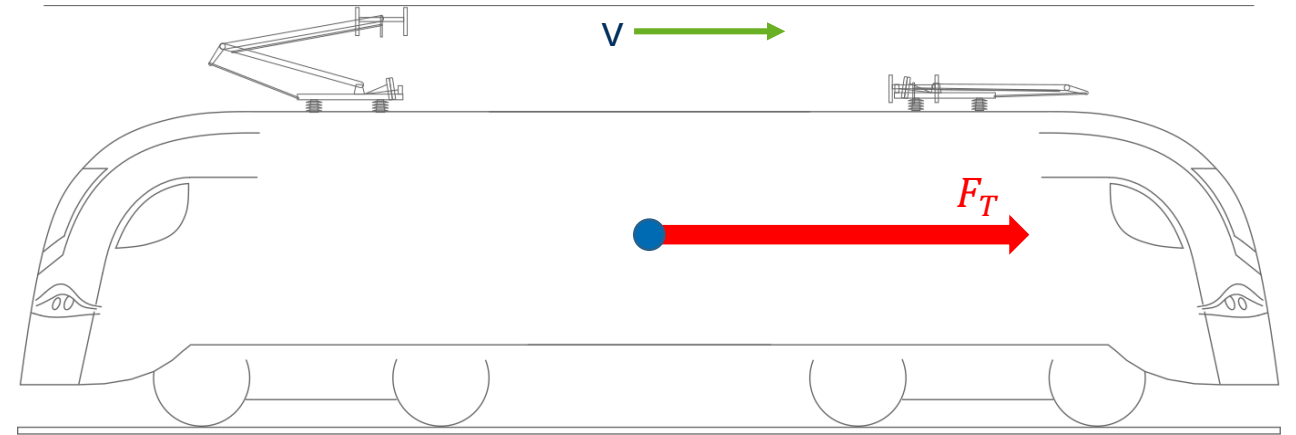


# Vorlesungsinhalte (Schwerpunkt: Schienenverkehr)

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



# Wiederholung

## Fahrwiderstand

Masse der Lok: 80 t  
Masse des Wagenzuges: 1072 t  
Dieselmotornennleistung: 1000 kW

Triebfahrzeugwiderstandskraft:

$$F_{WFT} = 1,75 + 4,95 \cdot \left(\frac{v + 15}{100}\right)^2$$

spez. Wagenzugwiderstandskraft:

$$f_{WFW} = 0,0015 + 0,0063 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2$$



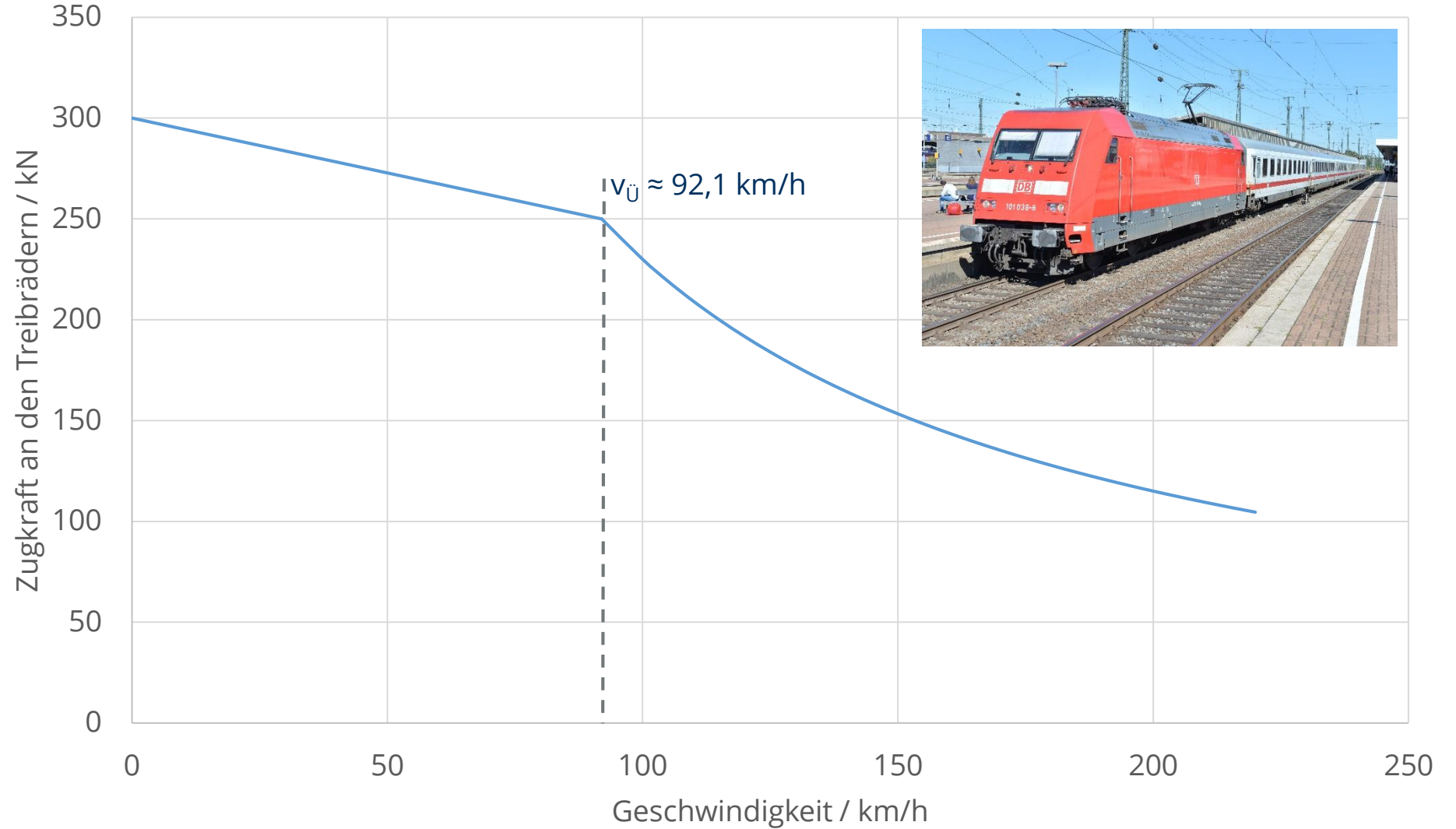
Wie sind folgende Fahrzustände zu beurteilen („wahrscheinlich erreichbar“ vs. „wahrscheinlich nicht erreichbar“)?

**Fall A:  $v = 60$  km/h in der Ebene?**

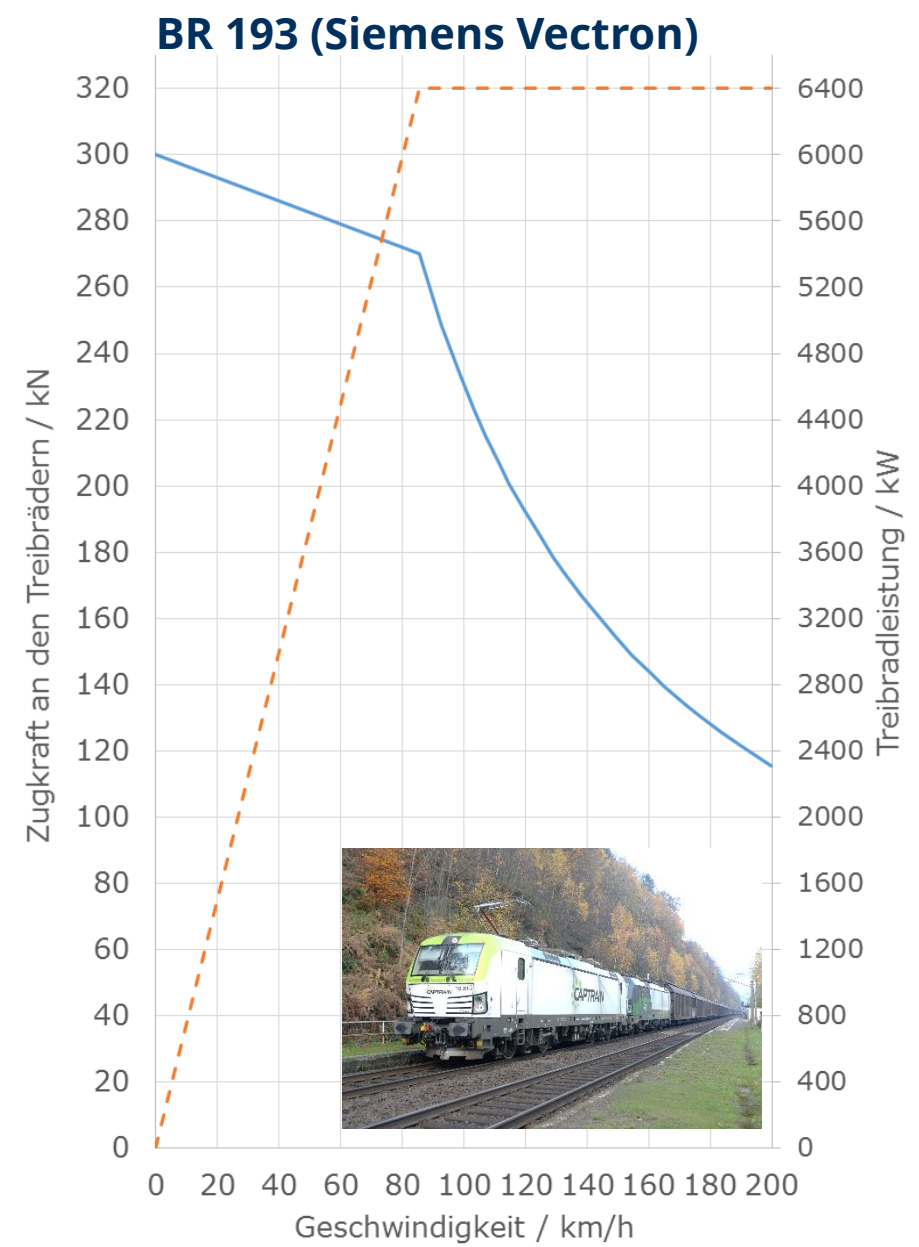
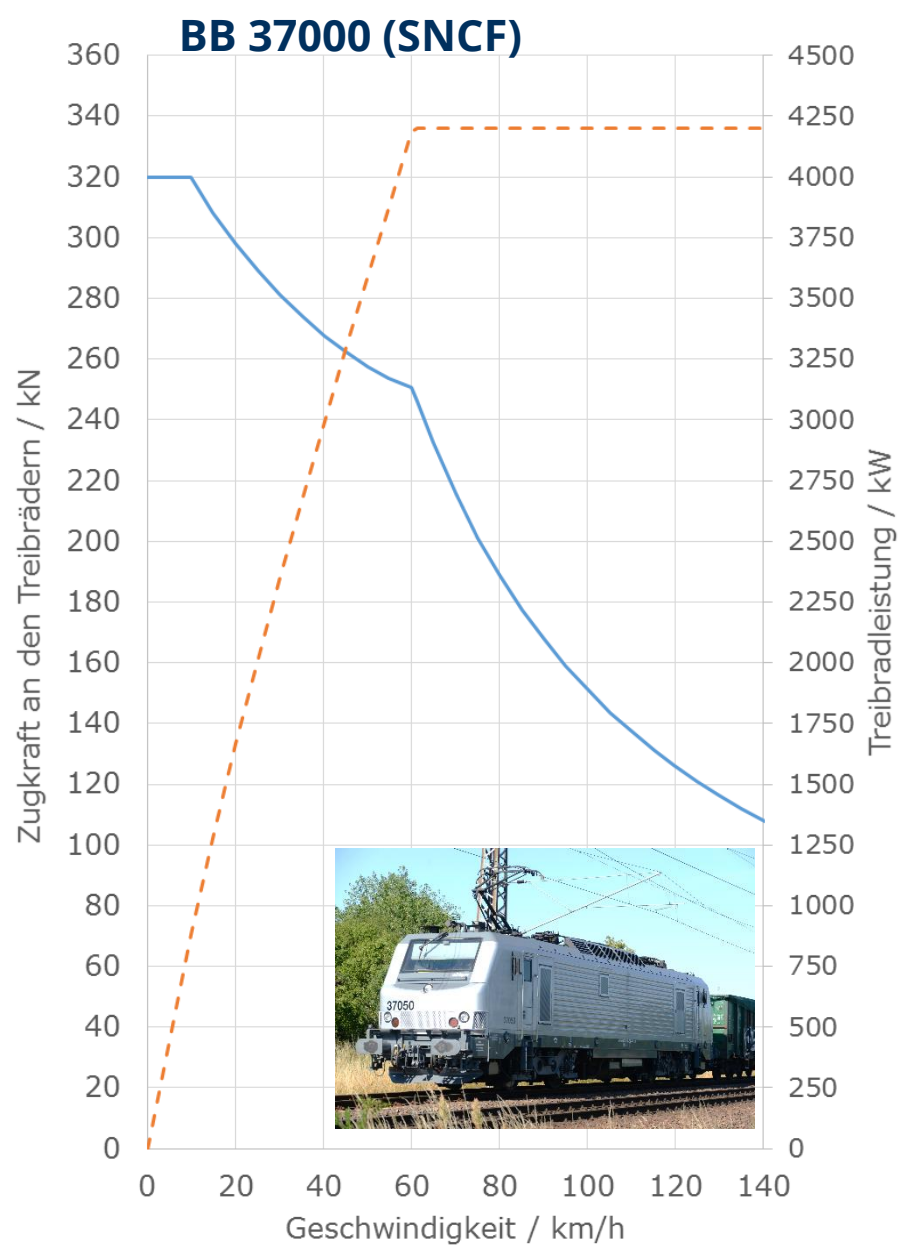
**Fall B:  $v = 60$  km/h in 3 Promille Steigung?**

# Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramm

Beispiel: BR 101

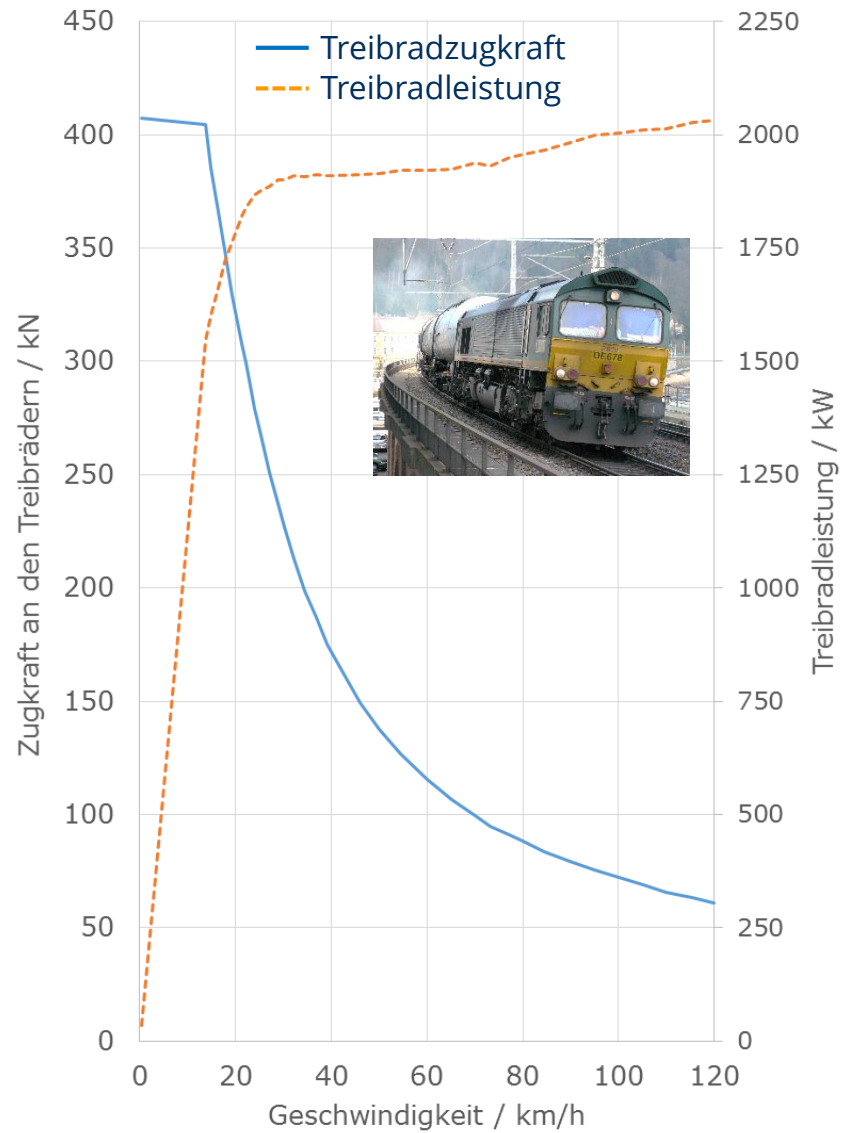


# Zugkraftdiagramme E-Traktion

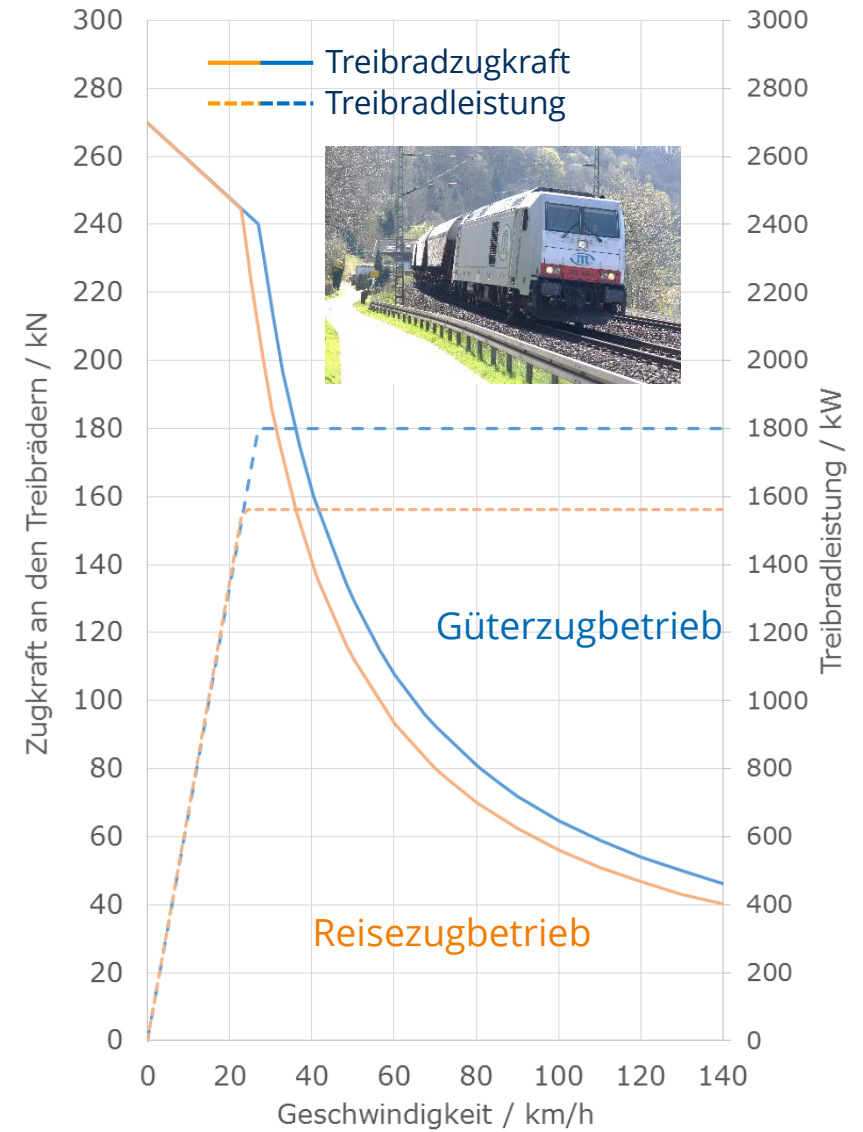


# Zugkraftdiagramme Dieseltraktion

## BR 247 (class 66)



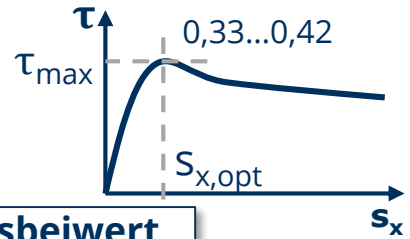
## Traxx F140 DE / P160 DE



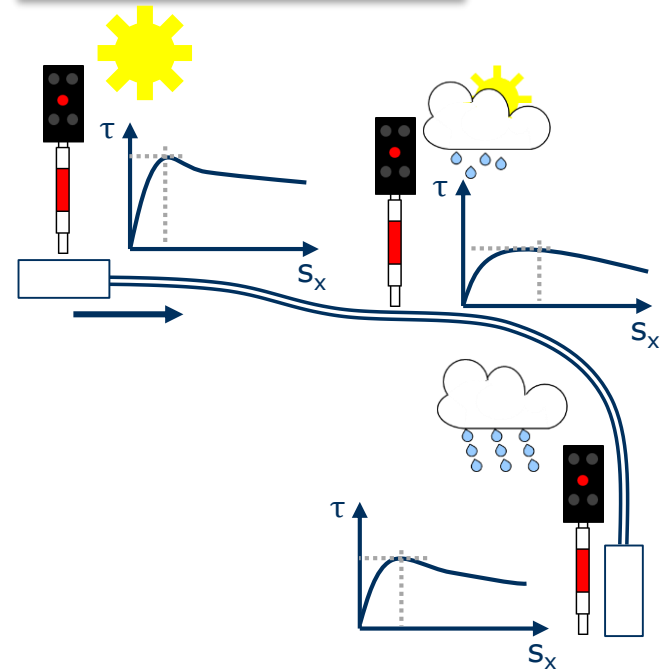
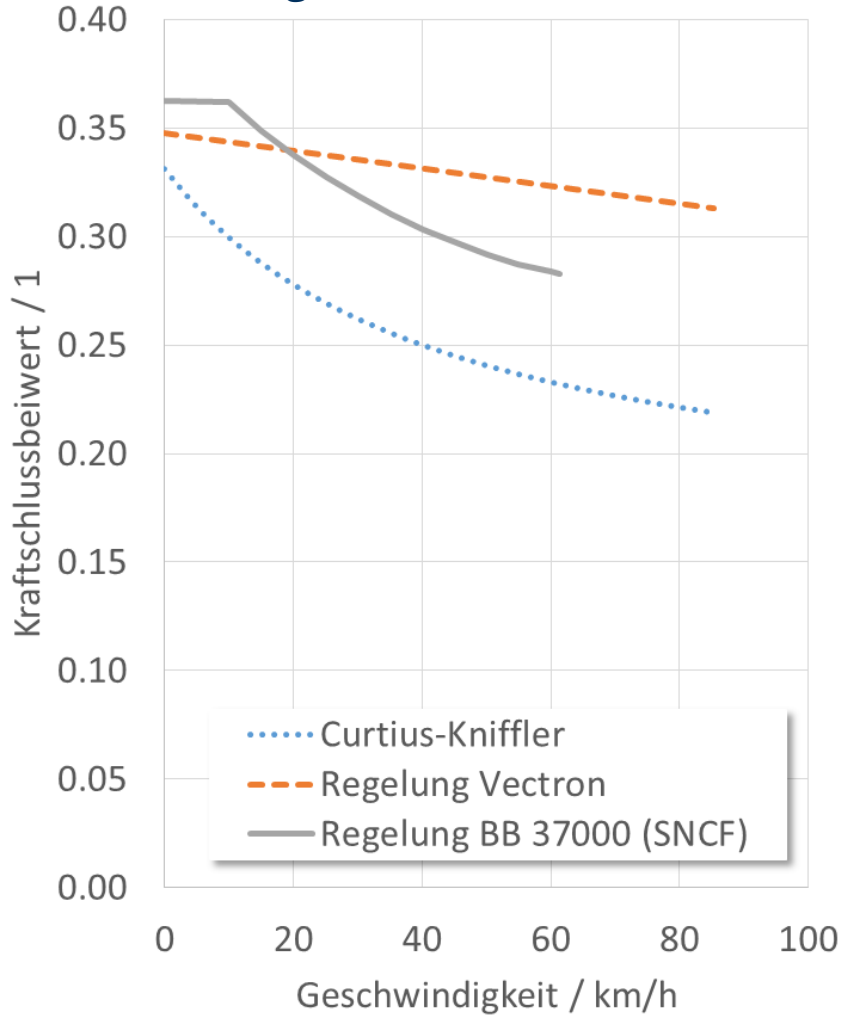
$$F_{T,max} = \Sigma(Q_{Ti} \cdot \tau)$$

Radsatzlast

Kraftschlussbeiwert



ausgenutzter Kraftschluss



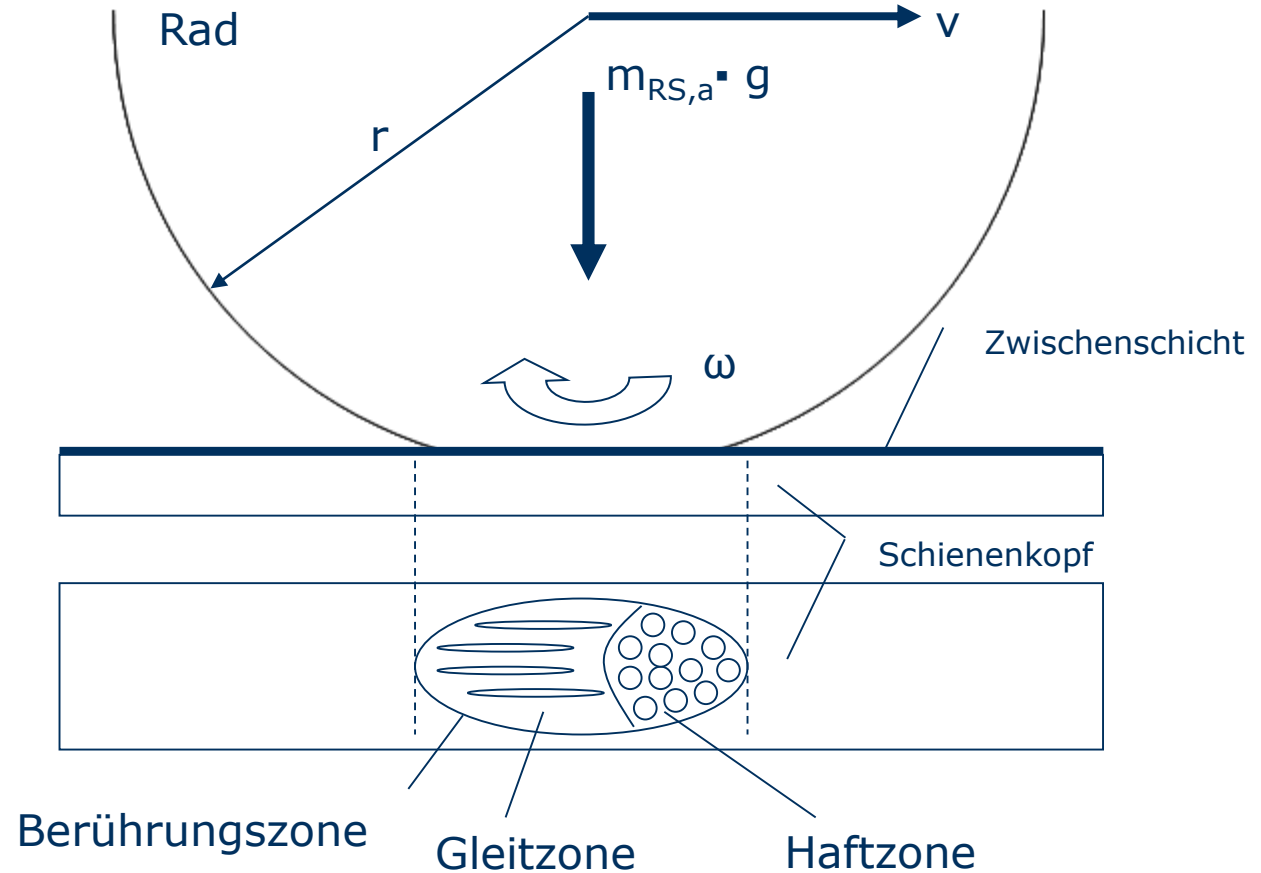
Kompensationsmaßnahmen:

- Sandungseinrichtung
- Radsatzschlupfregelung

# Kraftschlussmechanismus

**Definition  
Längsschlupf:**

$$s_x = \frac{\omega r - v}{v}$$



# Anfahrzugkraft und Fahrzeugtyp, Teil 1

## Vossloh G 1206



installierte DM-Leistung: 1500 kW

Tfz-Masse: 88 t

Anfahrzugkraft: 293 kN (Rangiergang)

Kraftschlussausnutzung: 0,34

## BR 152 (DB AG)



installierte Leistung: 6400 kW

Tfz-Masse: 87 t

Anfahrzugkraft: 300 kN

Kraftschlussausnutzung: 0,35

# Anfahrzugkraft und Fahrzeugtyp, Teil 2

## BR 232 (DB AG)



|                           |                 |
|---------------------------|-----------------|
| installierte DM-Leistung: | 2200 kW         |
| Tfz-Masse:                | 123 t           |
| Anfahrzugkraft:           | 295 kN (310 kN) |
| Kraftschlussausnutzung:   | 0,24 (0,26)     |
| Fahrmotortyp:             | ED 118          |

## BR 241 (DB AG)



|                           |         |
|---------------------------|---------|
| installierte DM-Leistung: | 2940 kW |
| Tfz-Masse:                | 127 t   |
| Anfahrzugkraft:           | 450 kN  |
| Kraftschlussausnutzung:   | 0,36    |
| Fahrmotortyp:             | ED 133  |

# Anfahrzugkraft und Fahrzeugtyp, Teil 3



300 kN  
84 t

$\tau = 0,36$



235 kN  
80 t

$\tau = 0,30$



534 kN  
129 t

$\tau = 0,42$



360 kN  
122 t

$\tau = 0,30$



118 kN  
49 t

$\tau = 0,25$



1400 kN  
360 t

$\tau = 0,40$



300 kN  
210\* t

$\tau = 0,15$



192 kN  
86\* t

$\tau = 0,23$



272 kN  
80t

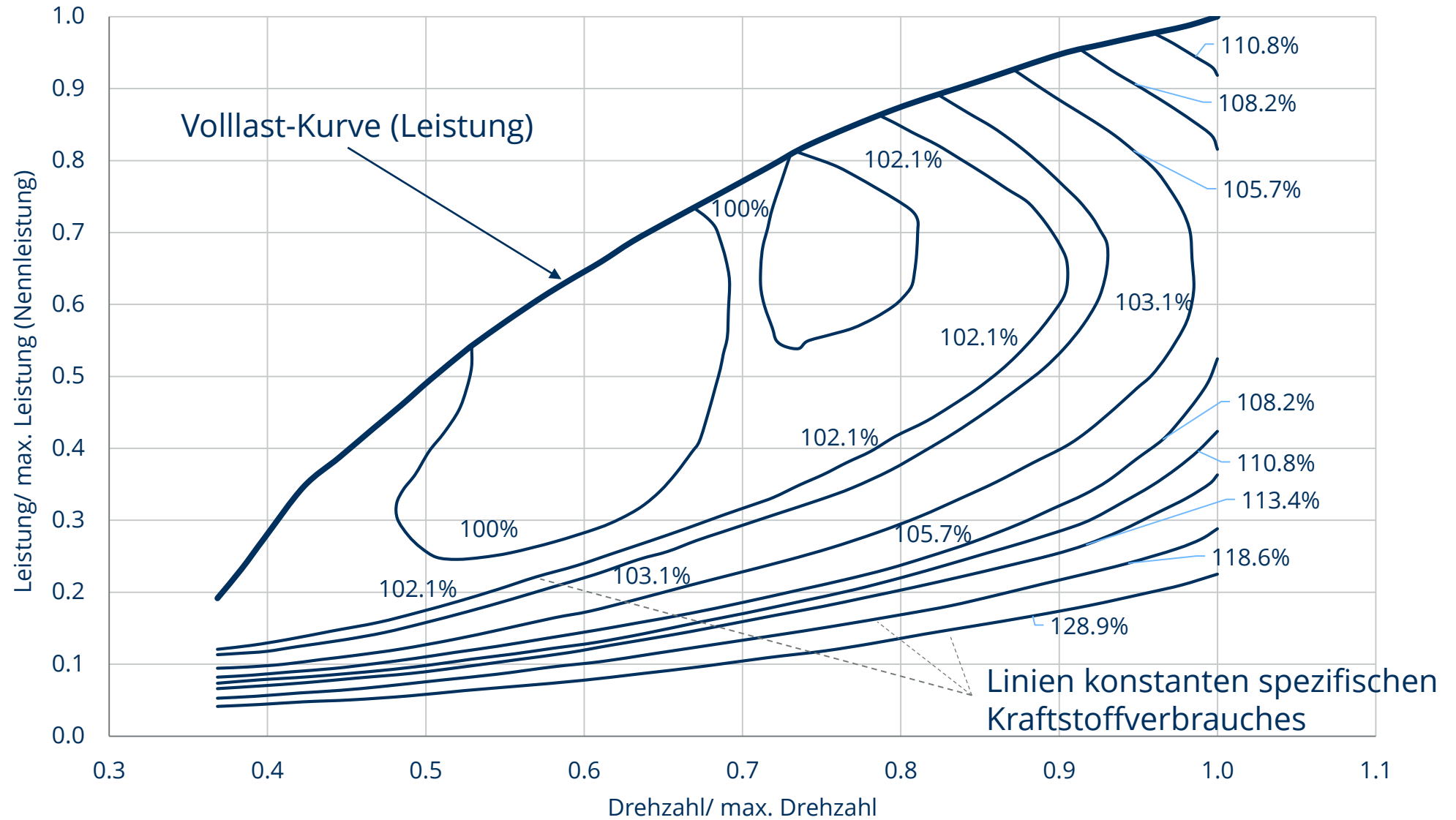
$\tau = 0,35$

\* Masse auf angetriebenen Radsätzen

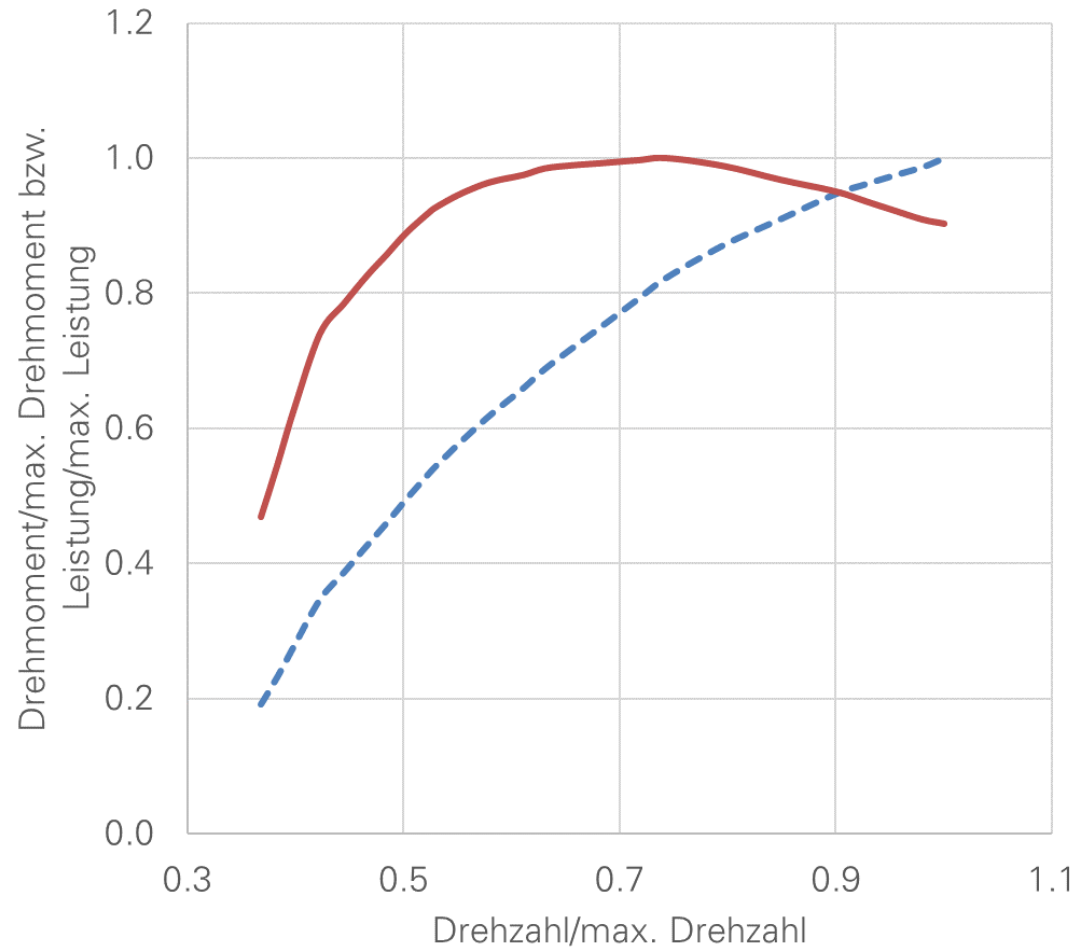
\* Masse auf angetriebenen Radsätzen

# Dieselmotor

Bsp. Triebwagenmotor

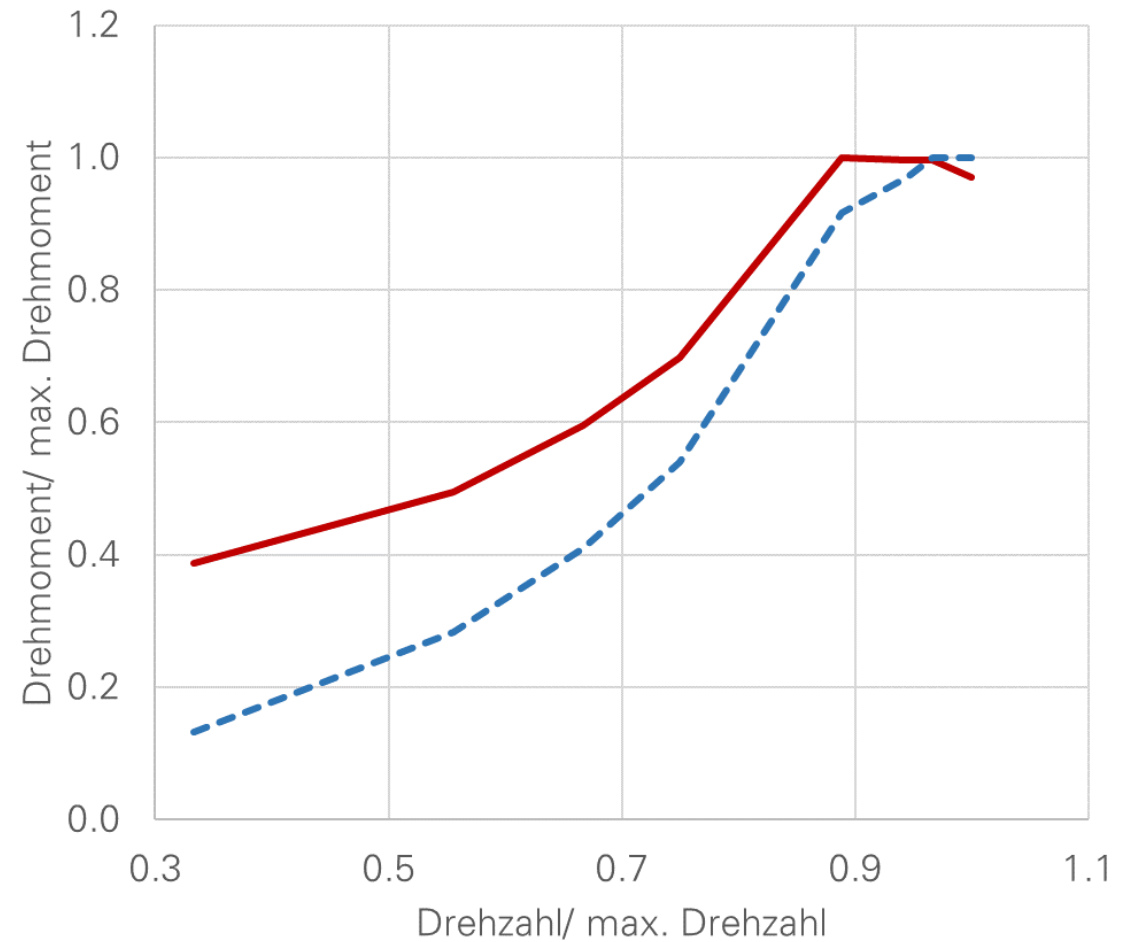


# Leistungs- und Drehmomentcharakteristik von Dieselmotoren



--- P/P\_max    — M/M\_max

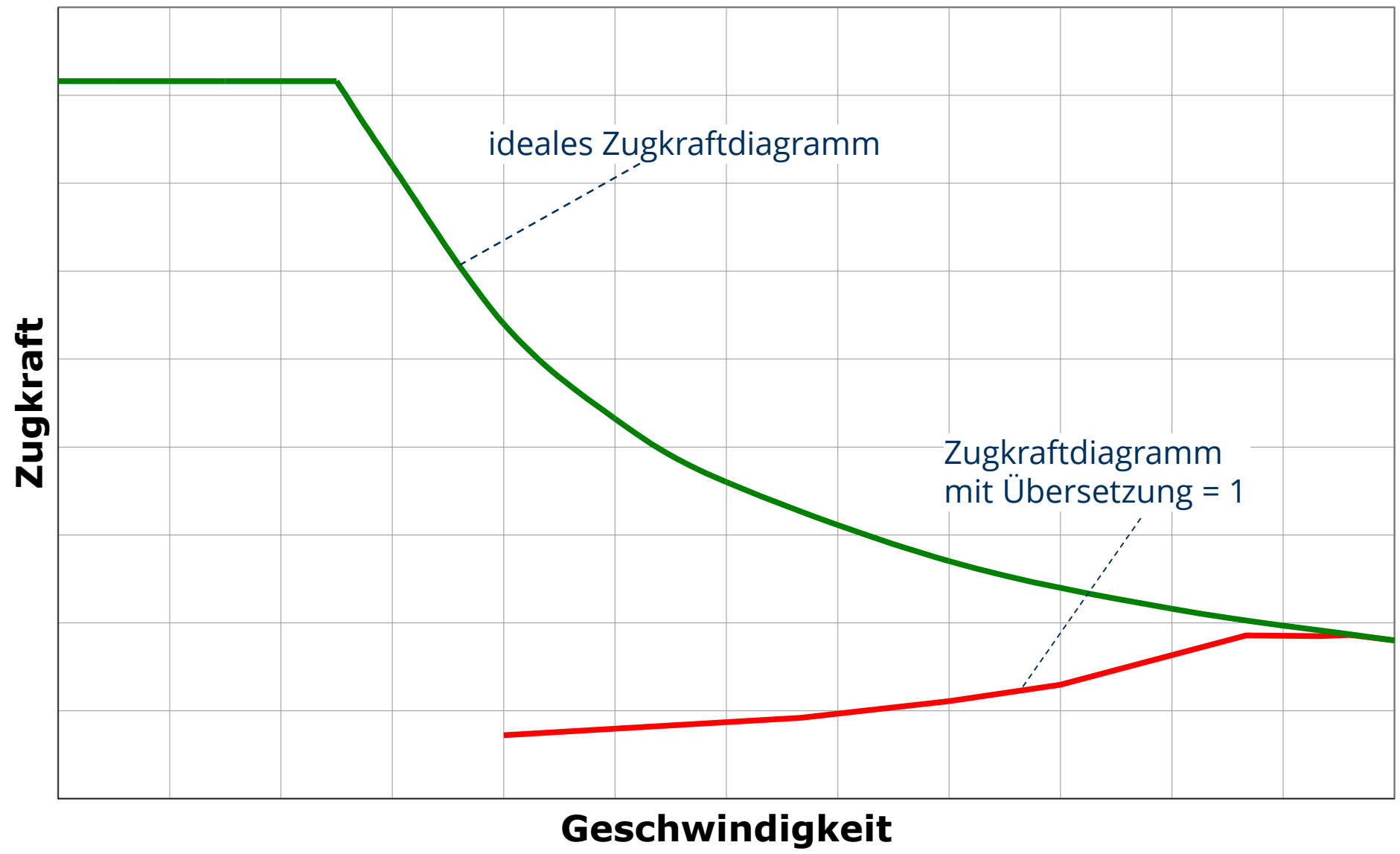
Triebwagenmotor



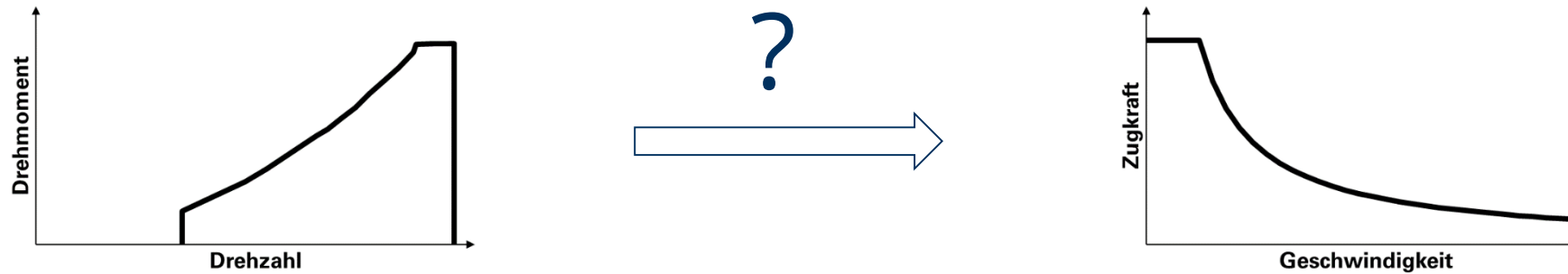
— M/M\_max    --- P/P\_max

Lokmotor

# Notwendigkeit einer Leistungsübertragung

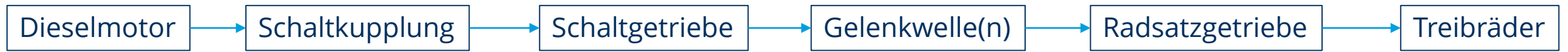


# Fahrdynamische Anforderungen an eine Leistungsübertragung



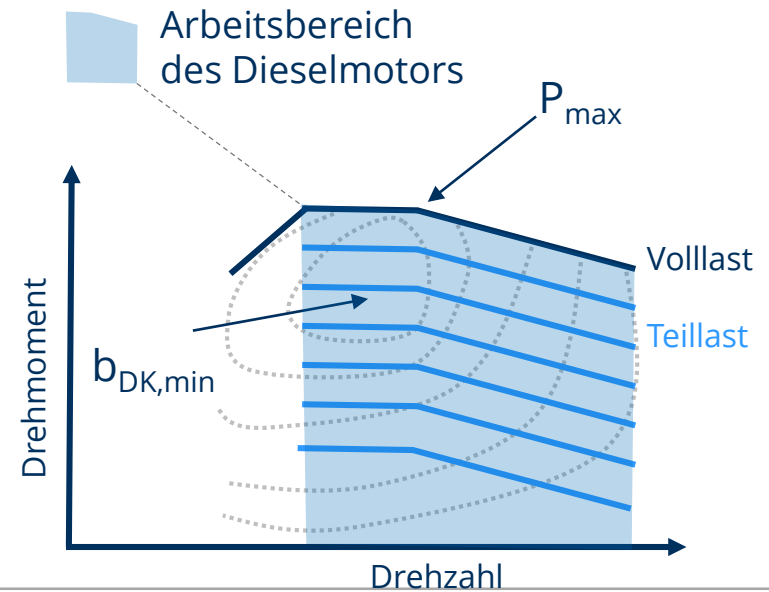
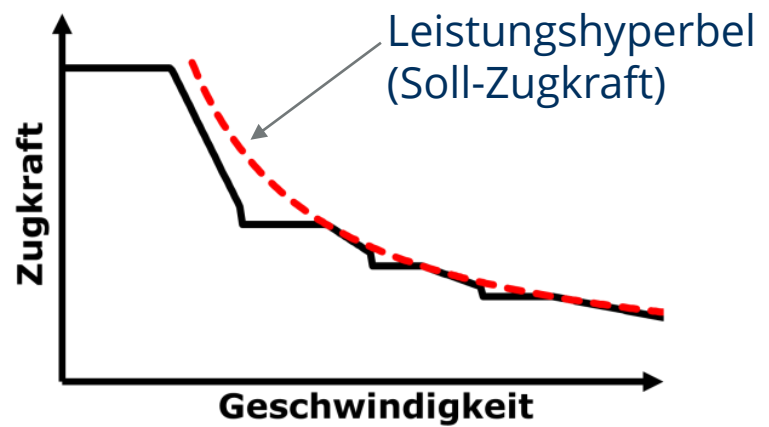
1. Verschleißfreie Anfahrmöglichkeit
2. Generierung hoher Zugkräfte (mindestens: bei kleinen Geschwindigkeiten)
3. Zugkraftentwicklung entlang der Leistungshyperbel und ohne Unstetigkeiten
4. dauerhafte Ausnutzung der Dieselmotorleistung ( $v \neq n_{DM}$ )
5. stufenlose Zugkraftregelung
6. Ermöglichung einer selektiven Radsatzschlupfregelung
7. Ermöglichung eines energetisch günstigen Betriebs des Dieselmotors (Primärkennlinie)
8. hoher Übertragungswirkungsgrad über weiten Drehzahl- und Drehmomentbereich
9. thermische Robustheit bei Vollast und kleinen Geschwindigkeiten
10. Umkehr des Leistungsflusses bei Bremsvorgängen ermöglichen (dynamische Bremse)

# Mechanische Leistungsübertragung



Drehmoment:  $M_{ab} = \eta_{SK} \cdot M_{an}$       $M_{ab} = \eta_{SG} \cdot i_{SG} \cdot M_{an}$       $M_{ab} = \eta_{Gw} \cdot M_{an}$       $M_{ab} = \eta_{RG} \cdot i_{RG} \cdot M_{an}$       $F_T = \frac{M_{an}}{r_T}$

Drehzahl:  $n_{Ab} = 0 \dots n_{an}$       $n_{Ab} = \frac{n_{an}}{i_{SG}}$       $n_{Ab} = n_{an}$       $n_{Ab} = \frac{n_{an}}{i_{RG}}$       $v = 2\pi n_{an} \cdot r_T$



$v \sim n_{DM}$

$F_T \sim M_{DM}$

$P_T \neq const.$

$P_{DM,max}$  punktuell



Bsp: Schienenbus

# Wahl geeigneter Getriebestufungen

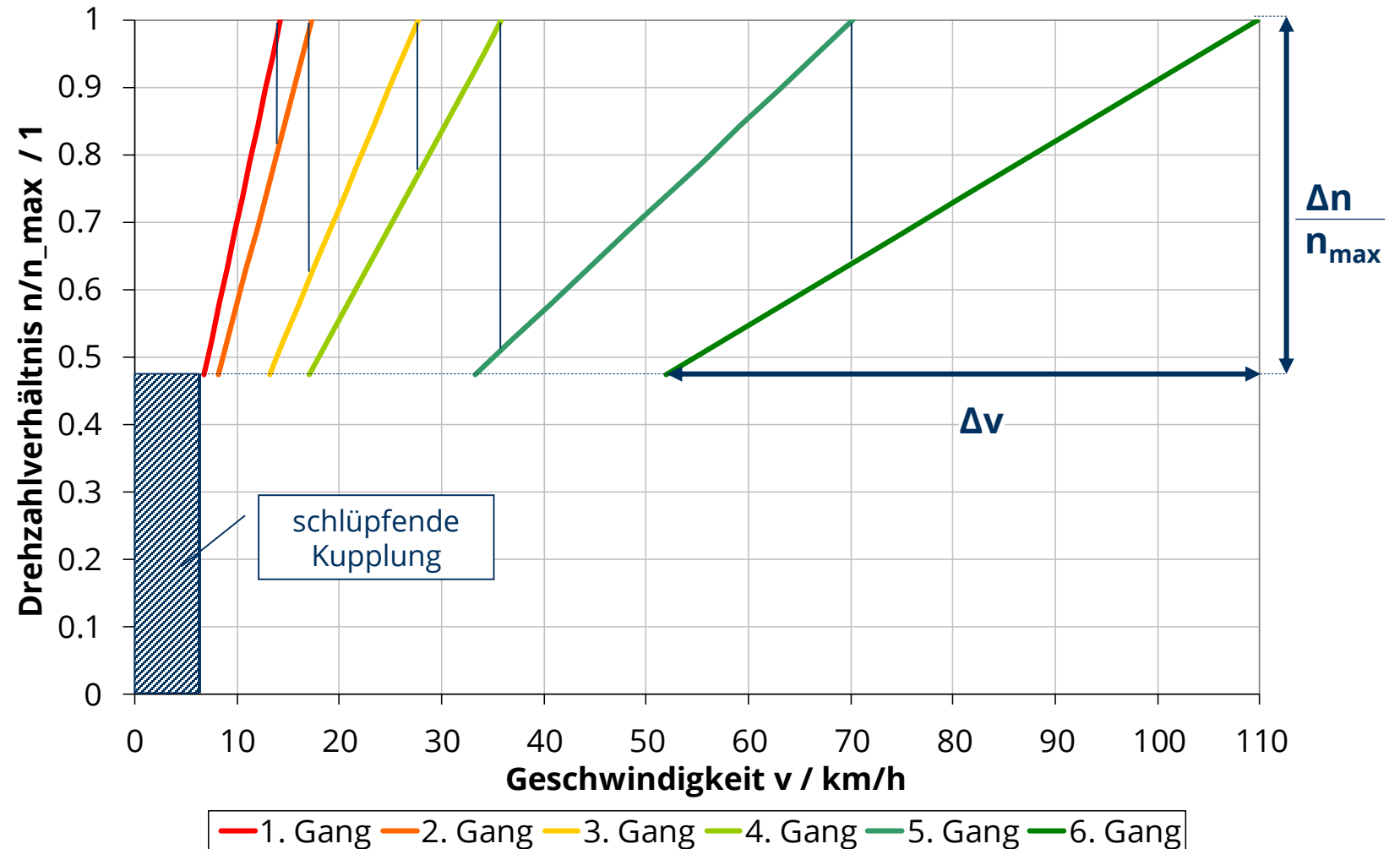
## Schaltdiagramm 6-Gang-Getriebe

Radius der Treibräder

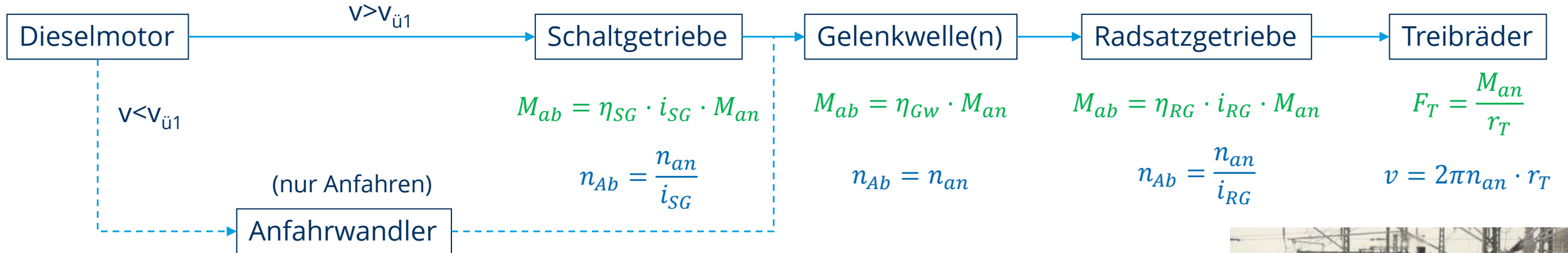
$$v = \frac{2\pi r_T}{i_{ges}} n_{DM}$$

Übersetzung von  
Schalt- und  
Radsatzgetriebe

Dieselmotor-  
drehzahl



# Hydromechanische Leistungsübertragung



$$M_{ab} = \eta_{SG} \cdot i_{SG} \cdot M_{an}$$

$$n_{Ab} = \frac{n_{an}}{i_{SG}}$$

$$M_{ab} = \eta_{Gw} \cdot M_{an}$$

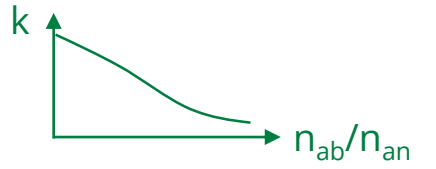
$$n_{Ab} = n_{an}$$

$$M_{ab} = \eta_{RG} \cdot i_{RG} \cdot M_{an}$$

$$n_{Ab} = \frac{n_{an}}{i_{RG}}$$

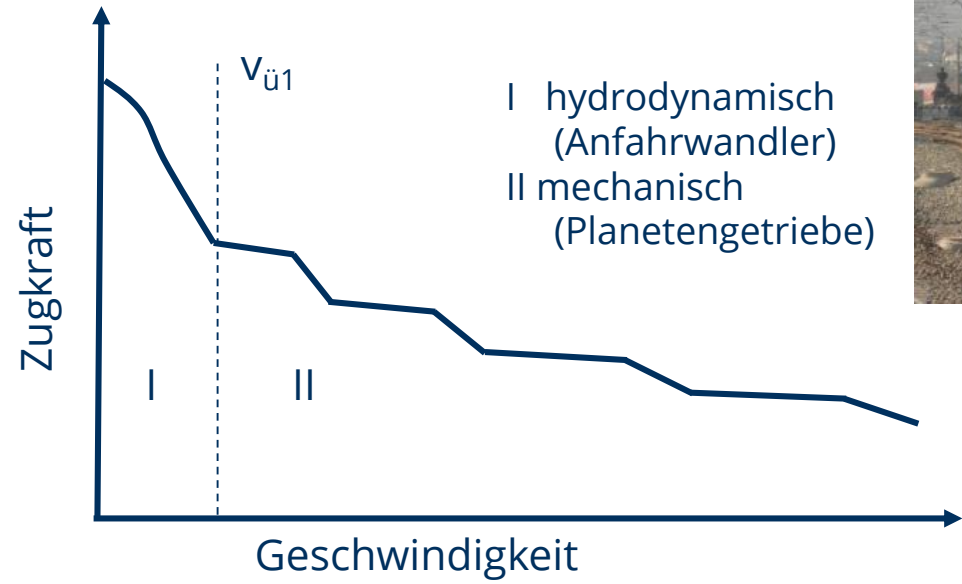
$$F_T = \frac{M_{an}}{r_T}$$

$$v = 2\pi n_{an} \cdot r_T$$

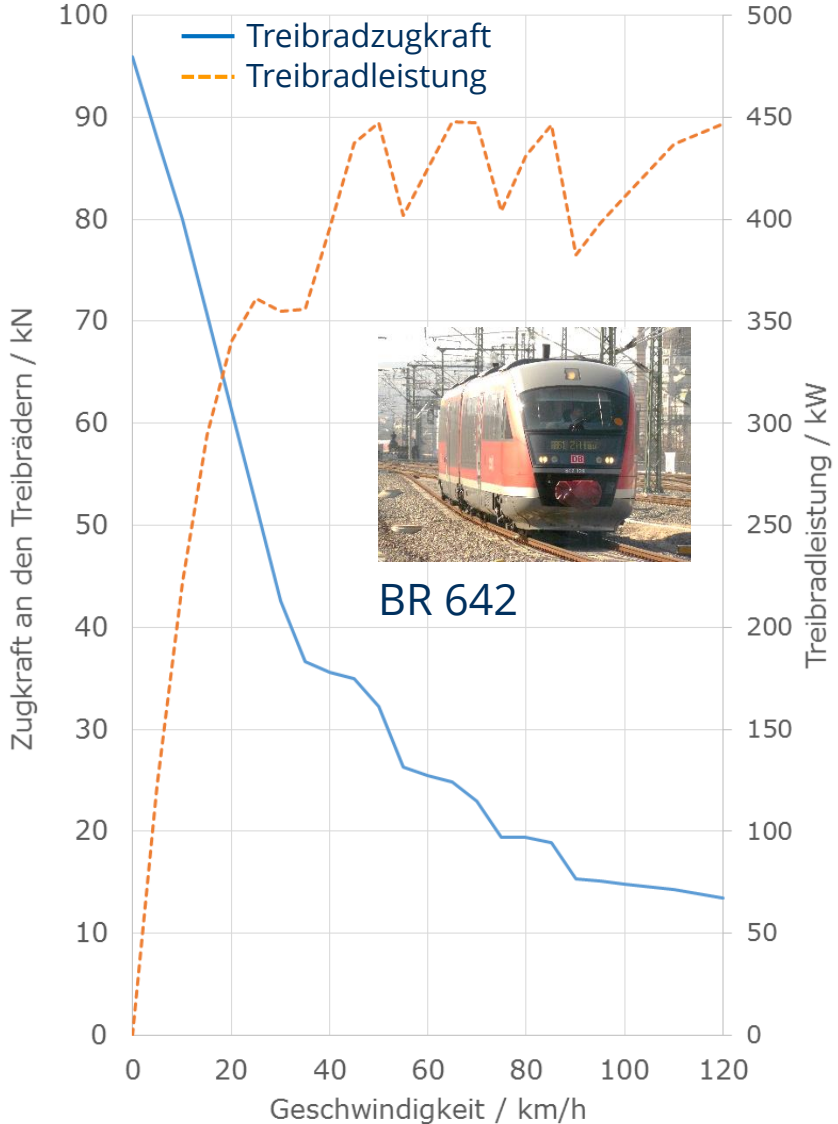


$$M_{ab} = k \left( \frac{n_{ab}}{n_{an}} \right) \cdot M_{an}$$

$$n_{Ab} = 0 \dots n_{an}$$



# Zugkraftdiagramme Diesel-hydraulische Fahrzeuge



BR 642

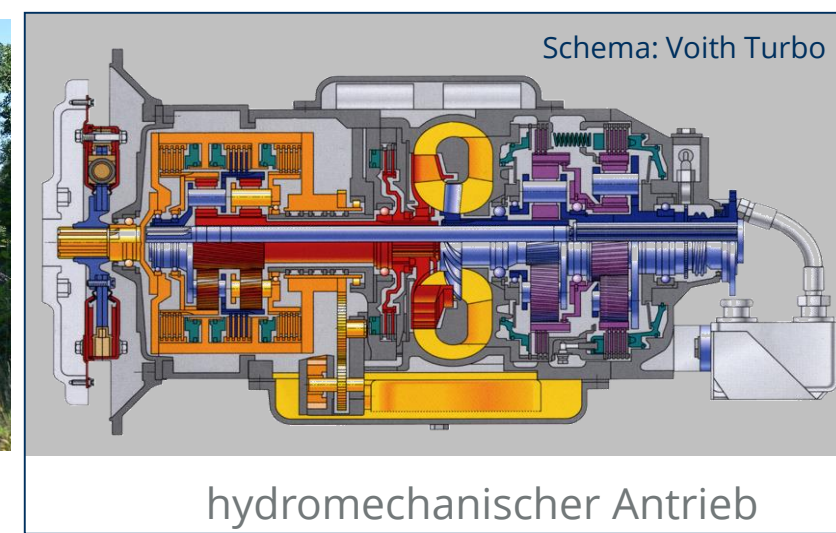


BR 650

# Hydromechanische Leistungsübertragung



Beispiel: BR 642 (Desiro)



- ✓ 1. Verschleißfreie Anfahrmöglichkeit
- ✓ 2. Generierung hoher Zugkräfte (mindestens: bei kleinen Geschwindigkeiten)
- ✗ 3. Zugkraftentwicklung entlang der Leistungshyperbel und ohne Unstetigkeiten
- ✗ 4. dauerhafte Ausnutzung der Dieselmotorleistung ( $v \neq n_{DM}$ )
- ✓ 5. stufenlose Zugkraftregelung
- ✗ 6. Ermöglichung einer selektiven Radsatzschlupfregelung
- ✗ 7. Ermöglichung eines energetisch günstigen Betriebs des Dieselmotors (Primärkennlinie)
- ✓ 8. hoher Übertragungswirkungsgrad über weiten Drehzahl- und Drehmomentbereich
- ✗ 9. thermische Robustheit bei Vollast und kleinen Geschwindigkeiten
- ✓ 10. Umkehr des Leistungsflusses bei Bremsvorgängen ermöglichen (dynamische Bremse)

# Hydrodynamische Leistungsübertragung

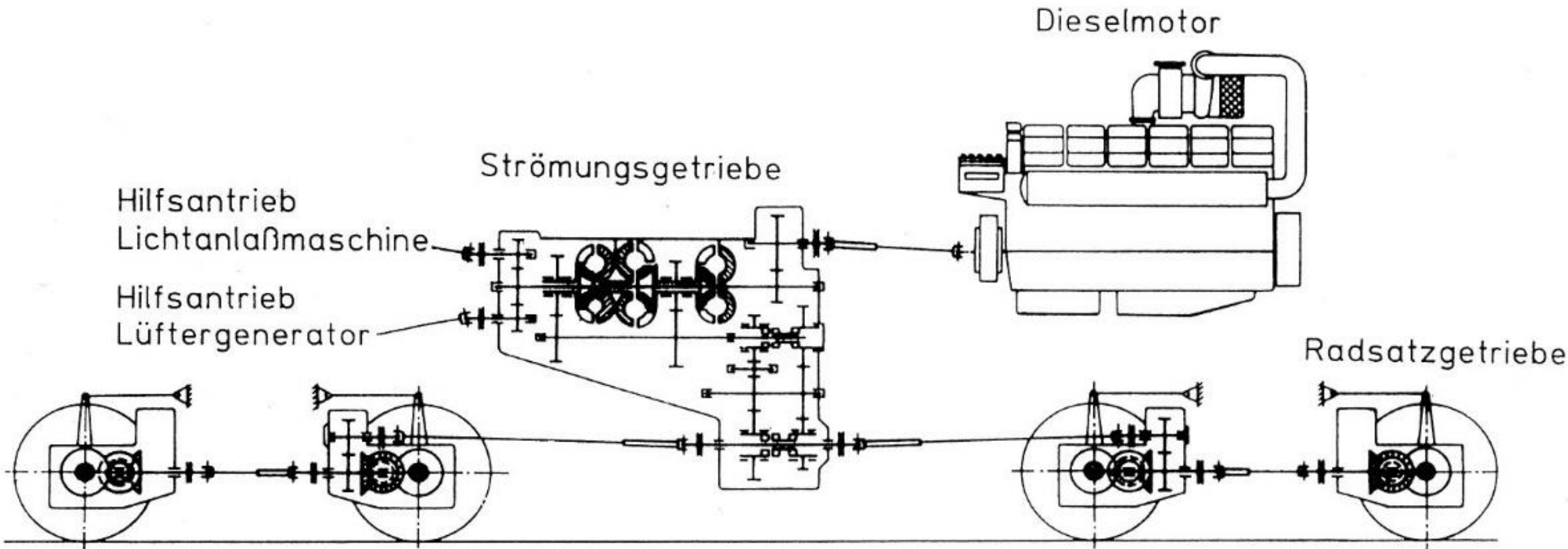
Bsp. 1:

Vossloh  
G 1206

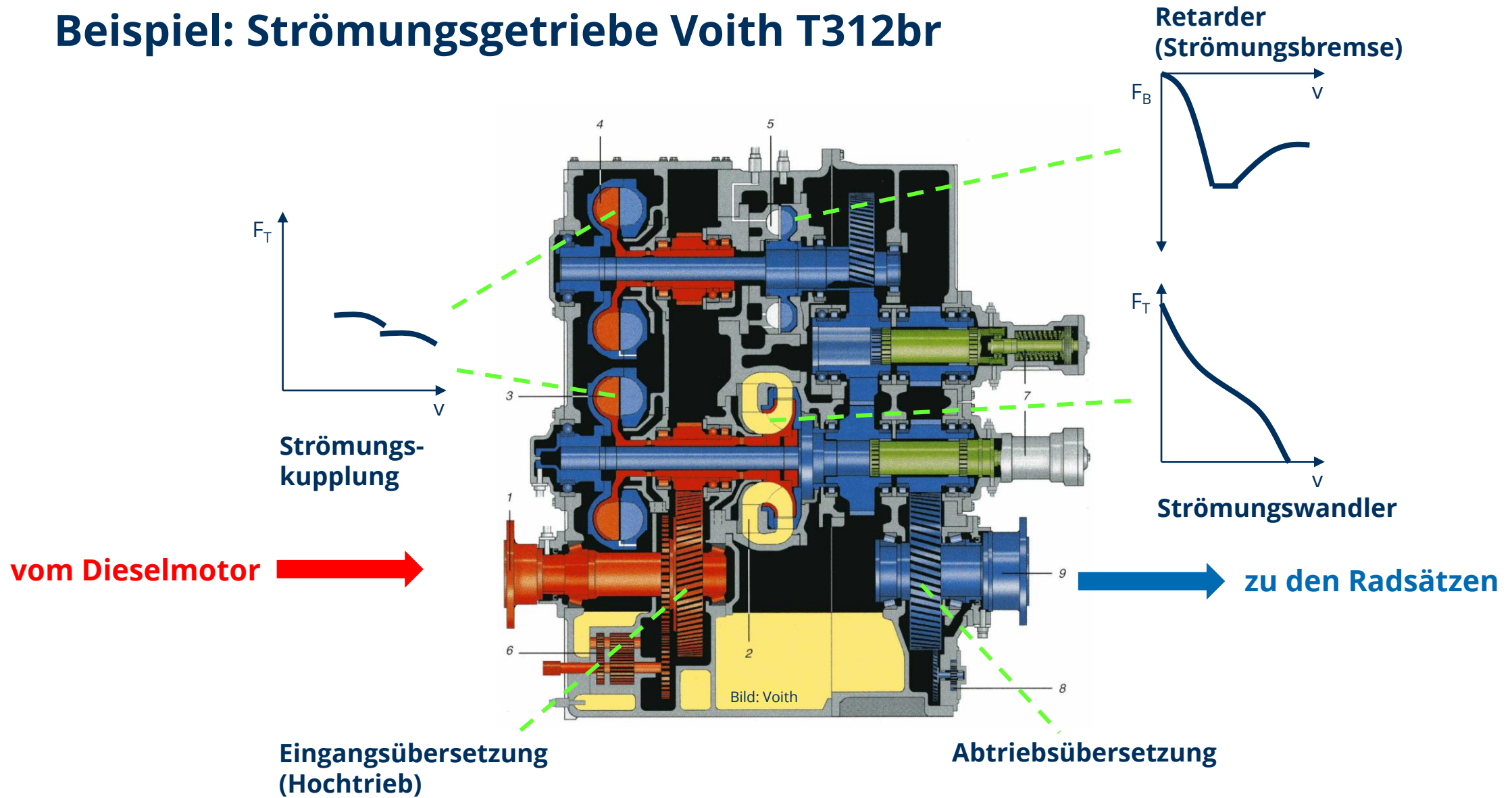


Bsp. 2:

BR 612

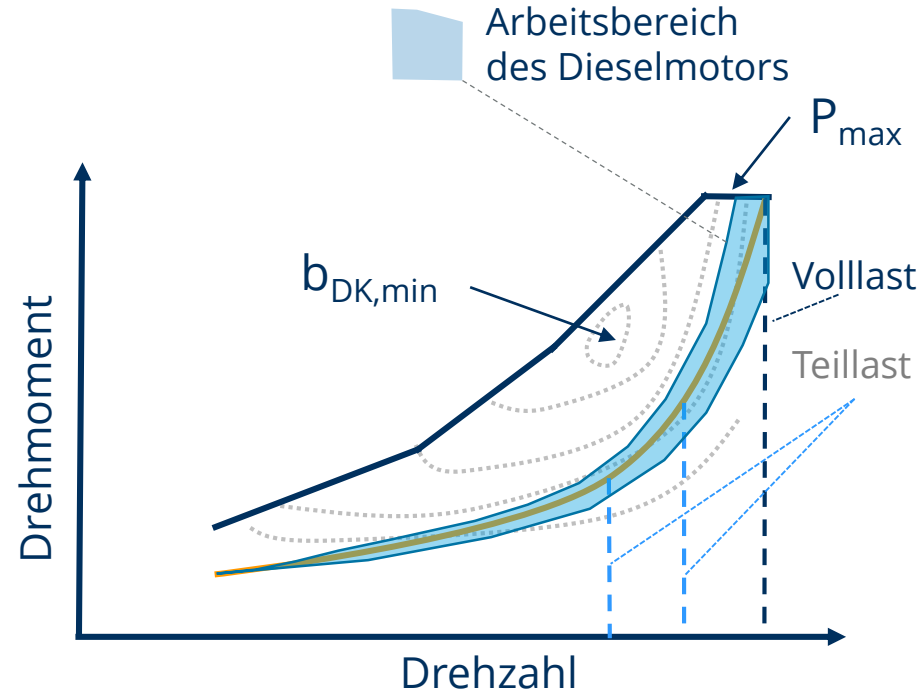
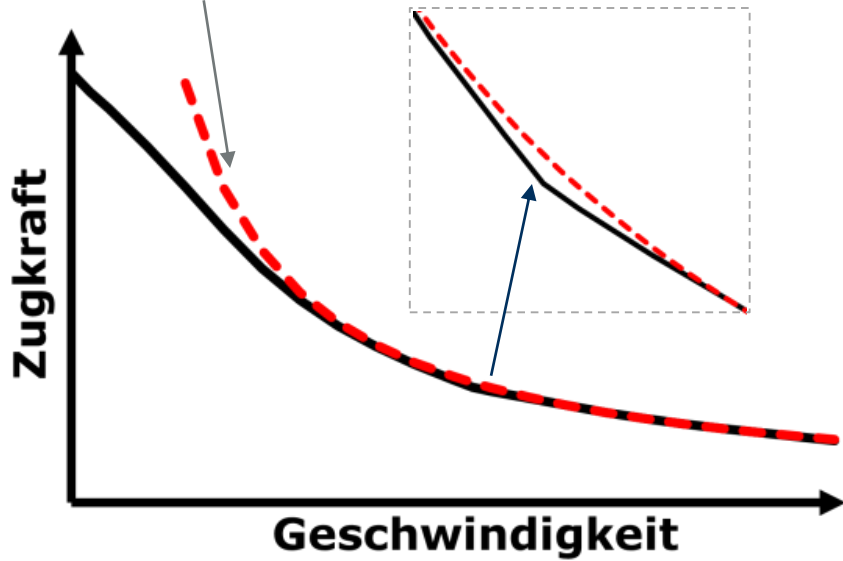


# Beispiel: Strömungsgetriebe Voith T312br



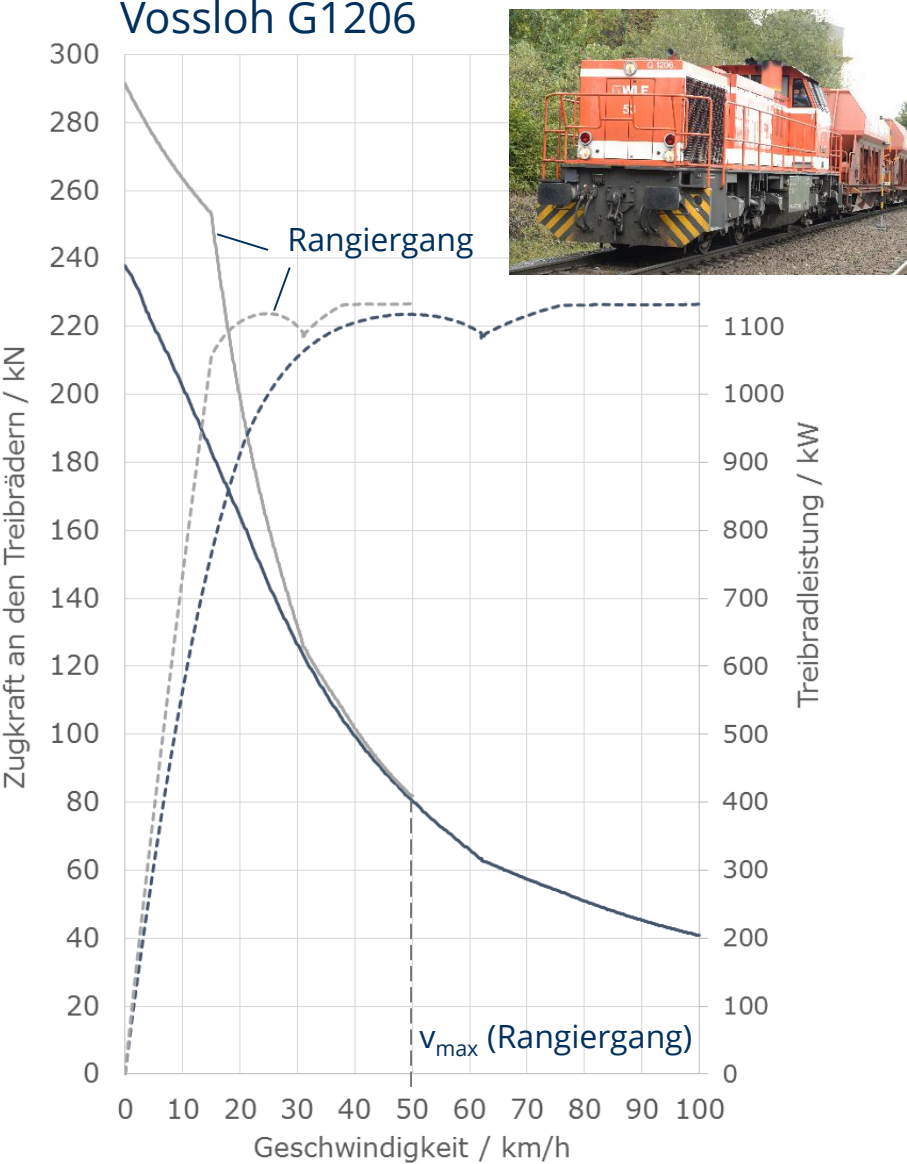
# Charakterisierung der hydrodynamischen Leistungsübertragung

Leistungshyperbel  
(Soll-Zugkraft)



- $v \neq n_{DM}$
- $F_T \neq M_{DM}$
- $P_T \neq \text{const.}$
- $P_{DM,max}$  dauerhaft

# Zugkraftdiagramme Diesel-hydrodynamische Fahrzeuge



# Hydrodynamische Leistungsübertragung



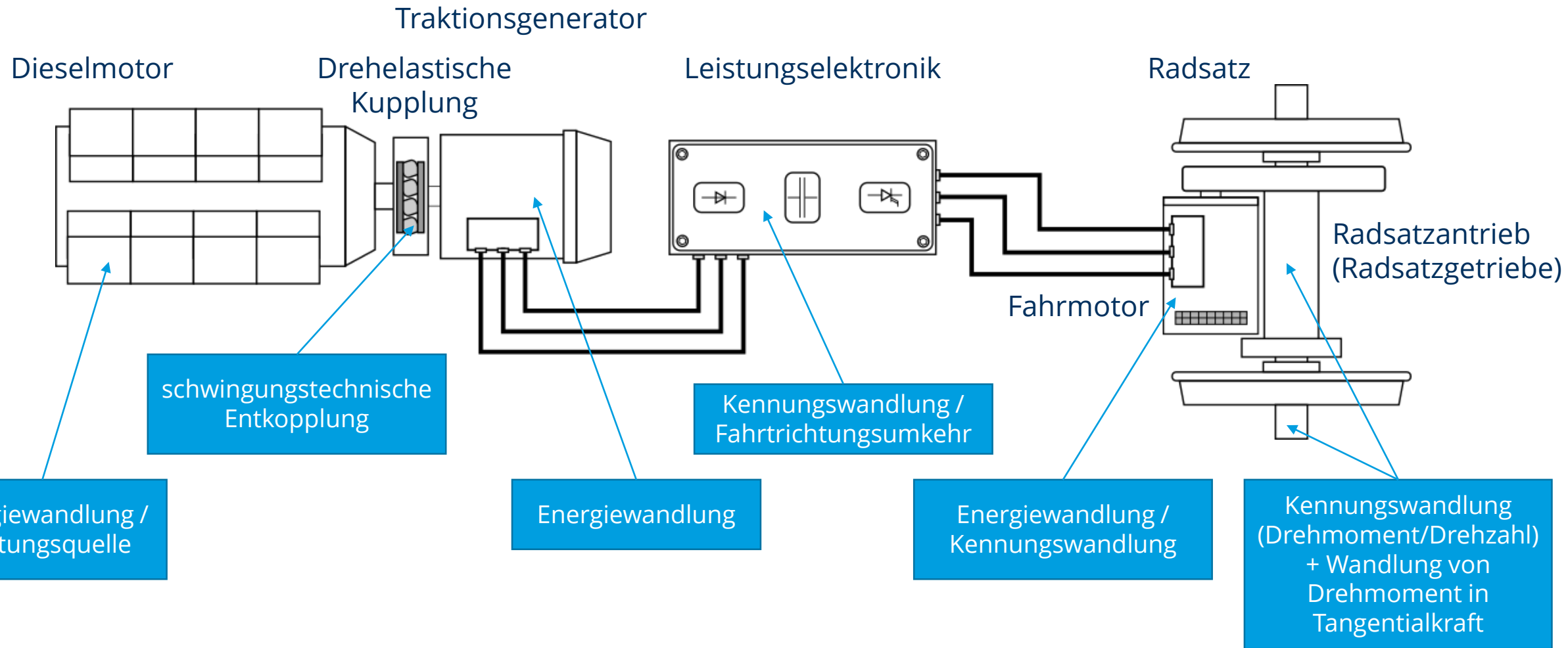
Beispiel 1: Vossloh G 1206



Beispiel2: BR 612

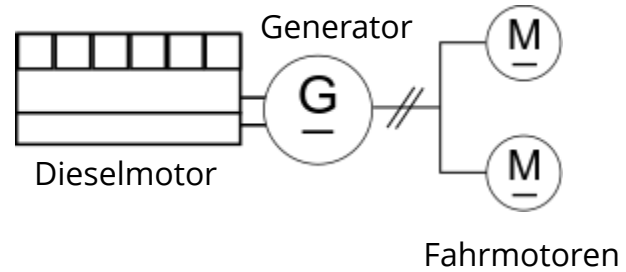
- ✓ 1. Verschleißfreie Anfahrmöglichkeit
- ✓ 2. Generierung hoher Zugkräfte (mindestens: bei kleinen Geschwindigkeiten)
- ✗ 3. Zugkraftentwicklung entlang der Leistungshyperbel und ohne Unstetigkeiten
- ✓ 4. dauerhafte Ausnutzung der Dieselmotorleistung (nur bei Verwendung von Wandlern)
- ✓ 5. stufenlose Zugkraftregelung
- ✓ 6. Ermöglichung einer selektiven Radsatzschlupfregelung
- ✓ 7. Ermöglichung eines energetisch günstigen Betriebs des Dieselmotors (Primärkennlinie)
- ✓ 8. hoher Übertragungswirkungsgrad über weiten Drehzahl- und Drehmomentbereich
- ✗ 9. thermische Robustheit bei Vollast und kleinen Geschwindigkeiten
- ✓ 10. Umkehr des Leistungsflusses bei Bremsvorgängen ermöglichen (dynamische Bremse)

# Aufbau elektrischer Leistungsübertragungsanlagen



# Elektrische Leistungsübertragung

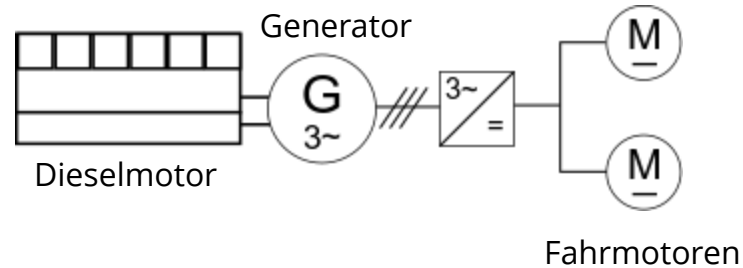
## Prinzipielle Topologien:



DC-DC



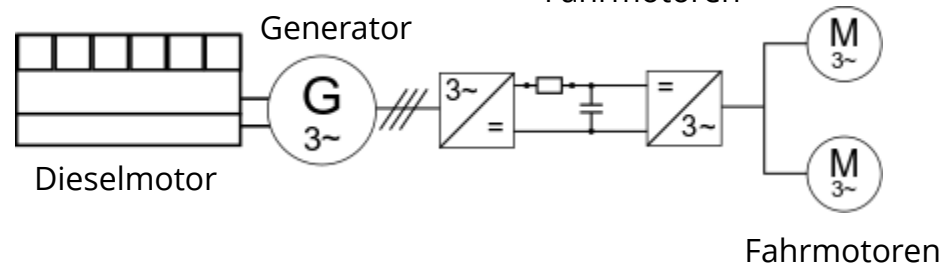
Heute in der westlichen Welt fast verschwunden.



AC-DC



Bei älteren Bestandsfahrzeugen sowie in Amerika von Bedeutung.



AC-AC

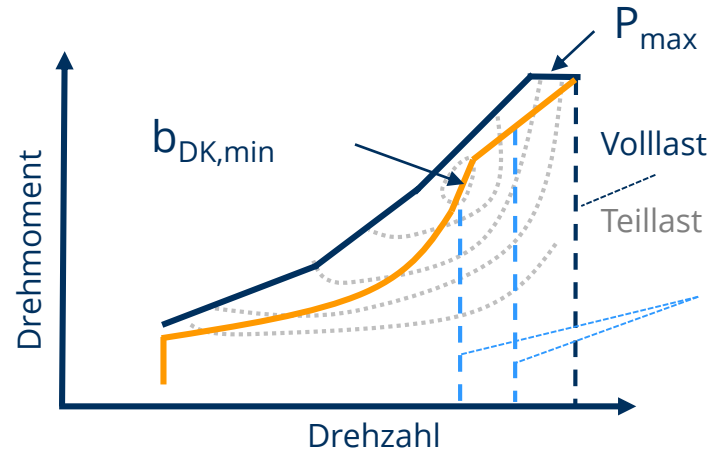
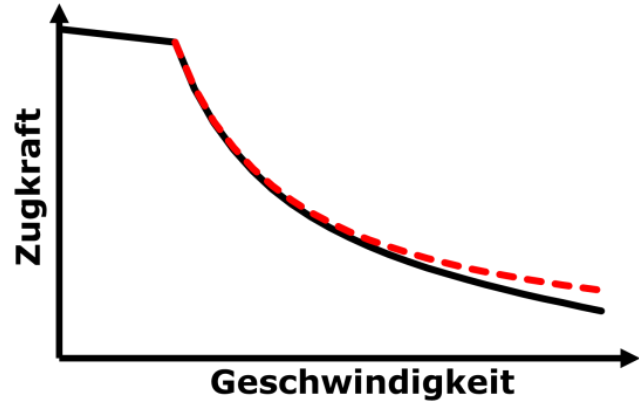


Stand der Technik

Die heute im Schienenfahrzeugbau am weitesten verbreiteten Fahrmotoren sind **Gleichstrom-Reihenschlussmotor** und **Drehstromasynchronmotor**

# Charakterisierung der hydrodynamischen Leistungsübertragung

## elektrische Lü (AC-DC)



$$v \neq n_{DM}$$

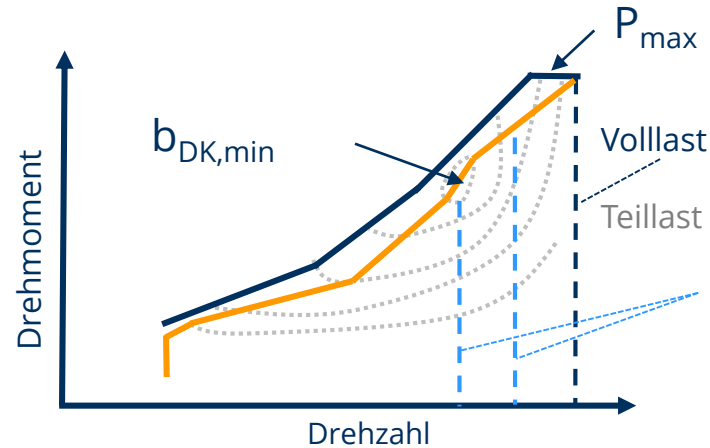
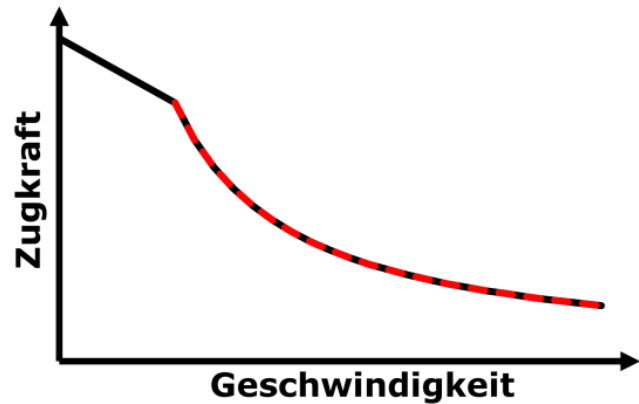
$$F_T \neq M_{DM}$$

$$P_T \neq \text{const.}$$

$$P_{DM,max} \text{ dauerhaft}$$



## elektrische Lü (AC-AC)



$$v \neq n_{DM}$$

$$F_T \neq M_{DM}$$

$$P_T = \text{const. (} v > v_{\ddot{u}} \text{)}$$

$$P_{DM,max} \text{ dauerhaft}$$



# Elektrische Leistungsübertragung



Beispiel 1: Traxx DE

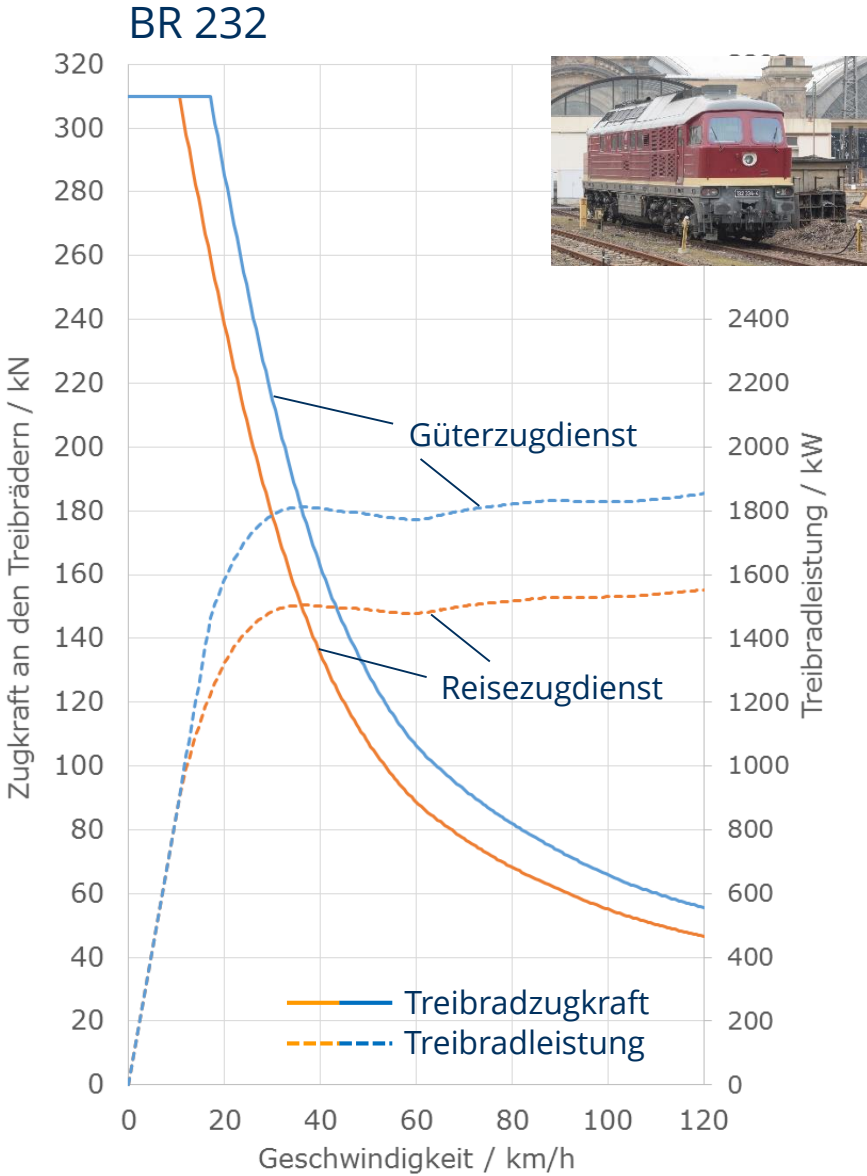
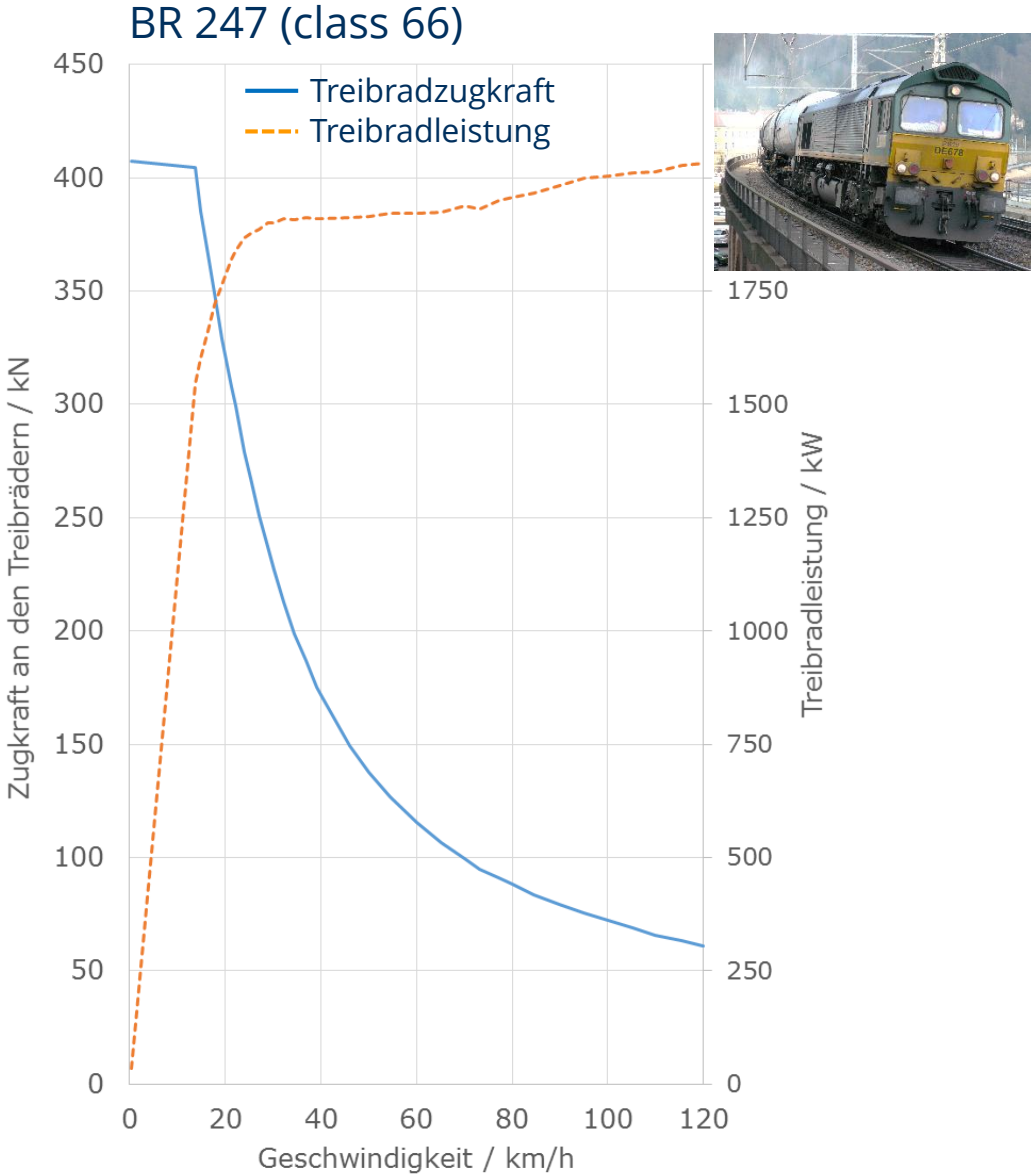


Beispiel2: class 66

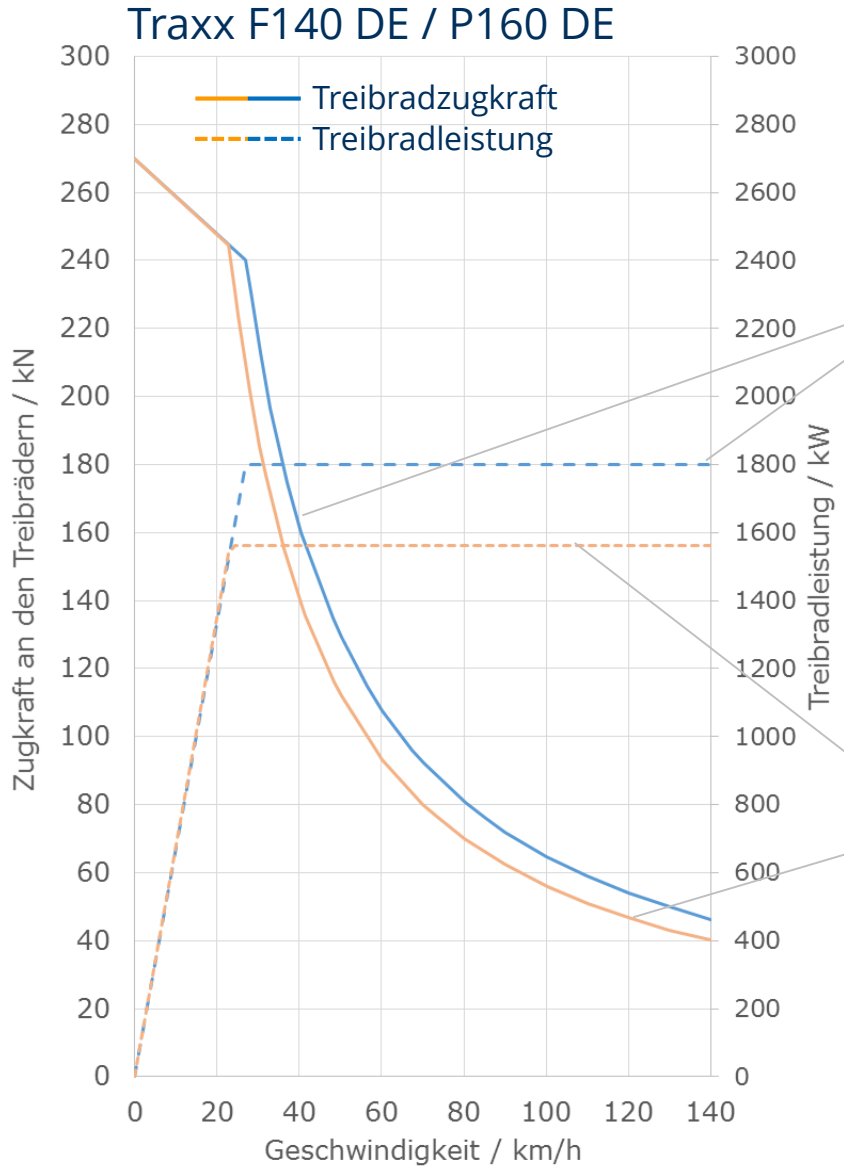
- ✓ 1. Verschleißfreie Anfahrmöglichkeit
- ✓ 2. Generierung hoher Zugkräfte (mindestens: bei kleinen Geschwindigkeiten)
- ✓ 3. Zugkraftentwicklung entlang der Leistungshyperbel (**nur DAT<sup>1</sup>**) und ohne Unstetigkeiten
- ✓ 4. dauerhafte Ausnutzung der Dieselmotorleistung (nur bei Verwendung von Wandlern)
- ✓ 5. stufenlose Zugkraftregelung
- ✓ 6. Ermöglichung einer selektiven Radsatzschlupfregelung
- ✓ 7. Ermöglichung eines energetisch günstigen Betriebs des Dieselmotors (Primärkennlinie)
- ✓ 8. hoher Übertragungswirkungsgrad über weiten Drehzahl- und Drehmomentbereich
- ✓ 9. thermische Robustheit bei Vollast und kleinen Geschwindigkeiten (**nur DAT<sup>1</sup>**)
- ✓ 10. Umkehr des Leistungsflusses bei Bremsvorgängen ermöglichen (dynamische Bremse)

<sup>1</sup> DAT: **D**rehstrom**A**ntriebs**T**echnik

# Zugkraftdiagramme Diselelektrische Fahrzeuge



# Zugkraftdiagramme Diselelektrische Fahrzeuge (DAT)



Güterzugbetrieb



Reisezugbetrieb

# 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

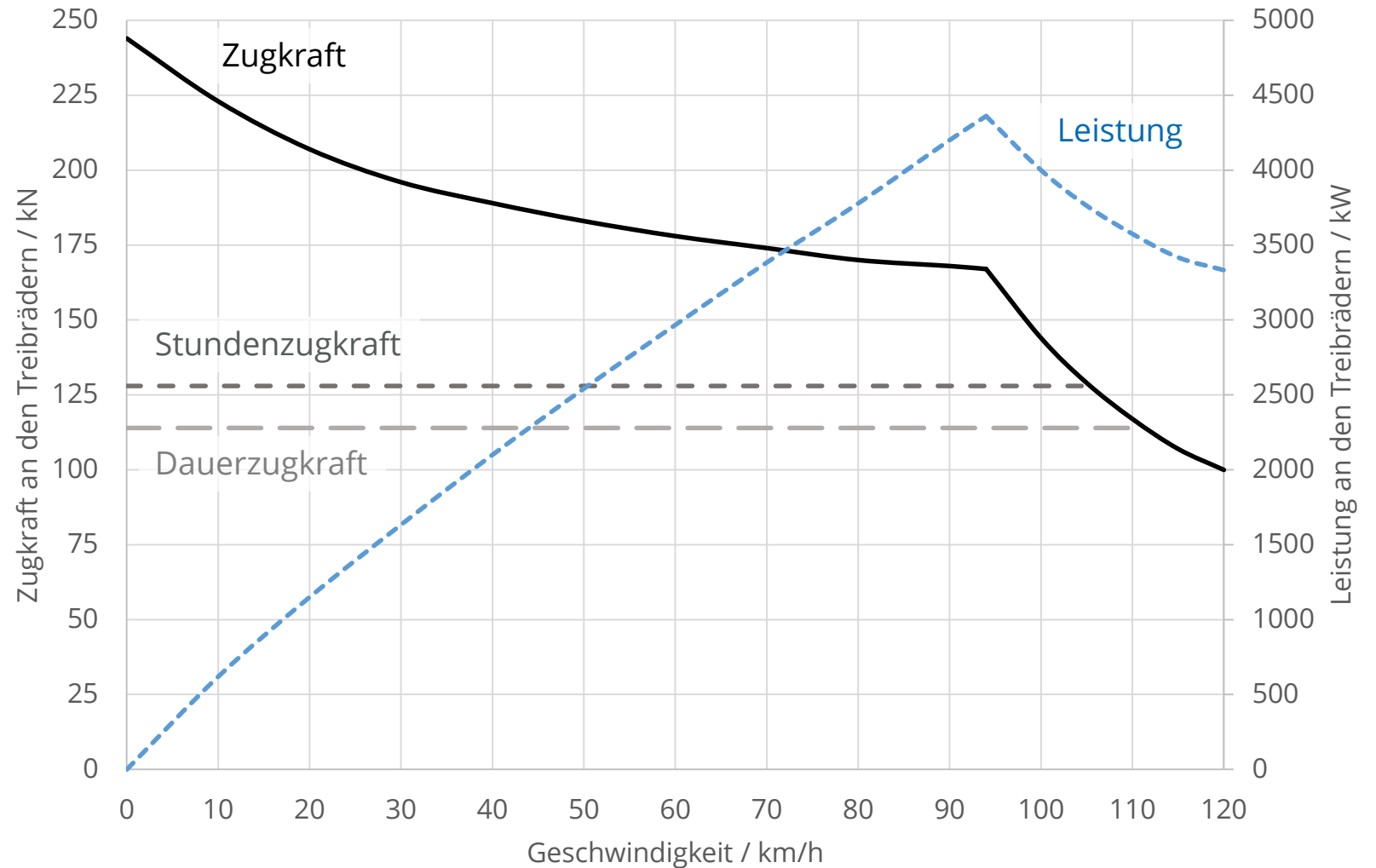


Baujahre: 1982 - 1991

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

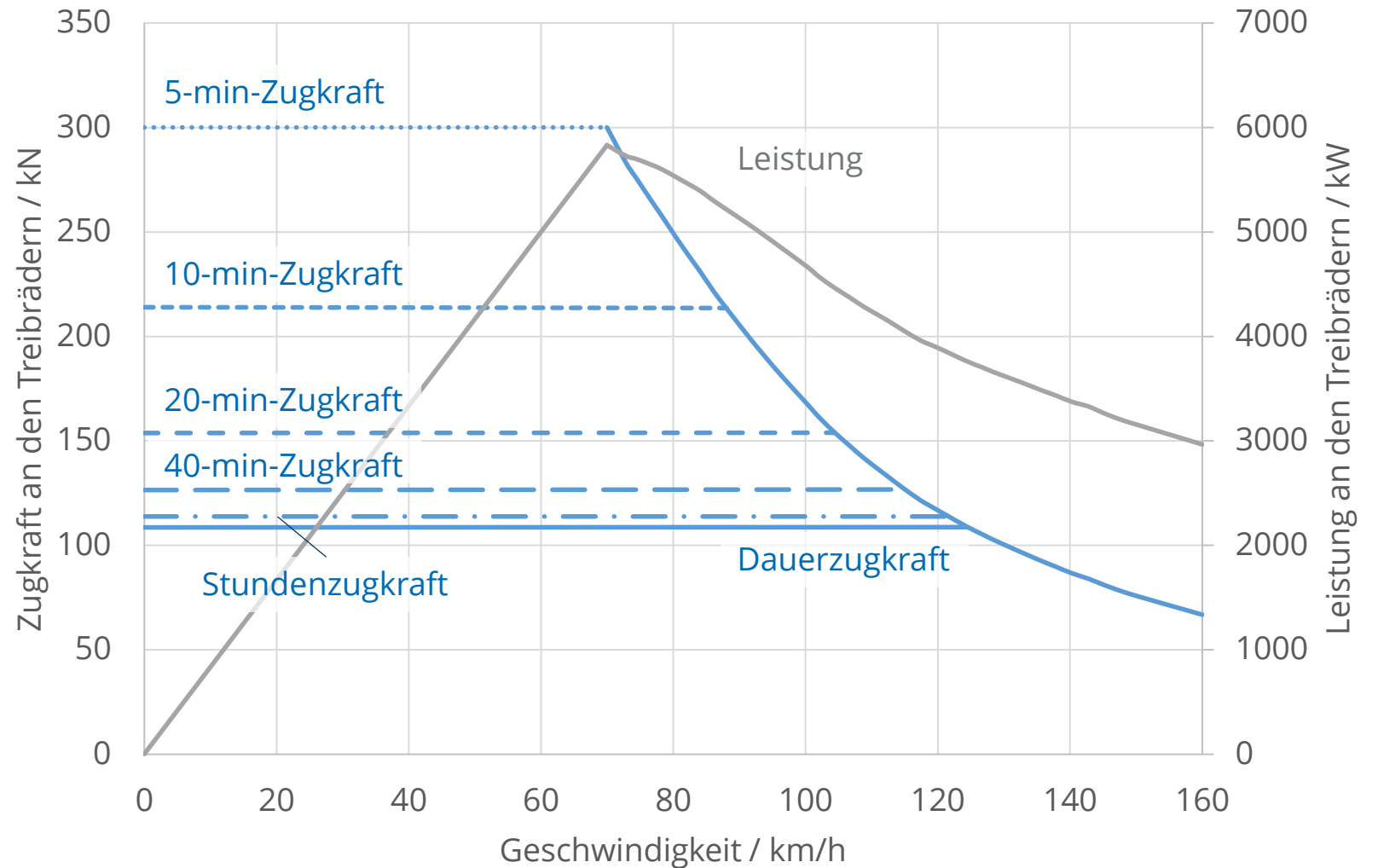


Baujahre: 1974 - 1984

28 Fahrstufen (Schaltwerk)

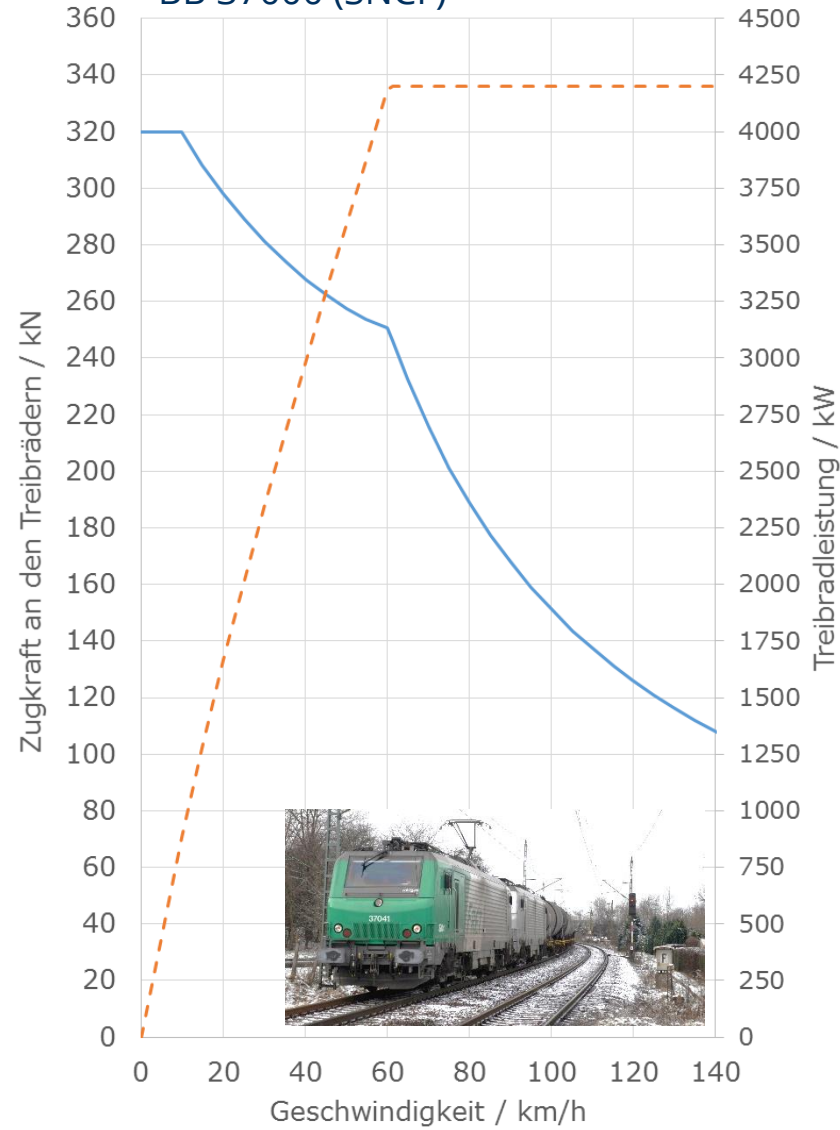
maximale Kraftschlussausnutzung  
 $\tau = 0,33$

Stundenleistung: 3700 kW  
Dauerleistung: 3620 kW

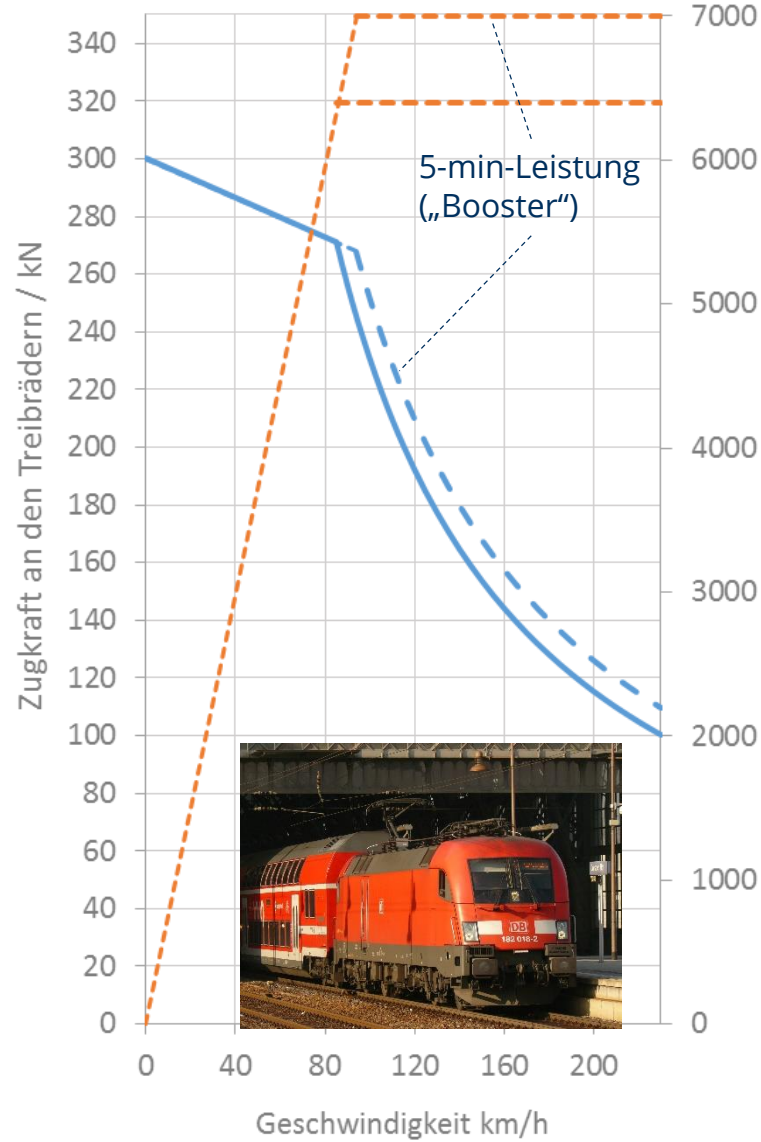


# Zugkraftdiagramme Drehstromtriebfahrzeuge

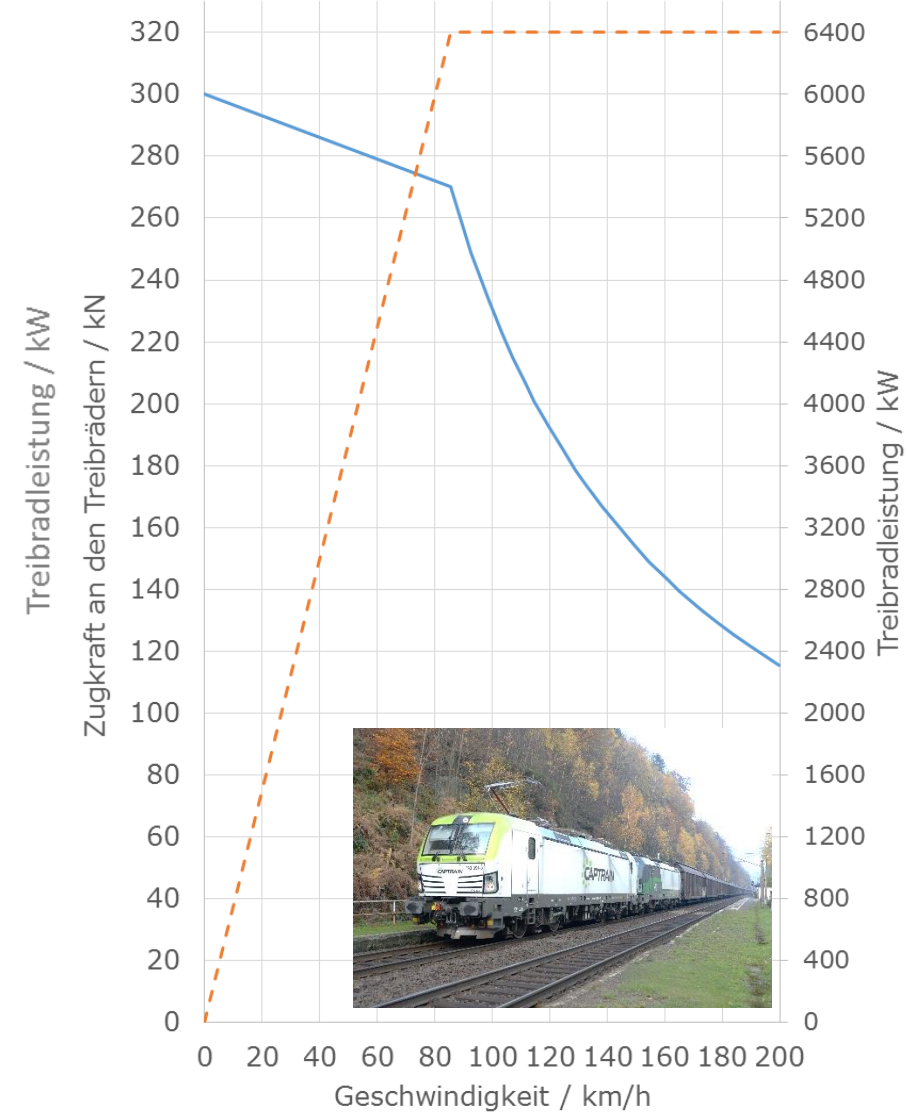
## BB 37000 (SNCF)



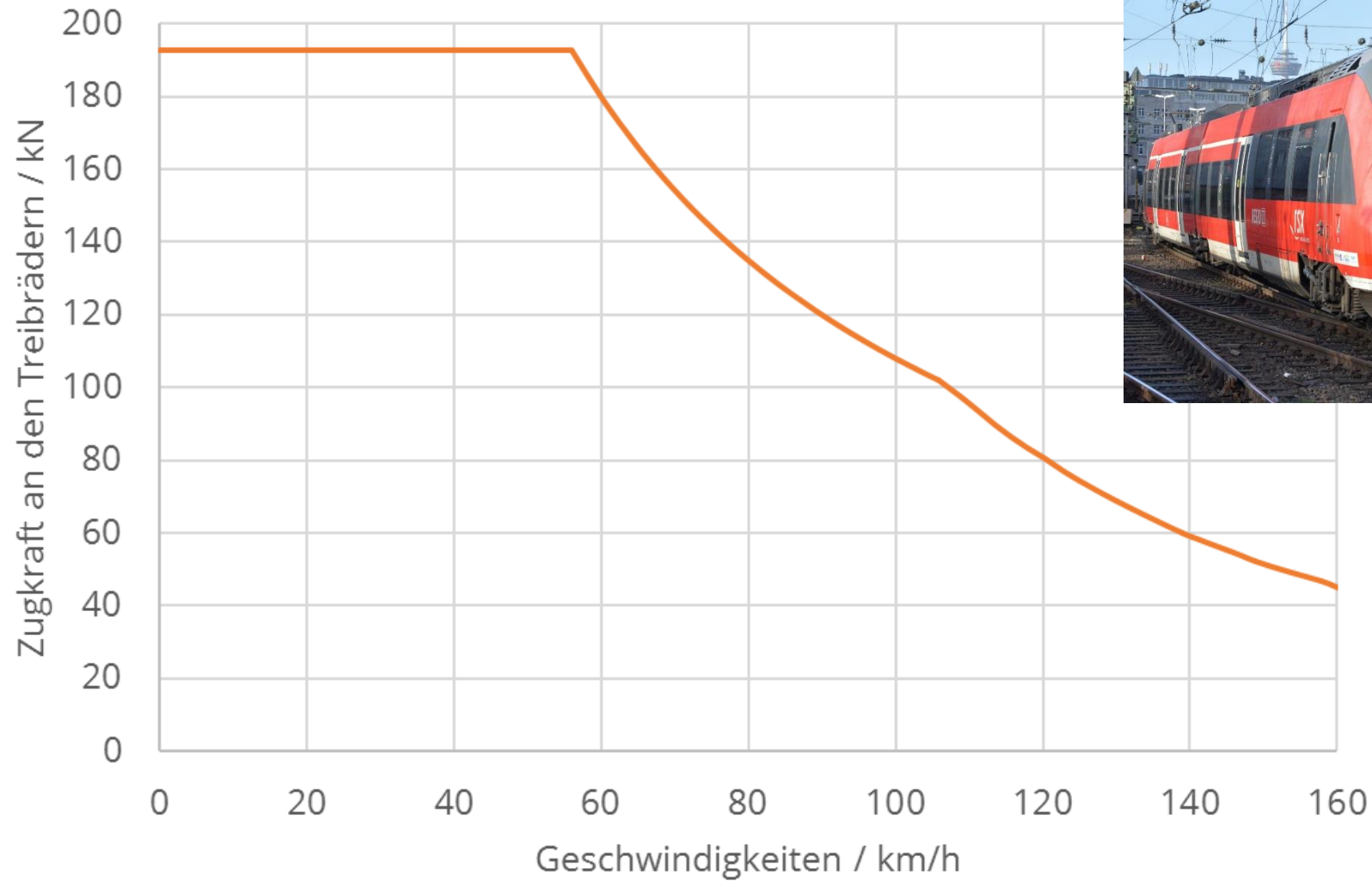
## BR 182 (DB AG)



## BR 193 (Siemens Vectron)



# Zugkraftdiagramme Drehstromtriebfahrzeuge

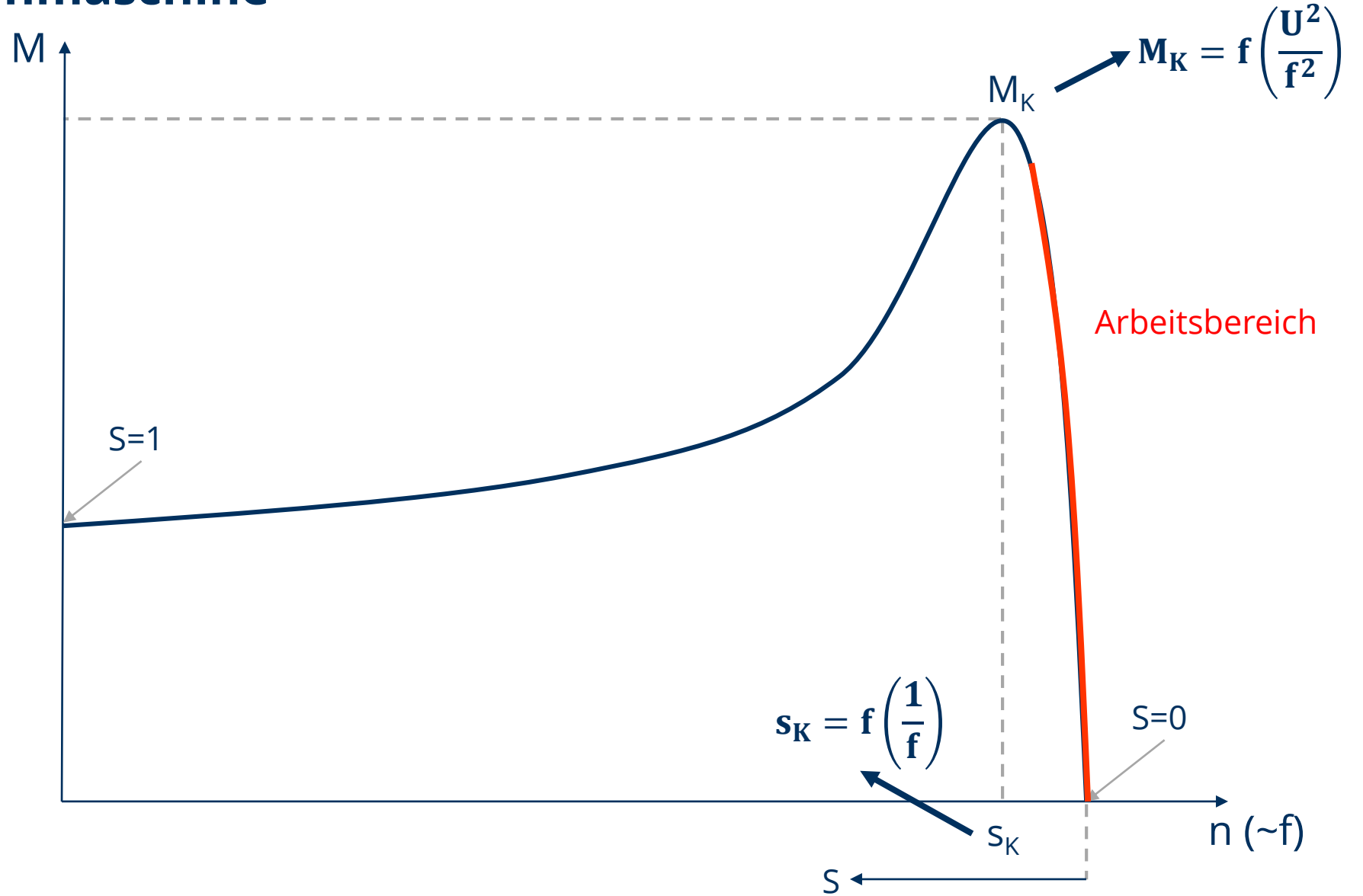


BR 442.2 (Talent 2, 4teilig.)

Woher kommt die zweite Unstetigkeit im Zugkraft-Verlauf?

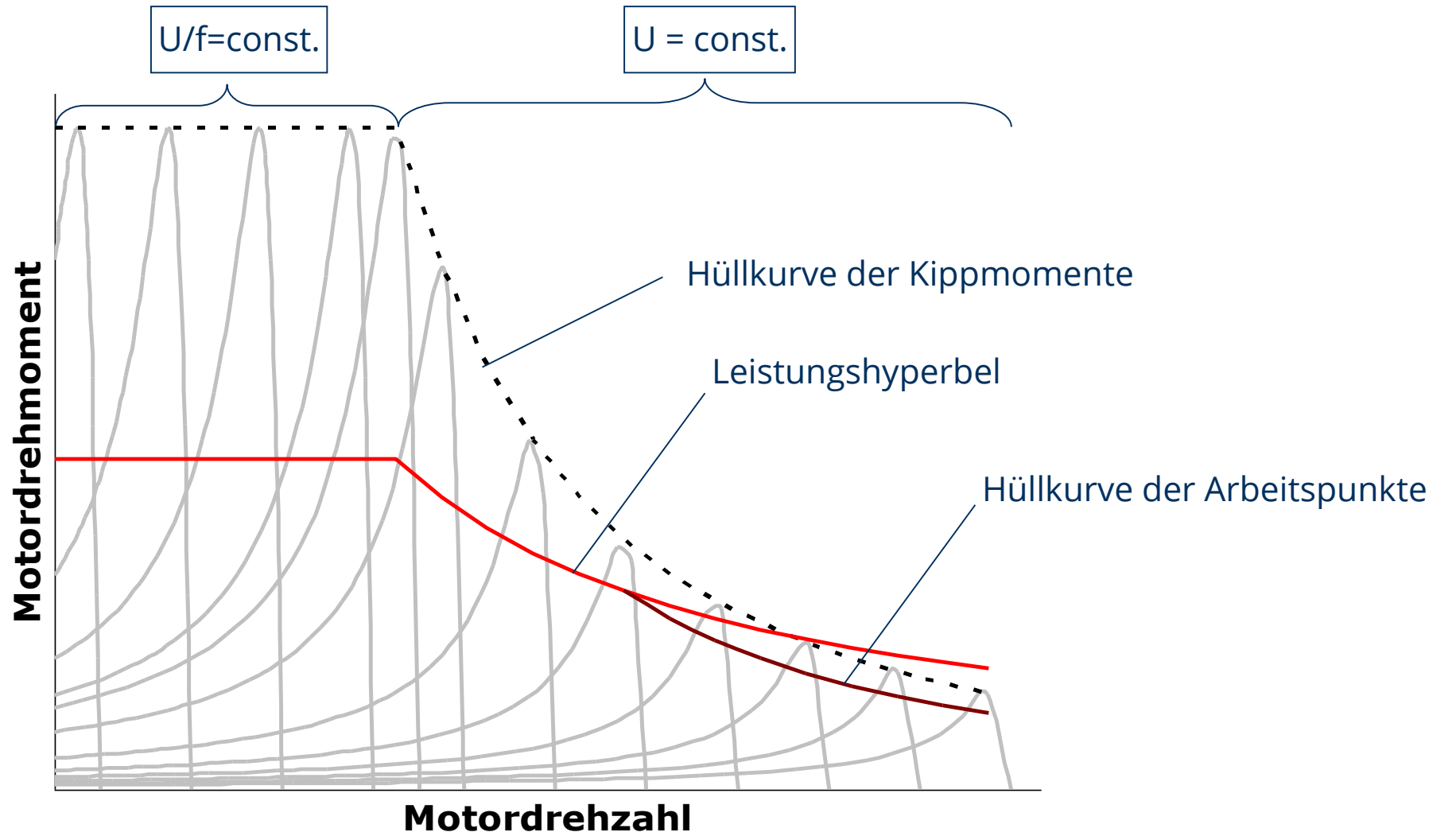
# Drehstromasynchronmaschine

## Betriebsverhalten



# Drehstromasynchronmaschine

## Betriebsverhalten



# Zugkraftdiagramm Zweikraftfahrzeug

Bsp.: BR 187  
(Bombardier Traxx 3 Lastmile)

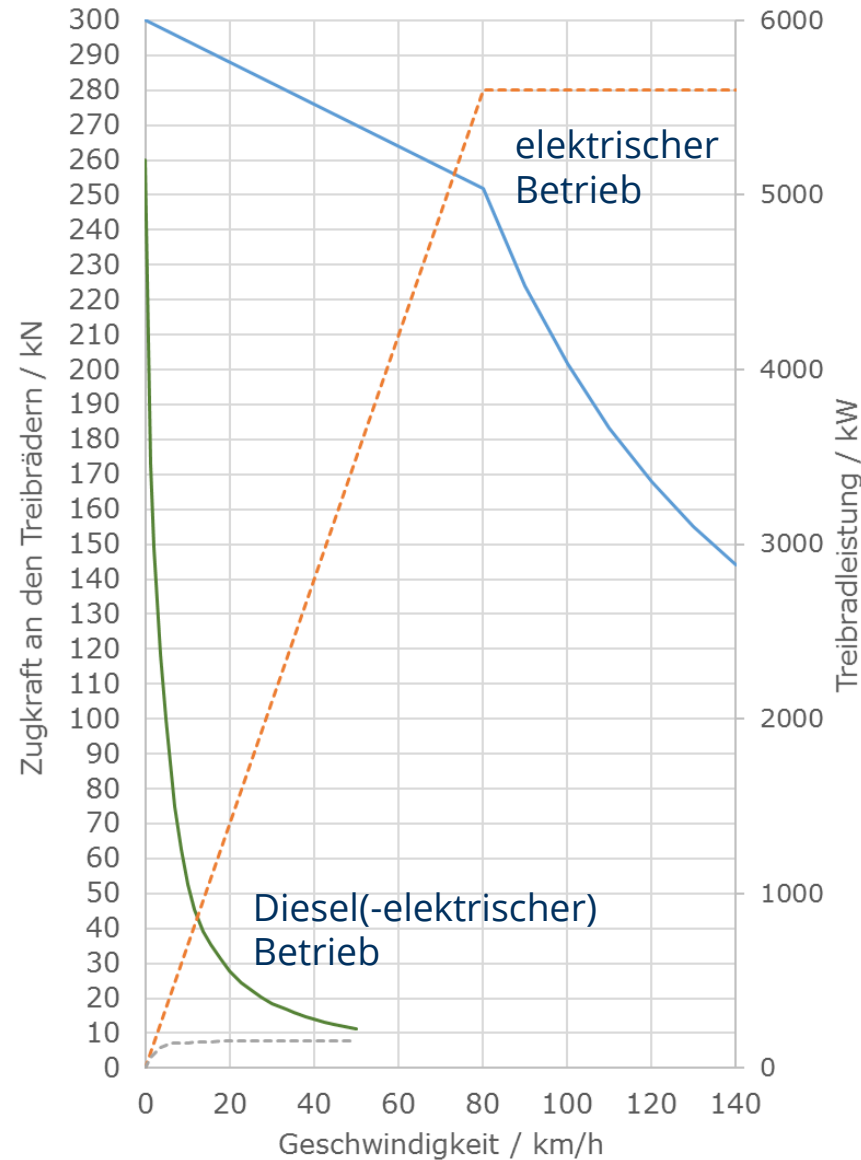


## Zweikrafttriebfahrzeug:

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)



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

Bombardier ALP45 DP



$P_{\text{elektrisch}} = 4,0...4,4 \text{ MW}$   
 $P_{\text{Diesel}} = 2,0...2,7 \text{ MW}$

# 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

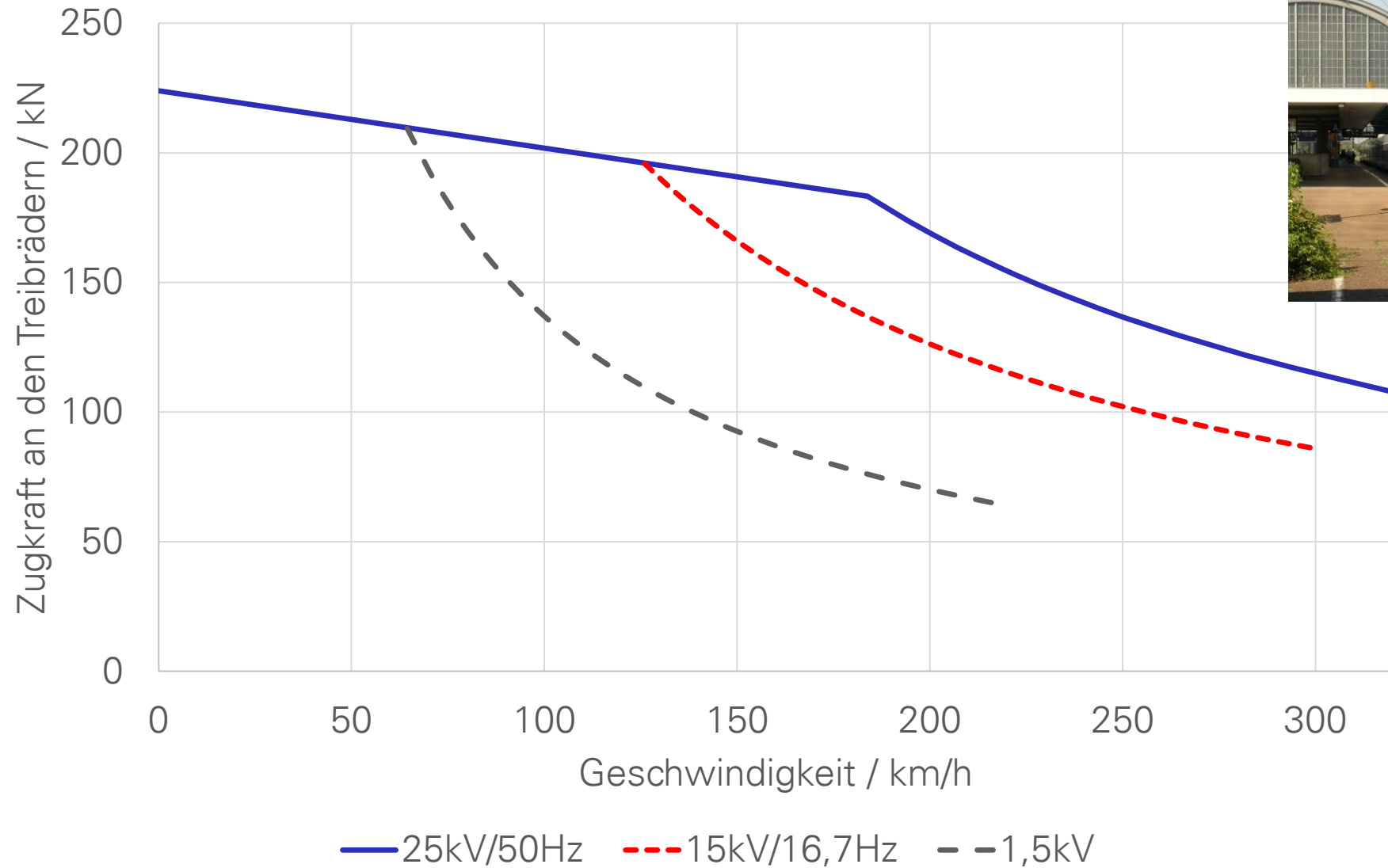
3 kV DC:

6,0 MW

1,5 kV DC:

4,5 MW

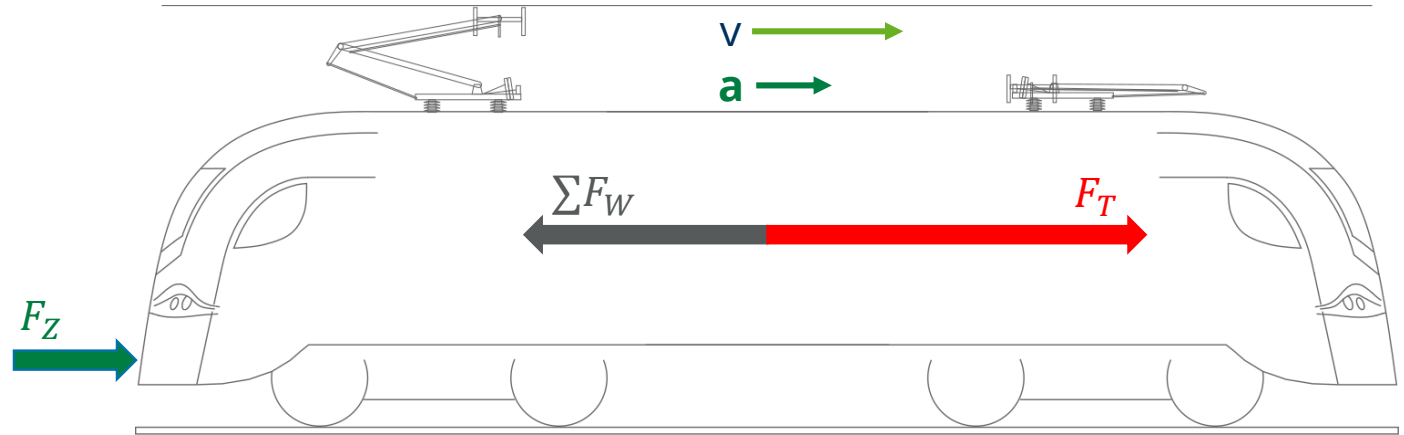
# Zugkraftentwicklung von Mehrsystemtriebfahrzeugen



TGV POS

# Vorlesungsinhalte (Schwerpunkt: Schienenverkehr)

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

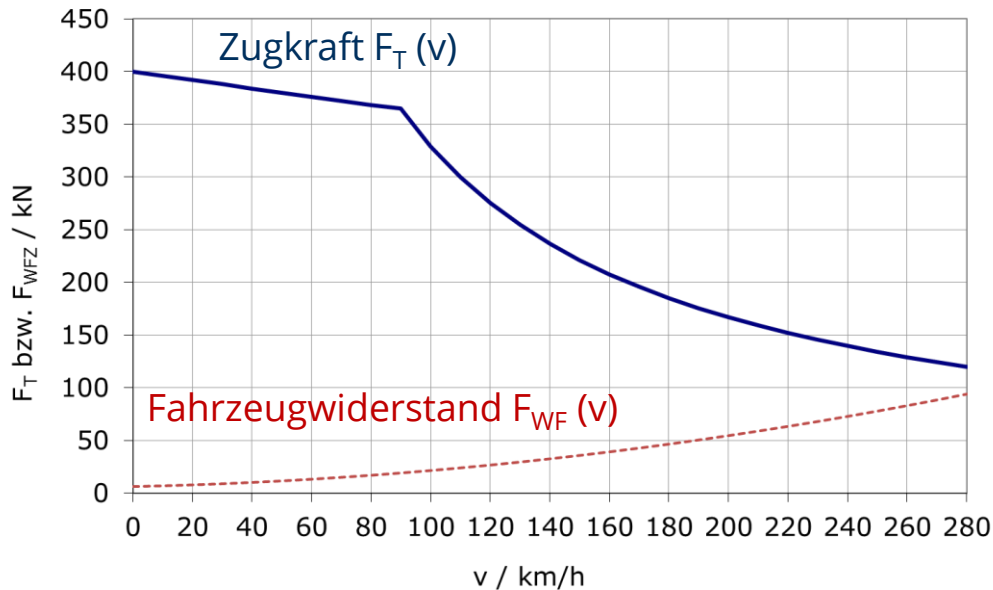


# Beschleunigungsvermögen

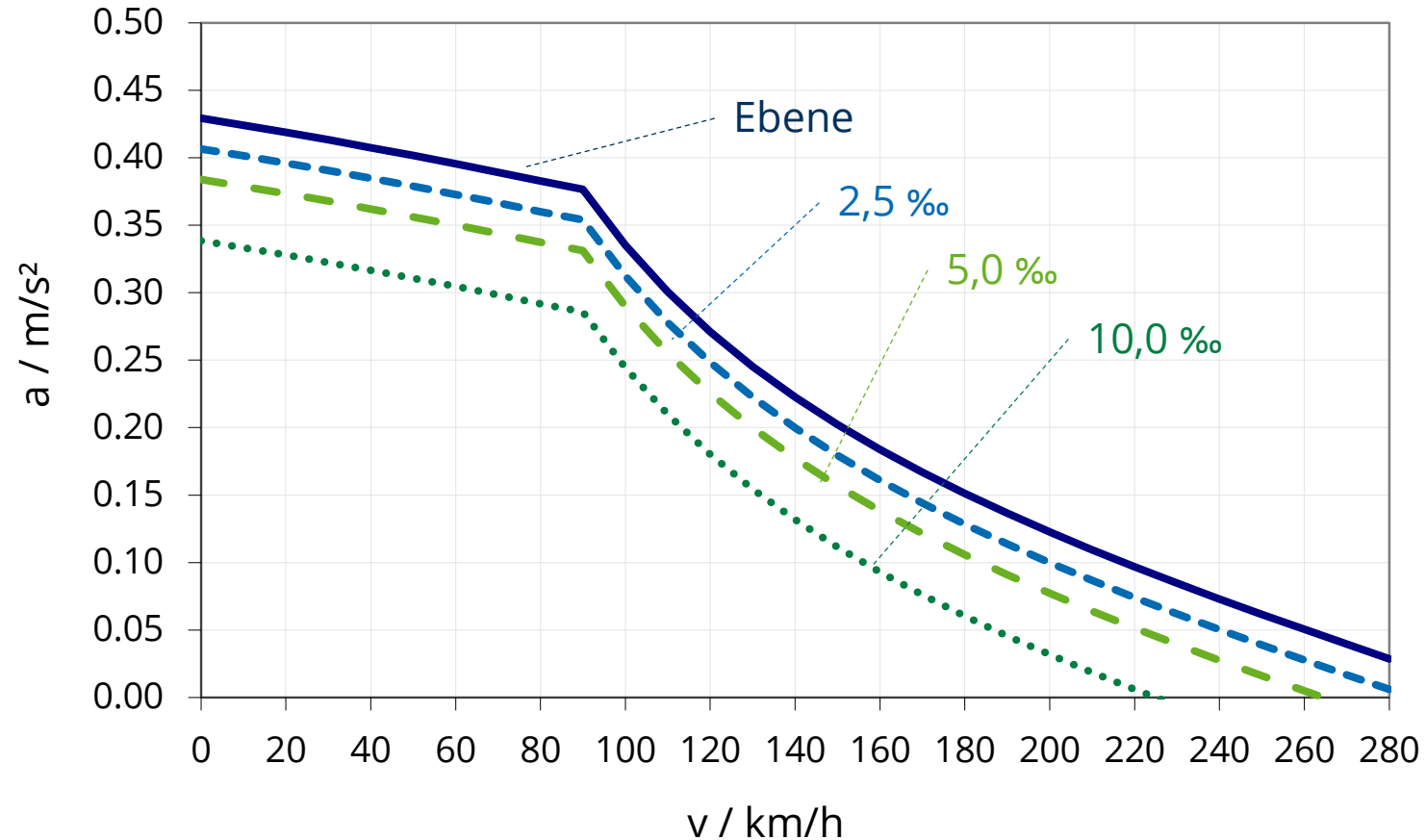
Beispiel ICE 1



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



Zugmasse: 850 t  
 Massenfaktor: 1,08

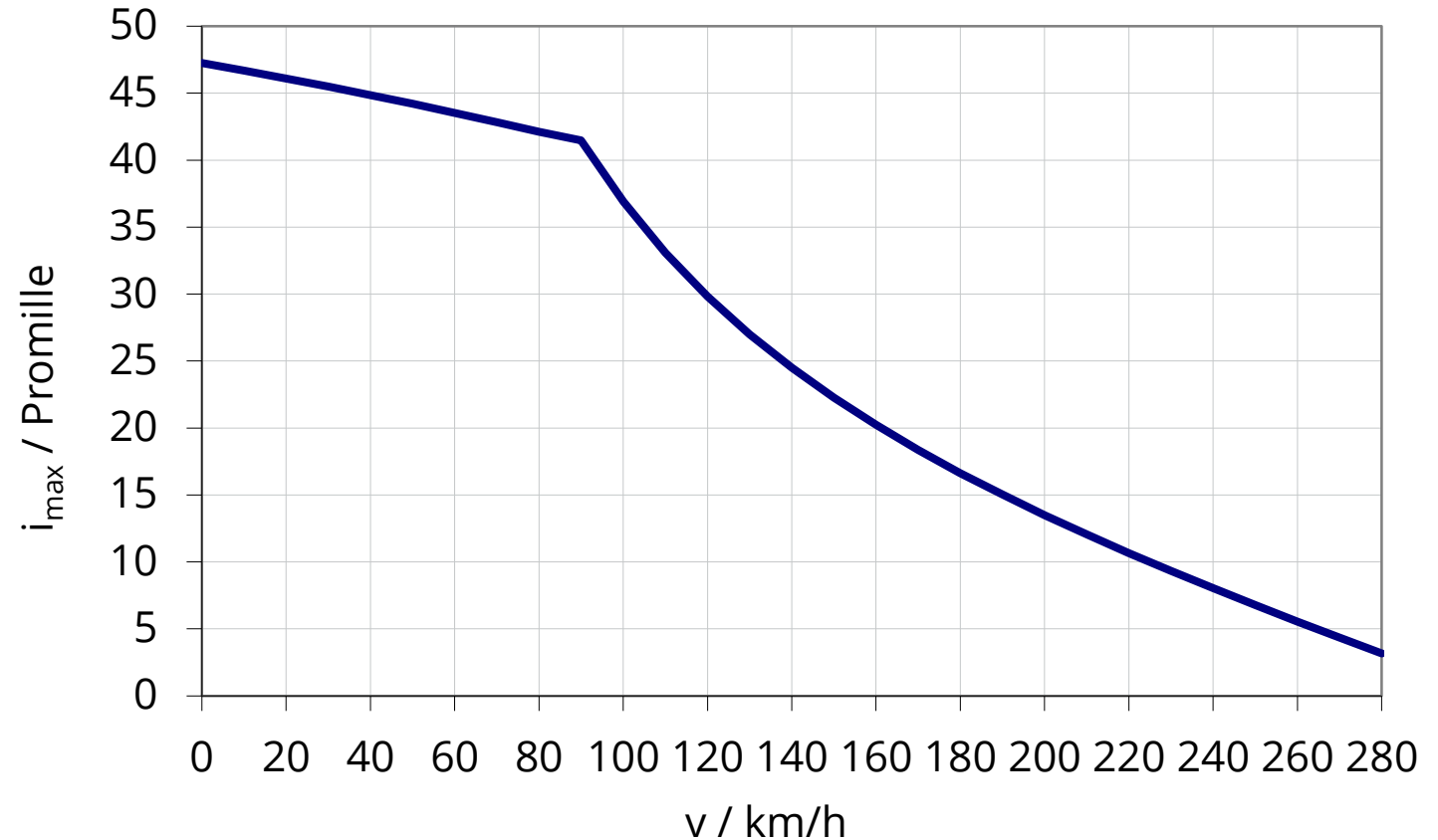
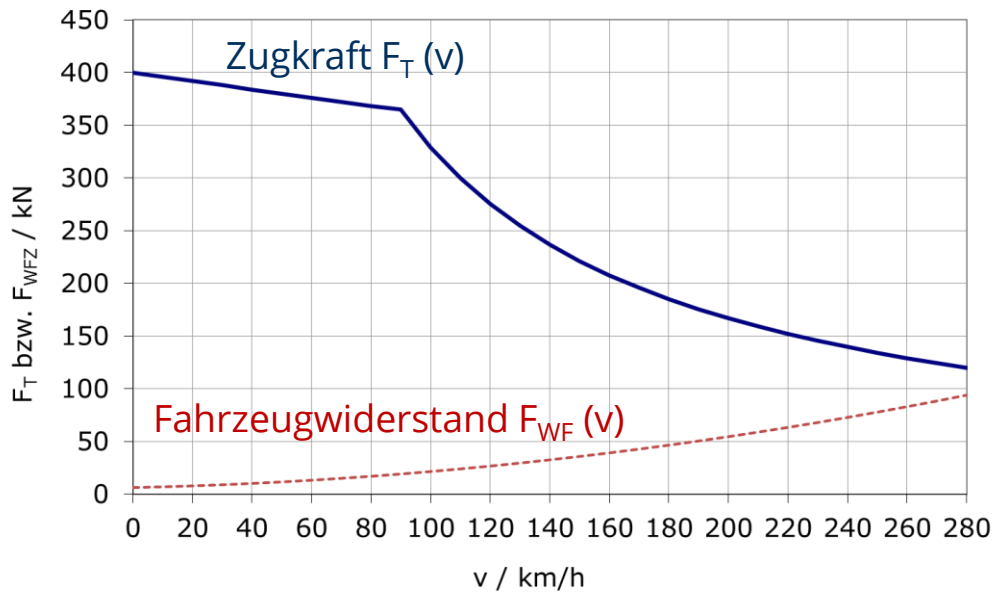


# Steigvermögen (in Beharrung)

Beispiel ICE 1



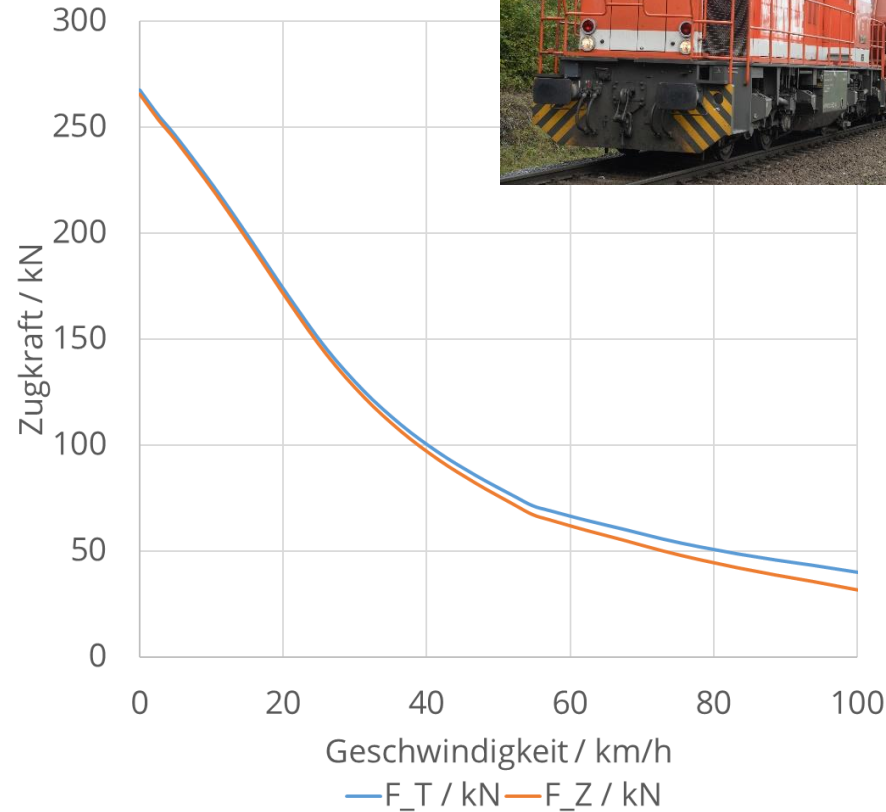
$$i = \frac{F_T(v) - F_{WF}(v)}{m_Z g}$$



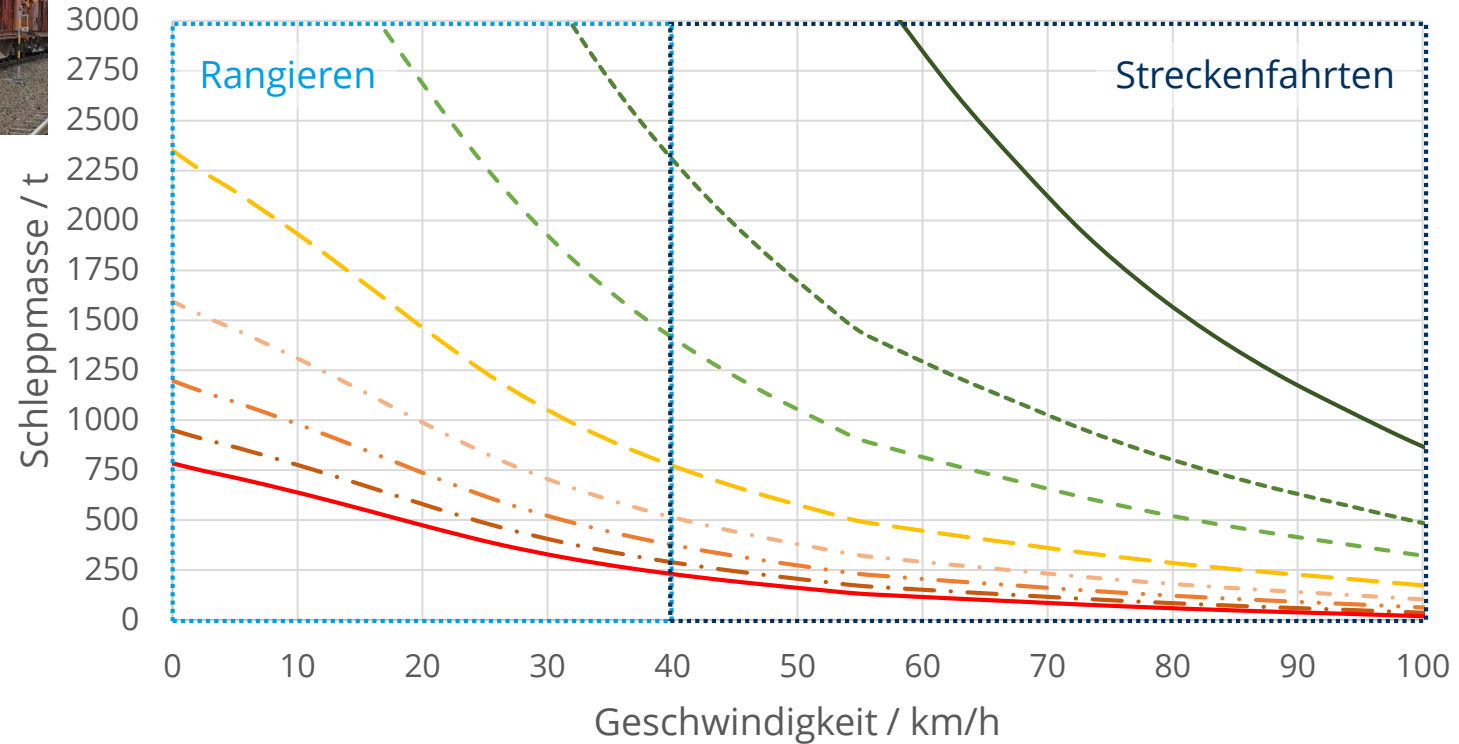
Zugmasse: 850 t  
 Massenfaktor: 1,08

# Schleppvermögen (in Beharrung)

Beispiel:  
G 1206 + Güterganzzug



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



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

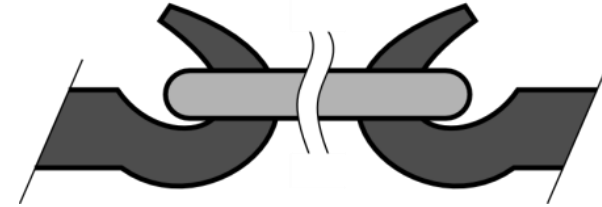


Welche Wagenzugmasse kann von welchem Triebfahrzeug auf welchem Laufweg maximal befördert werden?

# Grenzlastarten

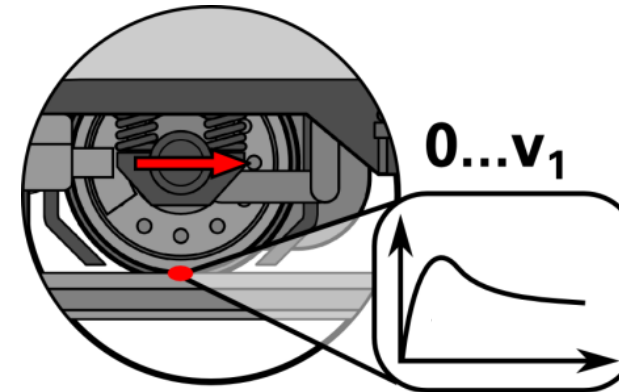
## Zughakengrenzlast

Festigkeit der Zugeinrichtung  
(Kupplungen)



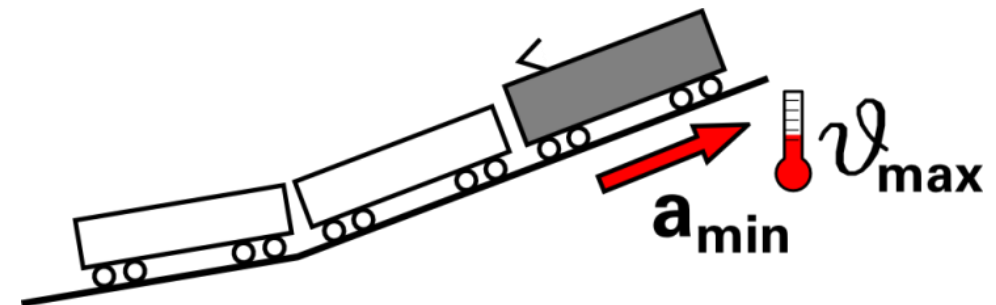
## Anfahrrenzlast

Anfahrzugkräfte (Kraftschluss!)  
Anfahrwiderstände



## Anhängegrenzlast

Mindestgeschwindigkeit  
Mindestbeschleunigung  
thermische Grenzen

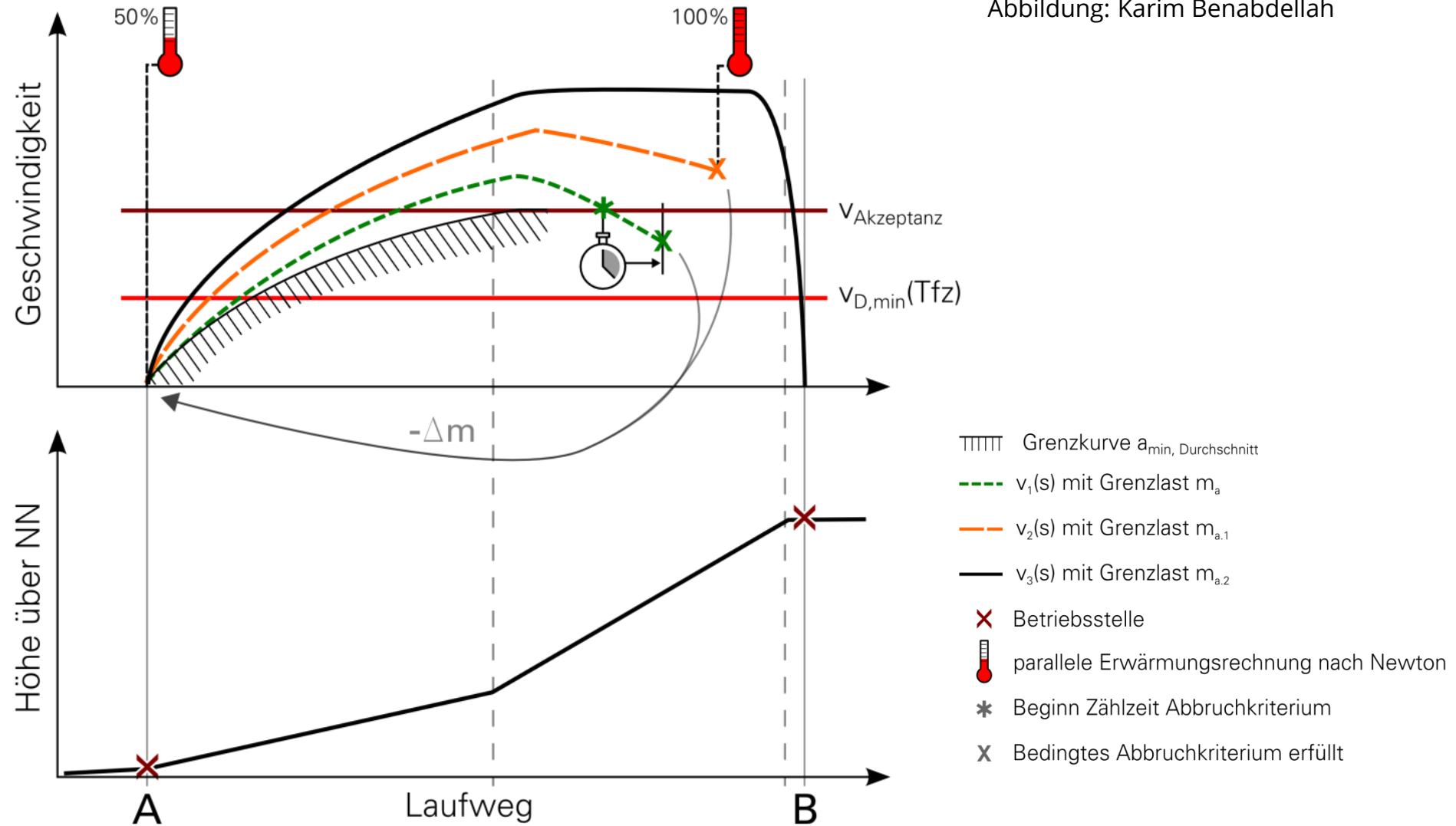


⇒ DB Ril 491.0201

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

