



Eisenbahn-Bundesamt

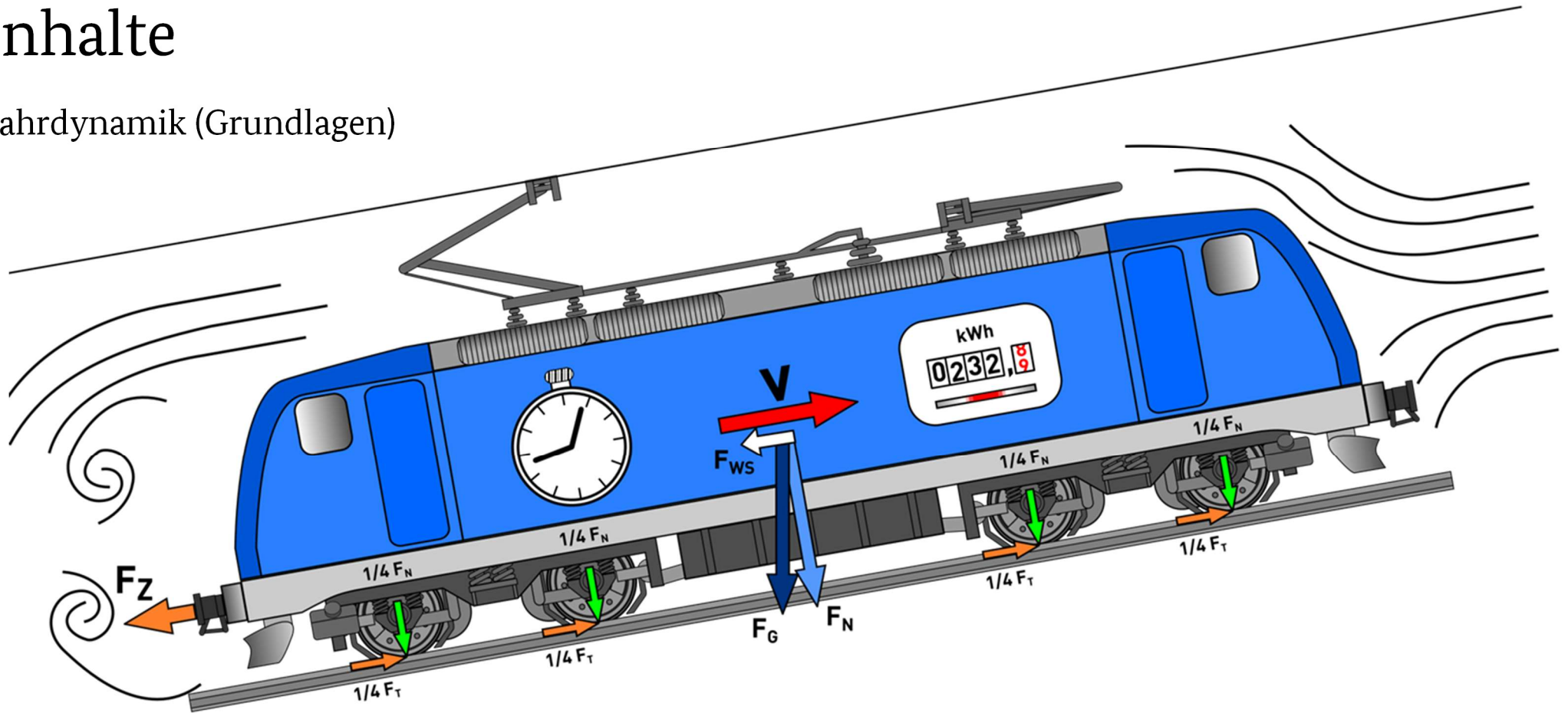
Fahrdynamik (Grundlagen)

Dr. Ing. Martin Kache



Inhalte

Fahrdynamik (Grundlagen)



© Karim Benabdellah, Martin Kache

Inhalte

Fahrdynamik

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

Leistungsauslegung



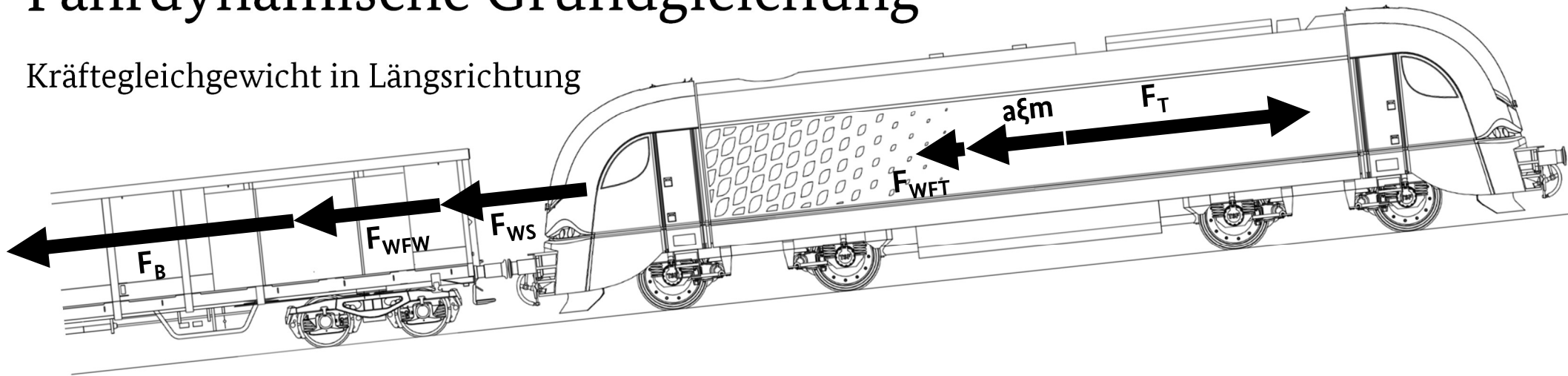
Inhalte

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

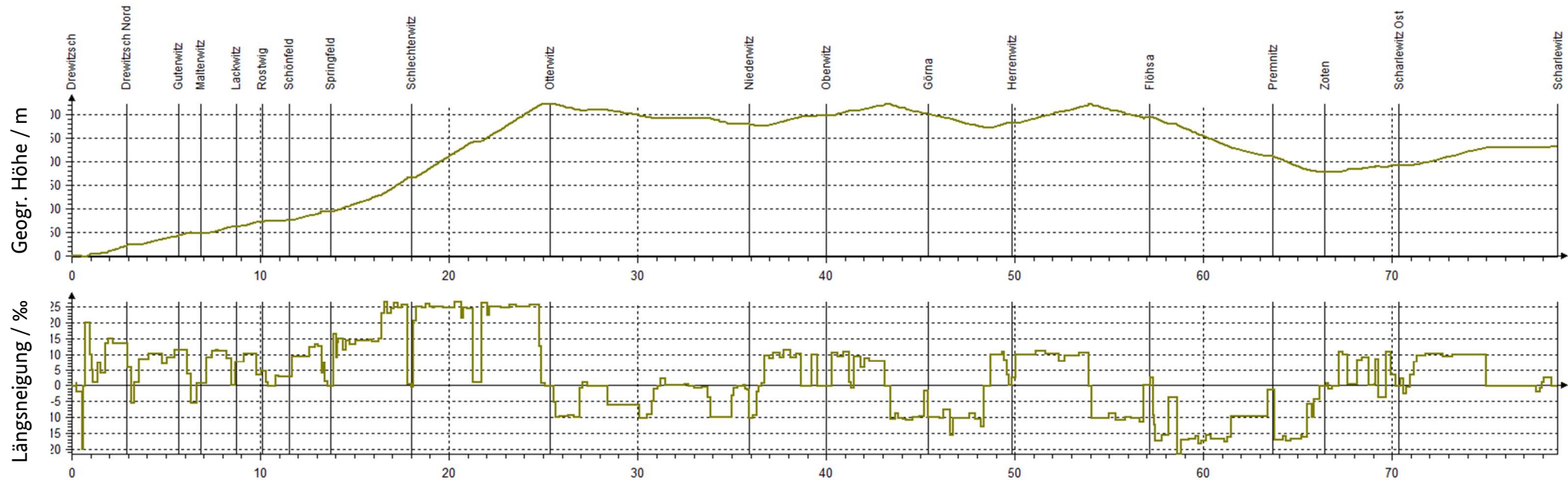
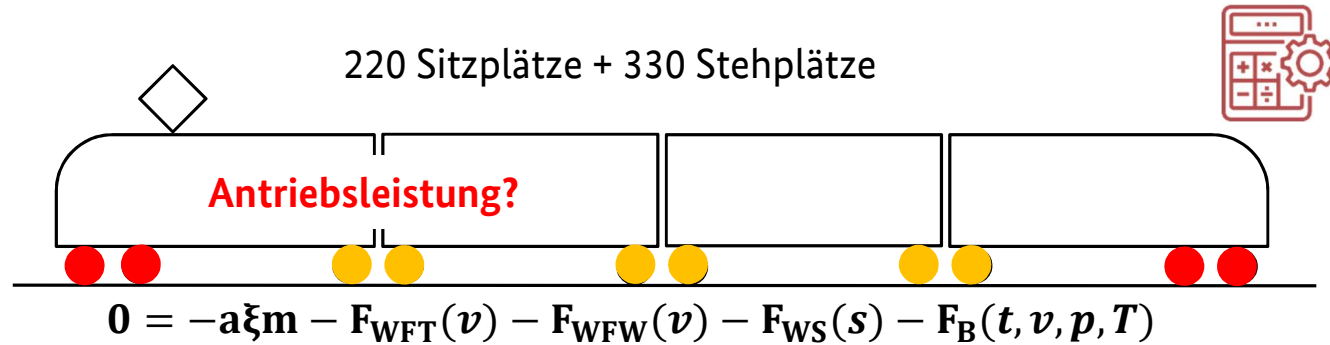
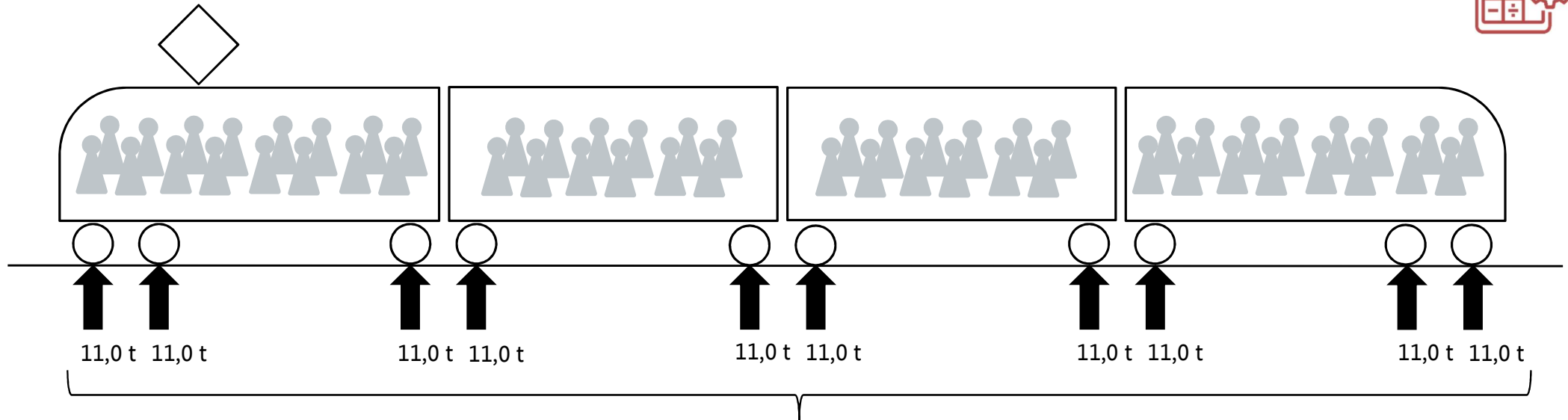


Abbildung erzeugt mit Dynamis (ive mbH)

Fallstudie



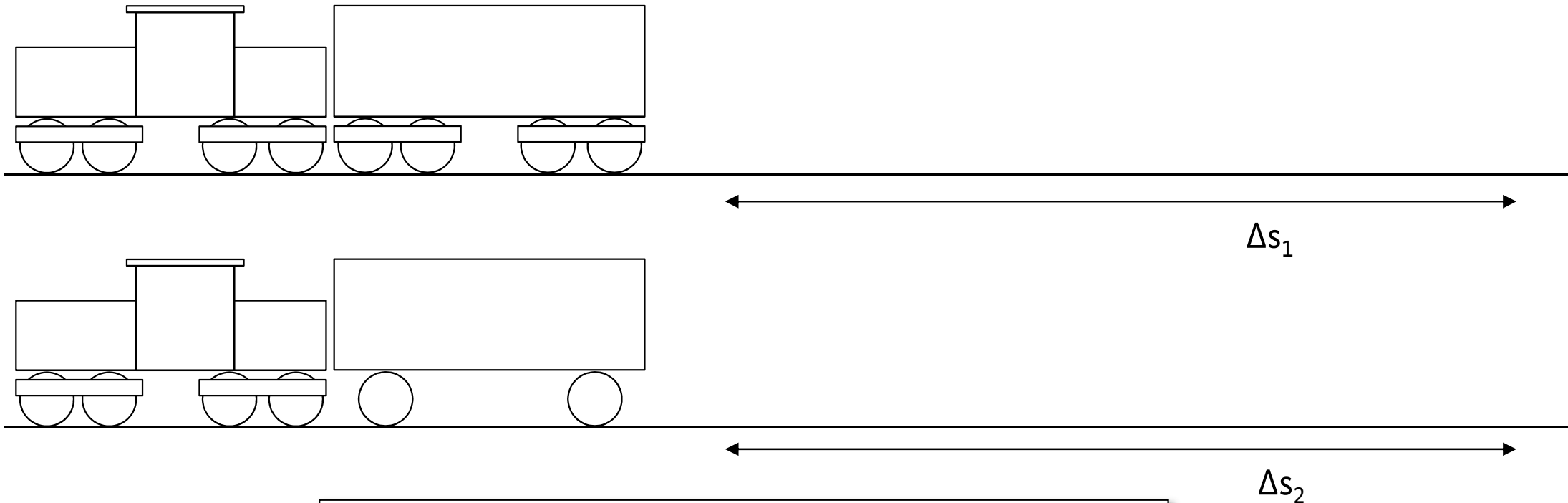
m = 110,0 t (Eigenmasse)

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

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

110...150 t

Gedankenexperiment - Abstoßversuch



Wagenmassen:

$$m_1 = m_2$$

Wagenquerschnitte:

$$A_1 = A_2$$

Geschwindigkeit:

$v_{01} = v_{02}$ (im Moment des Abstoßens)

Fahrwiderstand:

konstant und gleich für beide Wagen

Welcher Wagen rollt weiter?

Wagen1 / Wagen2 / keiner von beiden

Gedankenexperiment - Abstoßversuch



2 Radsätze

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

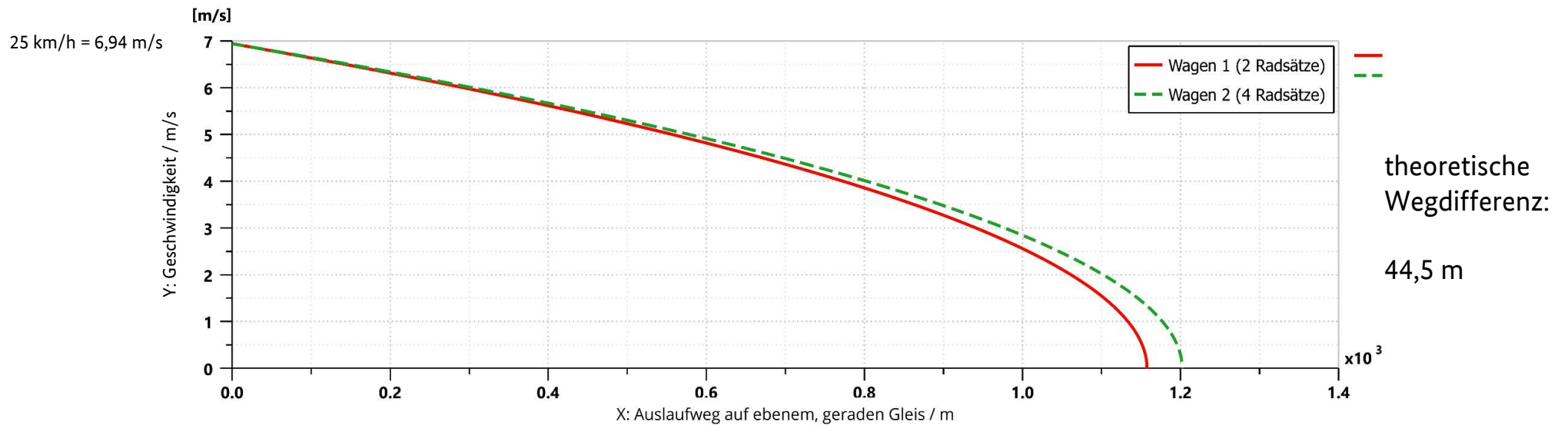


4 Radsätze

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

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

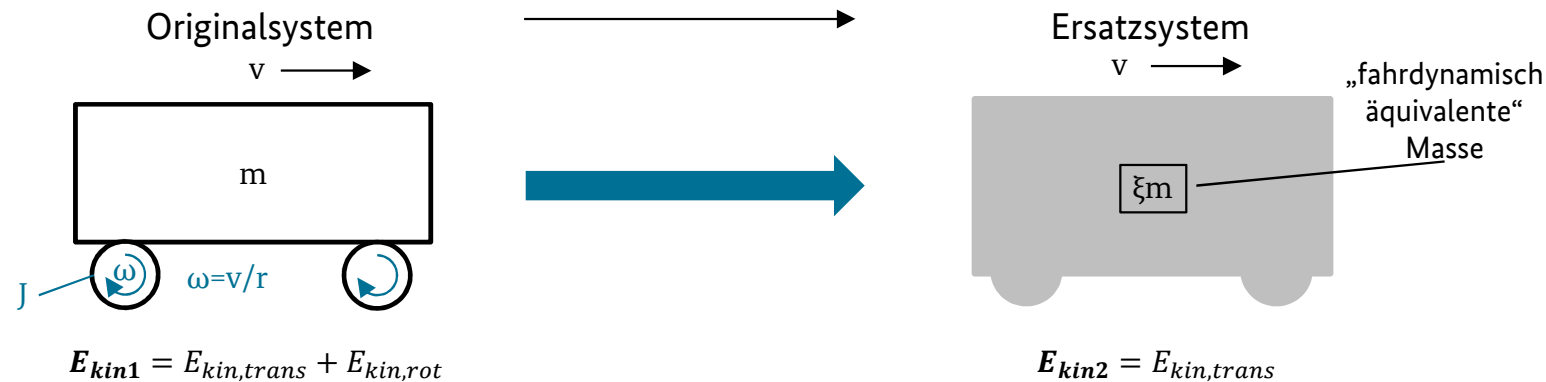
$$E_{\text{kin}} (25 \text{ km/h}) = 781.3 \text{ kJ} = 0.217 \text{ kWh}$$



Fahrdynamischer Massenfaktor

Definition

Ziel: Reduktion auf translatorische Bewegung bei gleichzeitiger Berücksichtigung rotatorischer Trägheiten



Energieansatz:

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

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

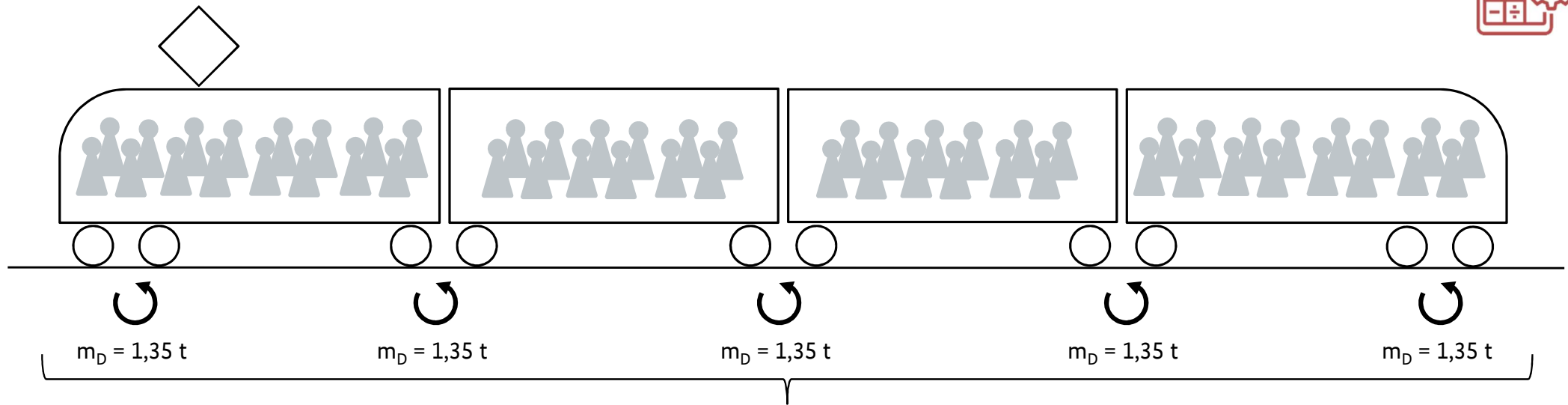
$$\xi = 1 + \frac{\frac{1}{2}J_{ges}\omega^2}{\frac{1}{2}mv^2} = 1 + \frac{E_{kin,rot}}{E_{kin,trans}}$$

Der fahrdynamische Massenfaktor stellt eine virtuelle Erhöhung der Fahrzeugmasse dar.

Er ist abhängig von:

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

Fallstudie



$$m_{D,ges} = 6,75 \text{ t („Drehmasse“)}$$

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

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

1,06...1,04

Inhalte

Fahrdynamik

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

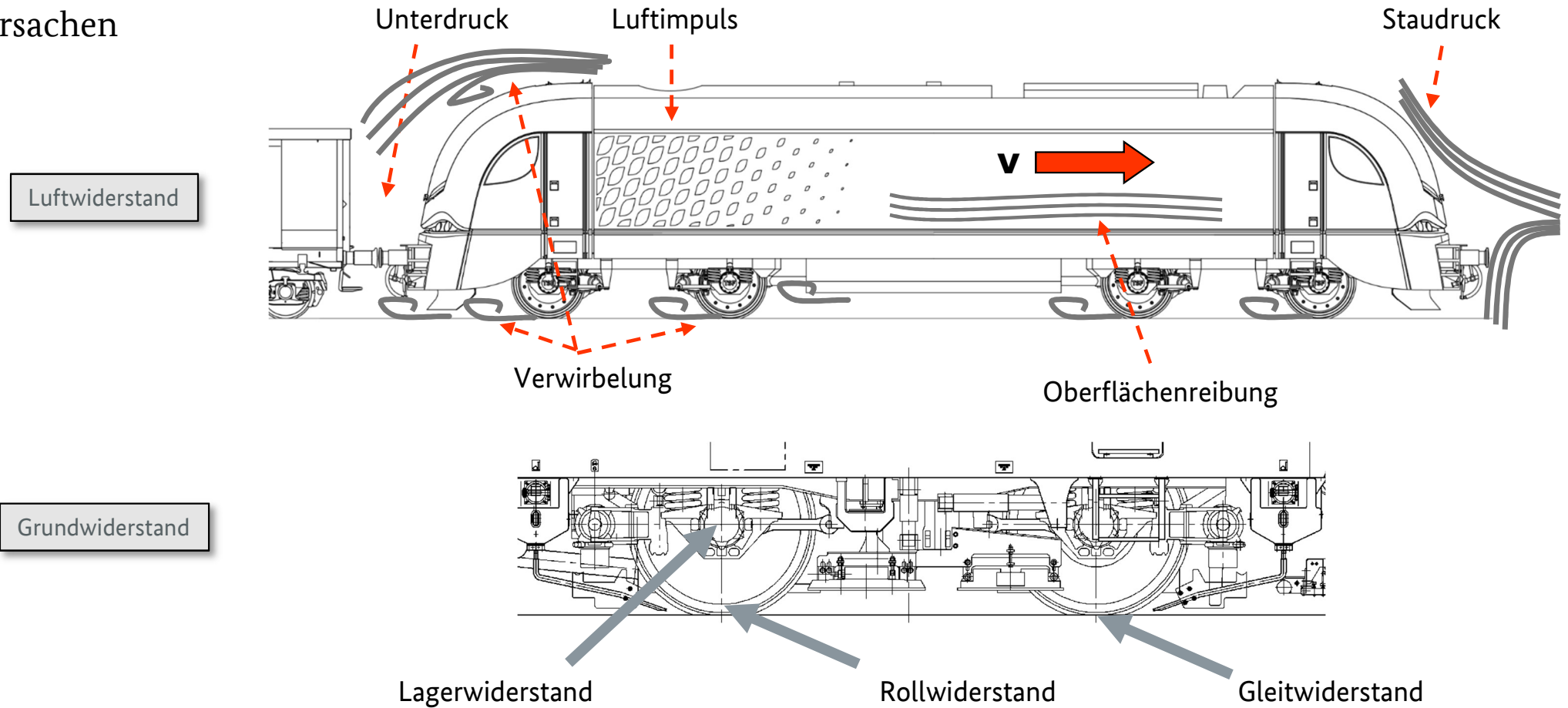
Fahrwiderstandskräfte

Einteilung



Fahrzeugwiderstand

Ursachen



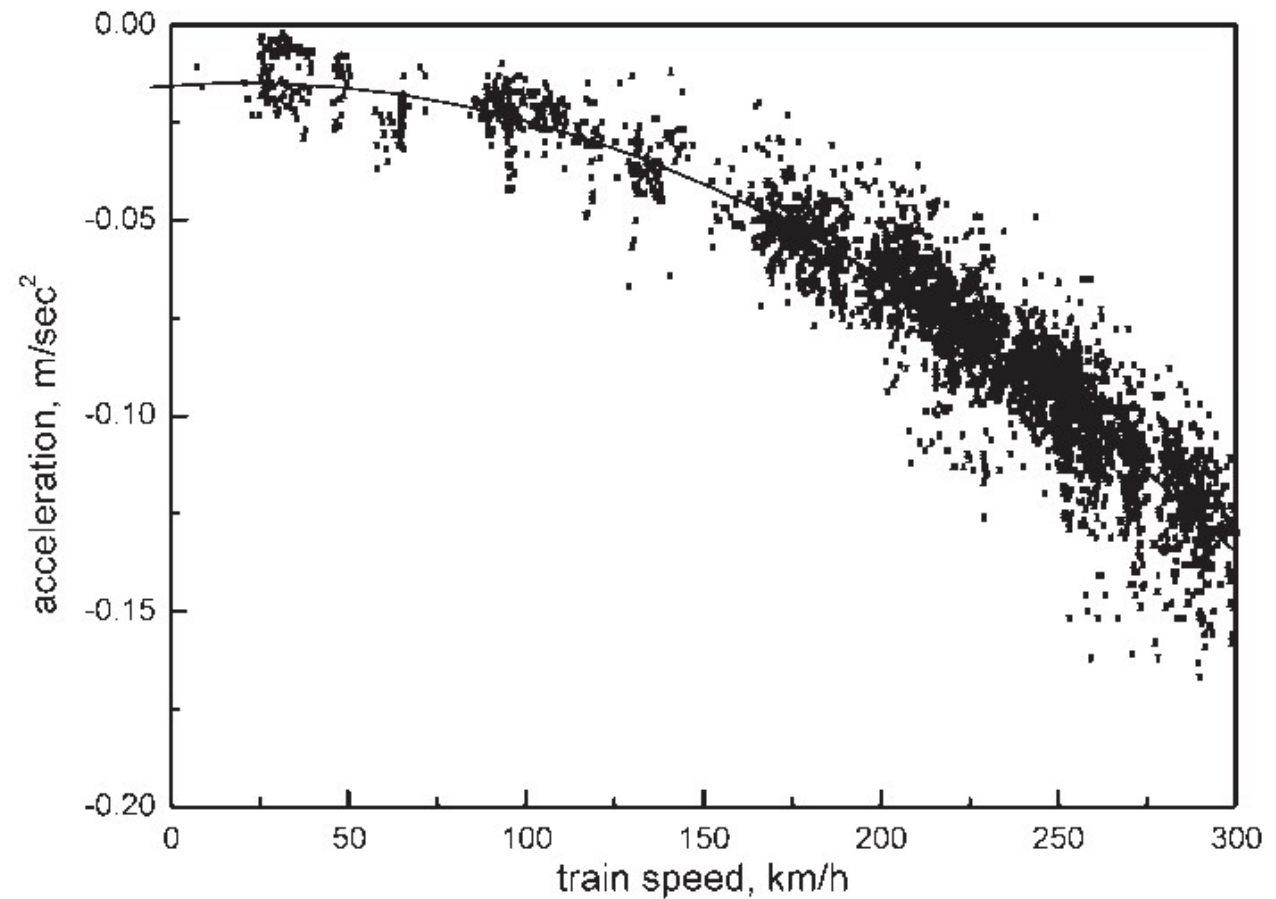
Ermittlung von Fahrzeugwiderstandsgleichungen

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

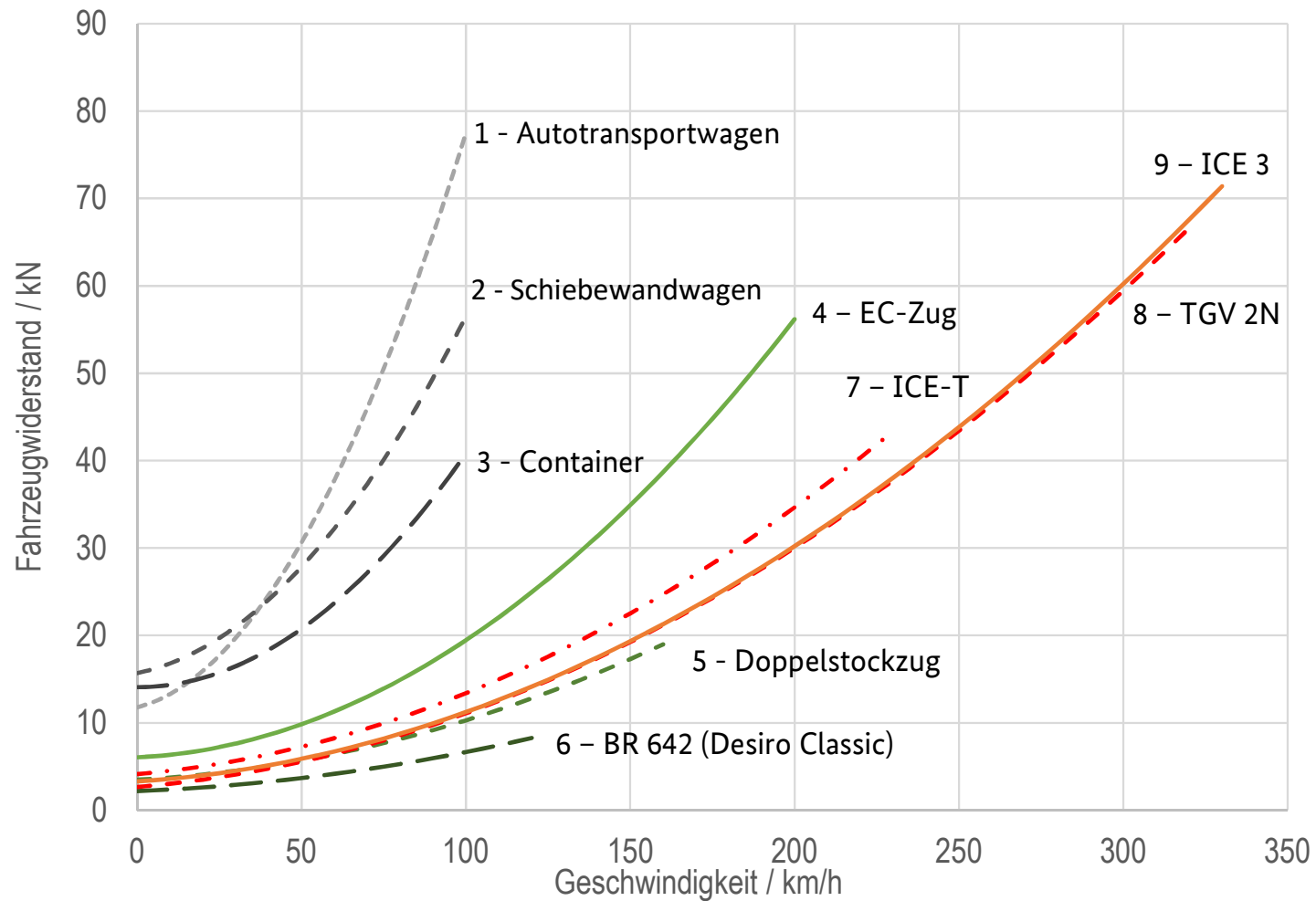


Foto: Lakshmix (wikipedia)

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

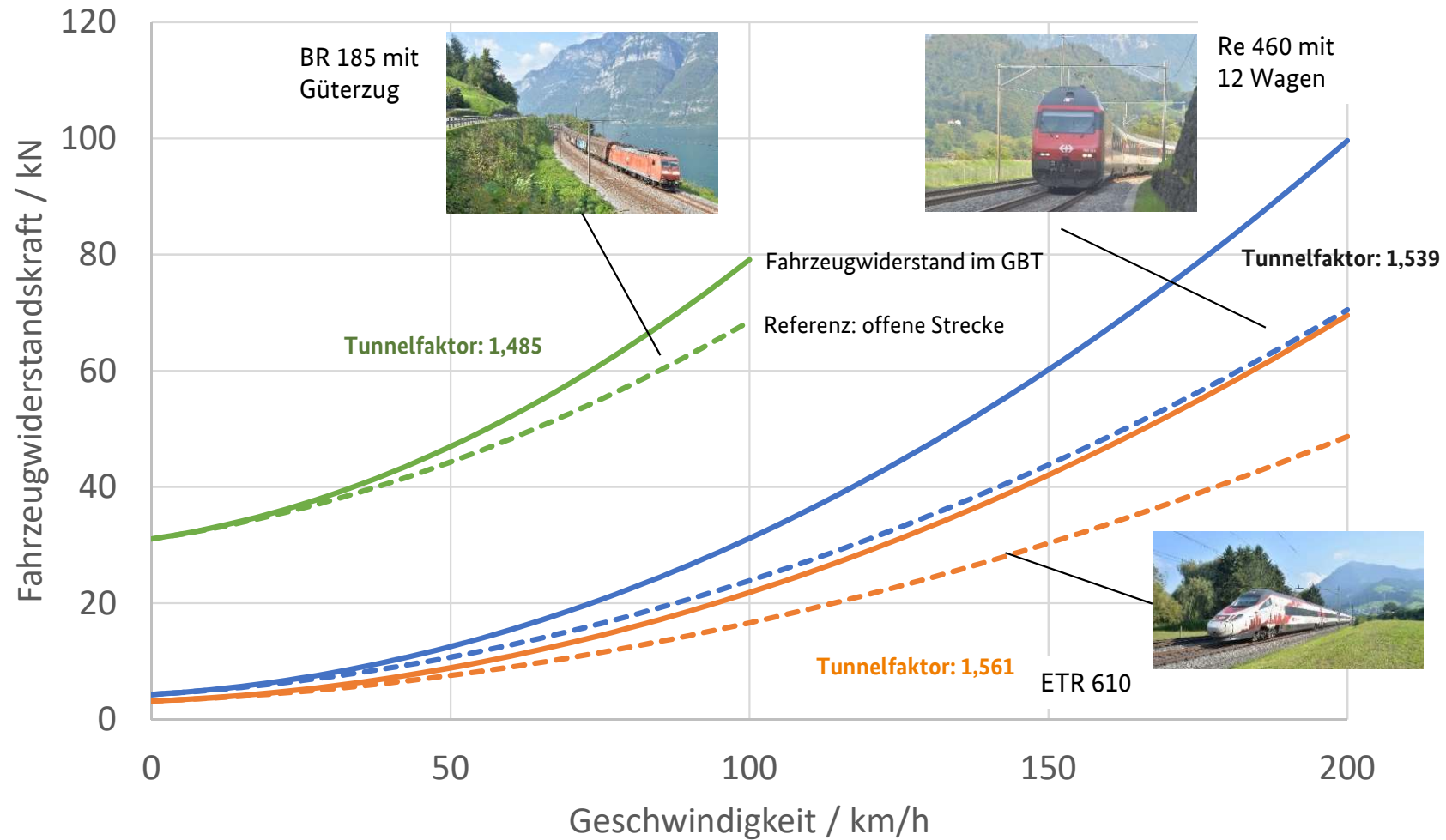


Zur Beachtung:
Die Gleichungen liefern *Anhaltswerte* für die Fahrzeugwiderstände auf empirischer Basis.

Tunnelwiderstand



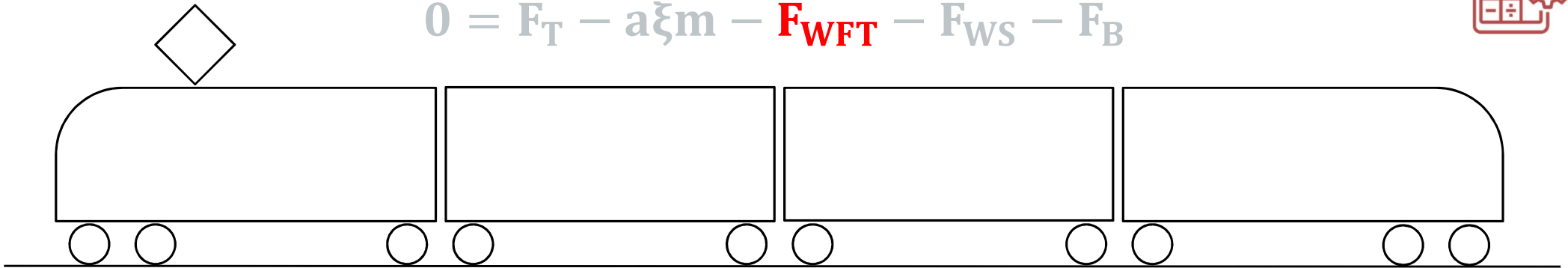
Luftwiderstand im Gotthard- Basistunnel (GBT)



Fallstudie



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

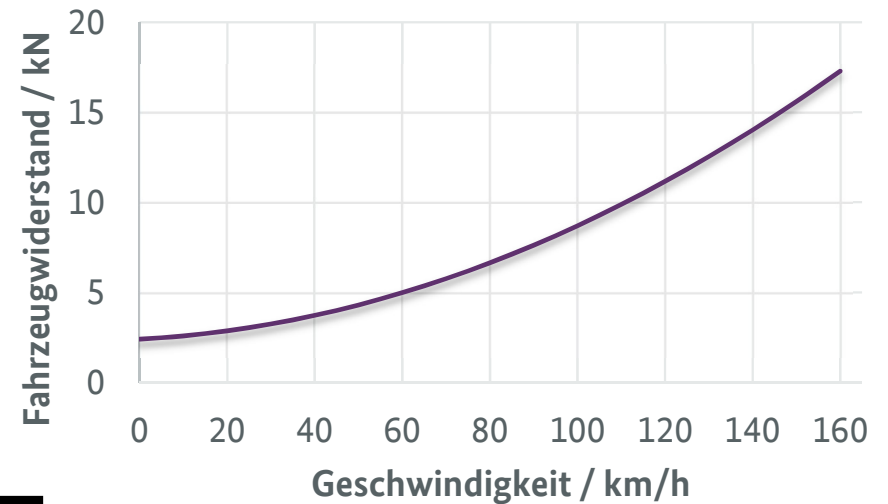


Fahrzeugwiderstandskraft des projizierten Triebzuges:

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

in km/h

in kN

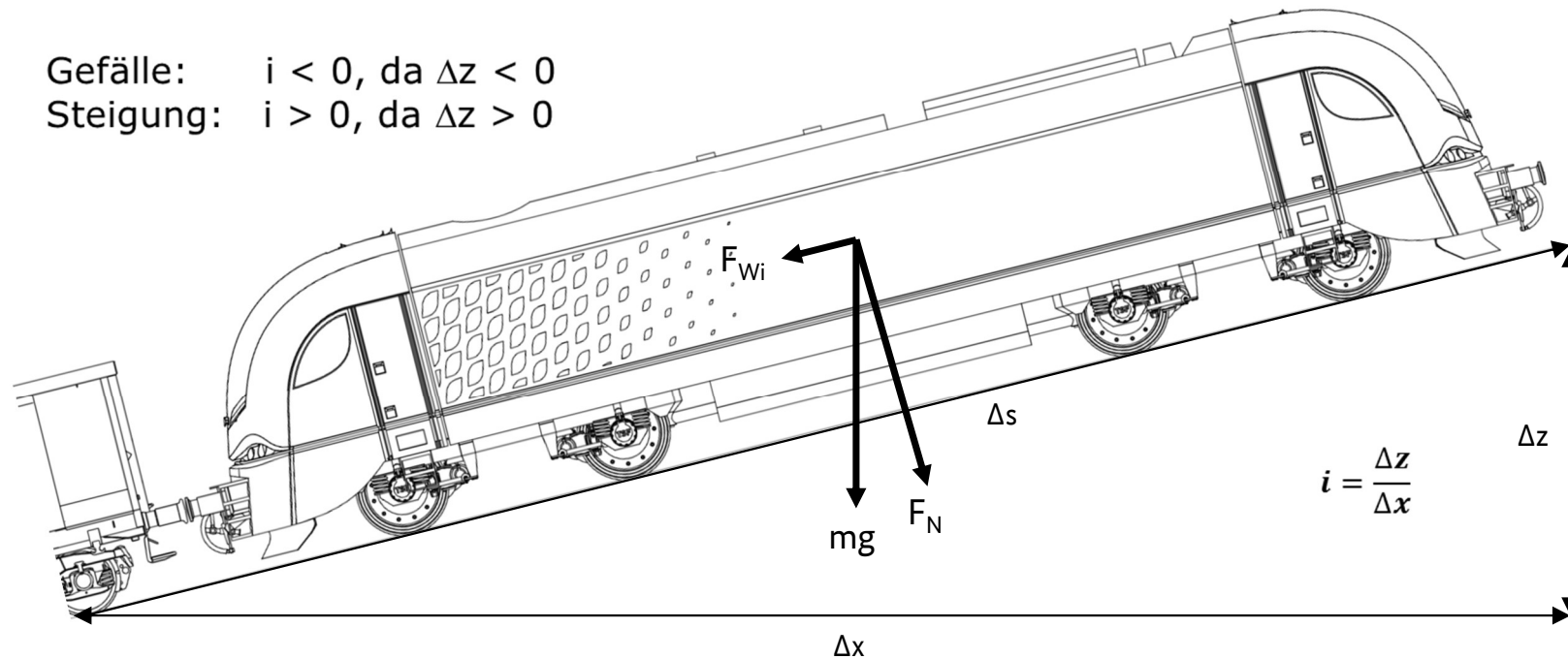


v / km/h	40	80	100	120	140	160
F _{WFT} / kN	3,7	6,6	8,7	11,2	14,0	17,3

Neigungswiderstand

Gefälle: $i < 0$, da $\Delta z < 0$

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



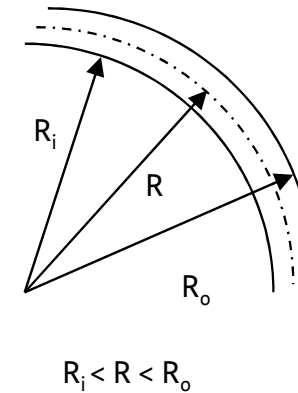
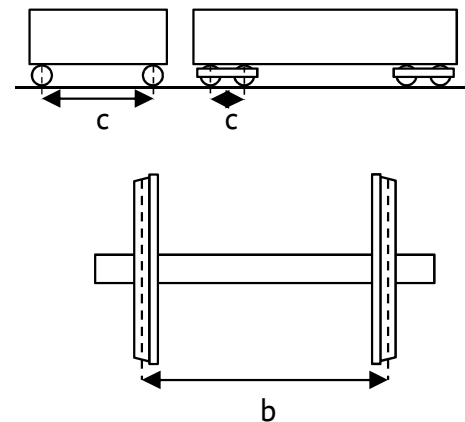
$$F_{Wi} = mg \cdot \sin \alpha$$

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)

Gleitreibung Rad/Schiene

Laufkreisabstand (Regelspur: 1,5 m)

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

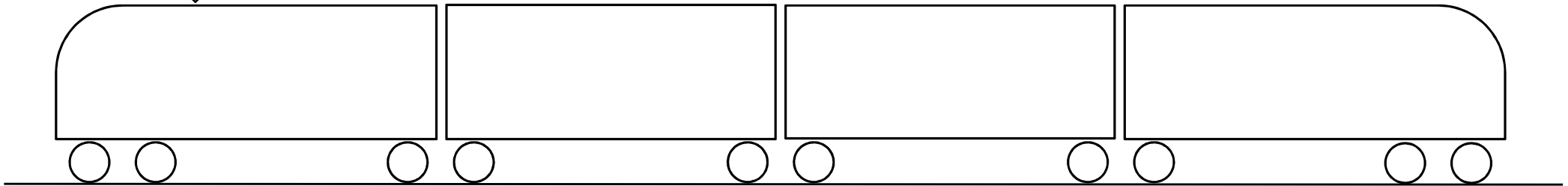
Gleisbogenradius

Radsatzabstand (im DG)

Fallstudie



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



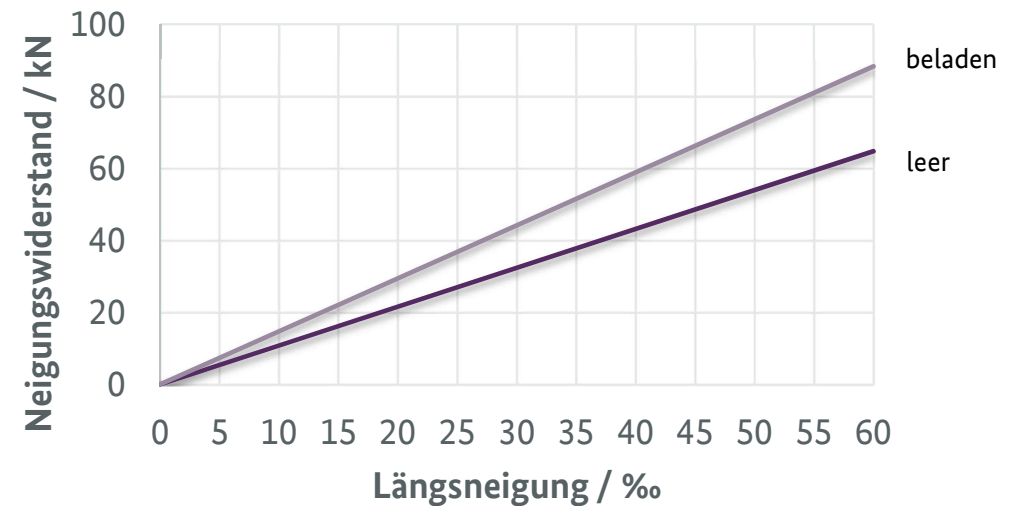
Neigungswiderstandskraft des projizierten Triebzuges:

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

in kN → F_{ws} i in ‰

v / km/h	40	80	100	120	140	160
F_{WFT} / kN	3,7	6,6	8,7	11,2	14,0	17,3
$i^* / \text{‰}$	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 $m = 110 \text{ t}$ (150 t)



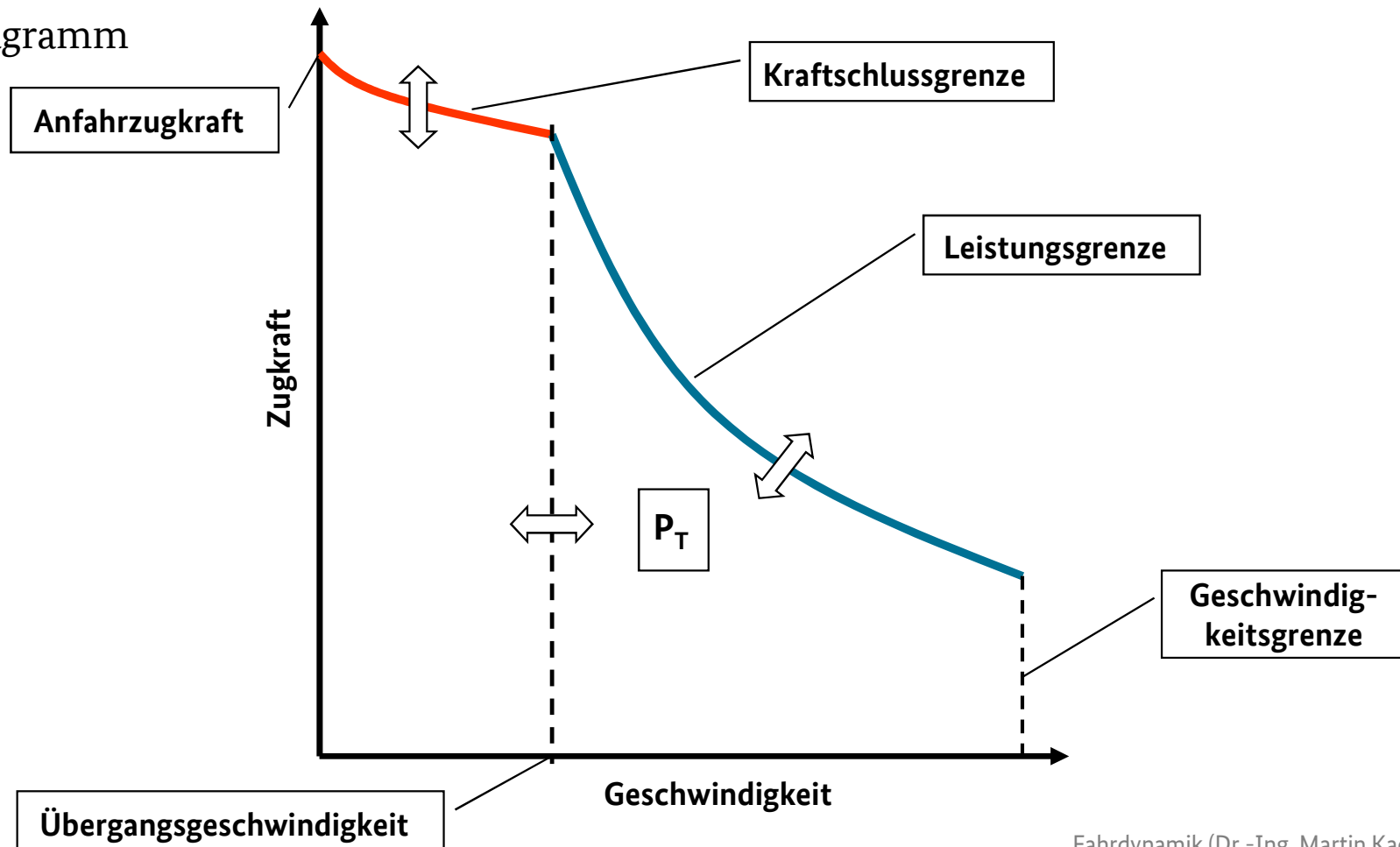
Inhalte

Fahrdynamik

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

Antriebskräfte

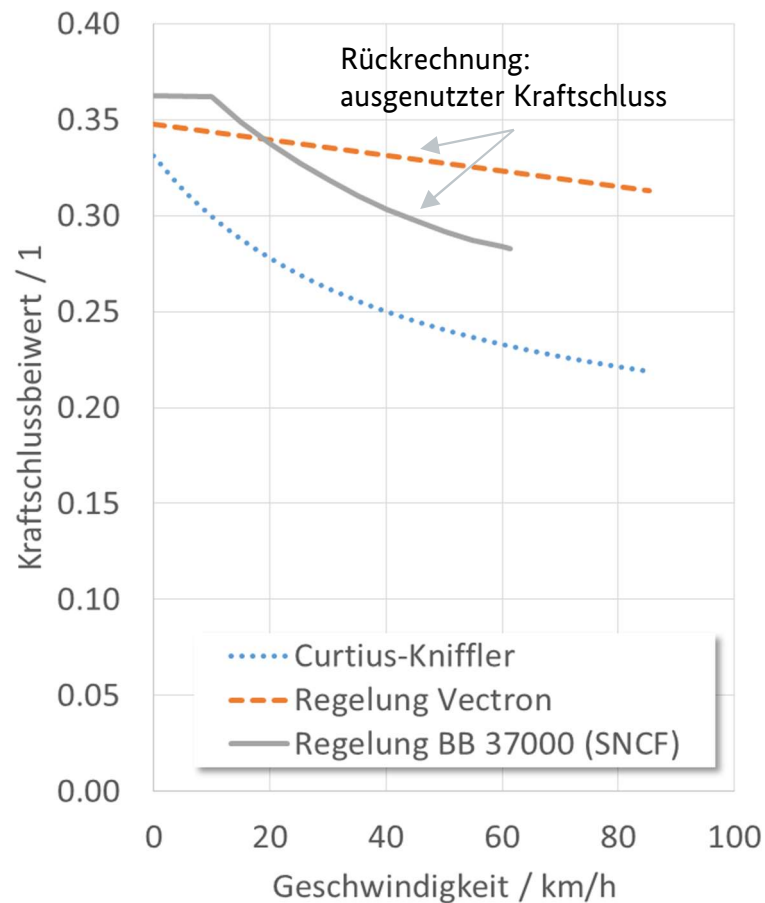
Zugkraft-Diagramm



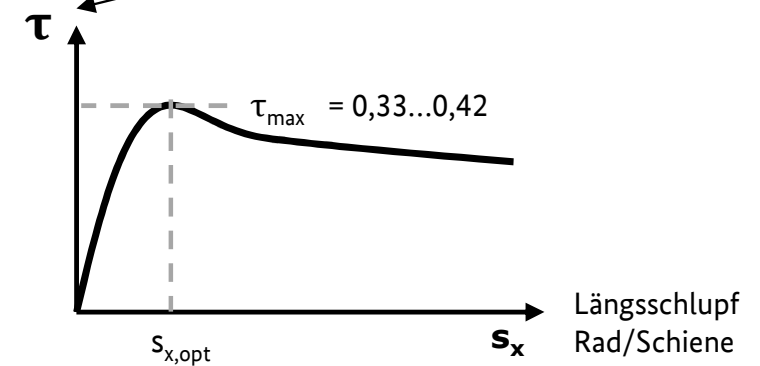
Antriebskräfte

Zugkraft an der Kraftschlussgrenze

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



Kraftschlussbeiwert



Beeinflussungsmöglichkeiten:

- Sandstreueinrichtung
- Radsatzschlupfregelung

Antriebskräfte

Kraftschlussbeiwert

Es gibt nicht *DEN* Kraftschlussbeiwert.

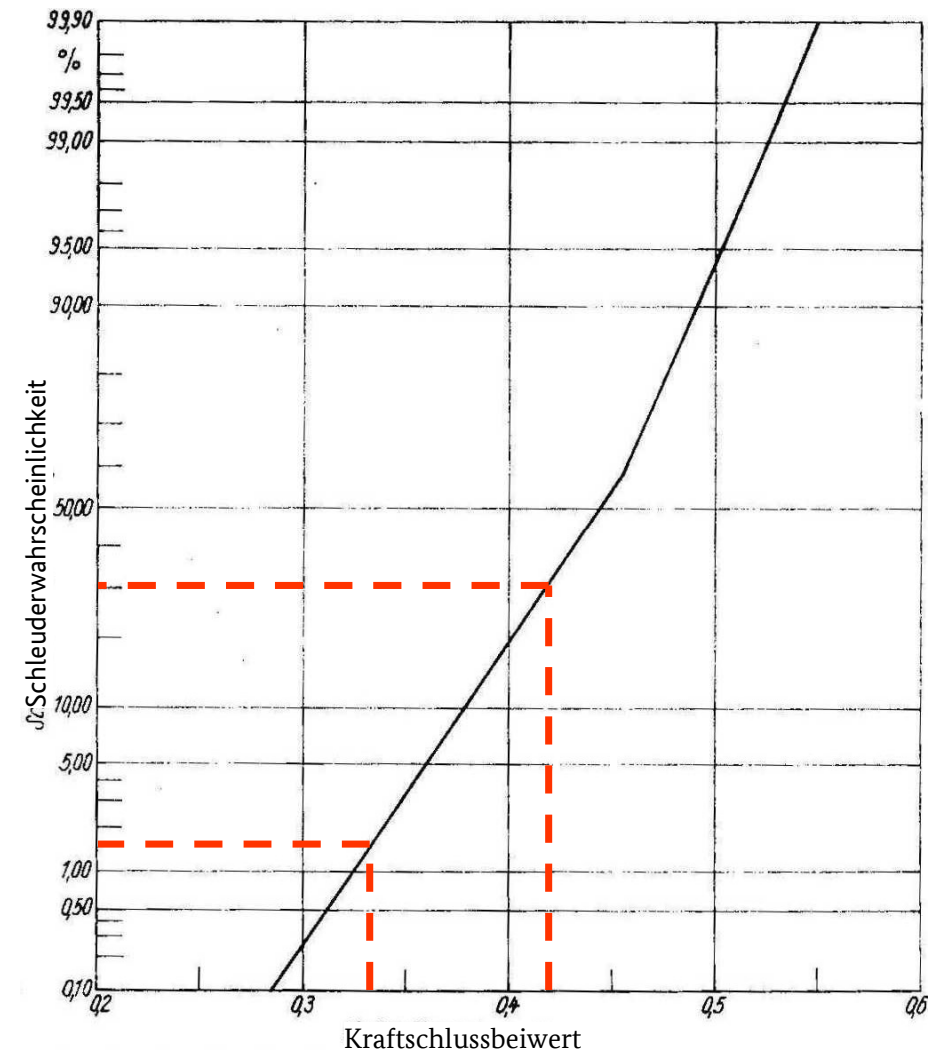
Allgemein anerkannt sind heute folgende Werte:

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.

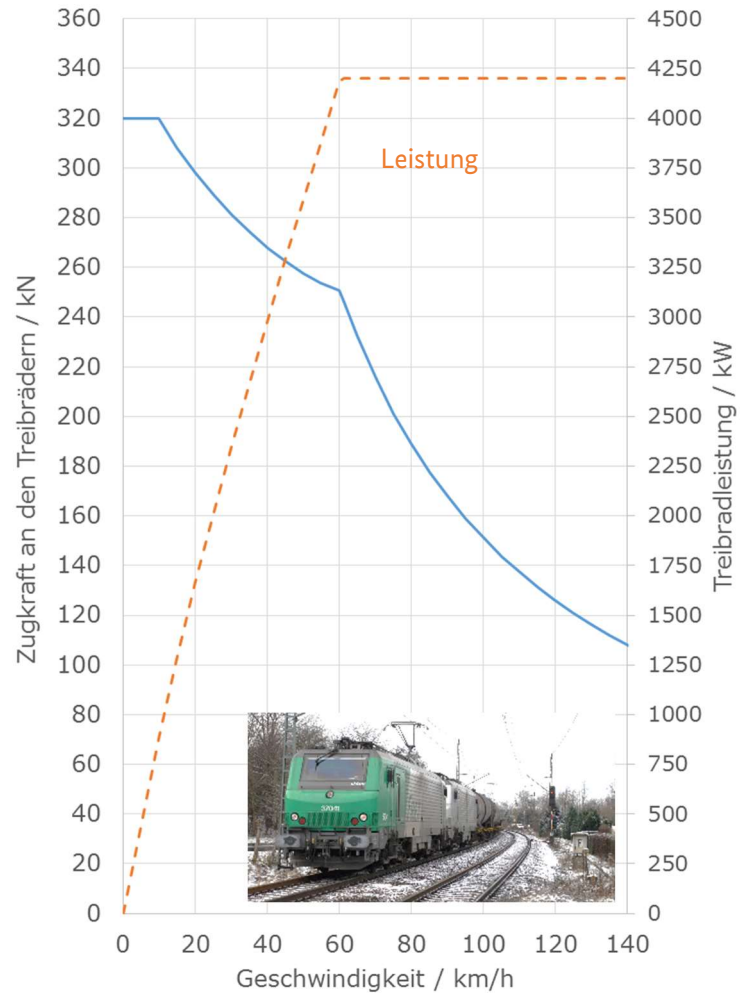
Abbildung gültig für saubere Schienen (trocken und nass)



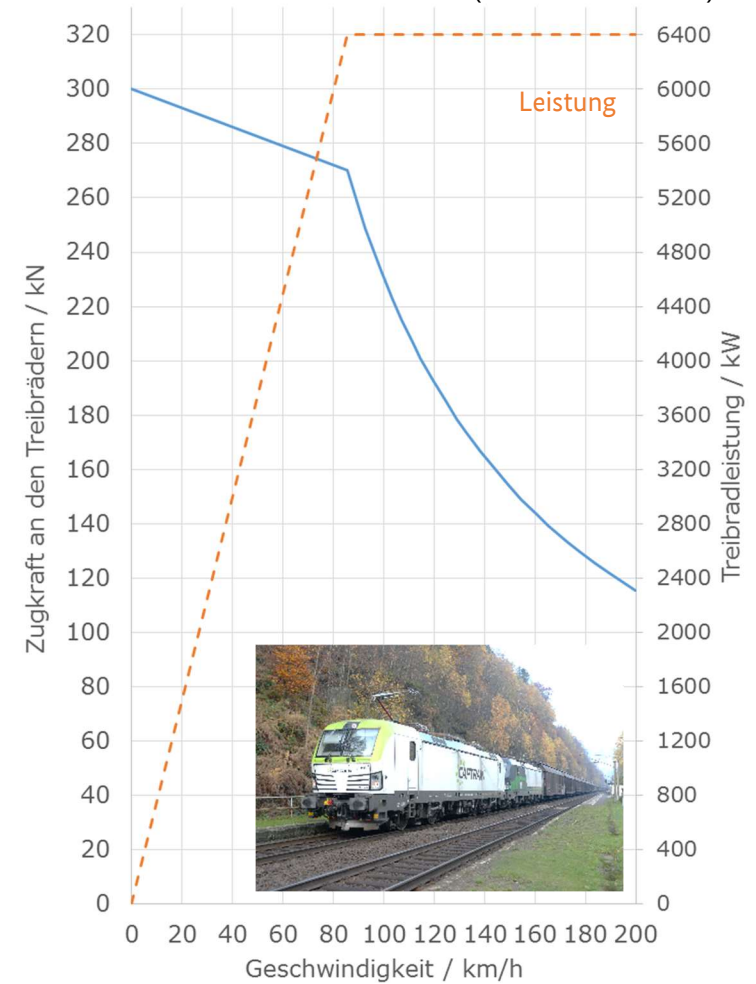
Zugkraftdiagramme von elektrischen Triebfahrzeugen mit Drehstromantrieben



BB 37000 (SNCF)



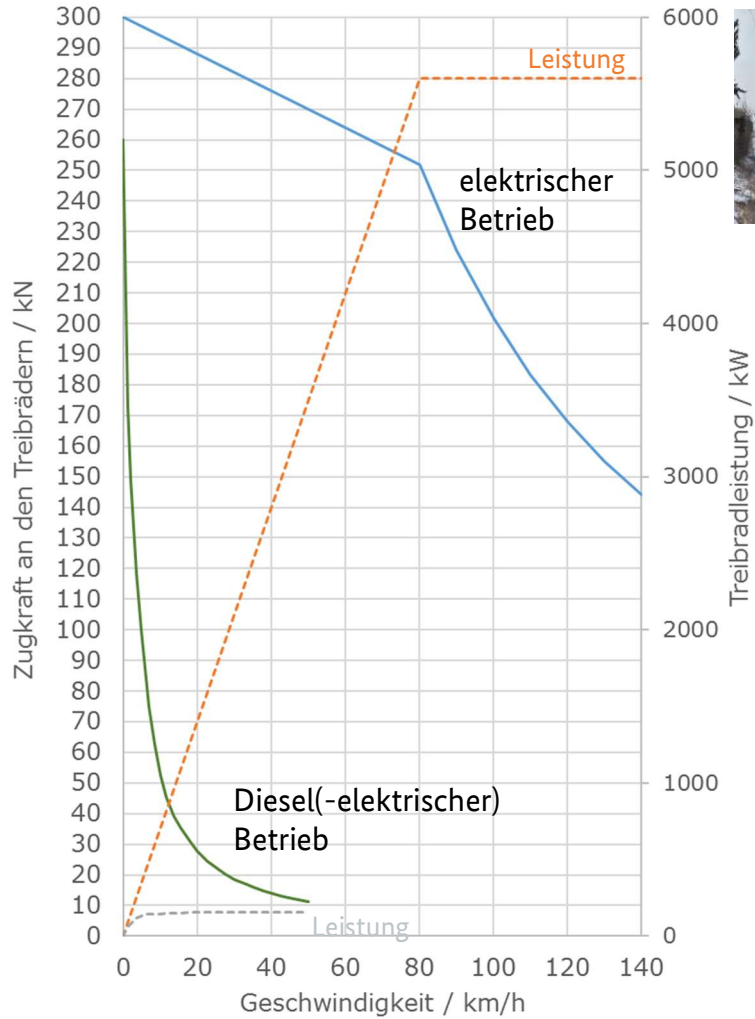
BR 193 (Siemens Vectron)



Zugkraftdiagramme von Zweikraft- und Mehrsystemtriebfahrzeugen

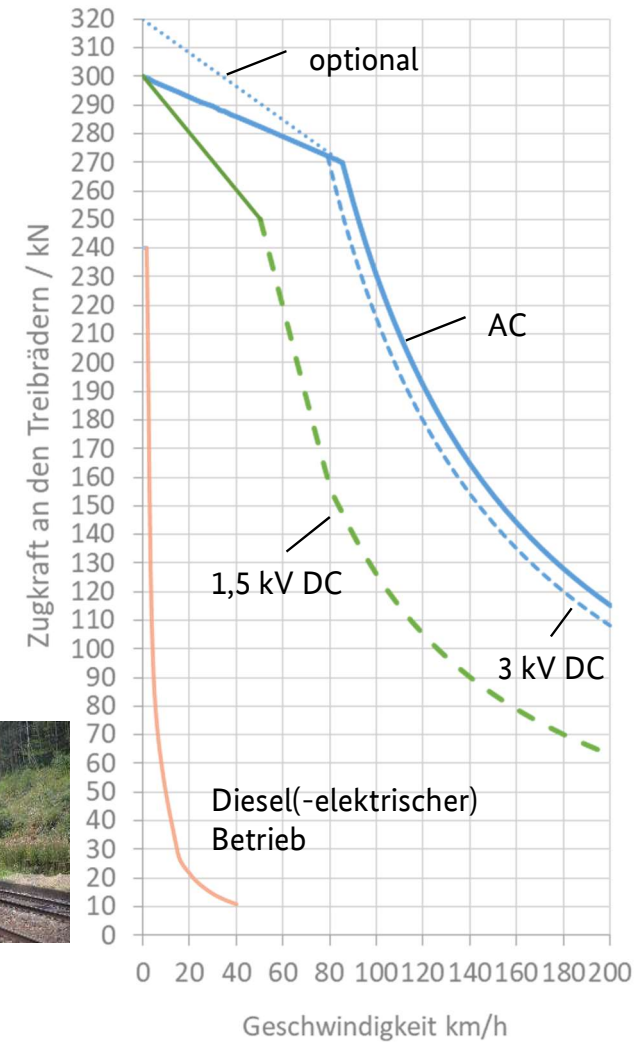
Beispiel 1:

ALSTOM
Traxx 3
Lastmile



Beispiel 2:

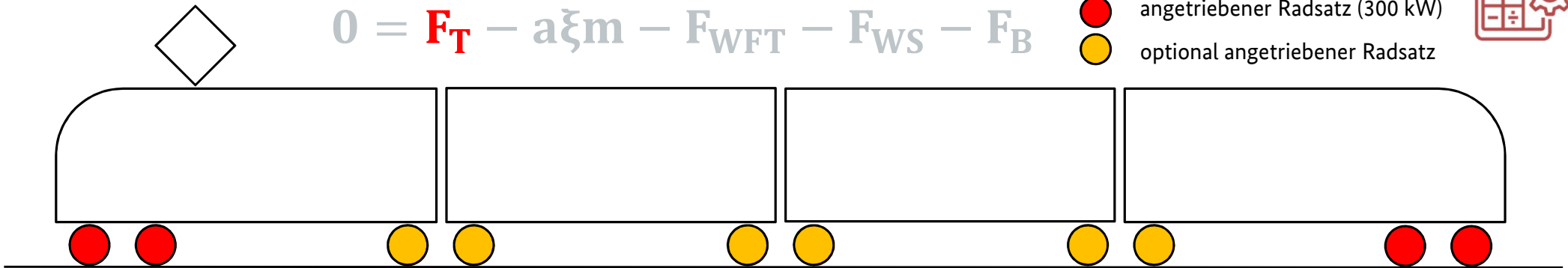
Siemens Vectron



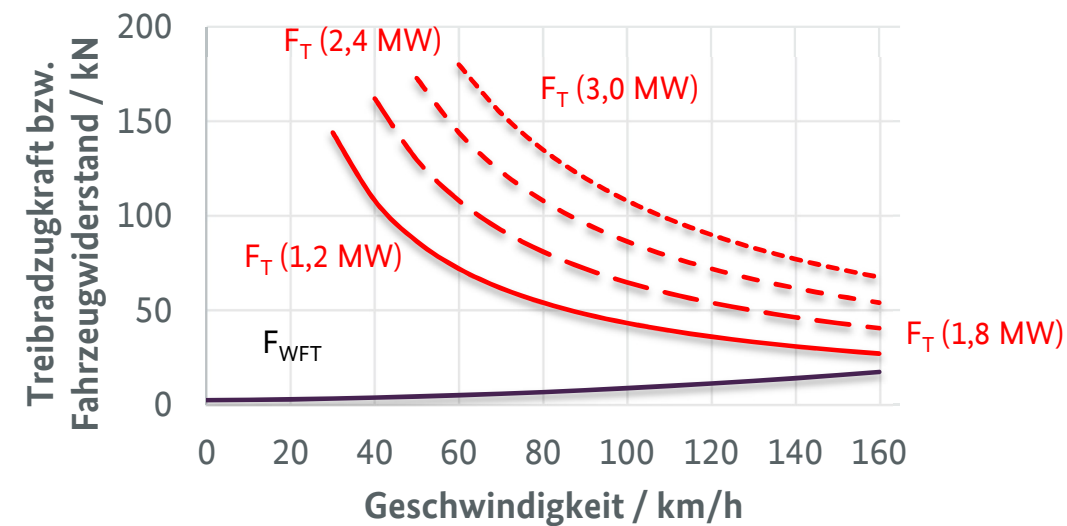
Fallstudie

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

- 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



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

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 Anfahrzugkraft bei hoher Kraftschlussausnutzung, geringe Antriebsleistung

NVET 410 1A:

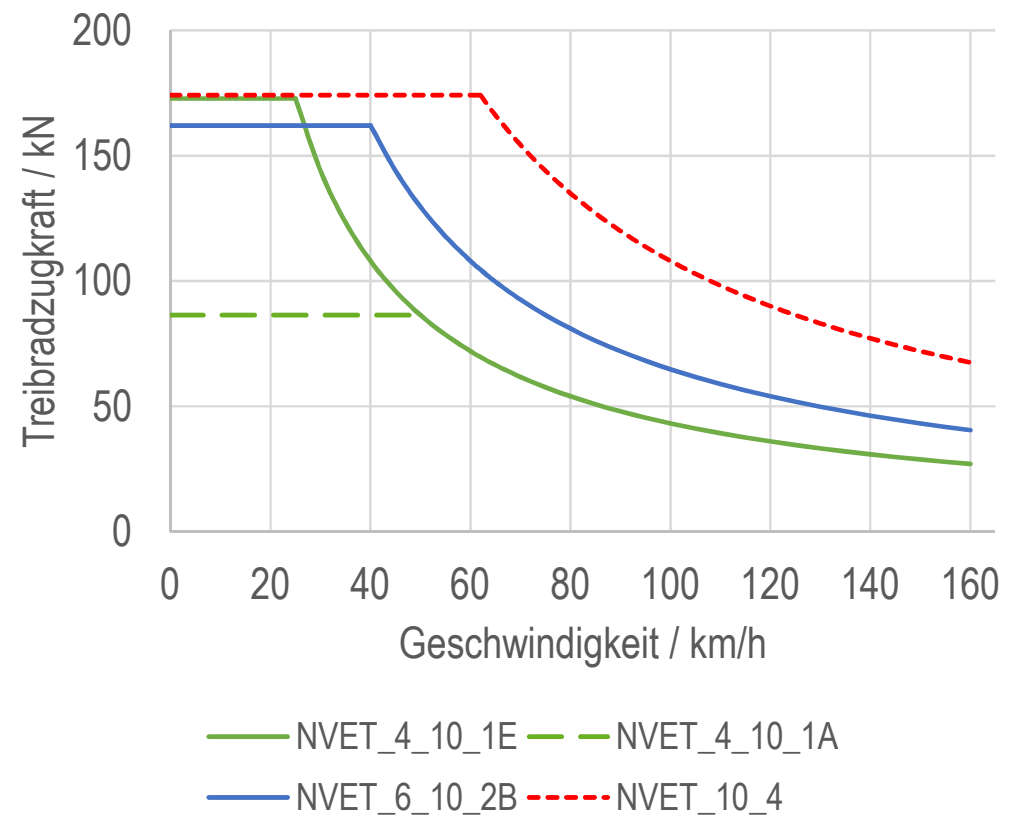
- geringe Anfahrzugkraft bei geringer Kraftschlussausnutzung, geringe Antriebsleistung

NVET 610 2B:

- hohe Anfahrzugkraft bei eher geringer Kraftschlussausnutzung, mittlere Antriebsleistung

NVET 10 4:

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



Inhalte

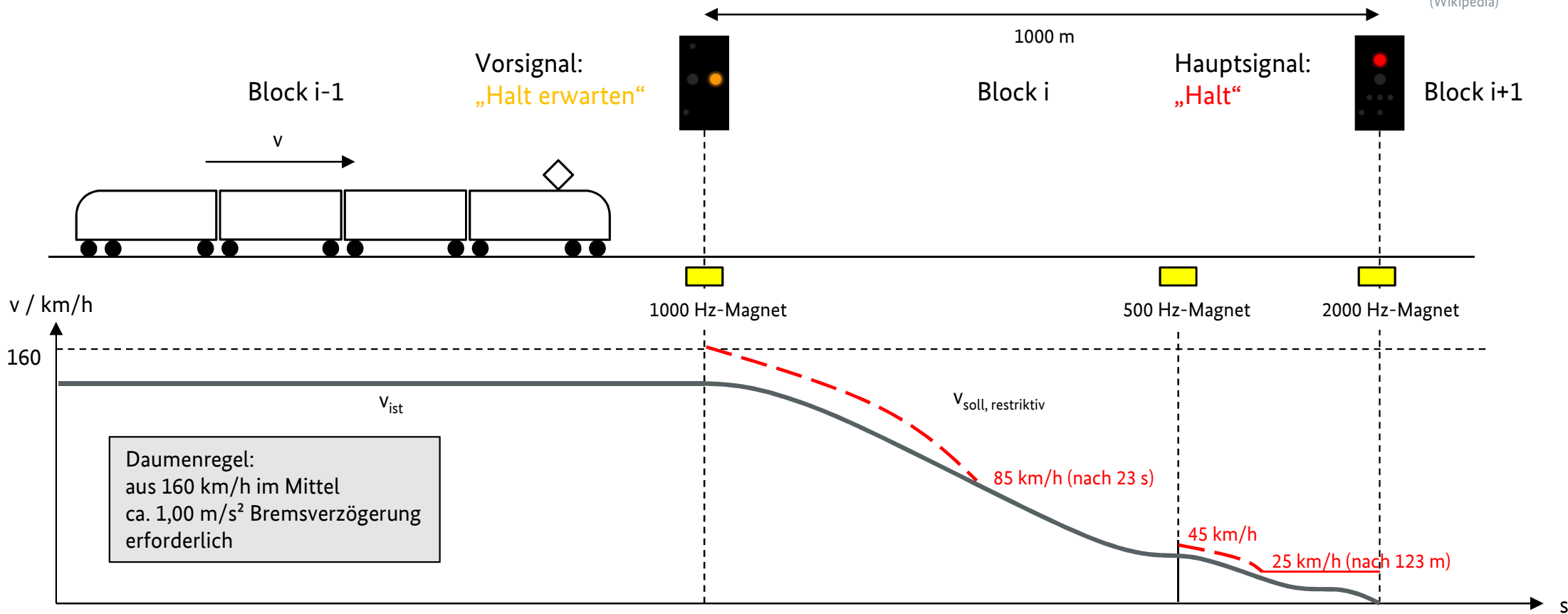
Fahrdynamik

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)

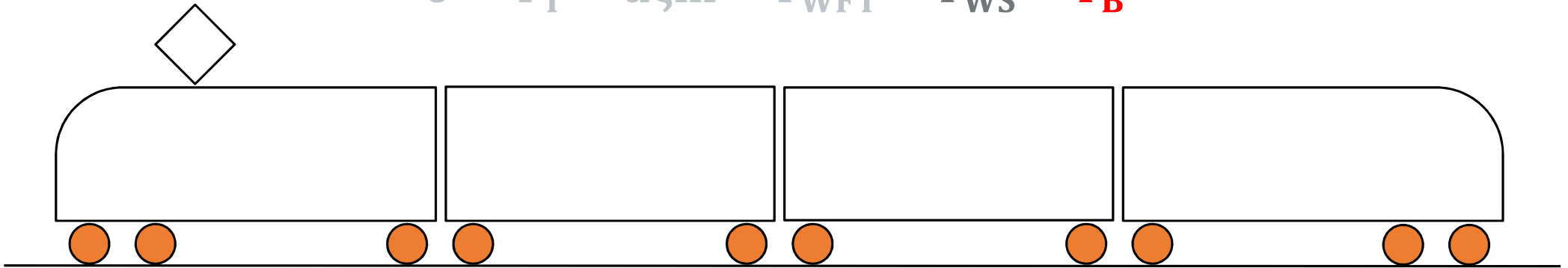
Signalbilder:
Markus Vierlinger
(Wikipedia)



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)

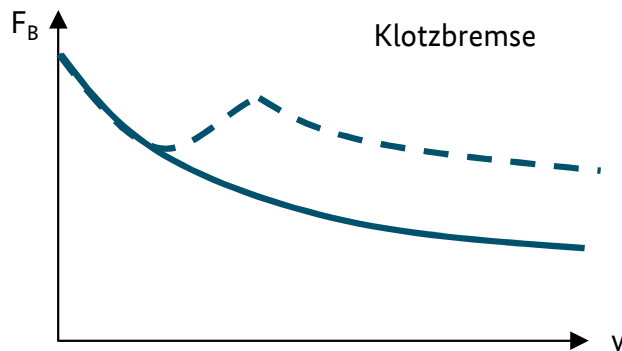
unter Vernachlässigung des Triebfahrzeugwiderstandes gilt für den voll abgebremsten Zug ($m_R = m$) in der Ebene:

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

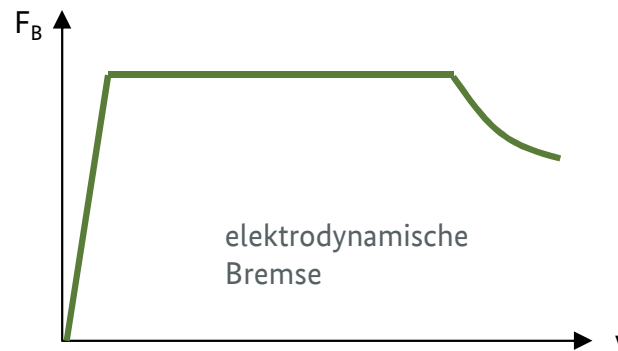
$$a_{max} = \frac{-g\tau}{\xi} = \frac{-9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 0,15}{1,06} = -1,39 \, m/s^2$$

Bremskraftkennlinien (qualitativ)

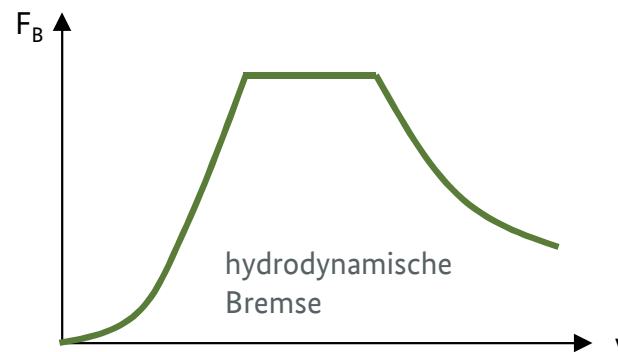
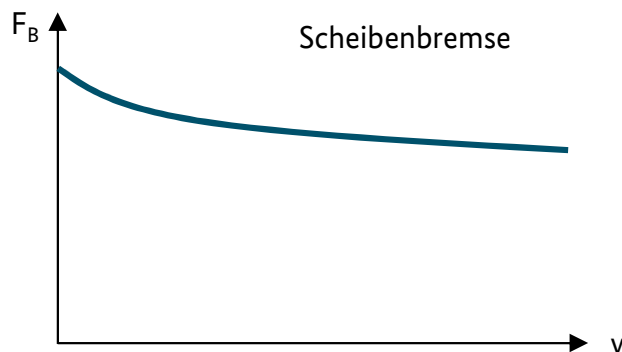
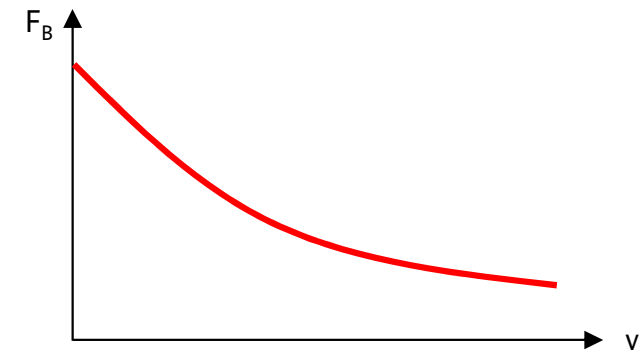
Rad(satz)bremsen (Druckluft)



Dynamische Bremsen



Magnetschienenbremsen



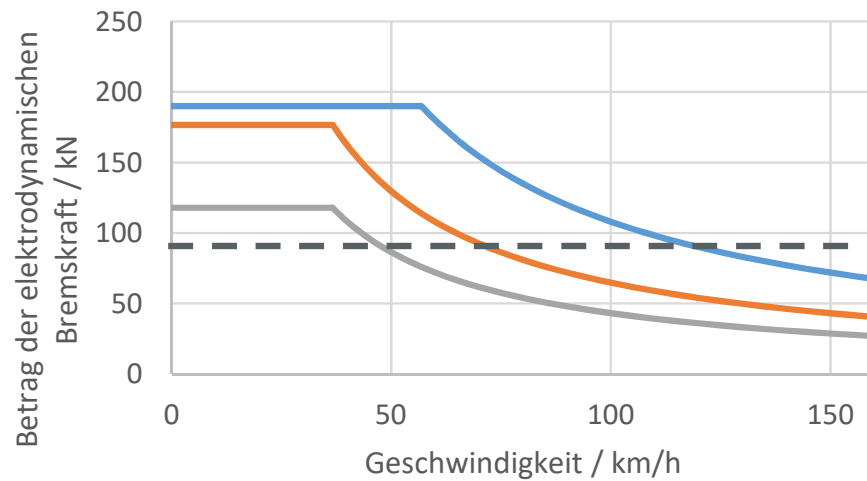
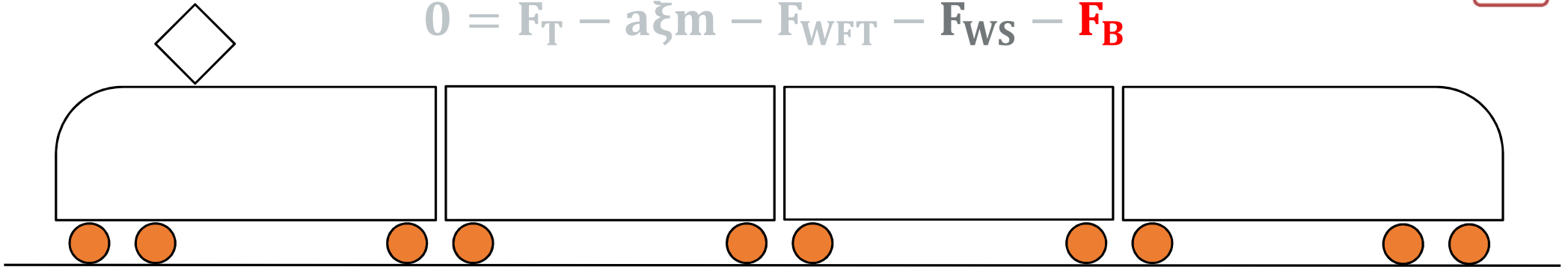
Sicherheit!
unabhängig vom Kraftschluss
zwischen Rad und Schiene

 Auswahl für Bsp. Fahrzeug

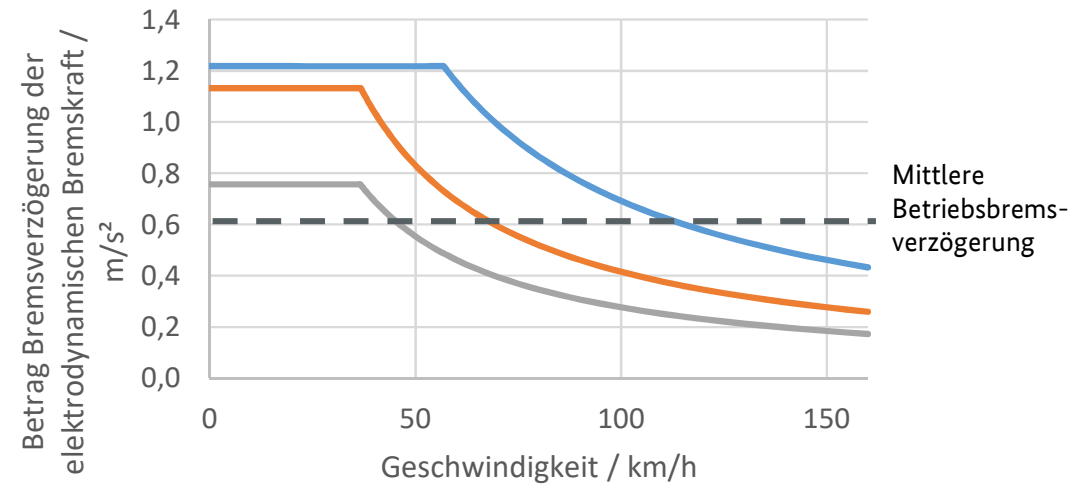
Fallstudie



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



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



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

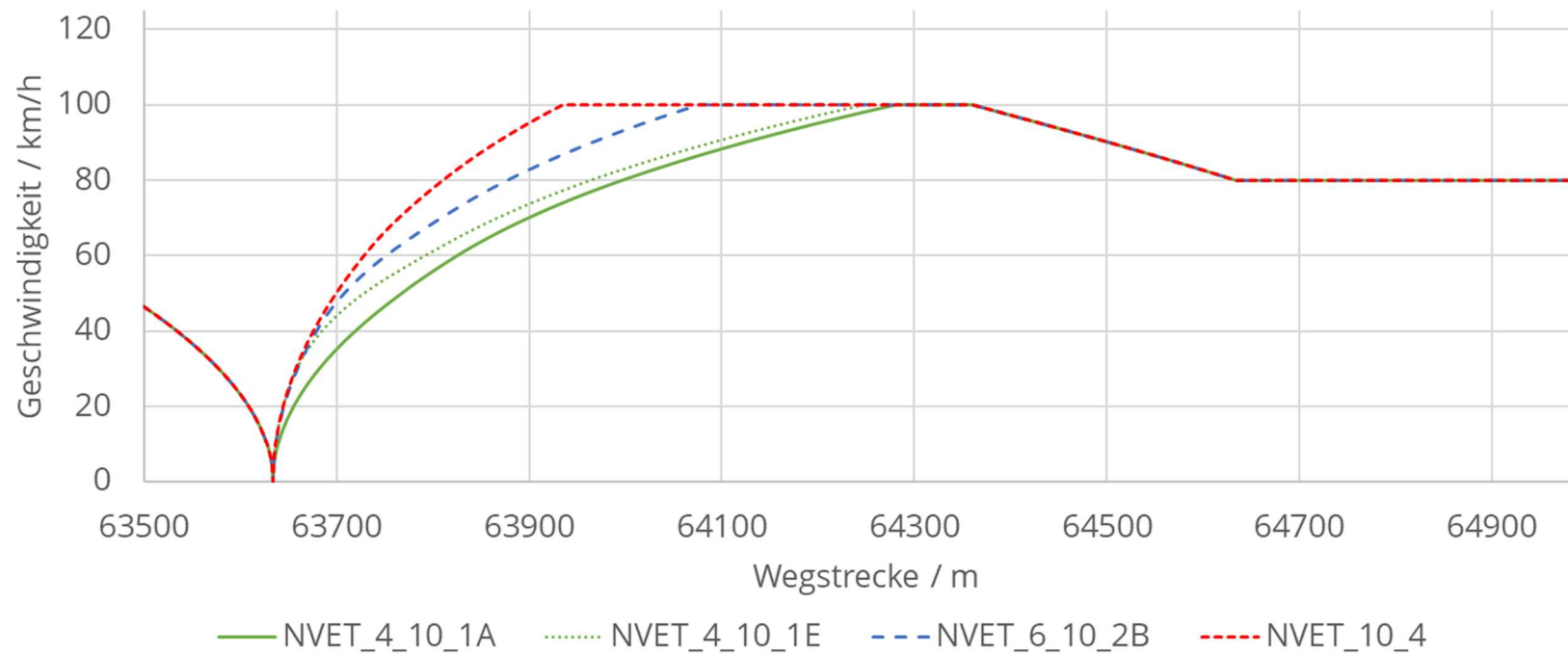


Simulationsergebnisse Leistungsauslegung



Fallstudie - Simulationsergebnisse

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





Fallstudie - Simulationsergebnisse

Variante	$F_{T,max}$	τ_{erf}	P_T	$t_{ges,RB}$
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"

$\Delta t = + 1' 45''$

$\Delta t = - 2' 49''$

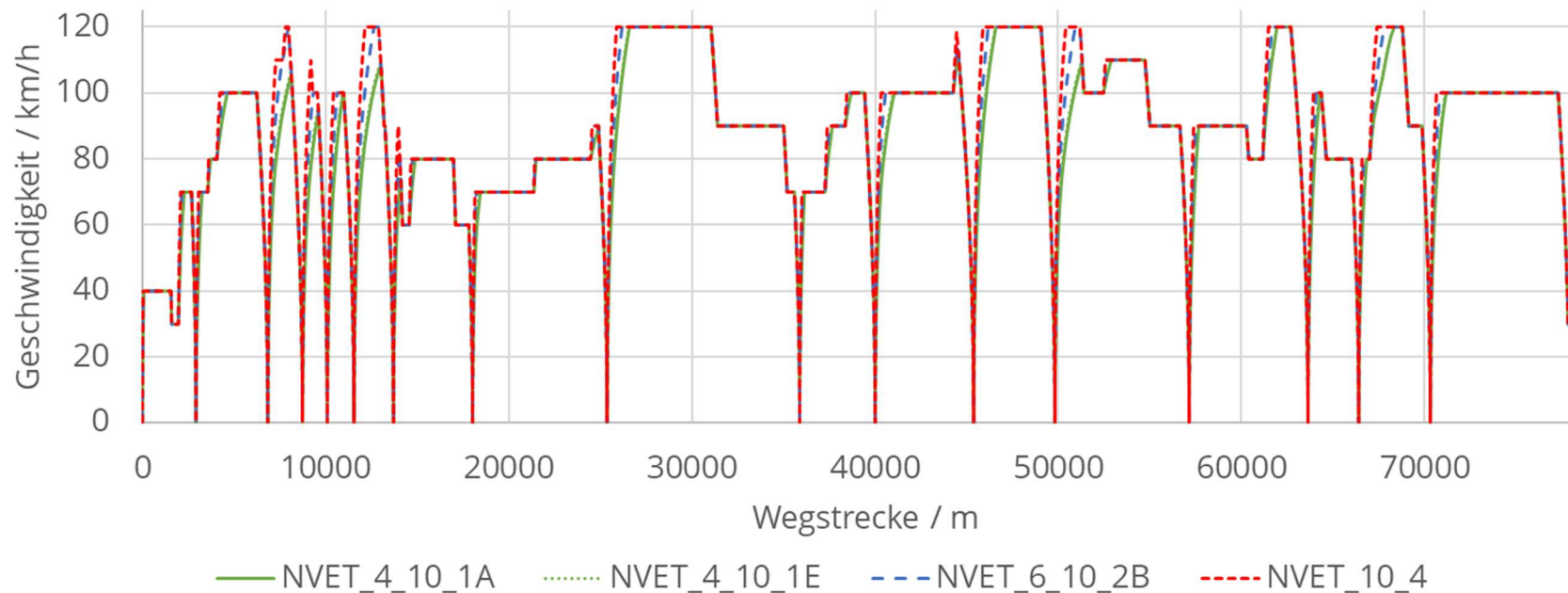
$\Delta t = - 0' 52''$

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

$\Delta t = + 0' 48''$

$\Delta t = - 1' 22''$

$\Delta t = - 0' 29''$



Zum Weiterlesen

Book Title

Fahrdynamik der
Schienenfahrzeuge

Book Subtitle

Grundlagen der
Leistungsauslegung sowie der
Energiebedarfs- und
Fahrzeitberechnung

Authors

Martin Kache

DOI

[https://
doi.org/10.1007/978-3-658-4
1713-0](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



Eisenbahn-Bundesamt