



Eisenbahn-Bundesamt

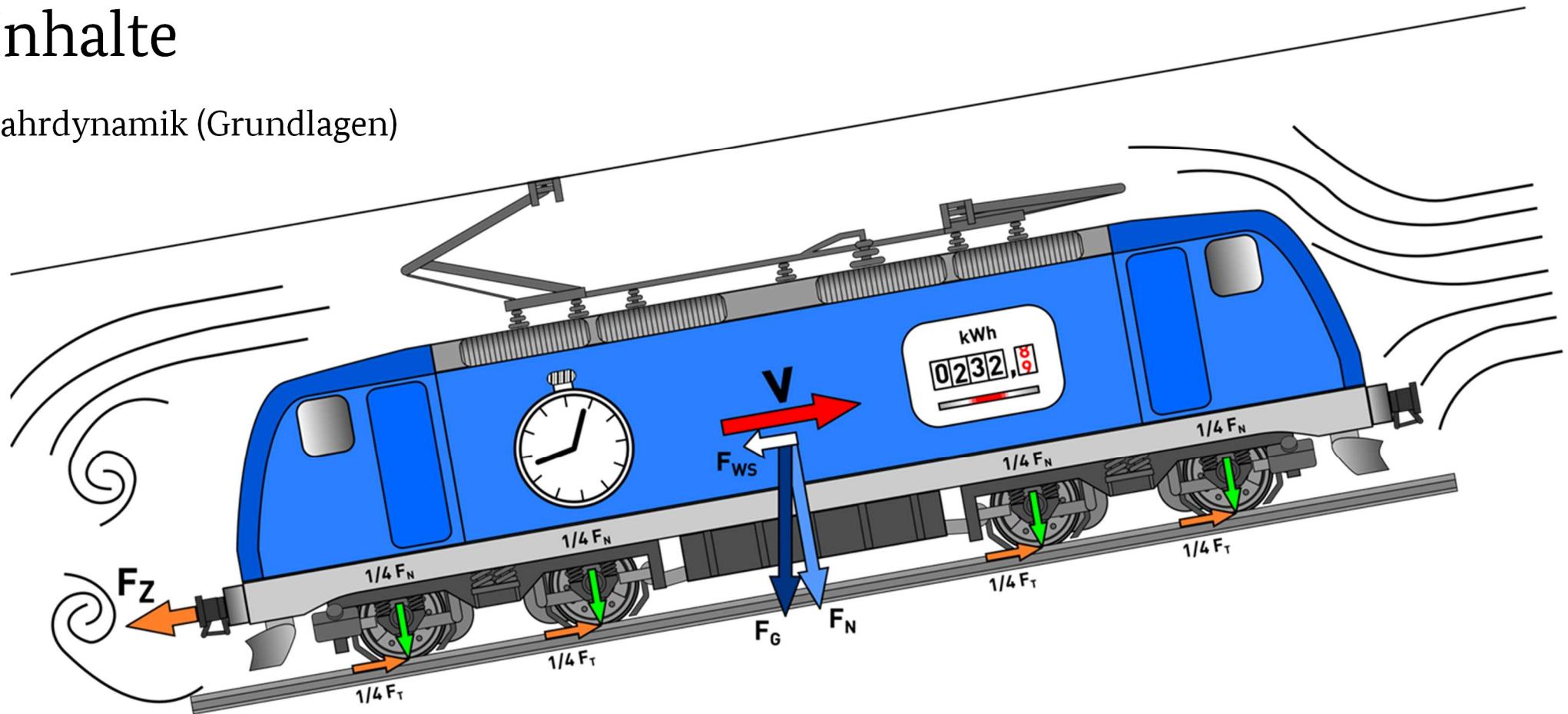
Fahrdynamik (Grundlagen)

Dr. Ing. Martin Kache



Inhalte

Fahrdynamik (Grundlagen)



© Karim Benabdelah, Martin Kache

Fahrdynamik (Dr.-Ing. Martin Kache), Folie 2

Inhalte

Fahrdynamik

1. Fahrdynamische Grundgleichung und Massenfaktor
2. Fahrwiderstandskräfte
3. Antriebskräfte
4. Bremskräfte

Leistungsauslegung



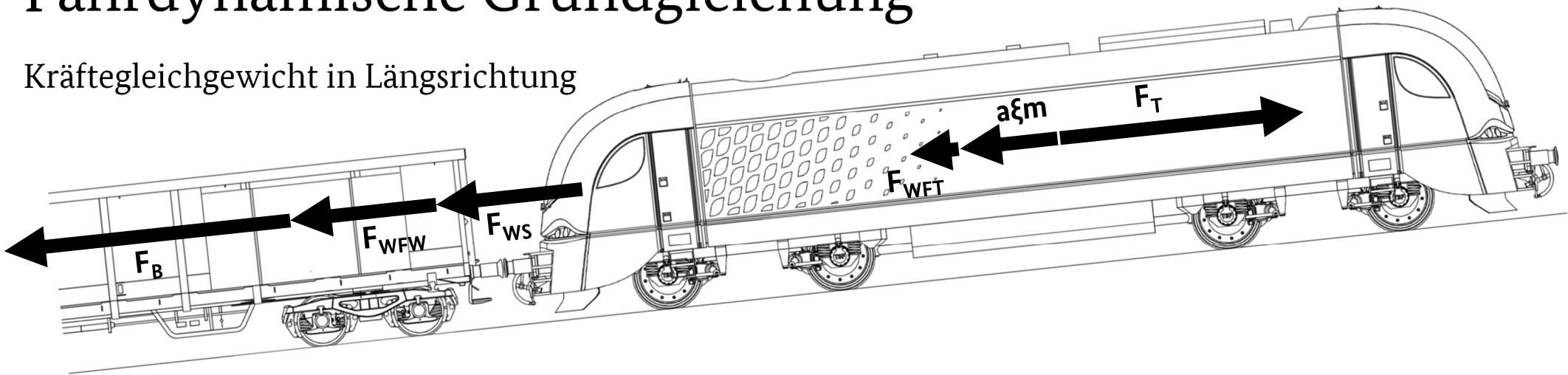
Inhalte

Fahrdynamik (Grundlagen)

1. Fahrdynamische Grundgleichung und Massenfaktor

Fahrdynamische Grundgleichung

Kräftegleichgewicht in Längsrichtung



F_T Zugkraft (Treibradzugkraft)
 $a\xi m$ Trägheitsterm
 F_{WFT} Triebfahrzeugwiderstandskraft

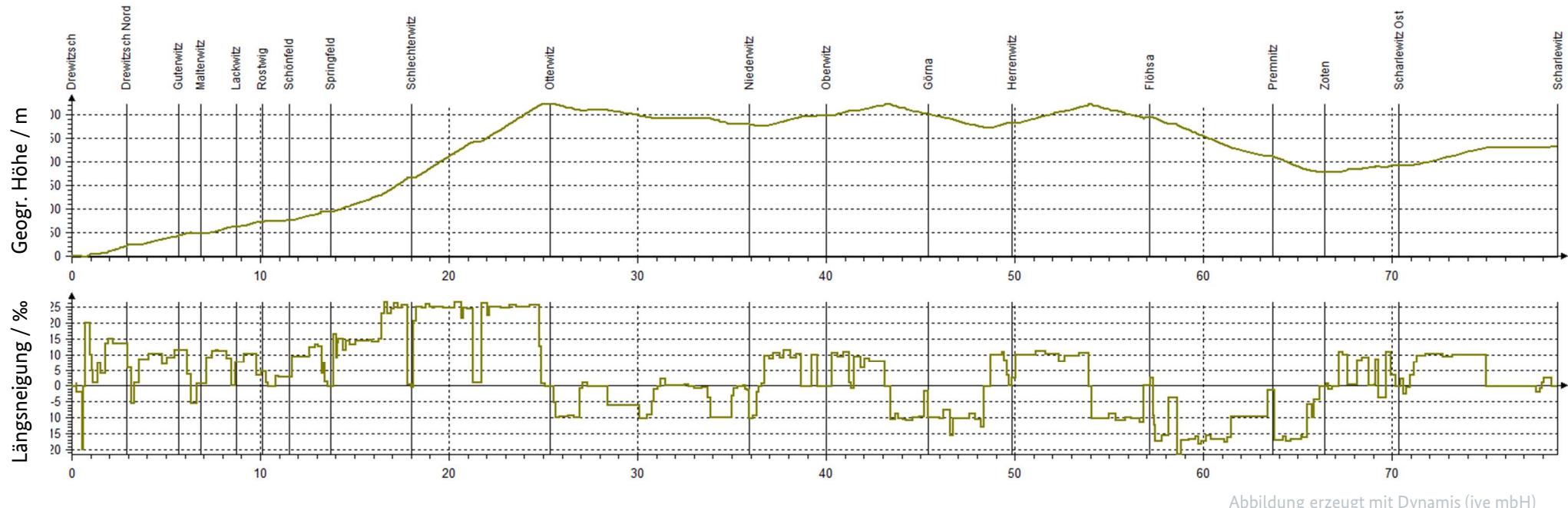
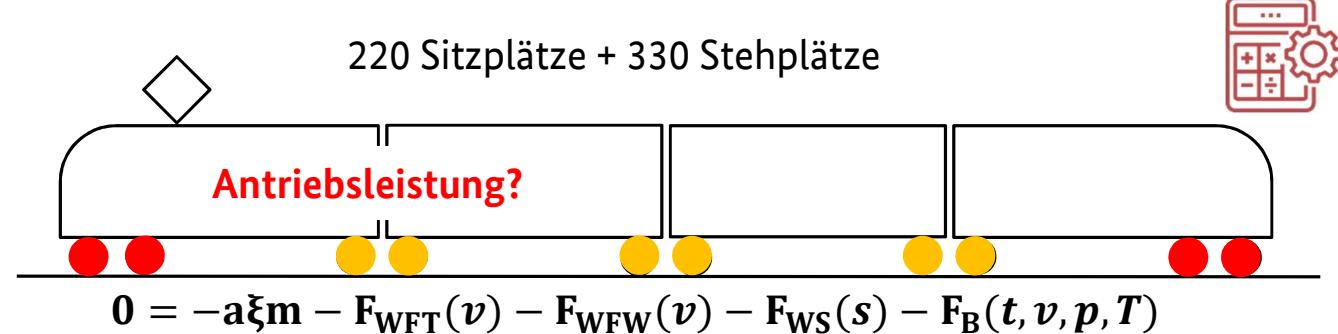
F_{WFW} Wagenzugwiderstandskraft
 F_{WS} Streckenwiderstandskraft
 F_B Bremskraft

Kräftebilanz = Fahrdynamische Grundgleichung:

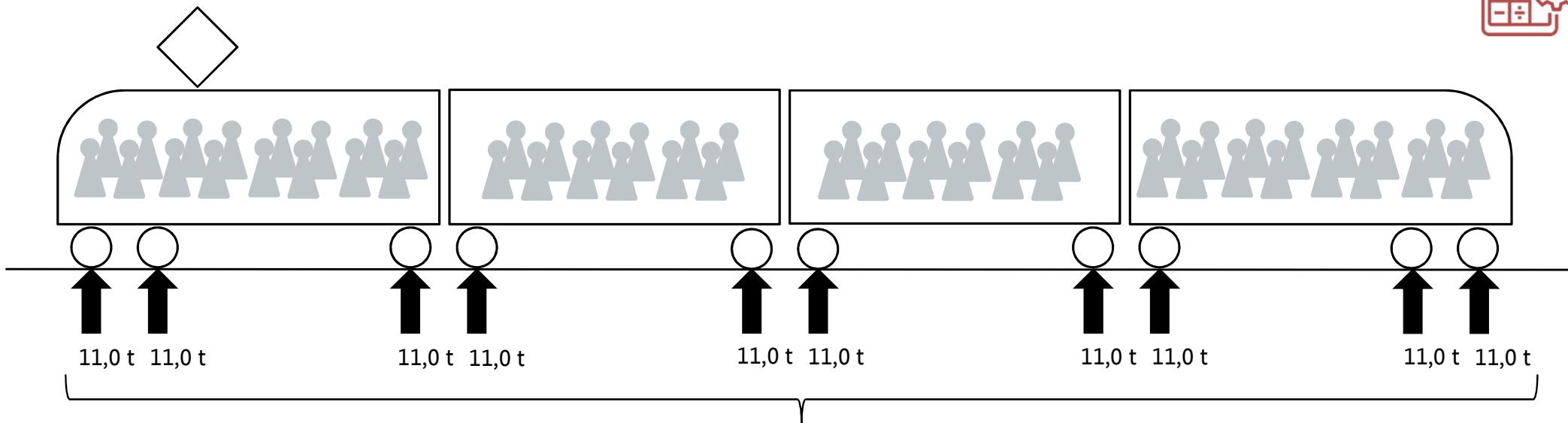
$$0 = F_T - a\xi m - F_{WFT} - F_{WFW} - F_{WS} - F_B$$

Fallstudie

- Modellstrecke Drewitzsch – Scharlewitz
- ca. 79 km mit 17 Zwischenhalten
- Höchstgeschwindigkeit: 120 km/h
- max. Längsneigung: 26 Promille



Fallstudie



$$m = 110.0 \text{ t} \text{ (Eigenmasse)}$$

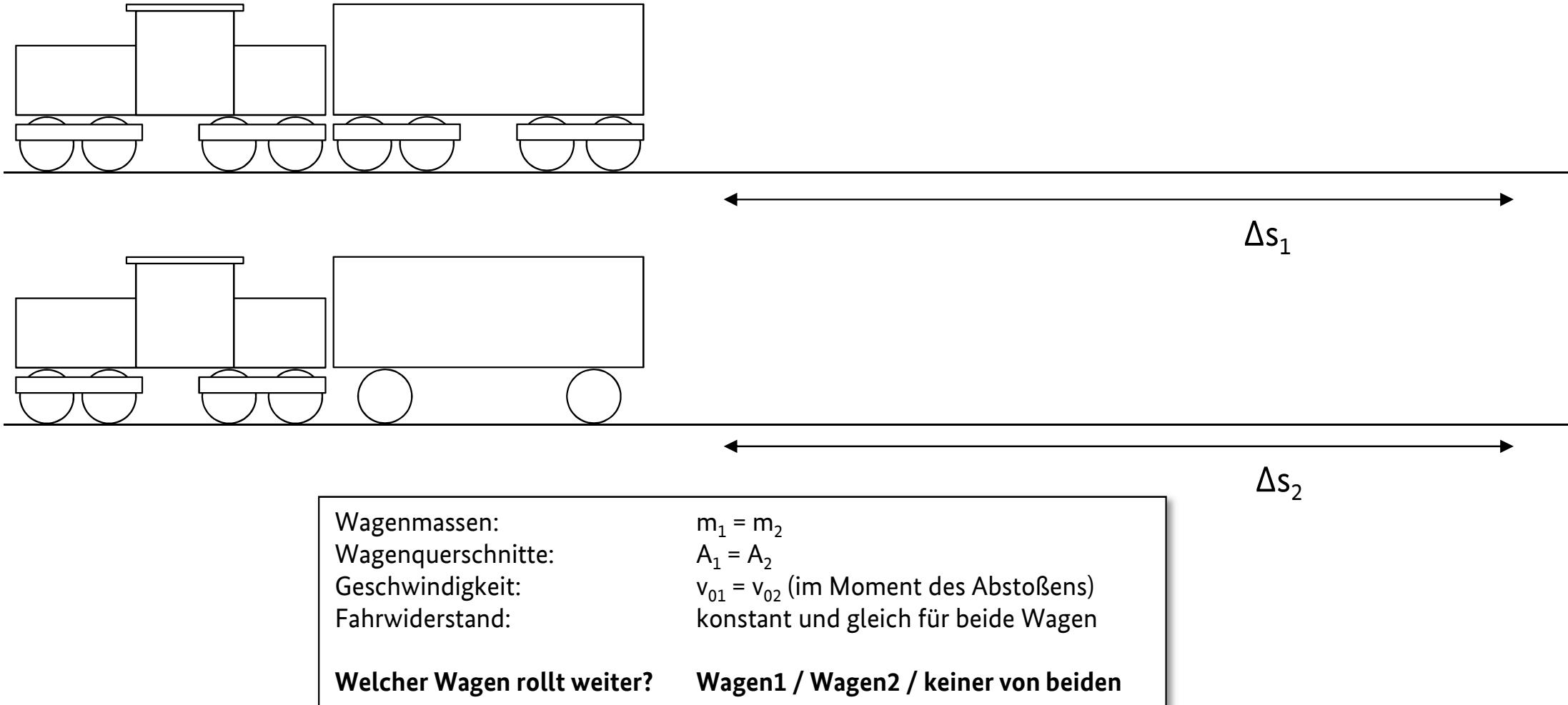
200 Sitzplätze + 330 Stehplätze: 530 Fahrgäste à 75 kg = 39,75 t Zuladung

$$0 = F_T - a\xi m - F_{WFT} - F_{WS} - F_B$$

?

110...150 t

Gedankenexperiment - Abstoßversuch



Gedankenexperiment - Abstoßversuch



2 Radsätze

Leermasse:	17,6 t
Zuladung:	12,4 t
Gesamtmasse:	30,0 t
F_{WFW} (0...25 km/h):	650 N
$J_{Radsatz}$:	116 kgm ²
J_{ges} :	232 kgm ²

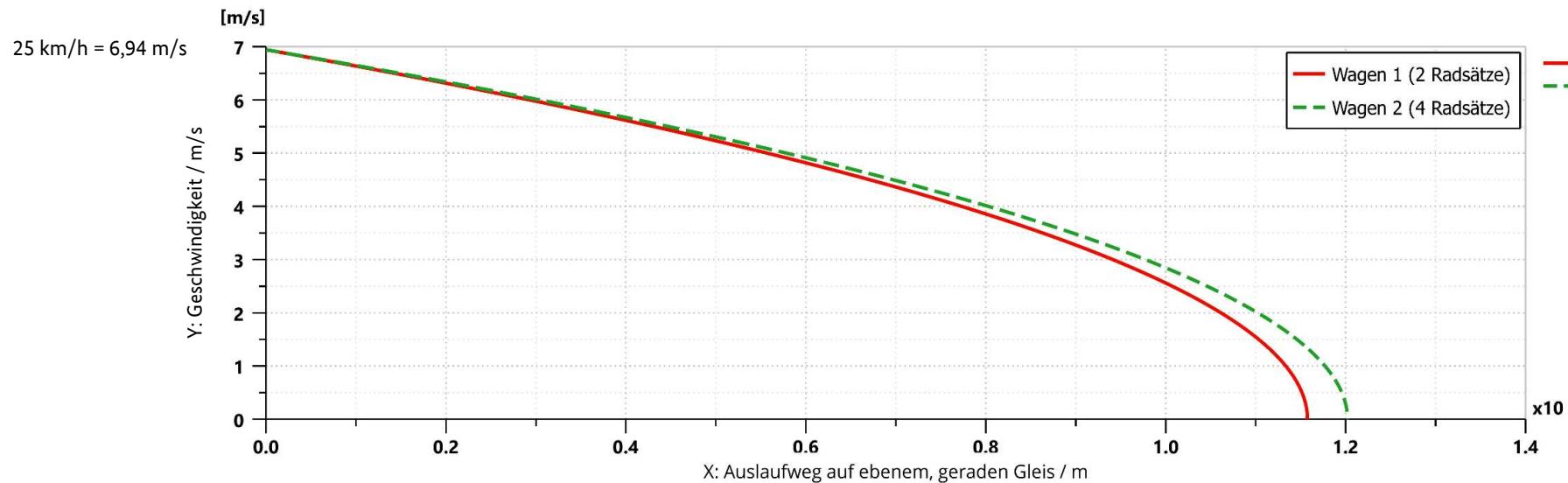


4 Radsätze

Leermasse:	30,0 t
Zuladung:	0,0 t
Gesamtmasse:	30,0 t
F_{WFW} (0...25 km/h):	650 N
$J_{Radsatz}$:	116 kgm ²
J_{ges} :	464 kgm ²

$$E_{kin} (25 \text{ km/h}) = 752.3 \text{ kJ} = 0.209 \text{ kWh}$$

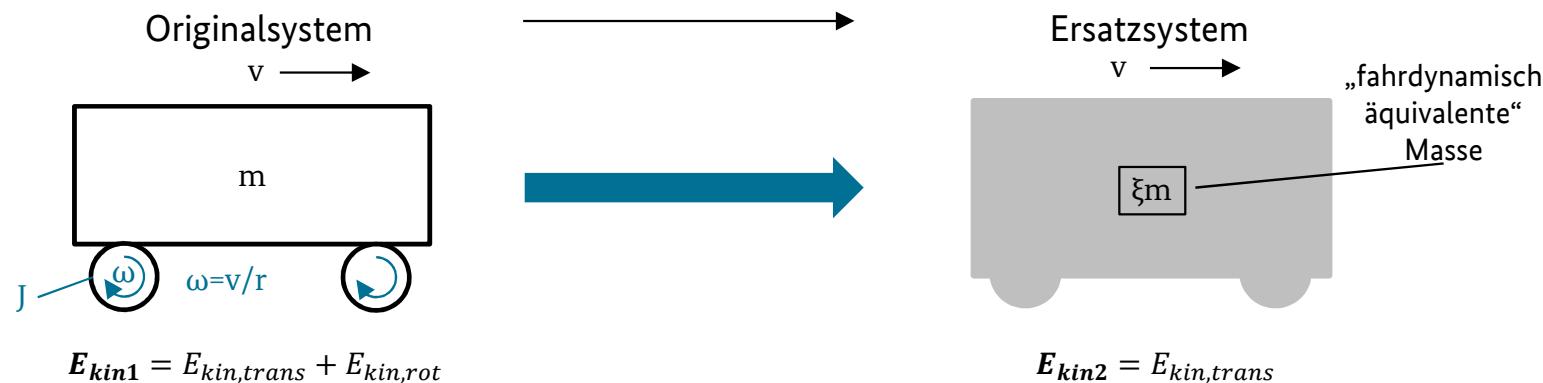
$$E_{kin} (25 \text{ km/h}) = 781.3 \text{ kJ} = 0.217 \text{ kWh}$$



Fahrdynamischer Massenfaktor

Definition

Ziel: Reduktion auf translatorische Bewegung bei gleichzeitiger Berücksichtigung rotatorischer Trägheiten



Energieansatz:

$$E_{kin1} = E_{kin2}$$

$$\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}J_{ges}\omega^2 = \frac{1}{2}\xi mv^2$$

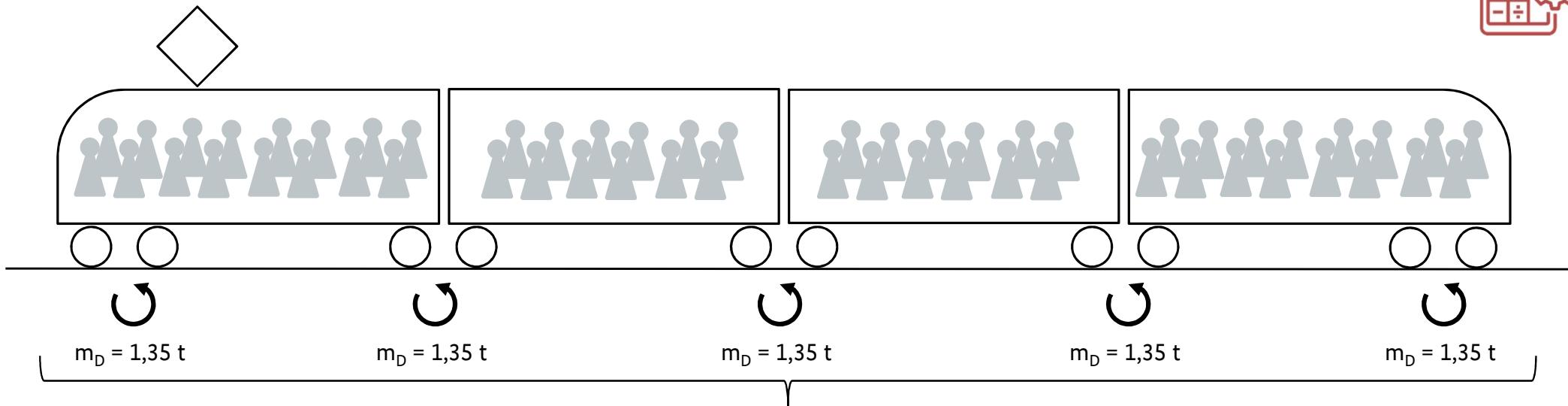
$$\xi = 1 + \frac{\frac{1}{2}J_{ges}\omega^2}{\frac{1}{2}mv^2} = 1 + \frac{E_{kin,rot}}{E_{kin,trans}}$$

Der fahrdynamische Massenfaktor stellt eine virtuelle Erhöhung der Fahrzeugmasse dar.

Er ist abhängig von:

- der Fahrzeuggbauart,
- dem Beladungszustand und
- dem Radverschleiß.

Fallstudie



$$\xi_{leer} = 1 + \frac{m_{D,ges}}{m} = 1 + \frac{6,75 \text{ t}}{110 \text{ t}} \approx 1,06 \quad \xi_{bel} = 1 + (\xi_{leer} - 1) \cdot \frac{m_{leer}}{m_{bel}} = 1 + (1,06 - 1) \cdot \frac{110 \text{ t}}{150 \text{ t}} \approx 1,04$$

$$0 = F_T - a\xi m - F_{WFT} - F_{WS} - F_B$$

1,06...1,04

Inhalte

Fahrdynamik

1. Fahrdynamische Grundgleichung und Massenfaktor
2. **Fahrwiderstandskräfte**

Fahrwiderstandskräfte

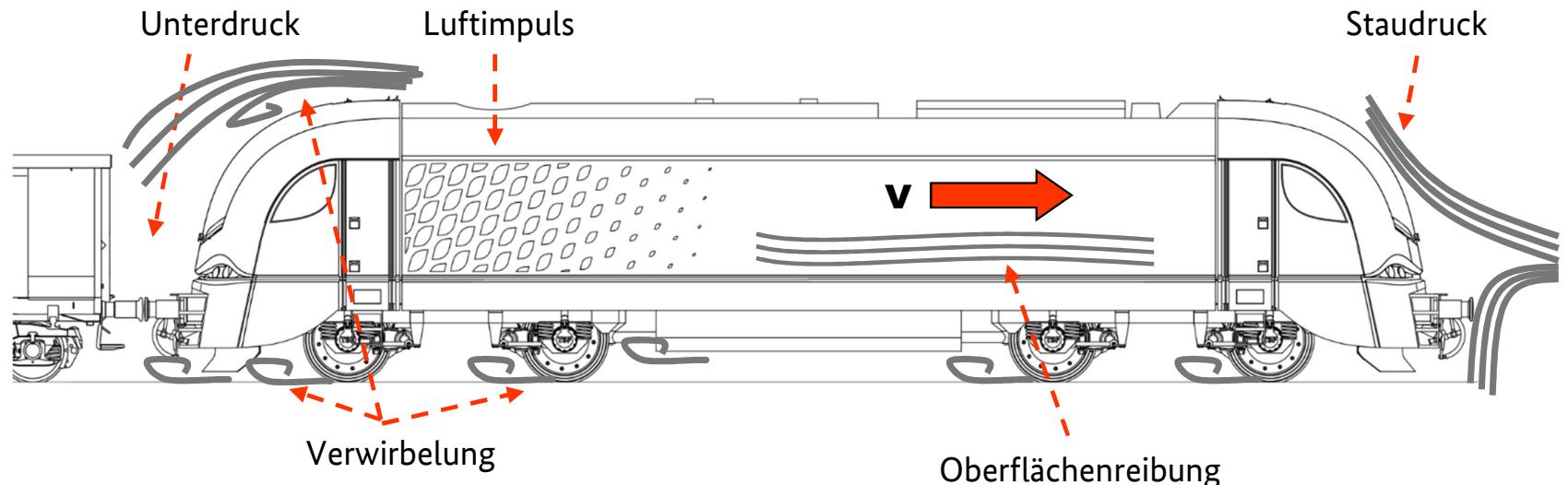
Einteilung



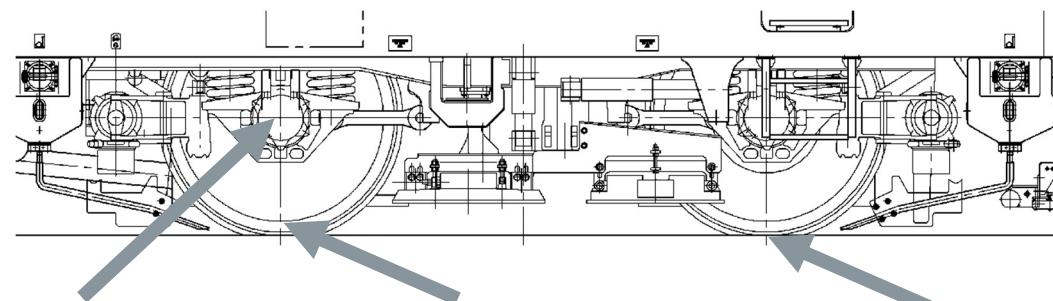
Fahrzeugwiderstand

Ursachen

Luftwiderstand



Grundwiderstand

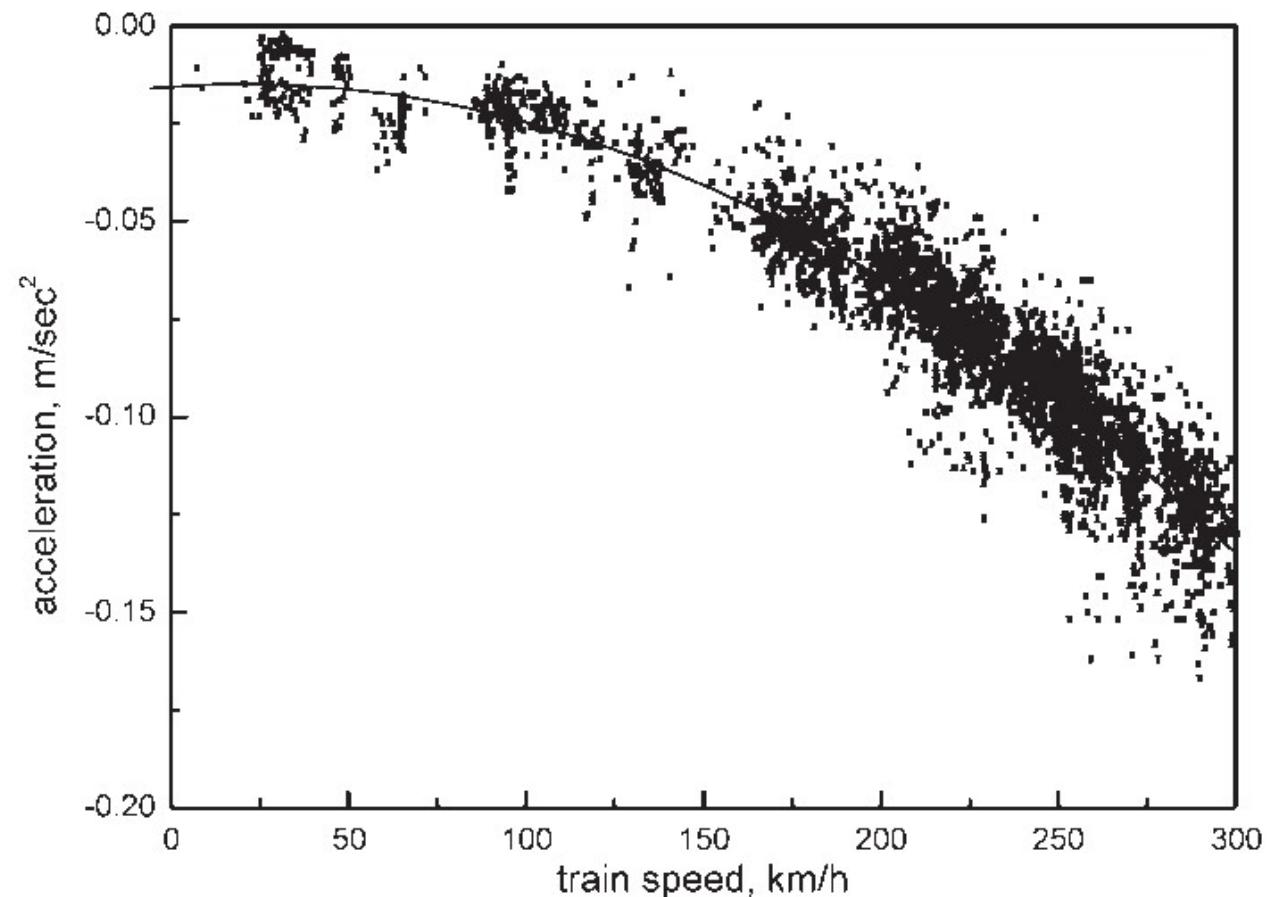


Ermittlung von Fahrzeugwiderstandsgleichungen

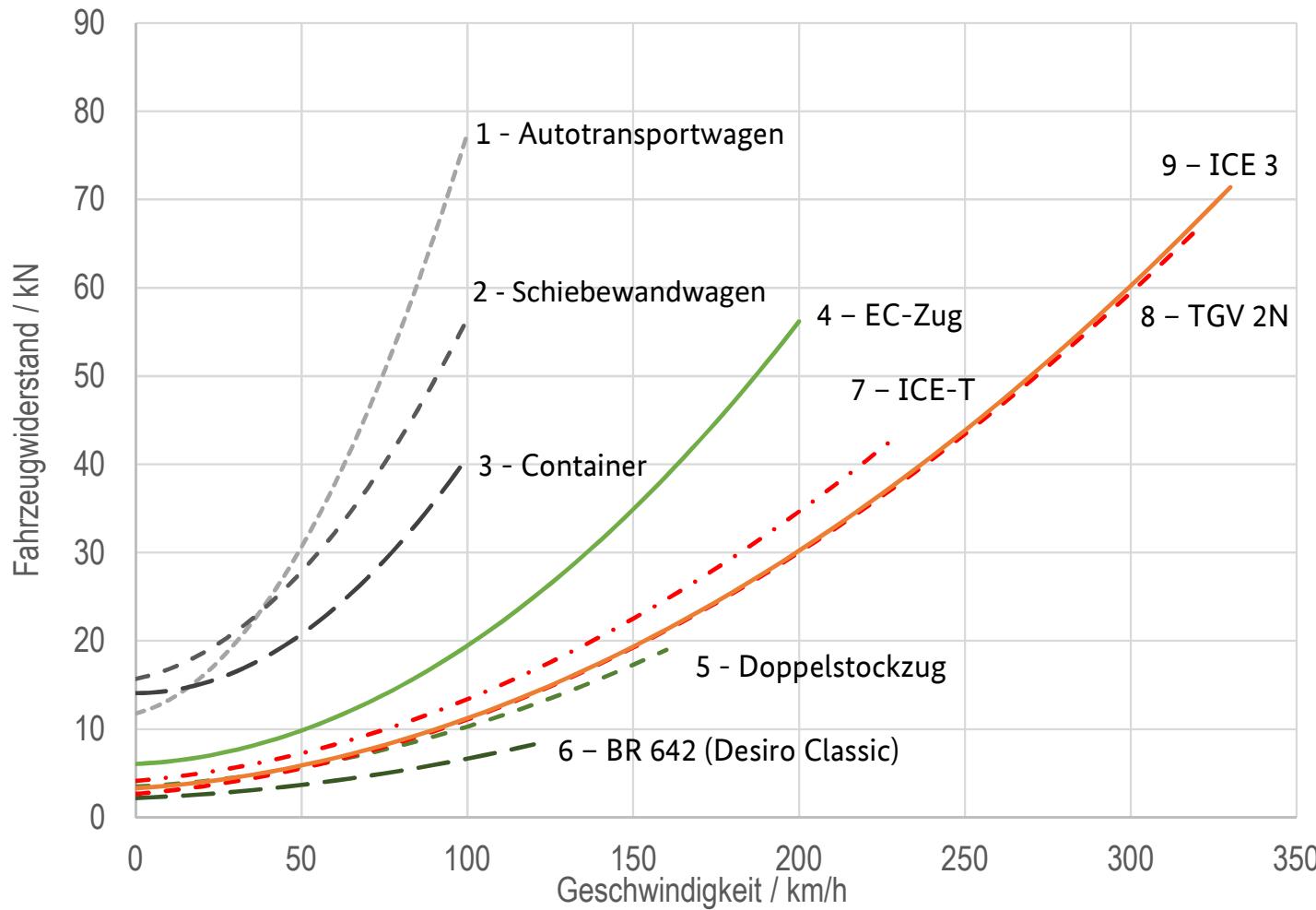
Bsp.: HSR-350x (Südkorea) - Auslaufversuche



Kim, S-W & Kwon, H-B & Kim, Y-G & Park, T-W. (2006). Calculation of resistance to motion of a high-speed train using acceleration measurements in irregular coasting conditions. Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part F-journal of Rail and Rapid Transit - PROC INST MECH ENG F-J RAIL R. 220. 449-459.
10.1243/0954409JRRT74.



Fahrzeugwiderstandsgleichungen ausgewählter Fahrzeuge und Züge

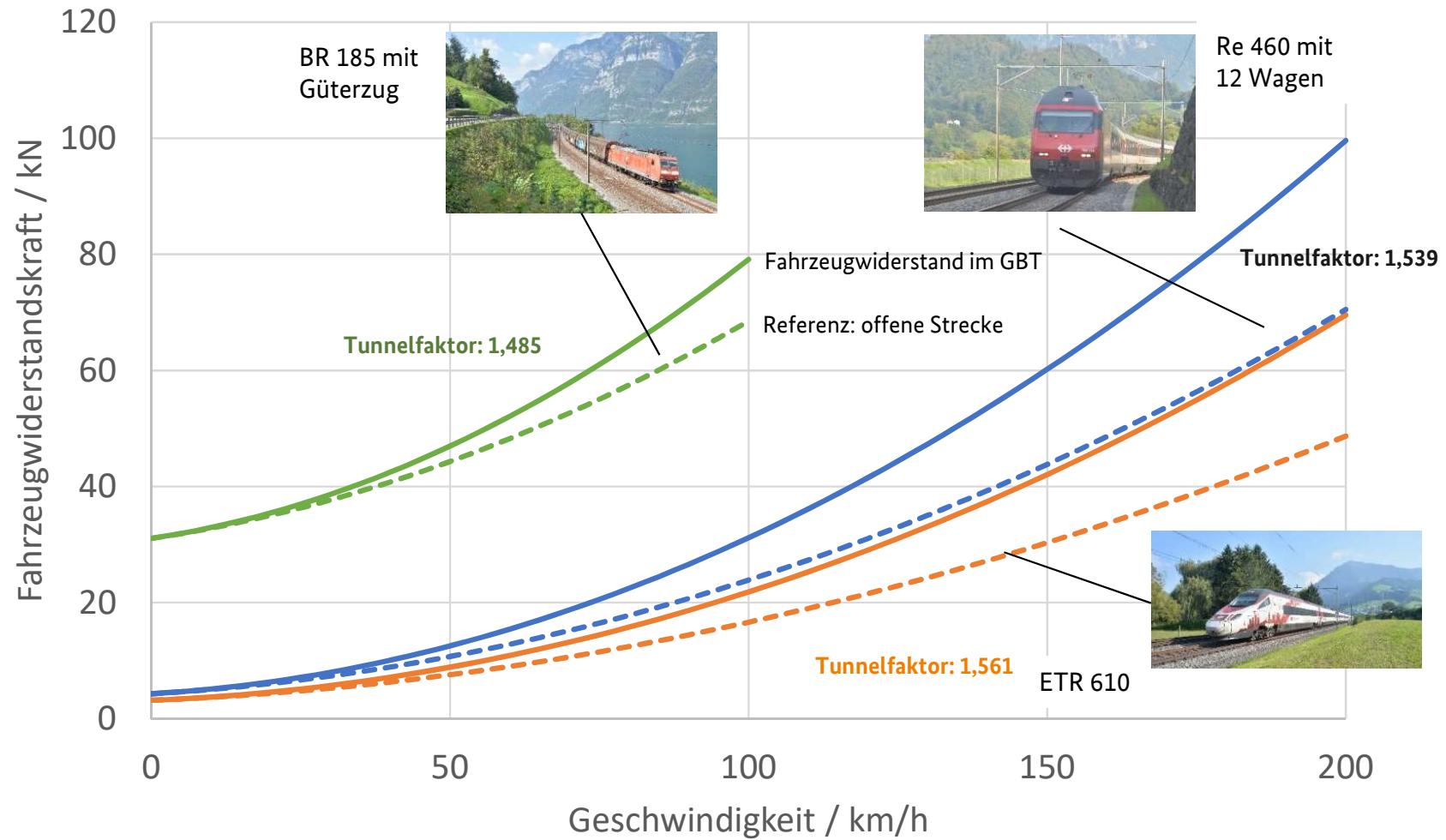


Zur Beachtung:
Die Gleichungen liefern Anhaltswerte
für die Fahrzeugwiderstände auf
empirischer Basis.

Tunnelwiderstand



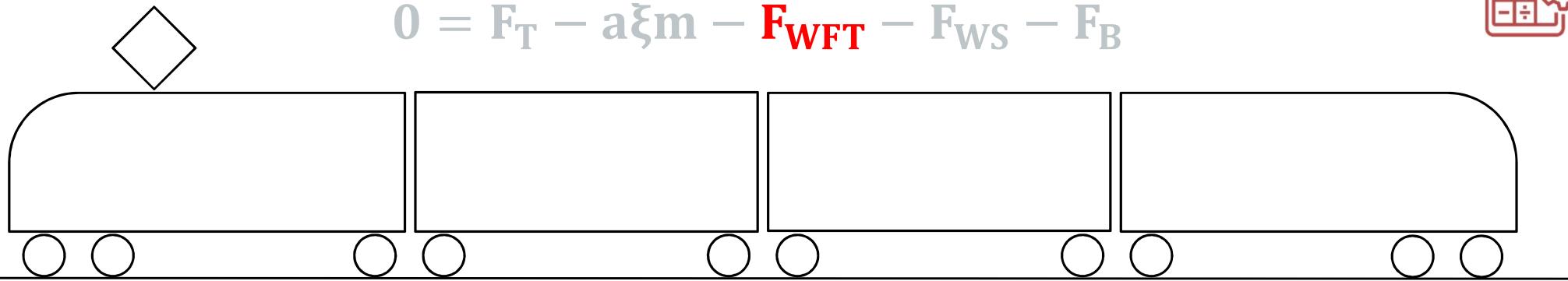
Luftwiderstand im Gotthard- Basistunnel (GBT)



Fallstudie



$$0 = F_T - a\xi m - F_{WFT} - F_{WS} - F_B$$

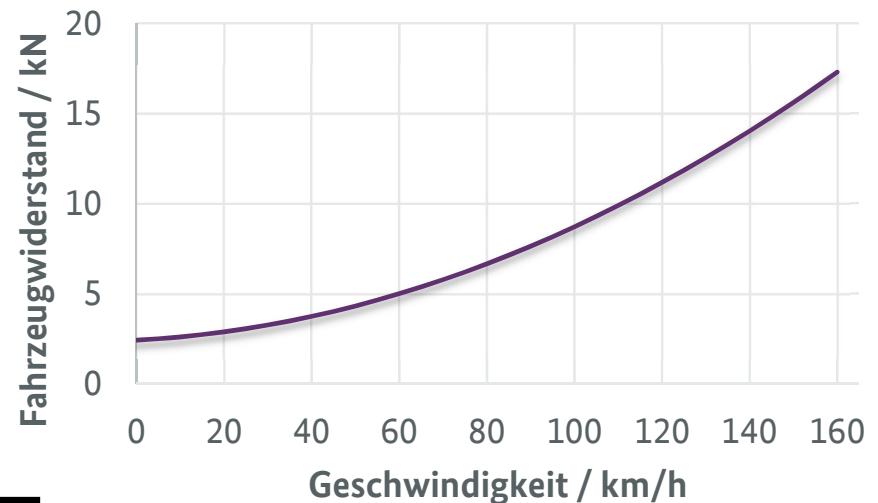


Fahrzeugwiderstandskraft des projektierten Triebzuges:

$$F_{WFT} = 2,4 + 1,3 \cdot \frac{v}{100} + 5,0 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2$$

in km/h

in kN

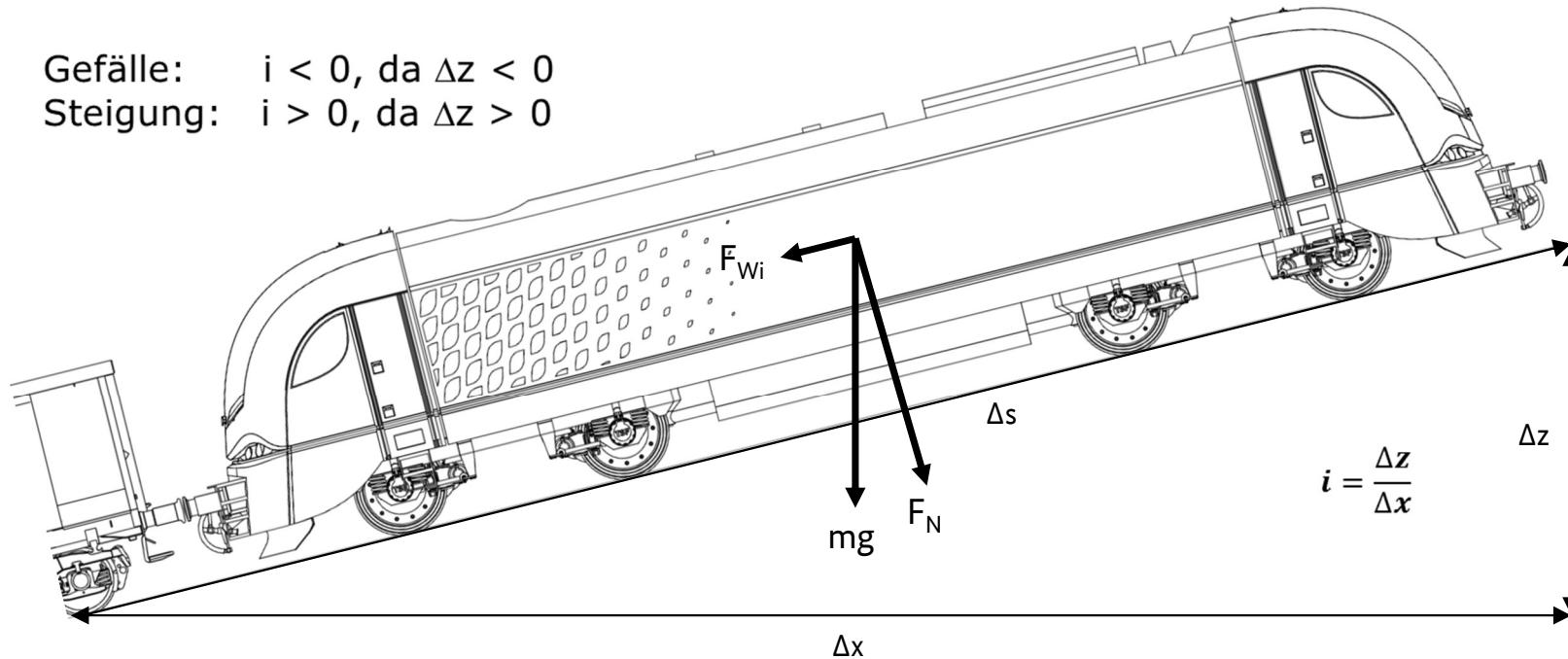


v / km/h	40	80	100	120	140	160
F_{WFT} / kN	3,7	6,6	8,7	11,2	14,0	17,3

Neigungswiderstand

Gefälle: $i < 0$, da $\Delta z < 0$

Steigung: $i > 0$, da $\Delta z > 0$



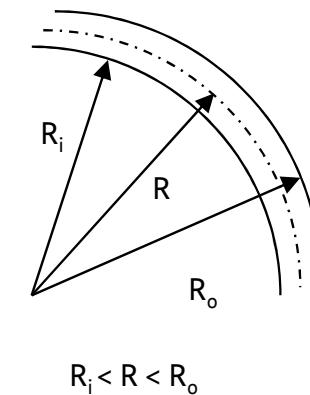
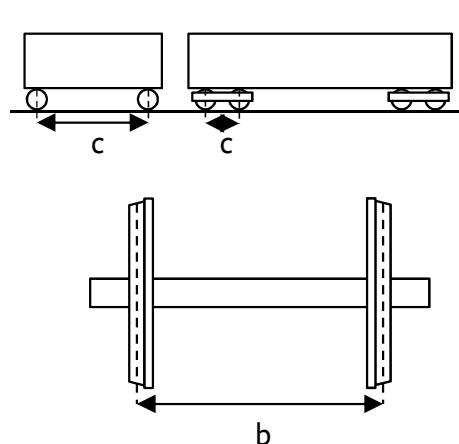
$$F_{Wi} = mg \cdot \sin\alpha$$

für $i < 100\%$ (kleine Winkel) gilt:

$$\sin\alpha = \frac{\Delta z}{\Delta s} \approx \frac{\Delta z}{\Delta x} \approx i$$

$$F_{Wi} \approx mgi$$

Krümmungswiderstand



Formel von Protopapadakis (1937)

$$f_{Bo} = \frac{\mu_{Gl} \cdot (720 \cdot b + 470 \cdot c)}{R}$$

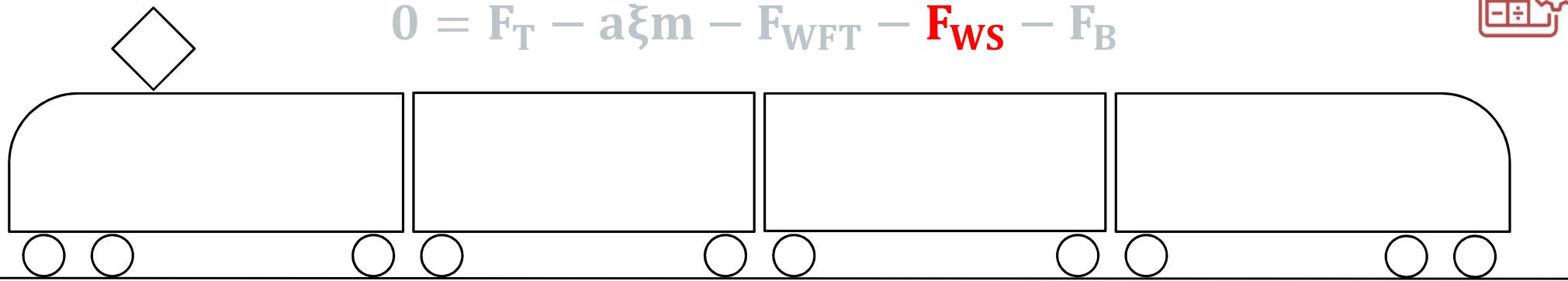
Annotations pointing to the formula:

- Gleitreibung Rad/Schiene (Gliding friction wheel/rail) points to μ_{Gl}
- Gleisbogenradius (Curve radius) points to R
- Laufkreisabstand (Regelspur: 1,5 m) (Running circle distance (Standard gauge: 1.5 m)) points to $720 \cdot b$
- Radsatzabstand (im DG) (Wheelset distance (in DG)) points to $470 \cdot c$

Fallstudie



$$0 = F_T - a\xi m - F_{WFT} - \mathbf{F}_{WS} - F_B$$



Neigungswiderstandskraft des projektierten Triebzuges:

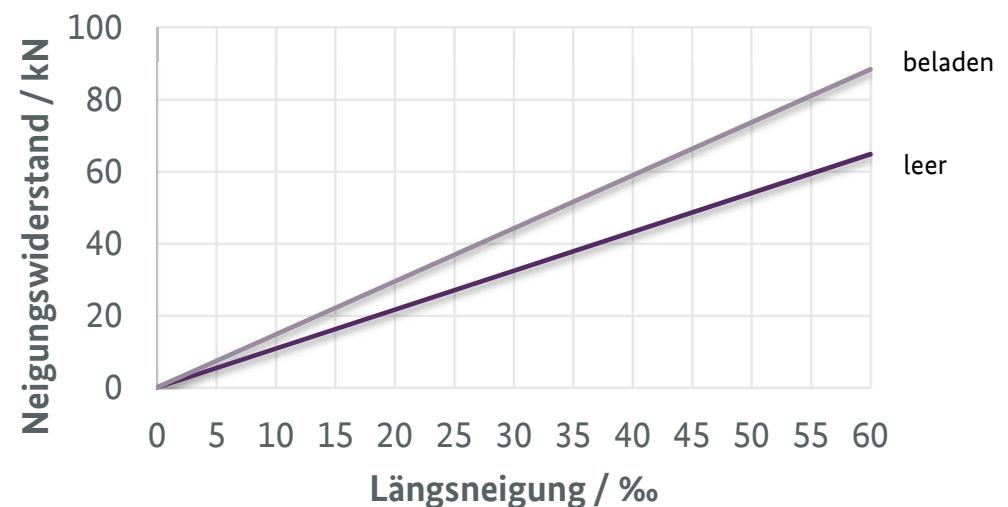
$$F_{WS} = m \cdot g \cdot \frac{i}{1000}$$

in % $\xrightarrow{\text{in \%}}$

in kN $\xrightarrow{\text{in kN}}$

v / km/h	40	80	100	120	140	160
F_{WFT} / kN	3,7	6,6	8,7	11,2	14,0	17,3
$i^* / \%$	3,4 (2,5)	6,1 (4,5)	8,1 (5,9)	10,4 (7,6)	13,0 (9,5)	16,0 (11,8)

Neigung, bei der $|F_{WS}| = |F_{WFT}|$ für $m = 110$ t (150 t)



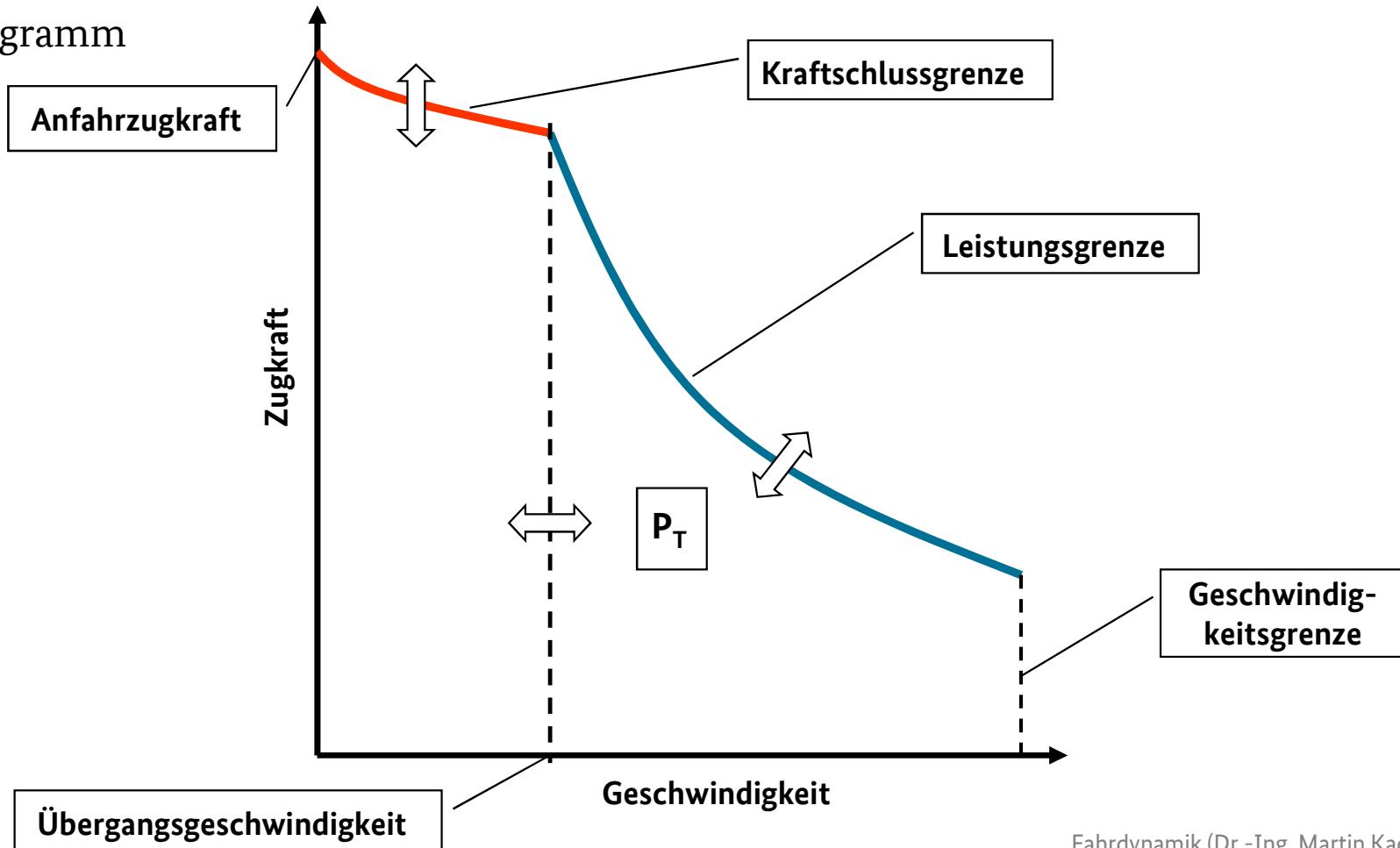
Inhalte

Fahrdynamik

1. Fahrdynamische Grundgleichung und Massenfaktor
2. Fahrwiderstandskräfte
- 3. Antriebskräfte**

Antriebskräfte

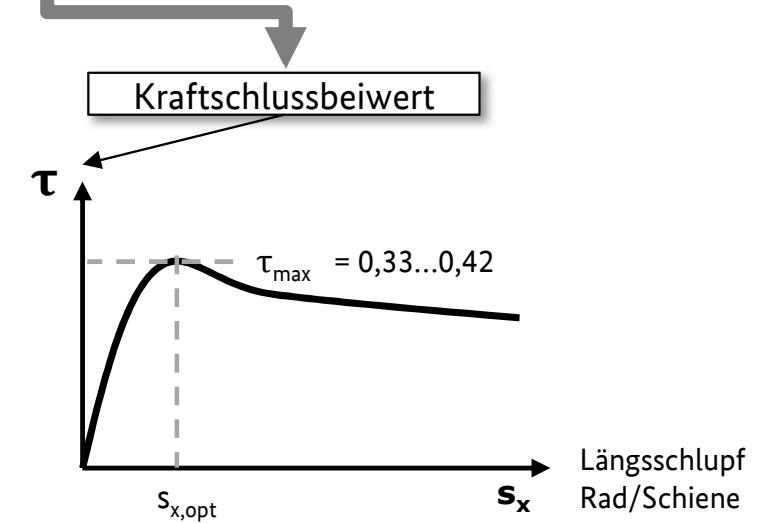
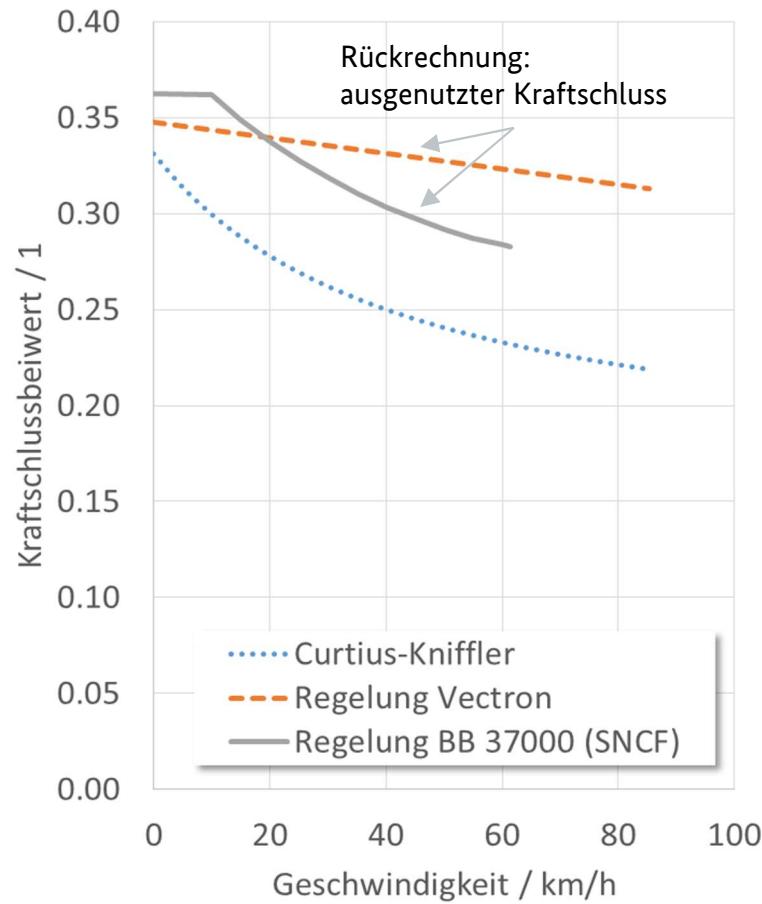
Zugkraft-Diagramm



Antriebskräfte

Zugkraft an der Kraftschlussgrenze

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



Beeinflussungsmöglichkeiten:

- Sandstreueinrichtung
- Radsatzschlupfregelung

Antriebskräfte

Kraftschlussbeiwert

Es gibt nicht **DEN** Kraftschlussbeiwert.

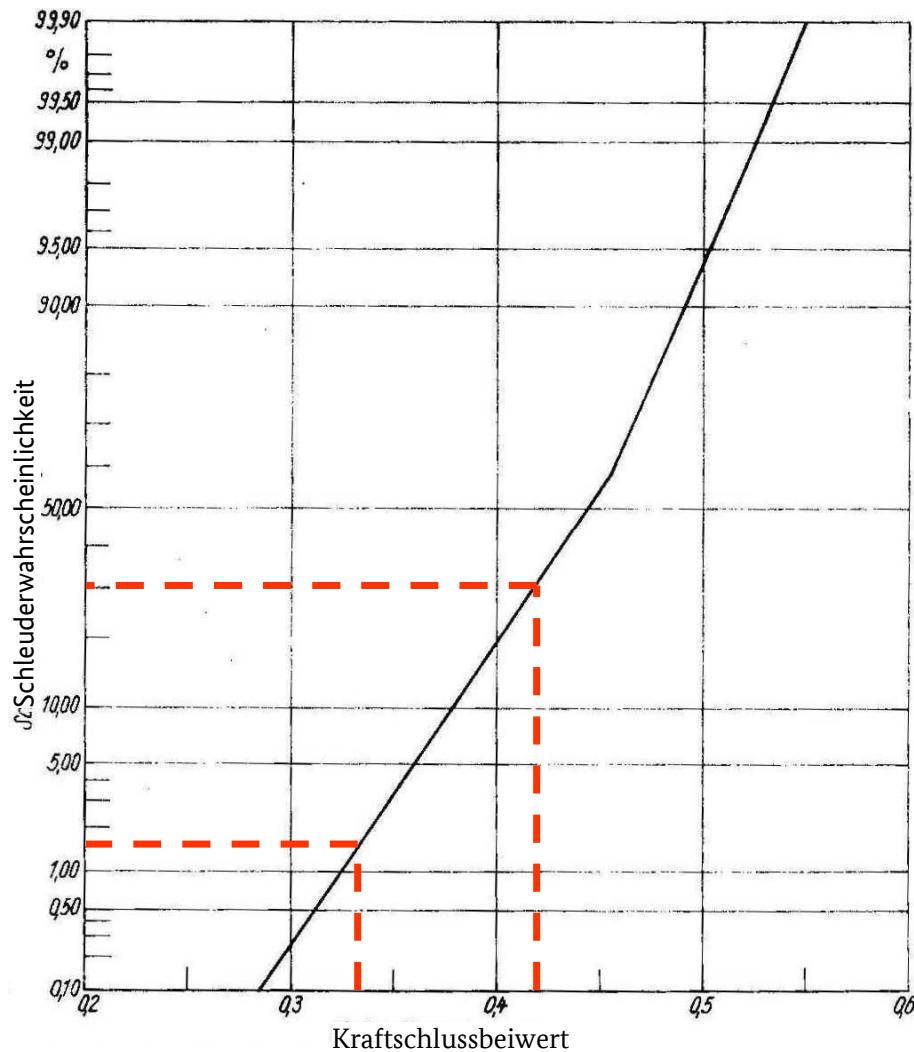
Allgemein anerkannt sind heute folgende Werte:

Traktion: $T_{\max} = 0,30 \dots 0,36$

Bremsen: $T_{\max} = 0,12 \dots 0,15$

Die Annahme höherer Werte (bis 0,42) für Traktion kann gerechtfertigt werden, wenn die erhöhte Schleuderwahrscheinlichkeit und der damit verbundene erhöhte Aufwand für die Regelung der Zugkraft berücksichtigt werden.

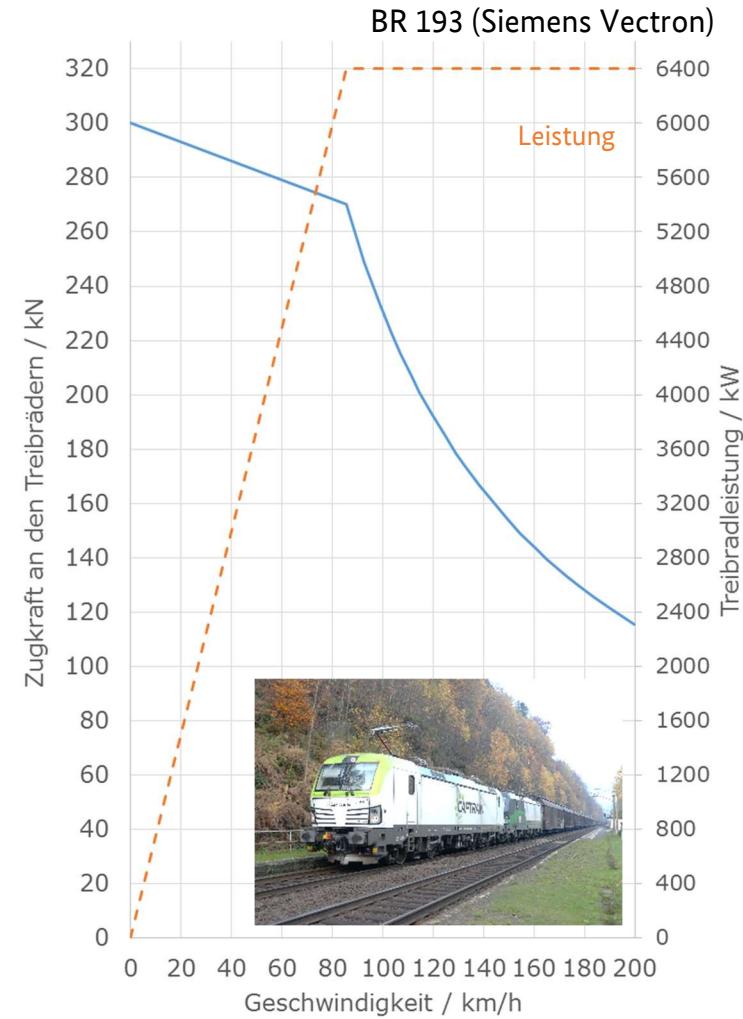
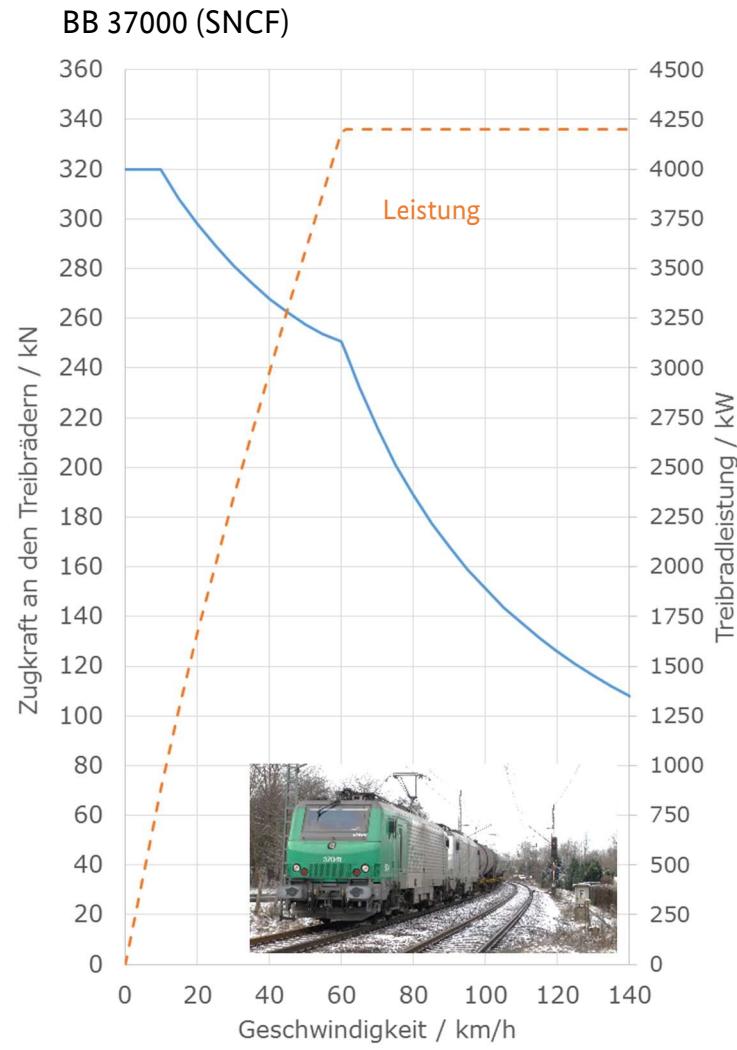
Abbildung gültig für saubere Schienen (trocken und nass)



(Quelle des Diagrammes: Bendel „Die elektrische Lokomotive“, 1994, transpress)

Fahrdynamik (Dr.-Ing. Martin Kache), Folie 29

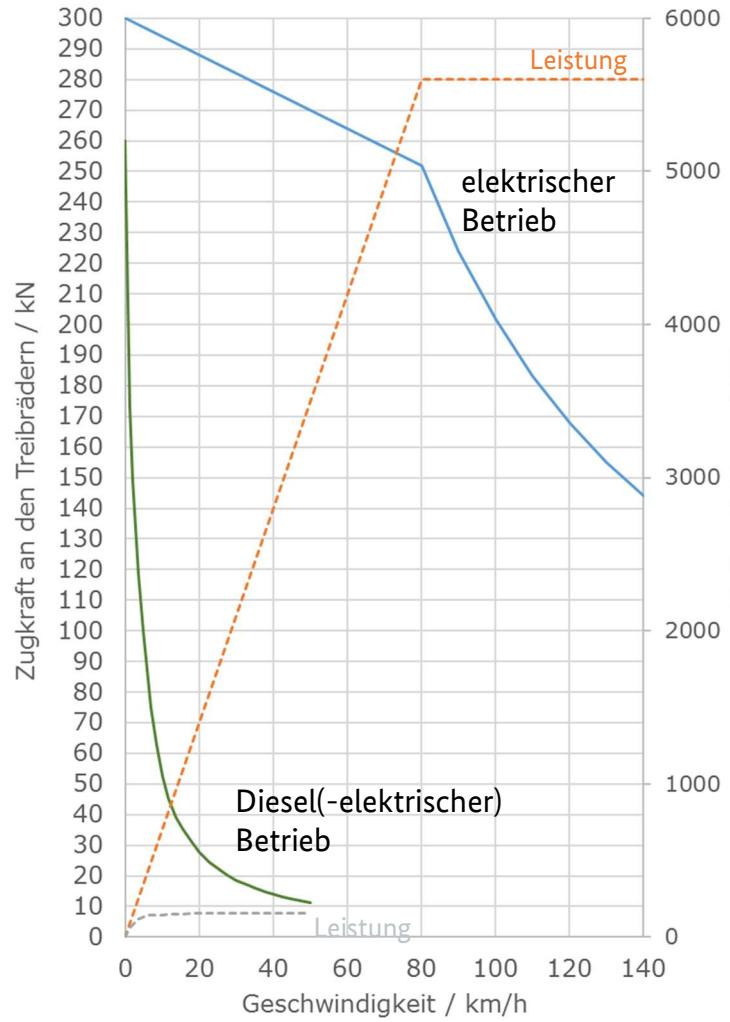
Zugkraftdiagramme von elektrischen Triebfahrzeugen mit Drehstromantrieben



Zugkraftdiagramme von Zweikraft- und Mehrsystemtriebfahrzeugen

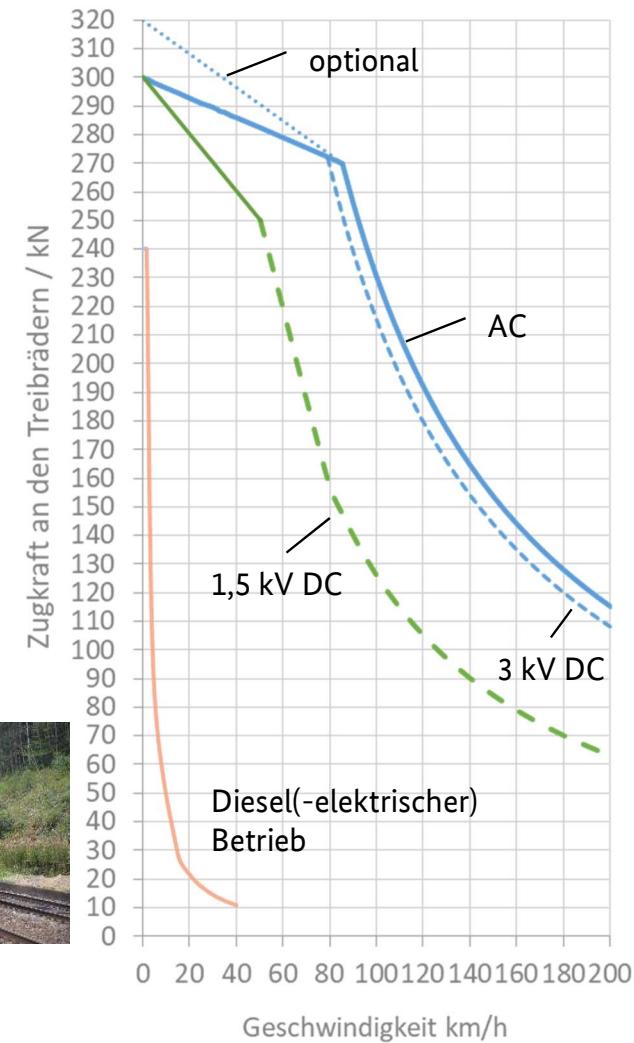
Beispiel 1:

ALSTOM
Traxx 3
Lastmile



Beispiel 2:

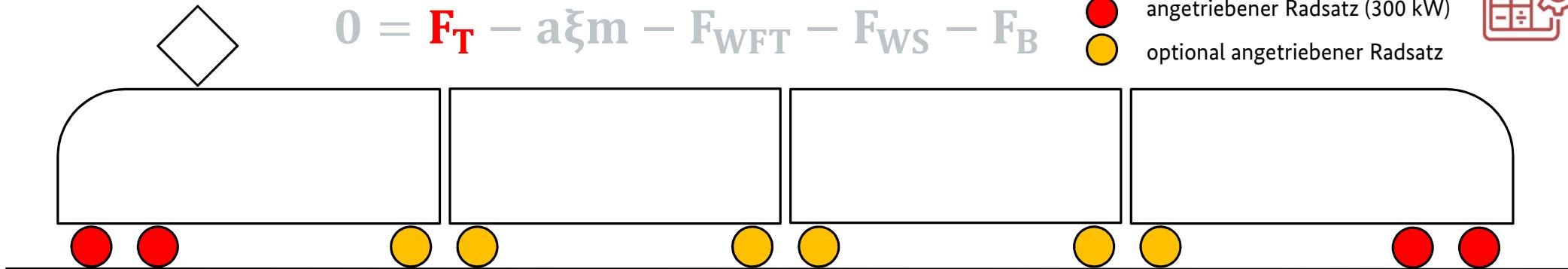
Siemens Vectron



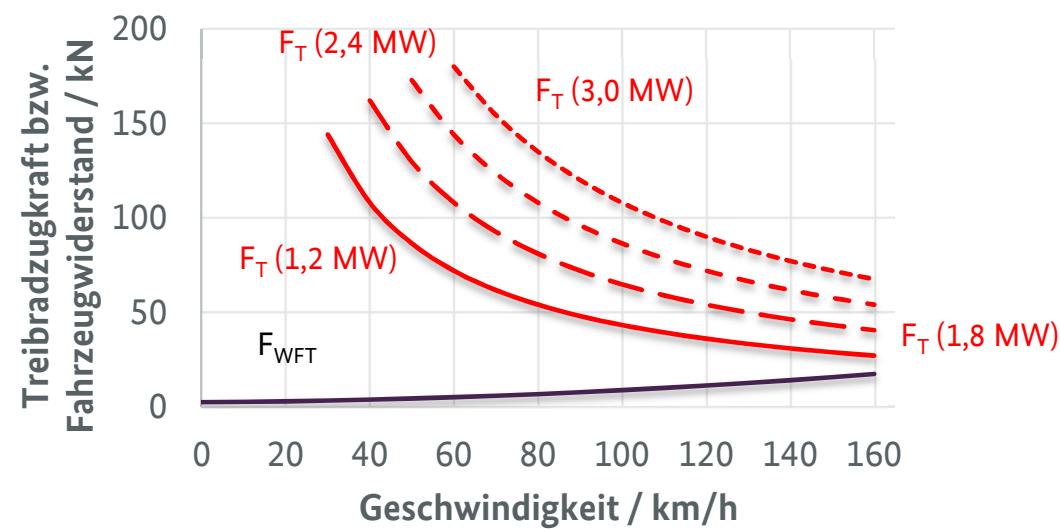
Fallstudie

$$0 = F_T - a\xi m - F_{WFT} - F_{WS} - F_B$$

- 
- angetriebener Radsatz (300 kW)
 - optional angetriebener Radsatz



Antrieb	$F_{T,max} (\tau=0,2)$	a_{max}	P_T
4/10	86,3 kN	0,58 m/s ²	1200 kW
6/10	129,5 kN	0,89 m/s ²	1800 kW
8/10	172,7 kN	1,19 m/s ²	2400 kW
10/10	215,8 kN	1,50 m/s ²	3000 kW



Fallstudie



$$0 = F_T - a\xi m - F_{WFT} - F_{WS} - F_B$$

Variante	$F_{T,max}$	τ_{erf}	P_T
NVET 410 1E	172,8 kN	0,40	1200 kW
NVET 410 1A	86,4 kN	0,20	1200 kW
NVET 610 2B	162,0 kN	0,25	1800 kW
NVET 10 4	174,2 kN	0,16	3000 kW

NVET 410 1E:

- hohe Anfahrtzugkraft bei hoher Kraftschlussausnutzung, geringe Antriebsleistung

NVET 410 1A:

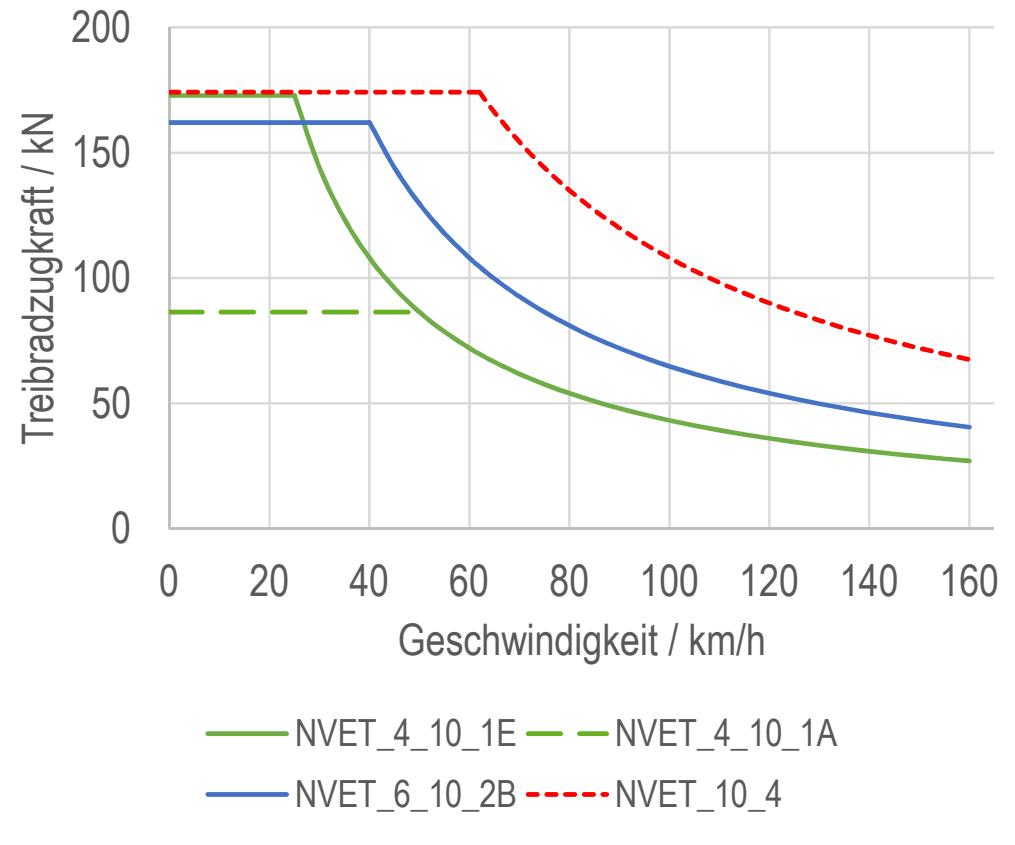
- geringe Anfahrtzugkraft bei geringer Kraftschlussausnutzung, geringe Antriebsleistung

NVET 610 2B:

- hohe Anfahrtzugkraft bei eher geringer Kraftschlussausnutzung, mittlere Antriebsleistung

NVET 10 4:

- hohe Anfahrtzugkraft bei geringer Kraftschlussausnutzung, maximale Antriebsleistung („Vollantrieb“)



Inhalte

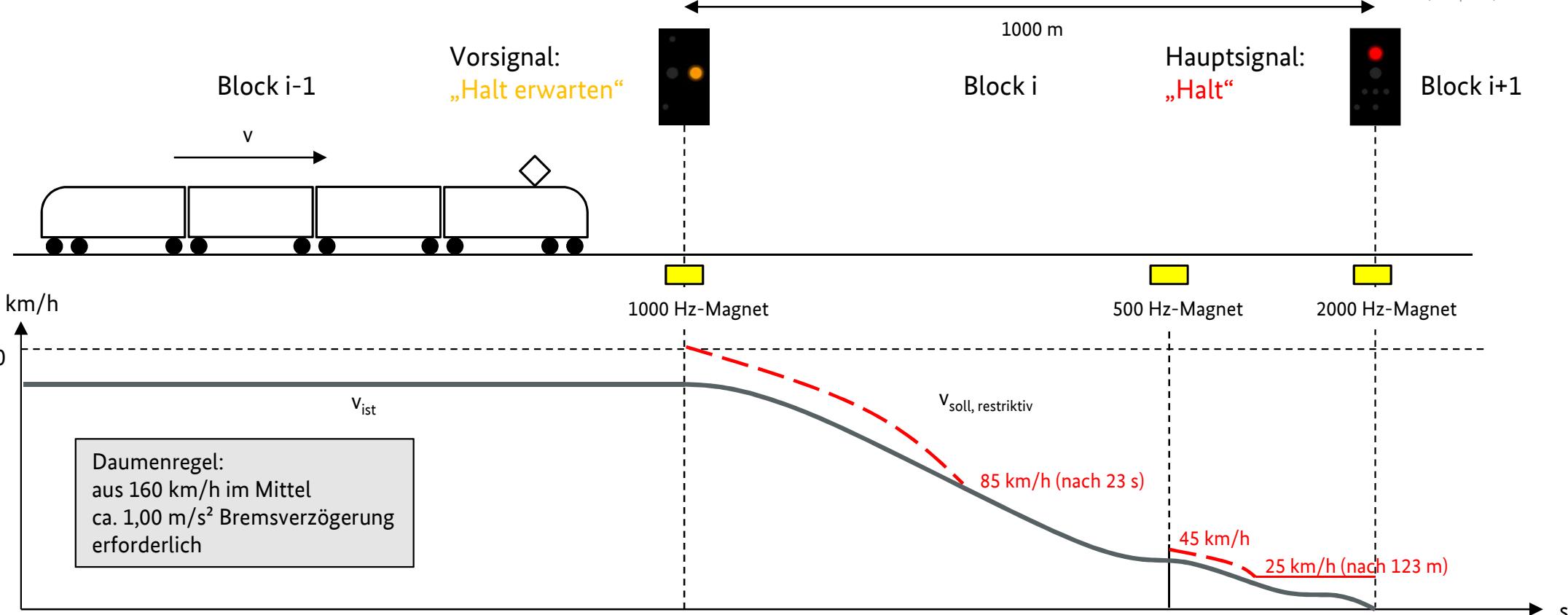
Fahrdynamik

1. Fahrdynamische Grundgleichung und Massenfaktor
2. Fahrwiderstandskräfte
3. Antriebskräfte
- 4. Bremskräfte**

Bremsungen bei der Eisenbahn

Hintergrund: Fahren im Raumabstand unter Einwirkung von Zugsicherungstechnik (PZB, LZB, ETCS)

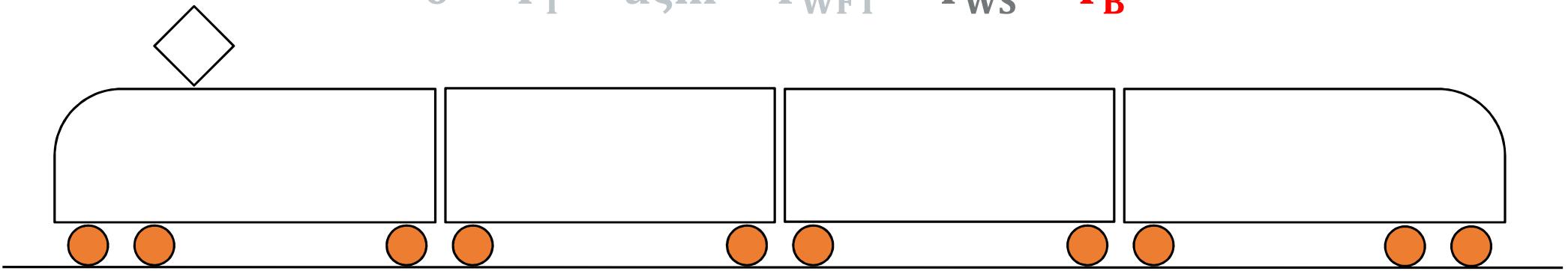
Signalbilder:
Markus Vierlinger
(Wikipedia)



Fallstudie



$$0 = F_T - a\xi m - F_{WFT} - F_{WS} - \mathbf{F}_B$$



maximal über die Radsätze übertragbare Bremskraft: $F_{B,max} = m_R g \tau$ $\tau = 0,15$ (Regelwerk)

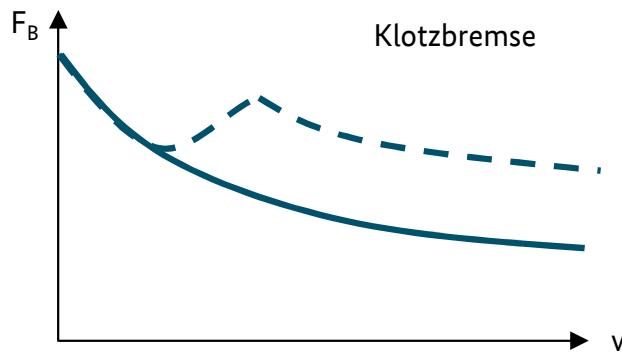
unter Vernachlässigung des Triebfahrzeugwiderstandes gilt für den voll abgebremsten Zug ($m_R = m$) in der Ebene:

$$0 = -a\xi m - F_B = -a_{max}\xi m - mg\tau \quad \rightarrow \quad a_{max}\xi m = -mg\tau$$

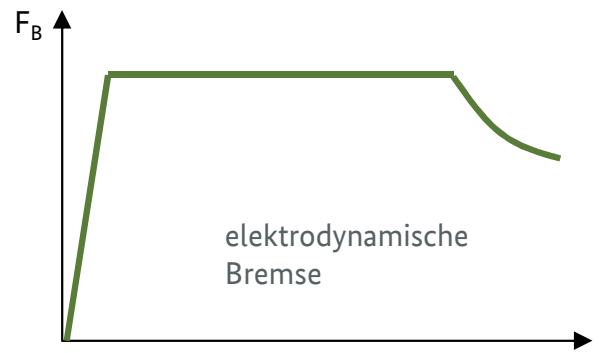
$$a_{max} = \frac{-g\tau}{\xi} = \frac{-9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 0,15}{1,06} = -1,39 \text{ m/s}^2$$

Bremskraftkennlinien (qualitativ)

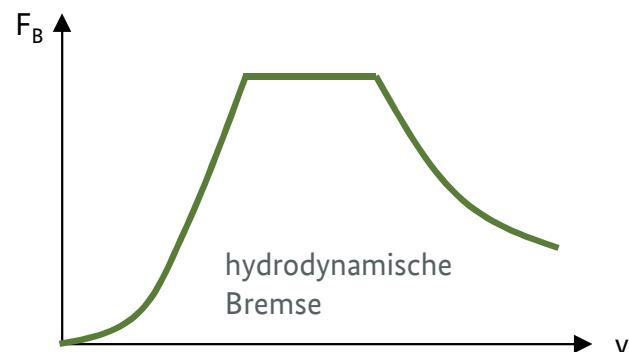
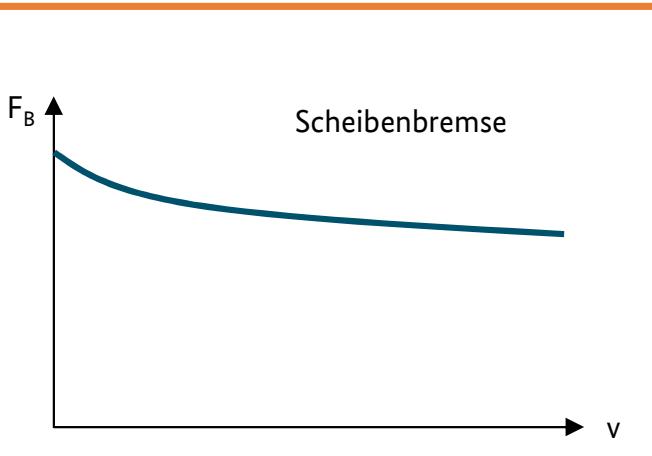
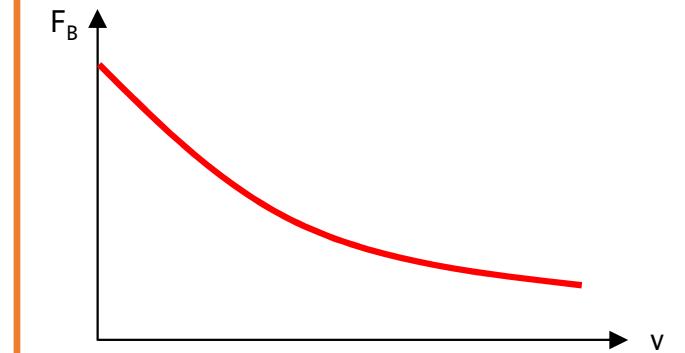
Rad(satz)bremsen (Druckluft)



Dynamische Bremsen



Magnetschienenbremsen



Sicherheit !
unabhängig vom Kraftschluss
zwischen Rad und Schiene

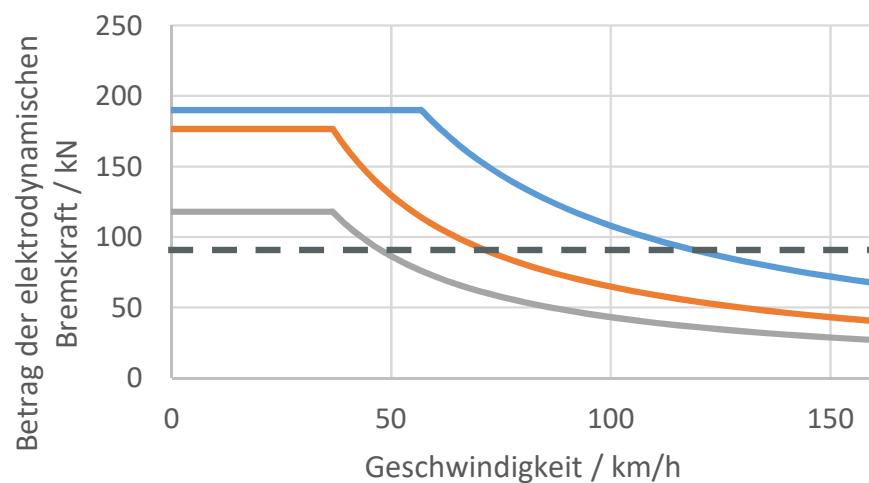
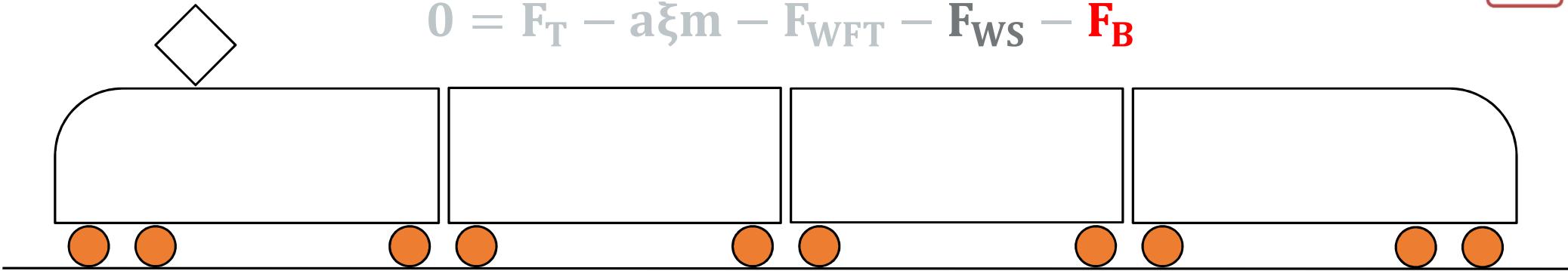


Auswahl für Bsp. Fahrzeug

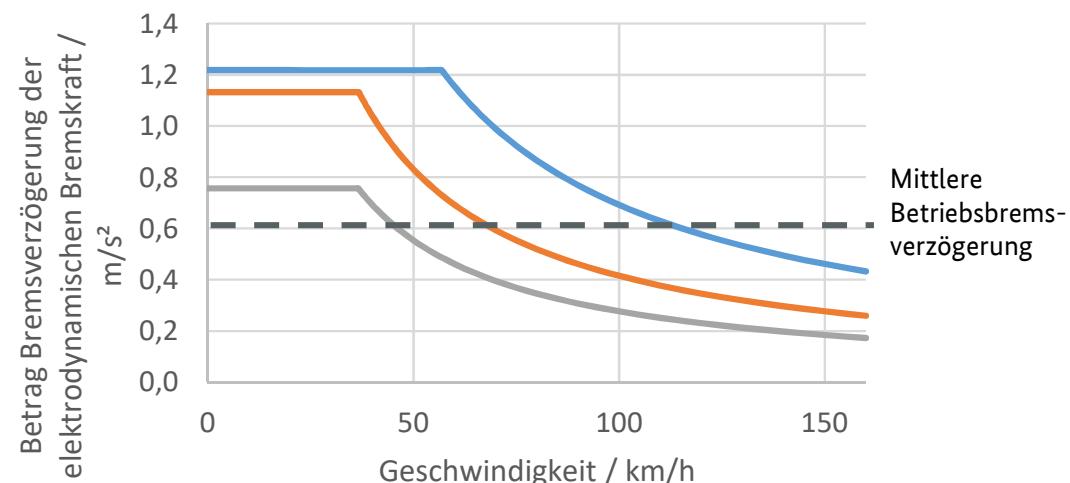
Fallstudie



$$0 = F_T - a\xi m - F_{WFT} - F_{WS} - F_B$$



— NVET 10 4 — NVET 610 1E — NVET 410 1E



— NVET 10 4 — NVET 610 1E — NVET 410 1E

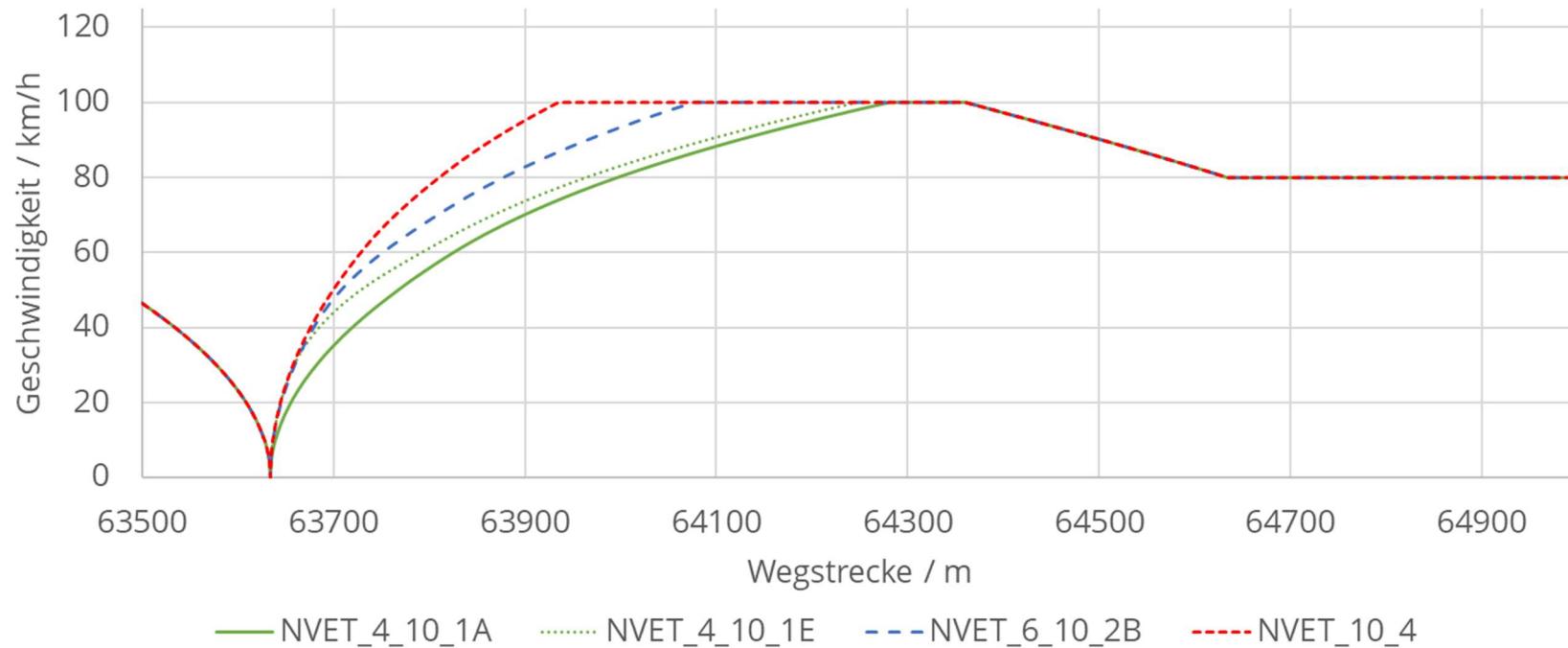


Simulationsergebnisse Leistungsauslegung

Fallstudie - Simulationsergebnisse



- NVET 410 1E:** hohe Anfahrtzugkraft bei hoher Kraftschlussausnutzung, geringe Antriebsleistung
- NVET 410 1A:** geringe Anfahrtzugkraft bei geringer Kraftschlussausnutzung, geringe Antriebsleistung
- NVET 610 2B:** hohe Anfahrtzugkraft bei eher geringer Kraftschlussausnutzung, mittlere Antriebsleistung
- NVET 10 4:** hohe Anfahrtzugkraft bei geringer Kraftschlussausnutzung, maximale Antriebsleistung („Vollantrieb“)

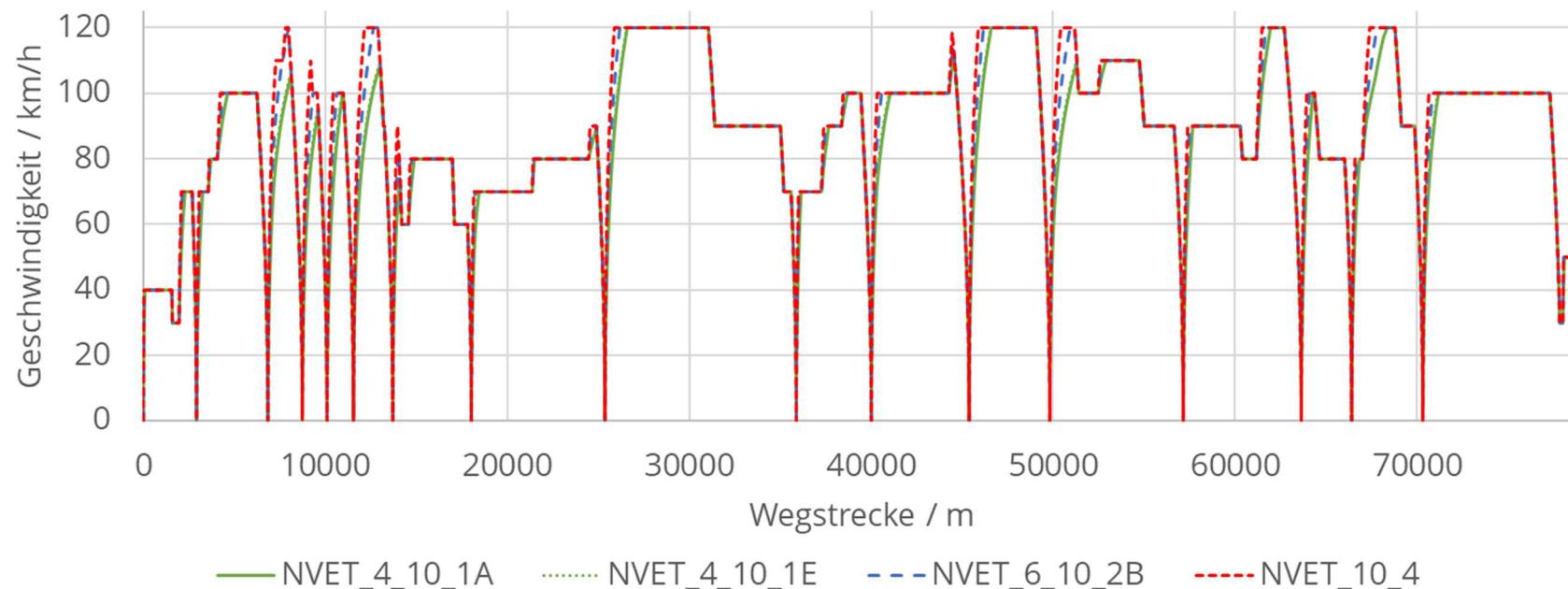


Fallstudie - Simulationsergebnisse



Variante	$F_{T,\max}$	τ_{erf}	P_T	$t_{\text{ges,RB}}$
NVET 410 1E	172,8 kN	0,40	1200 kW	62' 57"
NVET 410 1A	86,4 kN	0,20	1200 kW	64' 42"
NVET 610 2B	162,0 kN	0,25	1800 kW	61' 53"
NVET 10 4	174,2 kN	0,16	3000 kW	61'01"

Variante	$t_{\text{ges,RE}}$
NVET 410 1E	57' 31"
NVET 410 1A	58' 19"
NVET 610 2B	56' 57"
NVET 10 4	56' 28"



Zum Weiterlesen

Book Title Fahrdynamik der Schienenfahrzeuge	Book Subtitle Grundlagen der Leistungsauslegung sowie der Energiebedarfs- und Fahrzeitberechnung	Authors Martin Kache
DOI https://doi.org/10.1007/978-3-658-41713-0	Publisher Springer Vieweg Wiesbaden	eBook Packages Computer Science and Engineering (German Language)
Copyright Information Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2024	Softcover ISBN 978-3-658-41712-3 Published: 20 February 2024	eBook ISBN 978-3-658-41713-0 Published: 19 February 2024
Edition Number 1	Number of Pages XXII, 463	Number of Illustrations 29 b/w illustrations, 263 illustrations in colour



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Kontakt

Dr.-Ing Martin Kache

Eisenbahn-Bundesamt,
Sachbereich 4
August-Bebel-Straße 10
01219 Dresden

Martin Kache
kachem@eba.bund.de
www.eba.bund.de
Tel. +49 351 42 43 400

Bildnachweis: eigenes Bildmaterial, soweit nicht anders
gekennzeichnet

