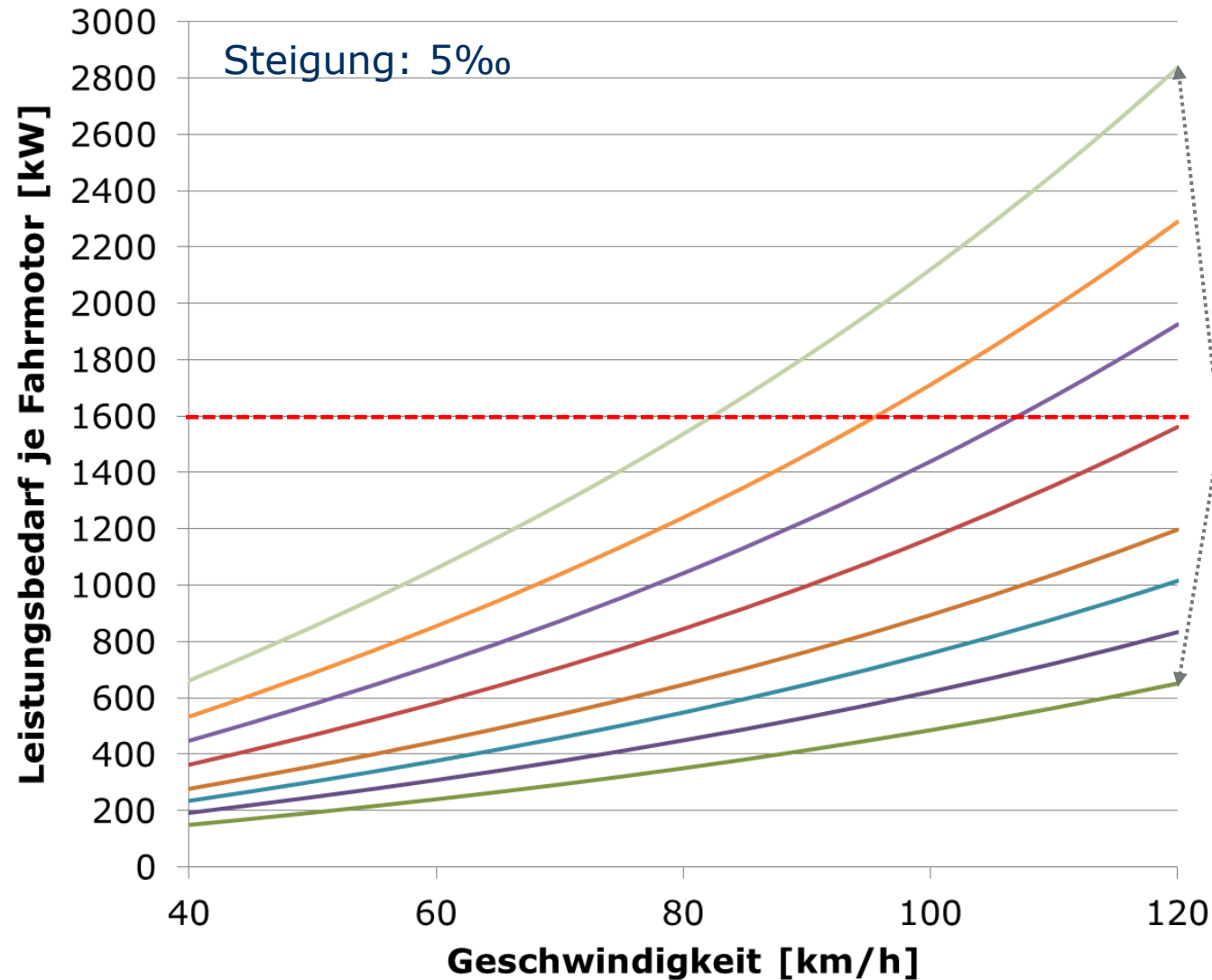


BR 145: 4 x 1050 kW



BR 152: 4 x 1600 kW

Leistungsbedarf (Fahrmotoren) einer elektrischen Bo'Bo'-Lokomotive



Annahmen:
 - Güterganzzug
 - $f_a = 0,0010$
 - Masse der Lok: 84 t

- $m_W = 600$ t
- $m_W = 800$ t
- $m_W = 1000$ t
- $m_W = 1200$ t
- $m_W = 1600$ t
- $m_W = 2000$ t
- $m_W = 2400$ t
- $m_W = 3000$ t

zum Vergleich:



BR 145: 4 x 1050 kW



BR 152: 4 x 1600 kW

Praktisches Beispiel: Fahrzeugausschreibung

ABSCHNITT II: AUFTRAGSGEGENSTAND

II.1) **BESCHREIBUNG**

II.1.1) **Bezeichnung des Auftrags durch den Auftraggeber:**

Herstellung, Zulassung und Lieferung von Streckendiesellokomotiven.

...

II.1.5) **Kurze Beschreibung des Auftrags oder Beschaffungsvorhabens:**

...

Die Lokomotiven müssen folgende Grundanforderungen erfüllen:

- Realisierung des folgenden Zugförderprogramms: 5 Doppelstockwagen (DoSto) mit je 55 t und ein Steuerwagen mit 60 t und V_{\max} 140 km/h in der Ebene mit einem Zugkraftüberschuss von 3N/kN und einer zentralen Energieversorgung (ZEV) von mindestens 300 kVA,
- Streckenklasse C2,
- Antrieb: Dieselmotor mit Abgasnorm Stage IIIB, gegebenenfalls auch Teillieferungen mit Stage IIIA,
- Anfahrzugkraft: mindestens 235 kN. Die Lokomotive muss auch auf 270 kN ausgelegt werden können,
- V_{\max} 140 km/h /Option 160 km/h,

...

Praktisches Beispiel: Fahrzeugausschreibung

Lt. Ausschreibung: 140 (160) km/h
 Lt. Ausschreibung: 5x55t + 60t = 335t
 Lt. Ausschreibung: 0 Promille (Ebene)
 Lt. Ausschreibung: 3 N/kN
 Lt. Ausschreibung: Streckenklasse C2 = 20t/Radsatz

$$P_{DM,T} = \frac{v}{3,6} \left[\frac{F_{WFT} + f_{WFW} \cdot g \cdot m_W + (f_{WS} + f_a) \cdot g \cdot (m_T + m_W)}{\eta_{Lü} \cdot (1 - \psi)} \right]$$

Schätzung der fehlenden Parameter (Orientierung an Bestandsfahrzeugen):

$$F_{WFT, BR 218} = 2,85 + 3,48 \cdot \left(\frac{v + 15}{100} \right)^2$$

$$F_{WFT, BR 228} = 1,47 + 2,65 \cdot \left(\frac{v + 20}{100} \right)^2$$

$$F_{WFT, ER 20} = 0,965 + 1,472 \cdot \frac{v}{100} + 3,34 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2$$



$$f_{WFW} = 0,0015 + 0,0028 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2$$

Gl. nach Strahl, Reisezüge allg.

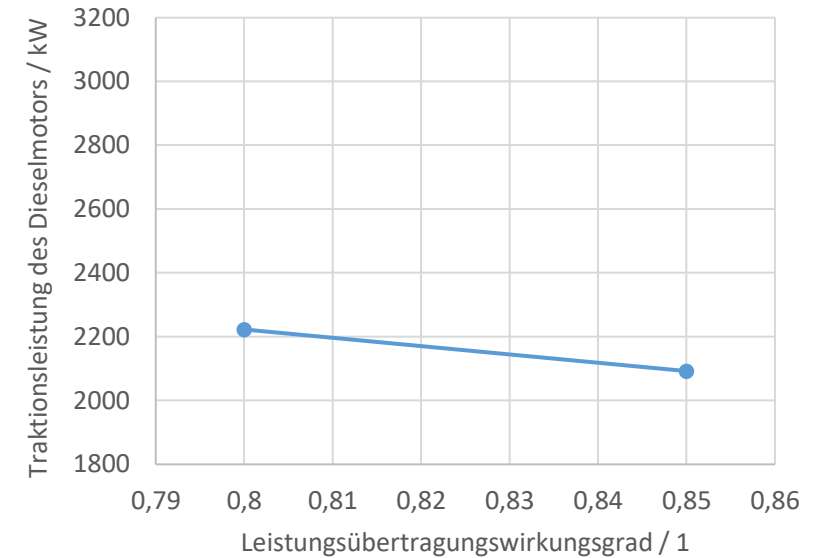
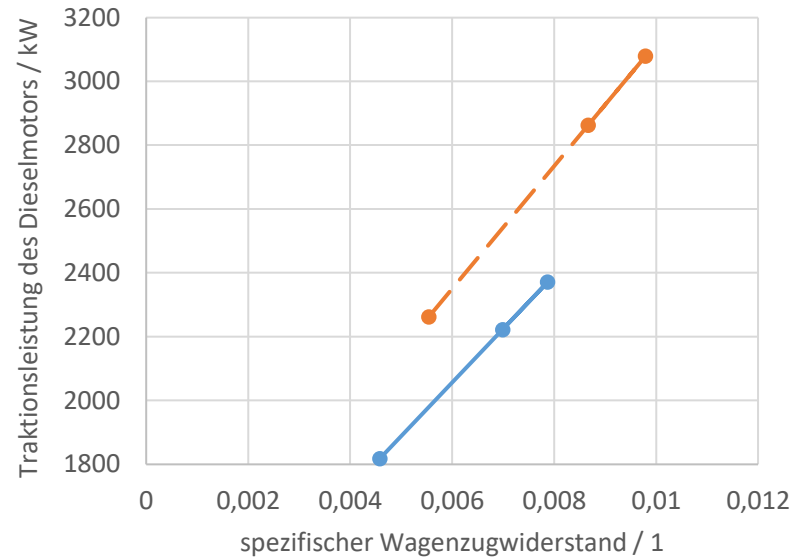
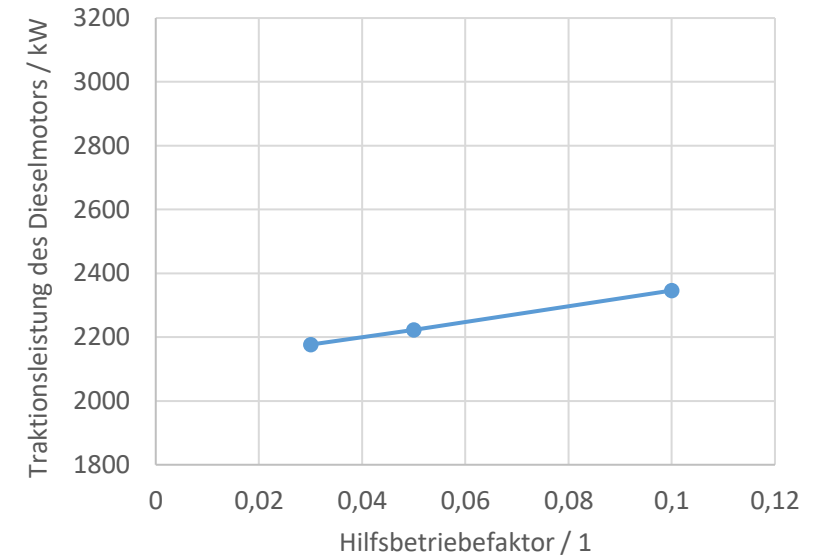
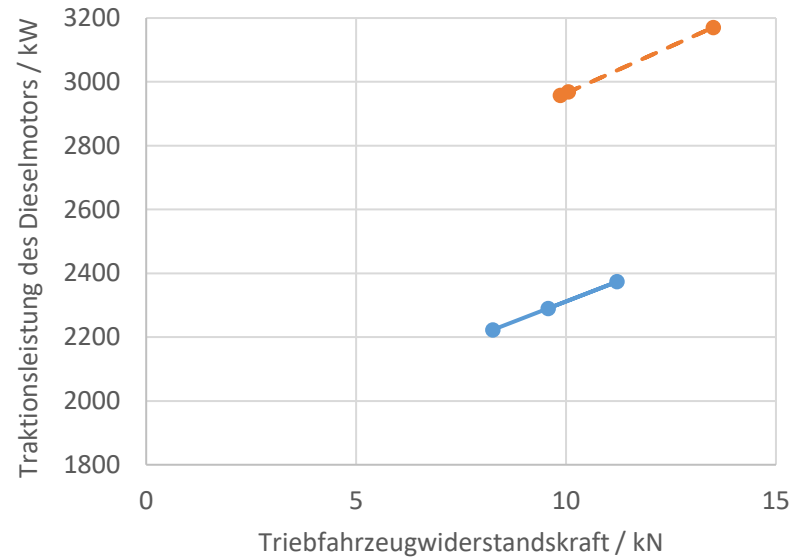
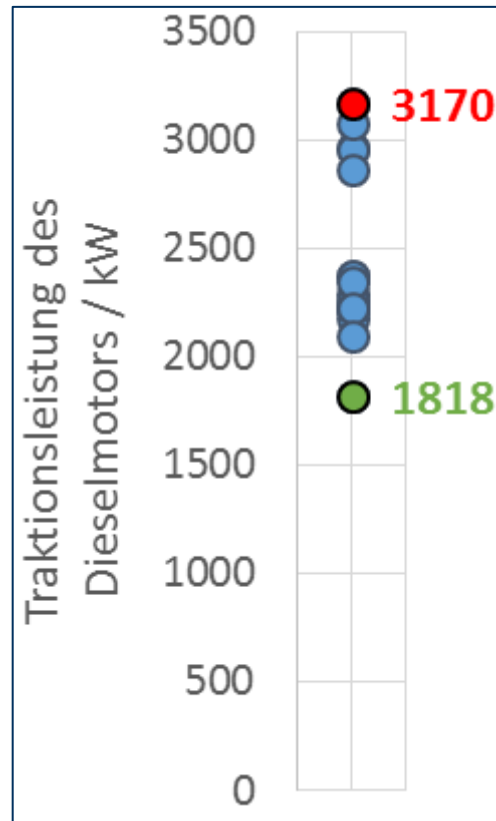
$$f_{WFW} = 0,0016 + 0,0032 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2$$

Gl. DR, Dosto-Züge

$$f_{WFW} = 0,0010 + 0,0006 \cdot \frac{v}{100} + 0,0014 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2$$

Messungen Metronom (Diss. R. Schimke)

Beispiel: Fahrzeugaus- schreibung



Praktisches Beispiel: Fahrzeugausschreibung

$$P_{DM,T} = \frac{140}{3,6} \left[\frac{F_{WFT} + f_{WFW} \cdot g \cdot 335t + 0,003 \cdot g \cdot (80t + 335t)}{\eta_{Lü} \cdot (1 - \psi)} \right]$$

Annahme: 0,85 \nearrow $\eta_{Lü} \cdot (1 - \psi)$ \nwarrow Annahme: 0,08

Schätzung der fehlenden Parameter (Orientierung an Bestandsfahrzeugen):

$$F_{WFT, BR 218} = 2,85 + 3,48 \cdot \left(\frac{140 + 15}{100} \right)^2 = 11,2 \text{ kN}$$



$$f_{WFW} = 0,0015 + 0,0028 \cdot \left(\frac{140}{100} \right)^2 = 0,0070$$

Gl. nach Strahl, Reisezüge allg.

$$F_{WFT, BR 228} = 1,47 + 2,65 \cdot \left(\frac{140 + 20}{100} \right)^2 = 8,3 \text{ kN}$$



$$f_{WFW} = 0,0016 + 0,0032 \cdot \left(\frac{140}{100} \right)^2 = 0,0079$$

Gl. DR, Dosto-Züge

$$F_{WFT, ER 20} = 0,965 + 1,472 \cdot \frac{140}{100} + 3,34 \cdot \left(\frac{140}{100} \right)^2 = 9,6 \text{ kN}$$



$$f_{WFW} = 0,0010 + 0,0006 \cdot \frac{140}{100} + 0,0014 \cdot \left(\frac{140}{100} \right)^2$$

Messungen Metronom (Diss. R. Schimke)

$$f_{WFW} = 0,0046$$

Praktisches Beispiel: Fahrzeugausschreibung

$$P_{DM,T} = \frac{140}{3,6} \left[\frac{9,6 \text{ kN} + 0,0046 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 335 \text{ t} + 0,003 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (80 \text{ t} + 335 \text{ t})}{0,85 \cdot (1 - 0,08)} \right]$$

$$P_{DM,T} = \frac{140}{3,6} \left[\frac{9,6 \text{ kN} + 15,11 \text{ kN} + 12,21 \text{ kN}}{0,782} \right]$$

$$P_{DM,T} = 38,8889 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \left[\frac{9,6 \text{ kN} + 15,11 \text{ kN} + 12,21 \text{ kN}}{0,782} \right]$$

$$P_{DM,T} = 1836 \text{ kW}$$

$$P_{DM} = P_{DM,T} + P_{ZSS} = 1836 \text{ kW} + 300 \text{ kW}$$

$$P_{DM} = 2136 \text{ kW}$$

Hilfs- und Nebenbetriebe

Hilfsbetriebe =

Aggregate, die der Gewährleistung der Funktionstüchtigkeit der Traktions-, Brems-, Leit- und Sicherungsausrüstung dienen

Beispiele:

Luftpresser

Kühlerlüfter

Trafoölpumpe

Fahrmotorlüfter

Kraftstoffpumpe

Kühlwasserpumpe



Hilfsleistungsfaktor Ψ
in % der DM-Nennleistung

Nebenbetriebe =

Aggregate, die dem Komfort und der Information von Reisenden und Personal dienen

Beispiele:

Klimaanlage: ca. 6-16 kW / Wagen

Bordbistro - ICE-T: 10 kVA

Beleuchtung – ICE 1: 2 kW/Wagen

Versorgung über Zugsammelschiene:

ICE 1: 500 kVA

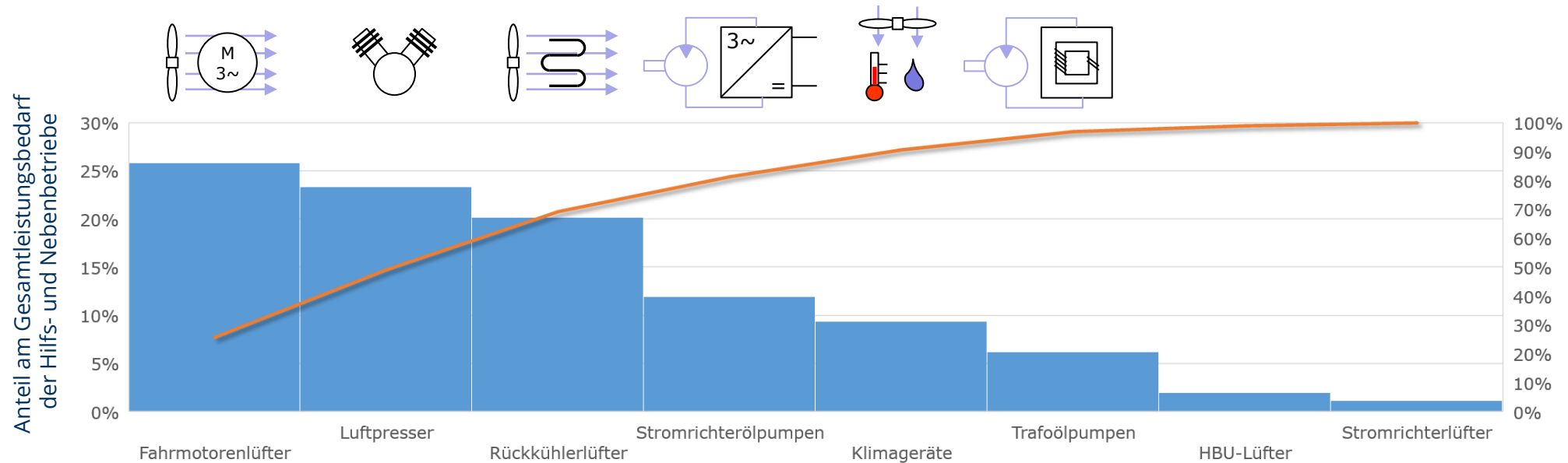
ICE-T: 4 x 250 kVA



Angabe als Pauschalleistung
je Wagen oder Radsatz

Hilfsbetriebe: Bsp. BR 145

Fahrmotorlüfter (4 Stck.):	30,8 kVA
Rückkühlerlüfter für Trafoöl (2 Stck.):	24,0 kVA
Trafoölpumpen (2 Stck.):	7,4 kVA
Stromrichterölpumpen (2. Stck.):	14,2 kVA
Stromrichterlüfter:	1,4 kVA
Hilfsbetriebeumrichterlüfter:	2,4 kVA
Luftpresser:	27,8 kVA
Klimageräte	11,2 kVA



Summierte Anteile am Gesamtleistungsbedarf der Hilfs- und Nebenbetriebe

Komfortleistungsbedarf von Reisezügen

Einstöckige Wagenparks

Altbau (nicht klimatisiert)



Leistungsbedarf Zugsammelschiene:
30 kVA/Wagen

ca. 90...180 kW / Zug

Neubau (klimatisiert)



Leistungsbedarf Zugsammelschiene:
52 kVA/Wagen

ca. 200...300 kW / Zug

Doppelstock (klimatisiert)



Leistungsbedarf Zugsammelschiene:
67 kVA/Wagen

ca. 200...400 kW / Zug