

Dipl.-Ing. Tobias Bregulla
Professur für Elektrische Bahnen

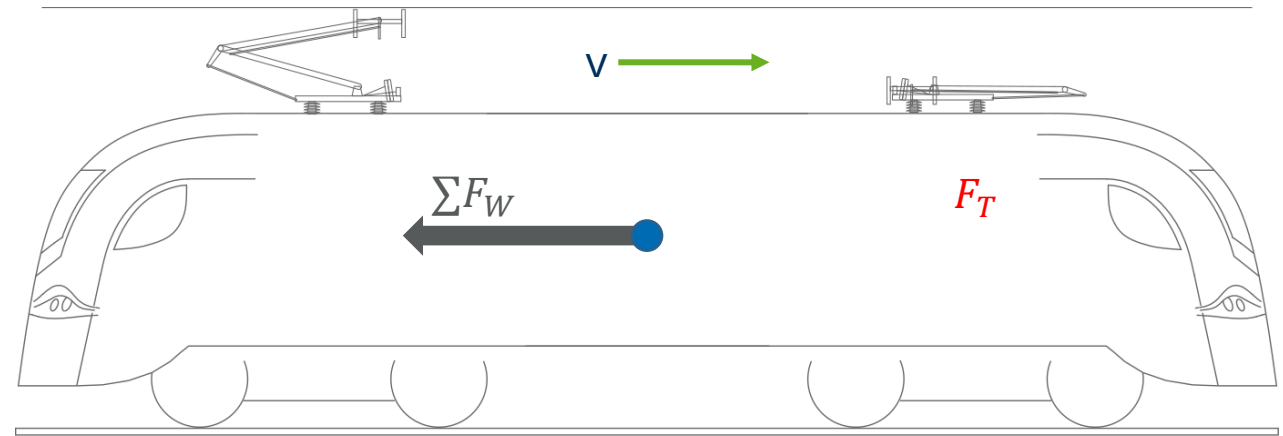
Fahrdynamik für das Verkehrsingenieurwesen

VL 02: Fahrwiderstandskräfte

Sommersemester 2023

Vorlesungsinhalte (Schwerpunkt: Schienenverkehr)

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



Fahrwiderstand

Einteilung

Widerstandskräfte, die sich **unbeschleunigten** Fahrbewegungen **entgegensetzen**.

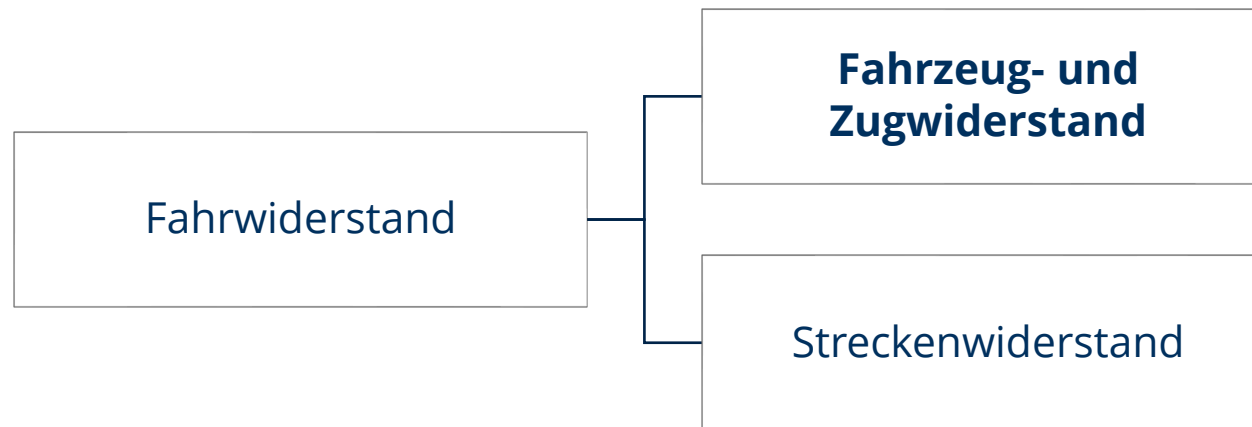
Fahrwiderstand

Fahrwiderstand

Einteilung

„Die **Zugwiderstandskraft** ist die **Summe aller vom Zug selbst hervorgerufener**, sich bei gleichförmiger Bewegung ($v = \text{konstant}$: Ohne Beschleunigungskraft) und Fahrt auf waagerechtem Gleis ($i = 0$: Ohne Streckenwiderstand) der Fahrbewegung **widersetzender Kräfte**.

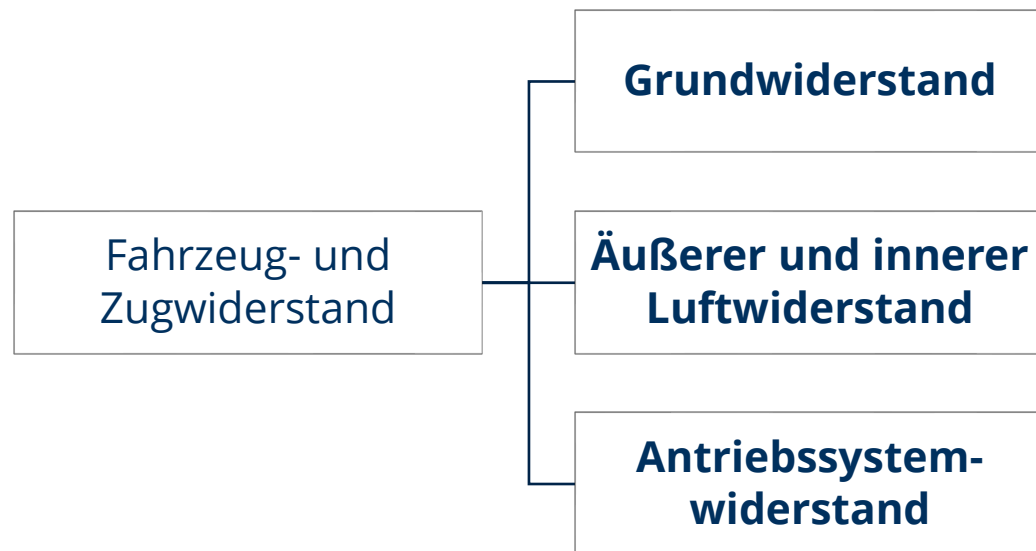
Im Fall der Bezugnahme auf das **Einzelfahrzeug** wird sie als **Fahrzeugwiderstandskraft** und bei Bezugnahme auf den **Zug** als **Zugwiderstandskraft** bezeichnet“ [Wende, S 109]



[Wende] D. Wende, Fahrdynamik des Schienenverkehrs, Teubner, 2003 (S 108 ff.)

Fahrwiderstand

Einteilung



Grundwiderstand: Geschwindigkeitsunabhängige* Festkörperreibungsvorgänge.

Luftwiderstand: Widerstände durch Luftkontakt oder Luftdurchsatz.

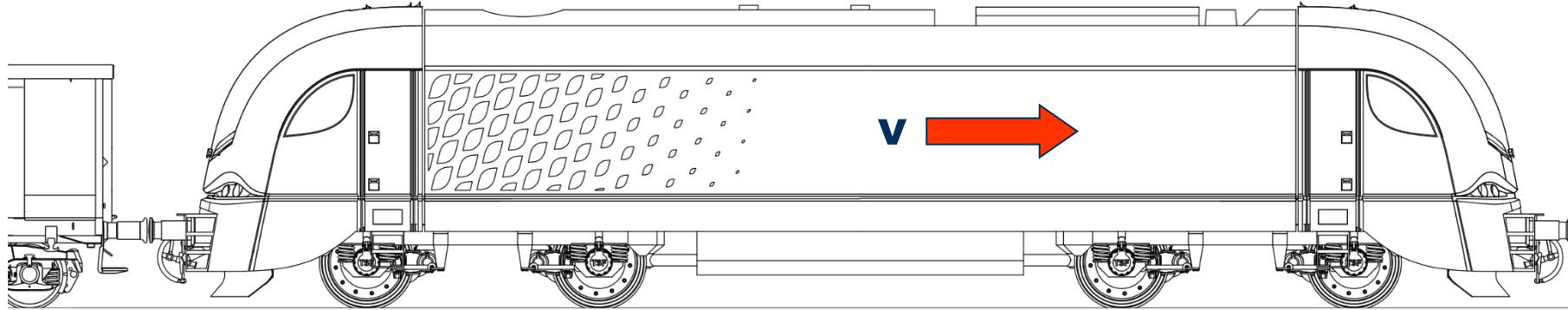
Antriebssystemwiderstand: Hervorgerufen durch Baugruppen der Leistungsübertragung.

Einteilung nach D. Wende, Fahrdynamik des Schienenverkehrs, Teubner, 2003 (S 108 ff.)

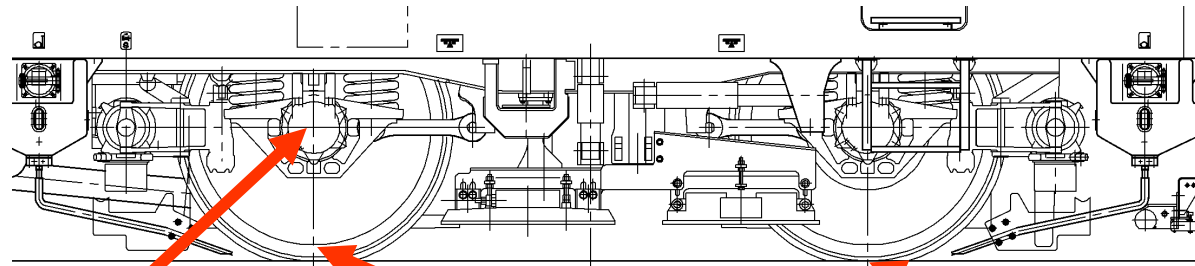
*Mit Grundwiderstand wird auch der Faktor A bezeichnet, der nur in empirischen Widerstandsformeln geschwindigkeitsunabhängig ist. Die bezeichneten Reibungsvorgänge besitzen u.U. Geschwindigkeitsabhängigkeit.

Fahrwiderstand

Grundwiderstand



Grundwiderstand



Lagerwiderstand

Rollwiderstand

Gleitwiderstand

Fahrwiderstand

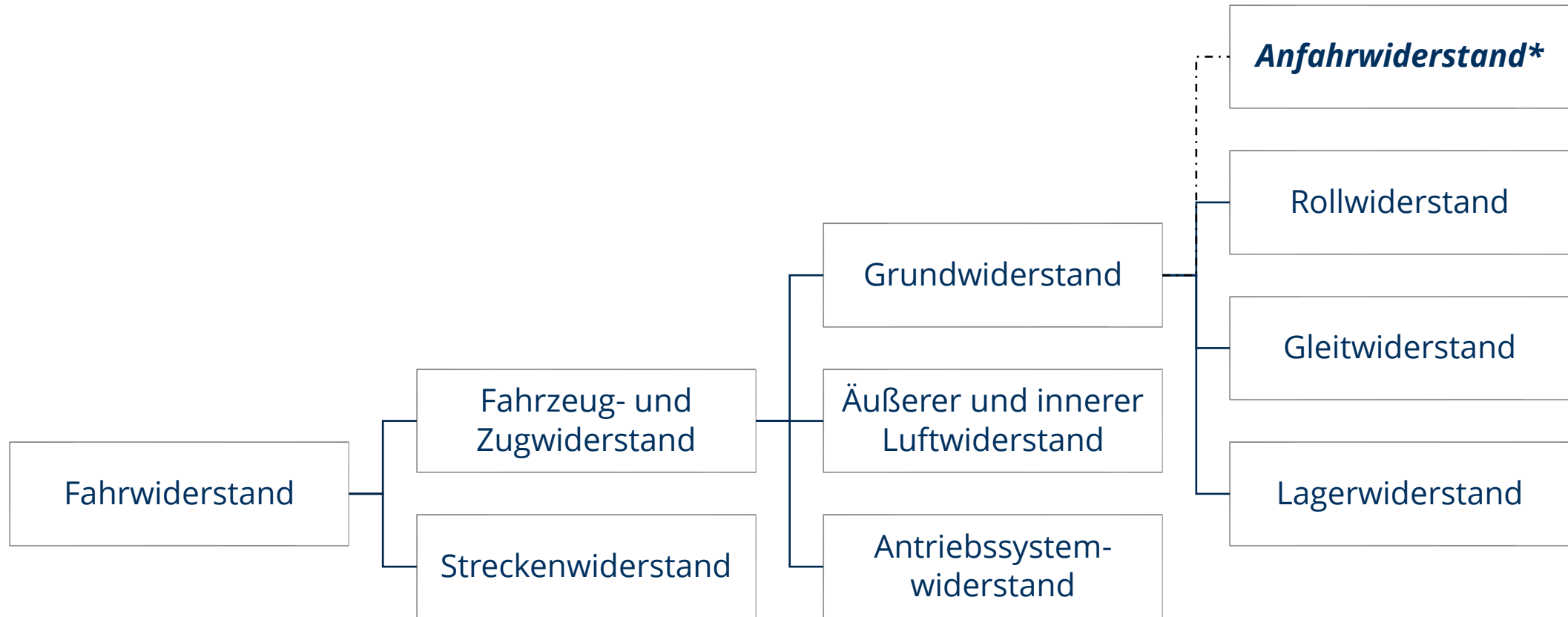
Grundwiderstand

- **Rollwiderstand:** Reib- und Deformationsarbeit an der Kontaktstelle Rad-Schiene.
Größenordnung: $f_{Wro} \approx 0,46 \text{ ‰ bis } 2 \text{ ‰}$
- **Gleitwiderstand:** Mikrogleitbewegungen auf der Rad-Schiene Kontaktfläche, die bspw. durch Sinuslauf, Radsatzschrägstellung und Durchmesserunterschiede an einem Radsatz hervorgerufen werden.
Größenordnung: $f_{WGl} \approx 0,5 \text{ ‰ bis } 1 \text{ ‰}$ für Wagen. Für angetriebene Fahrzeuge bis zu 3 ‰
- **Dynamische-, Schall und Walkwiderstandskraft:** Dämpfung von Schwingungen. Energieverzehr bei (wenn vorhanden) gummigefederten Radscheiben zur Dämpfung des Fahrgeräuschs. Abstrahlung von Schallenergie.
Größenordnungen: $f_{WDyn} \ll 1 \text{ ‰}$, $f_{WSchall} < 1 \text{ ‰}$ $f_{WWalk} \approx 0,5 \text{ ‰ bis } 1 \text{ ‰}$
- **Lagerwiderstandskraft:** Reibung zwischen Wälzkörper und Innen- bzw. Außenring. Bei tiefen Temperaturen ist der Widerstand größer.
Größenordnung: $f_{WLa} \approx 0,2 \text{ ‰}$ (Wälzlager)
- **Anfahrwiderstandskraft:** Ingangsetzung der Drehbewegung. Verteilung der Schmiermittel. Elastischer Zugverband erforderlich.
Größenordnung: $f_{WANf} \approx 3 \dots 10 \cdot f_{WW}$ (Für Wälz bzw. Gleitlager für $s < 10 \text{ m}$)

Grundwiderstand z.T. auch
geschwindigkeitsabhängig

Fahrwiderstand

Einteilung

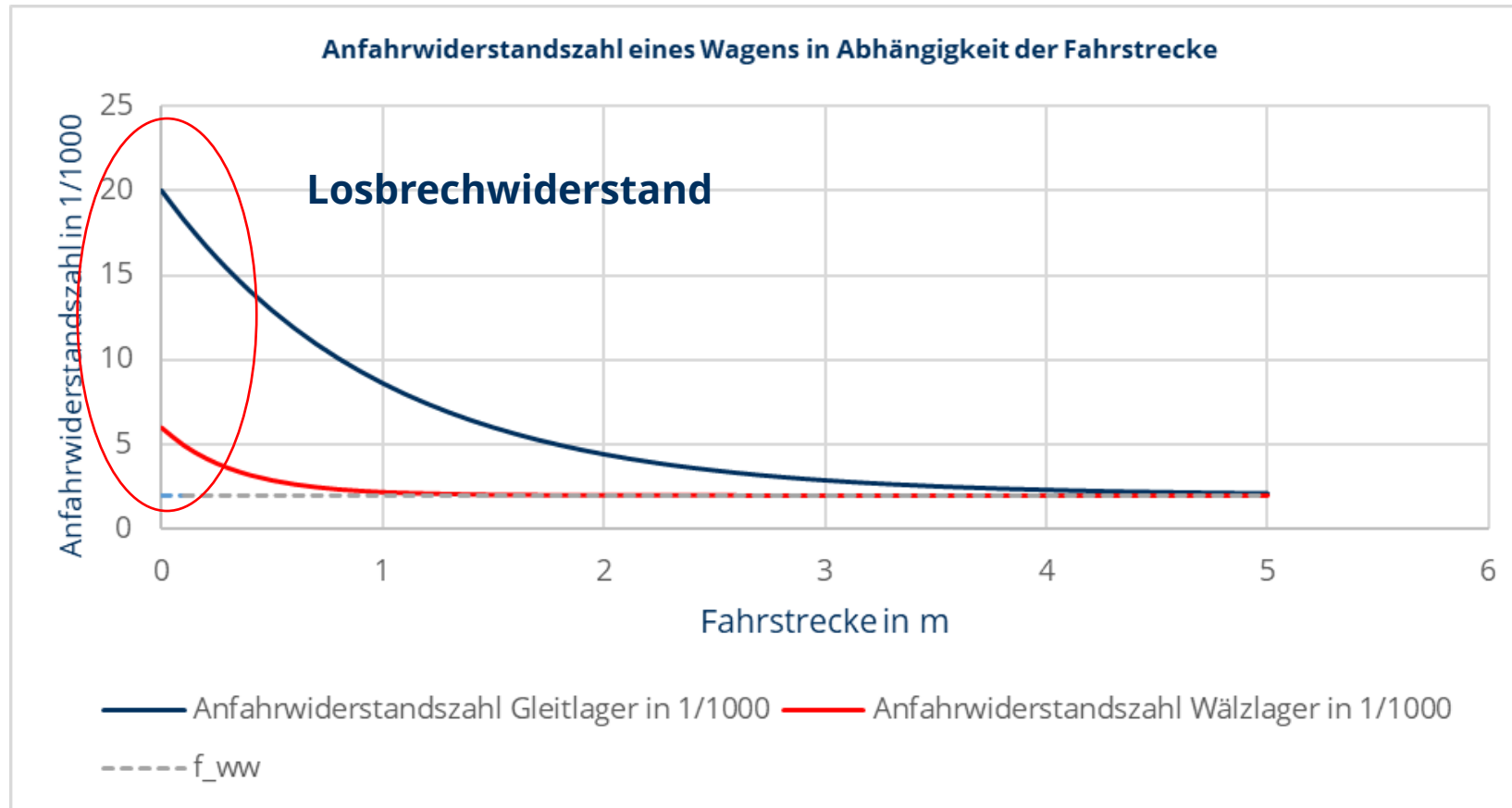


Einteilung nach D. Wende, Fahrdynamik des Schienenverkehrs, Teubner, 2003 (S 108 ff.)

*Anfahrwiderstand wirkt als Faktor auf den Wagenwiderstand

Fahrwiderstand

Anfahrwiderstand



D. Wende, Fahrodynamik des Schienenverkehrs, Teubner, 2003 (S 117)

Infrastrukturseitige Einflussfaktoren

Grundwiderstand



Einflussfaktoren

- Gleislage
- Verbindung der Schienen
- Art des Oberbaus



Infrastrukturseitige Einflussfaktoren

Grundwiderstand



Asphalt

$$f_{WR} = 0,010$$



Beton

$$f_{WR} = 0,011...0,014$$



Kopfsteinpflaster

$$f_{WR} = 0,015...0,030$$



Erde

$$f_{WR} = 0,045...0,100$$



Schlamm

$$f_{WR} = 0,35$$

Fahrzeugwiderstände

Rollwiderstand



	Reisezugwagen	Reisebus	Straße/Schiene
Fahrzeugmasse	40-45 t	18 t	0,4 bis 0,45
spezifischer Rollwiderstand	0,0007...0,0033 kN/kN	0,0100 kN/kN	3 bis 14
Absoluter Rollwiderstand	0,27...1,3 kN*	1,8 kN	6,7 bis 1,4

Extremer „Schlechtläufer“ / Extremer „Gutläufer“

spez. Grundwiderstand Straße/Schiene: Faktor 3...14

Daumenregel: Rollwiderstand Straße = 10 x Rollwiderstand Schiene

*Quelle: Messungen DB

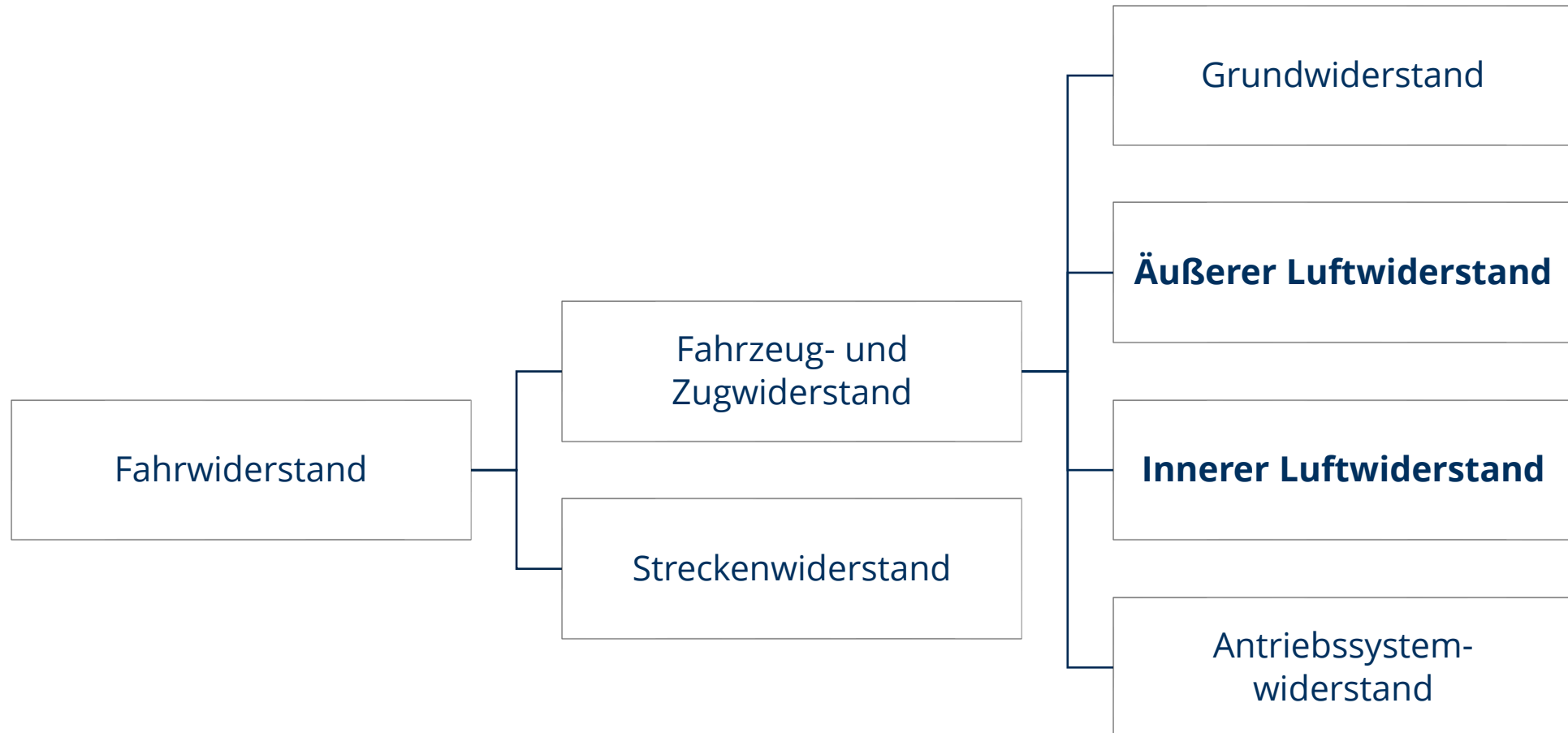
Luftwiderstand



Foto: M. Kache

Luftwiderstand

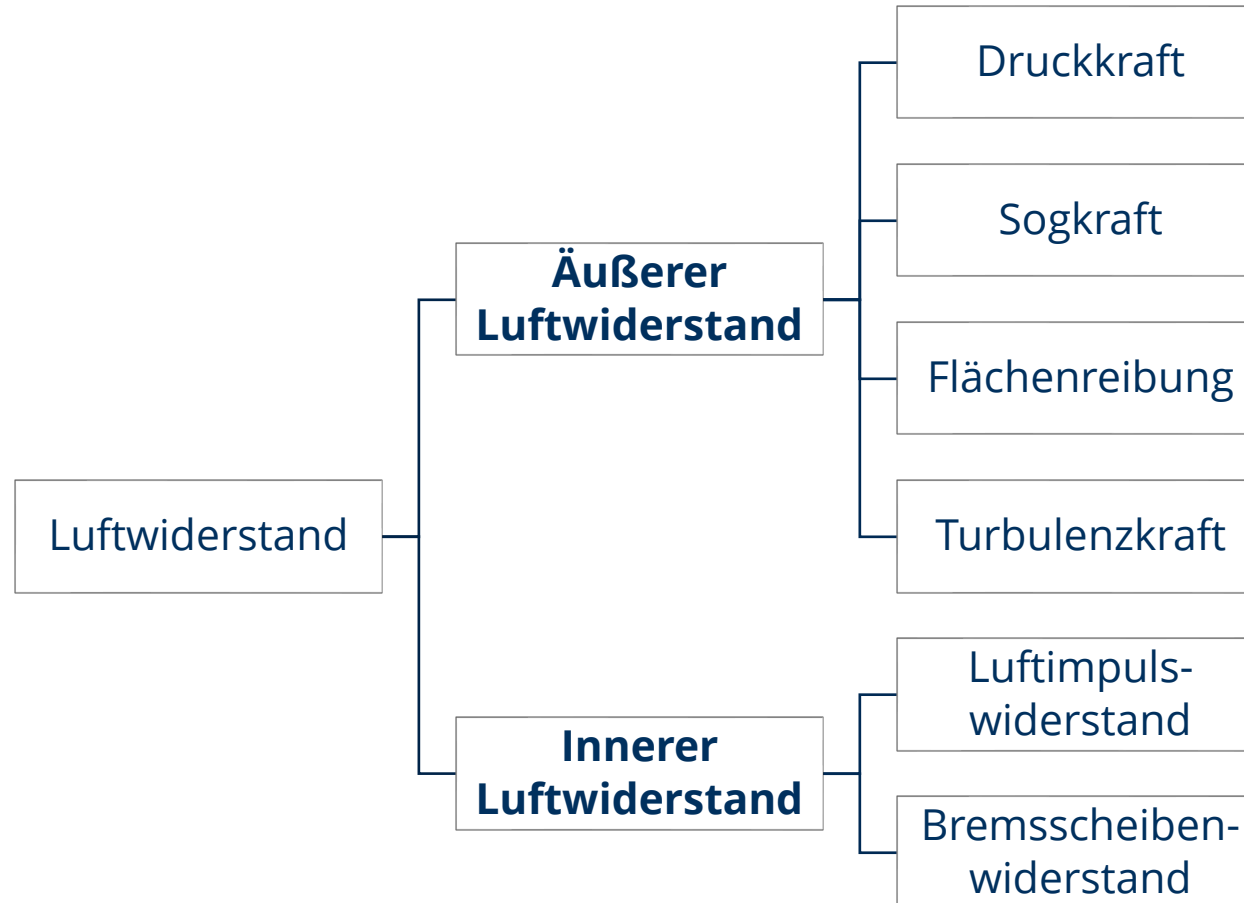
Einordnung



Einteilung nach D. Wende, Fahrdynamik des Schienenverkehrs, Teubner, 2003 (S 108 ff.)

Luftwiderstand

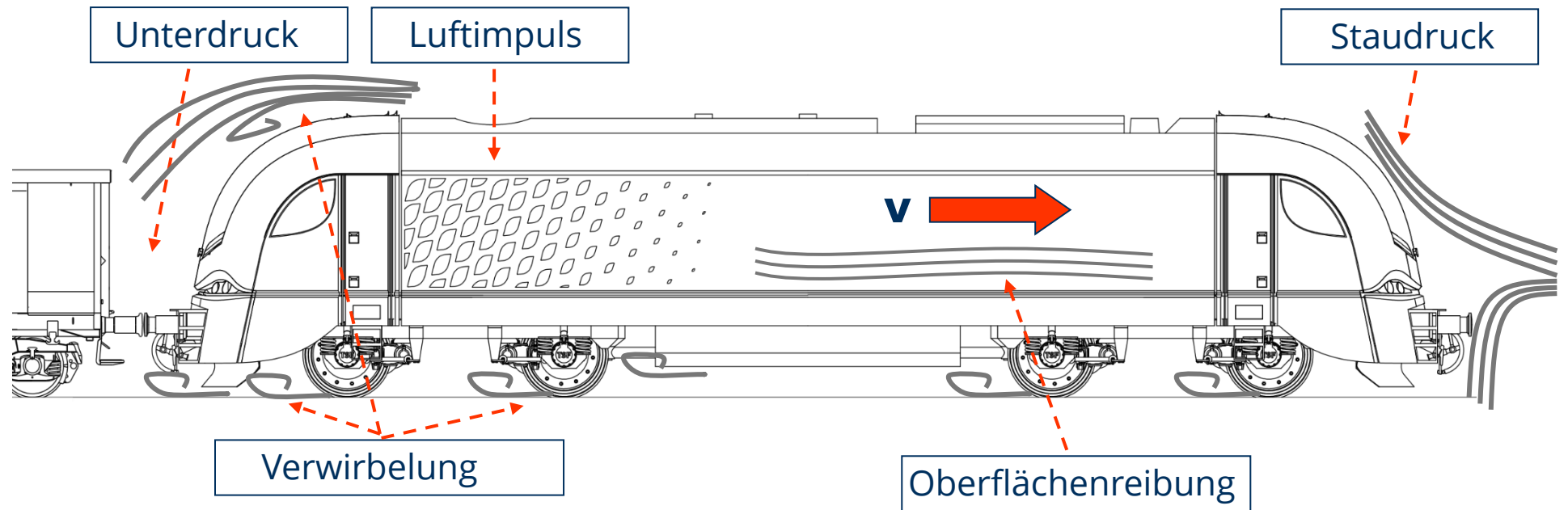
Einordnung



Einteilung nach D. Wende, Fahrdynamik des Schienenverkehrs, Teubner, 2003 (S 119 ff., 141 f.)

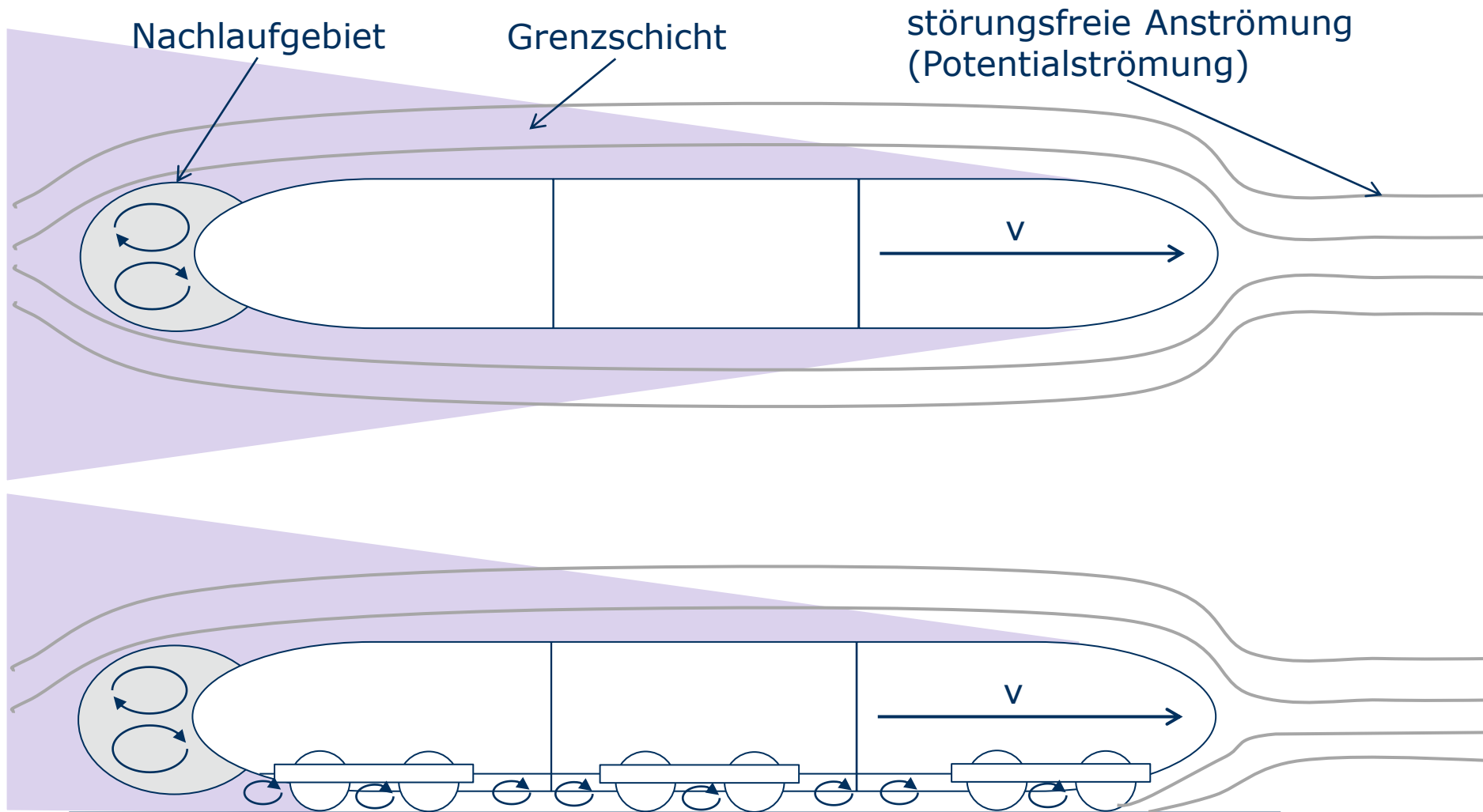
Fahrzeugwiderstand

Luftwiderstand



Luftwiderstand

Zonenbildung bei der Fahrzeugumströmung



Berechnung des Luftwiderstands

Berechnung der Luftwiderstandes:

$$F_{WLu} = \frac{1}{2} \rho_{Lu} c_W A v^2$$

für Züge gilt:

$$F_{WL} = \frac{1}{2} \rho_L (c_{W,T} + c_{W1} + (n_W - 2)c_{W,m} + c_{W,n}) A_{norm} \Theta_{Tu} (v + \Delta v)^2$$

- Ermittlung des c_W – Wertes in Windkanalversuchen oder mittels CFD (computational fluid dynamics)
- **wesentlich ist Produkt $c_W A$** – Bsp. Pkw und SUV mit gleichen c_W – Werten, aber SUV trotzdem 20% höherer Luftwiderstand wegen größerer Querschnittsfläche
- A ist bei Eisenbahnfahrzeugen durch das Lichtraumprofil definiert ($A_{norm} = 10 \text{ m}^2$)
- c_W – Wert ist abhängig von der Formgestaltung

Luftwiderstandsbeiwert

Beispiele



Pkw: $c_w \approx 0,24...0,41$



Busse: $c_w \approx 0,35...0,60$



ICE: $c_w = 1,55$
ICE-Triebkopf: $c_w = 0,21$



Ellok: $c_w = 0,64$
Ellok vor Zug: $c_w = 0,53$



Lkw (einzeln): $c_w \approx 0,44...0,64$



Lkw (Lastzug): $c_w \approx 0,58...0,88$



Lkw (Sattelzug): $c_w \approx 0,49...0,77$

Abbildungen: M. Kache

Beispiele

c_w -Werte



BR 110:
 $c_w = 0,61$ (Lok)
 $c_w = 0,39$ (vor Zug)



BR 120:
 $c_w = 0,64$ (Lok)
 $c_w = 0,53$ (vor Zug)



BR 103:
 $c_w = 0,46$ (Lok)
 $c_w = 0,28$ (vor Zug)



Shinkansen Reihe 0:
 $c_w = 0,97$



BR 420:
 $c_w = 0,74$ (3-teilig.)



26,4m-Wagen:
 $c_w = 0,11$ (im Zugverband)



26,4m-Wagen:
 $c_w = 0,23$ (Zugende)

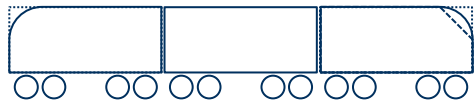


ex BR 403:
 $c_w = 0,68$ (3-teilig.)



BR 401 (TK):
 $c_w = 0,21$
BR 401 (Ganzzug):
 $c_w = 1,55$

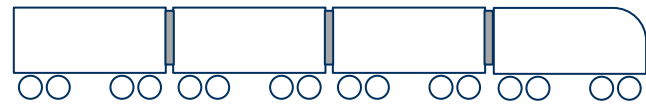
Einflussfaktoren Luftwiderstand von Zügen



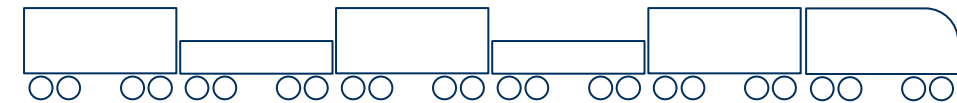
Formgebung Bug/Heck



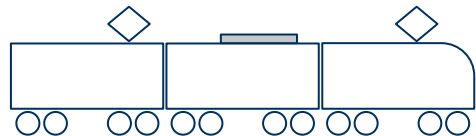
Zuglänge



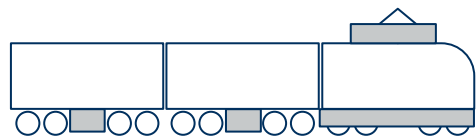
Wagenübergänge



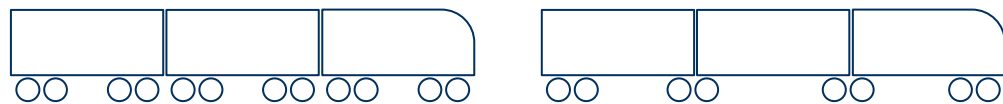
Querschnittswechsel



Dachausrüstung



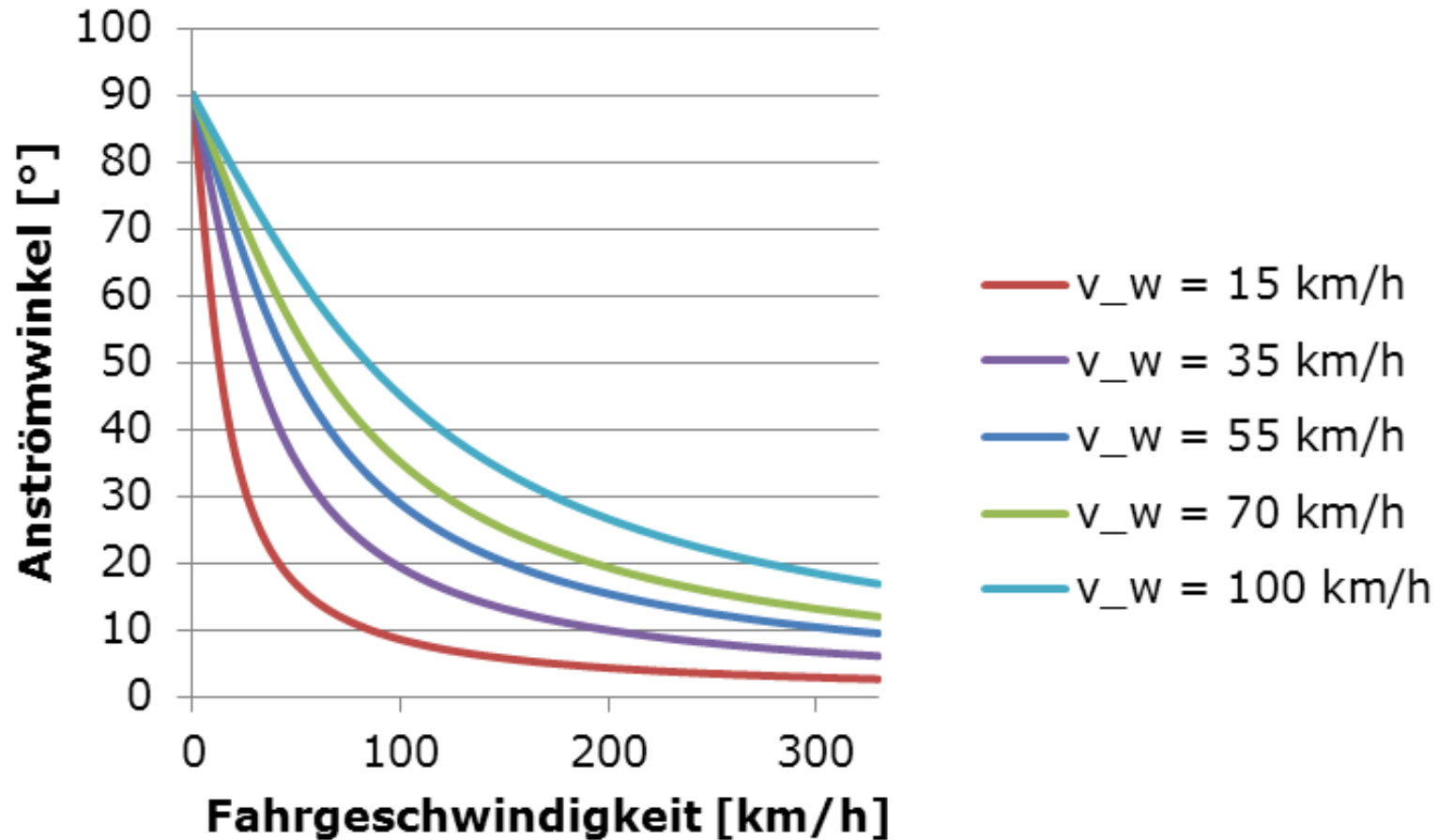
Verkleidungen



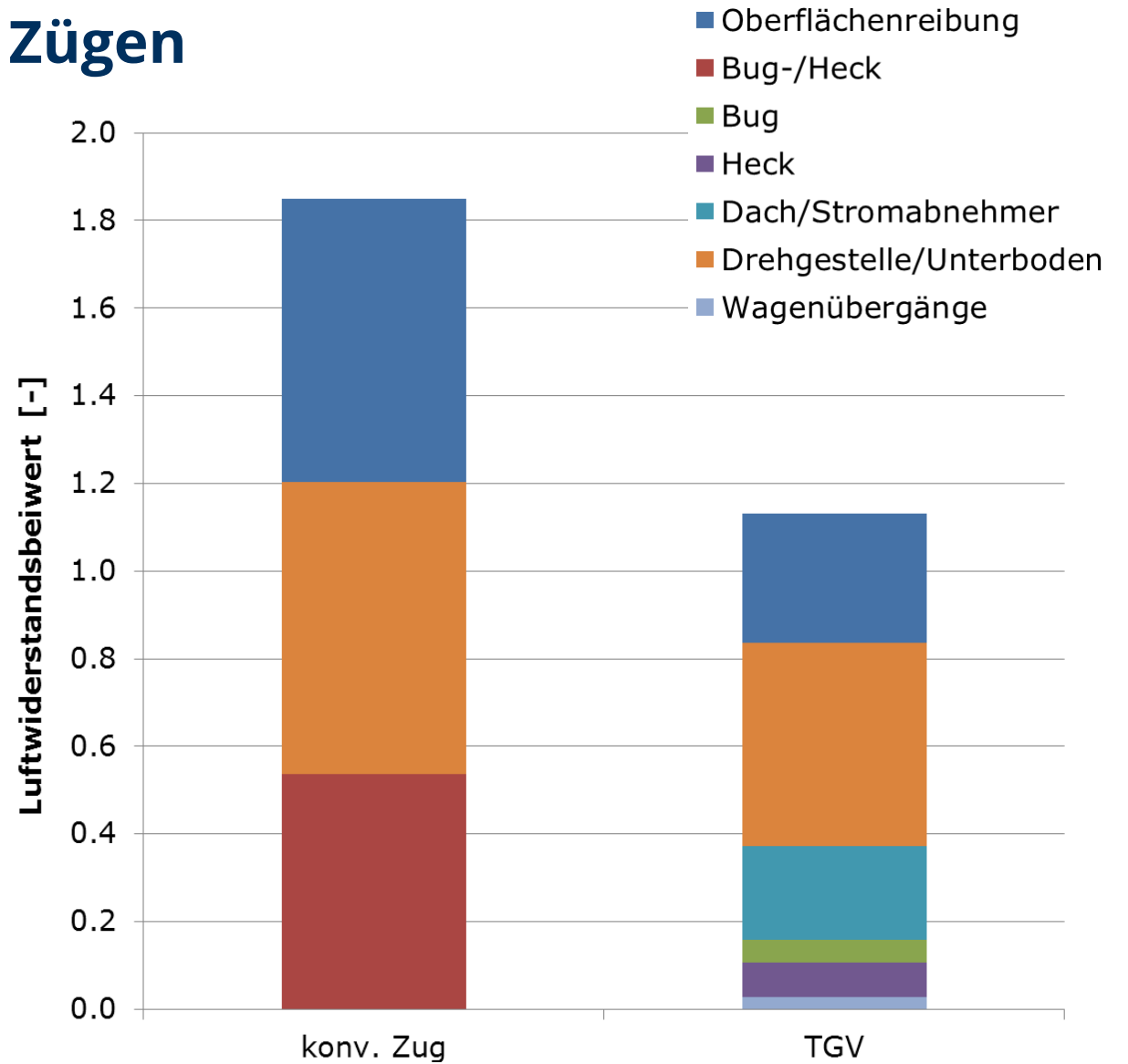
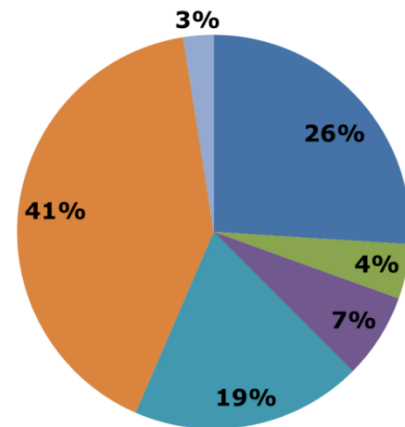
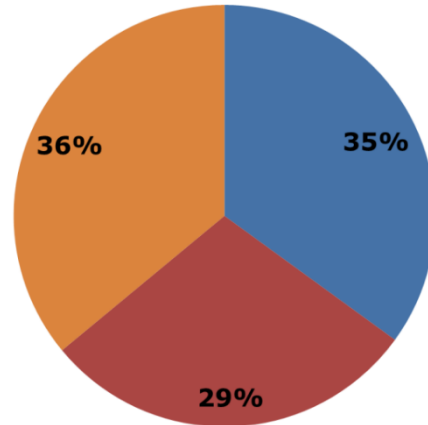
Fahrwerksart

Luftwiderstand

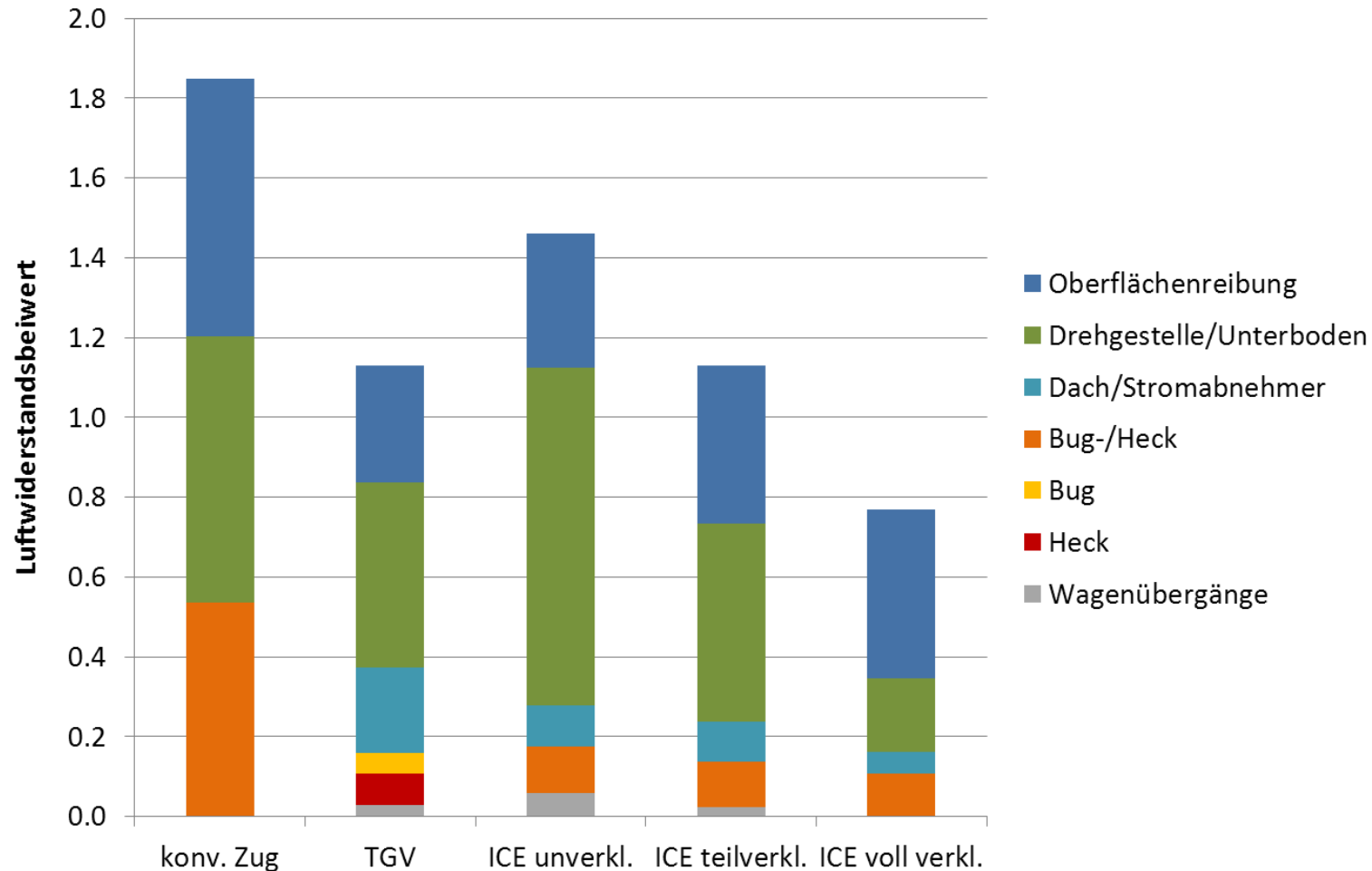
Resultierender Anströmwinkel



Luftwiderstandskomponenten bei Zügen



Einflussfaktoren Luftwiderstand HGV



zitiert nach: S. R. Ahmed, R. G. Gawthorpe & P. -A. Mackrodt (1985): Aerodynamics of Road- and Rail Vehicles, Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, 14:4-6, 319-392

Beispiel Fahrzeug- unterboden



Vergleich:
IC/EC-Wagen

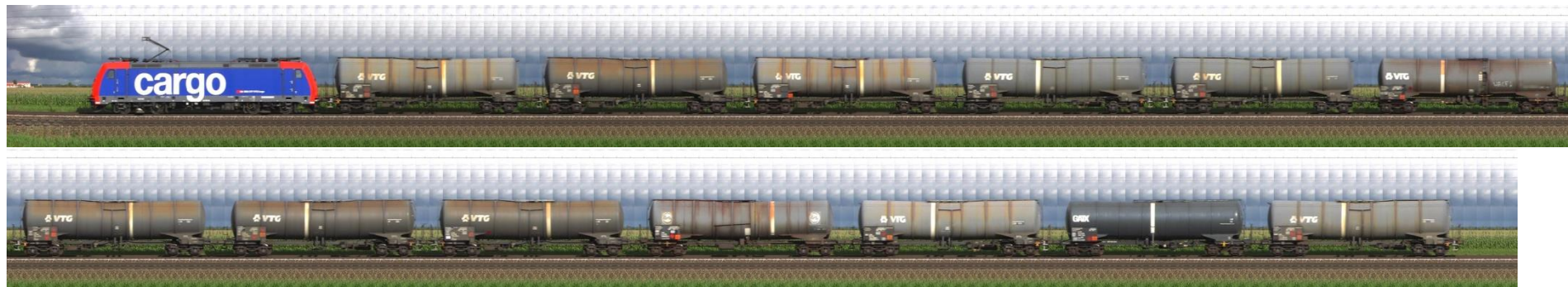


Luftwiderstand und (Güter-)Zugart

Bsp. 1: Containerzug mit unvollkommener Beladung



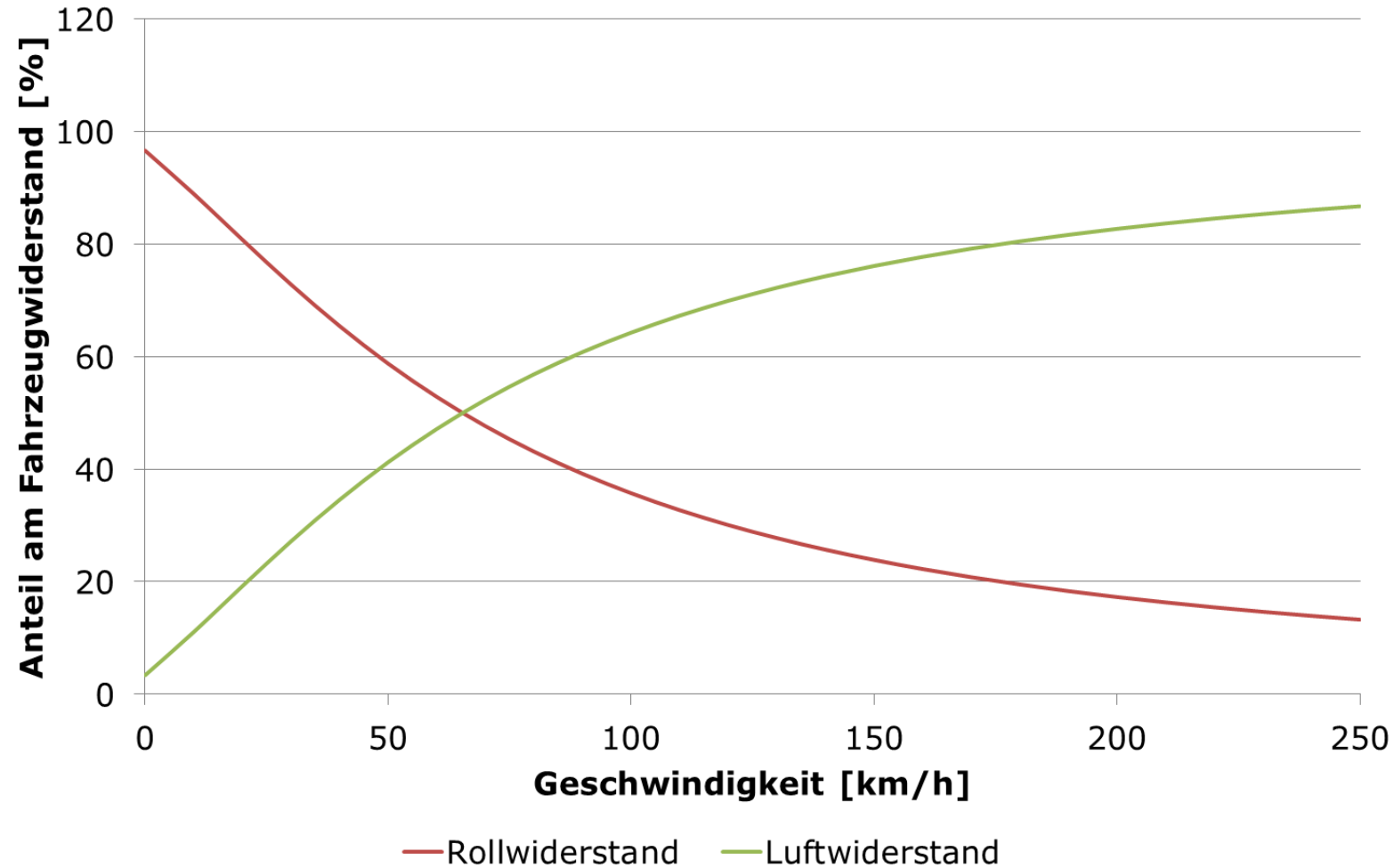
Bsp. 2: Güterganzzug mit Kesselwagen



Fotos:
Johannes Stier

Anteil Luftwiderstand

Beispiel HGV



Anteil Luftwiderstand

Beispiel HGV



ICE 1



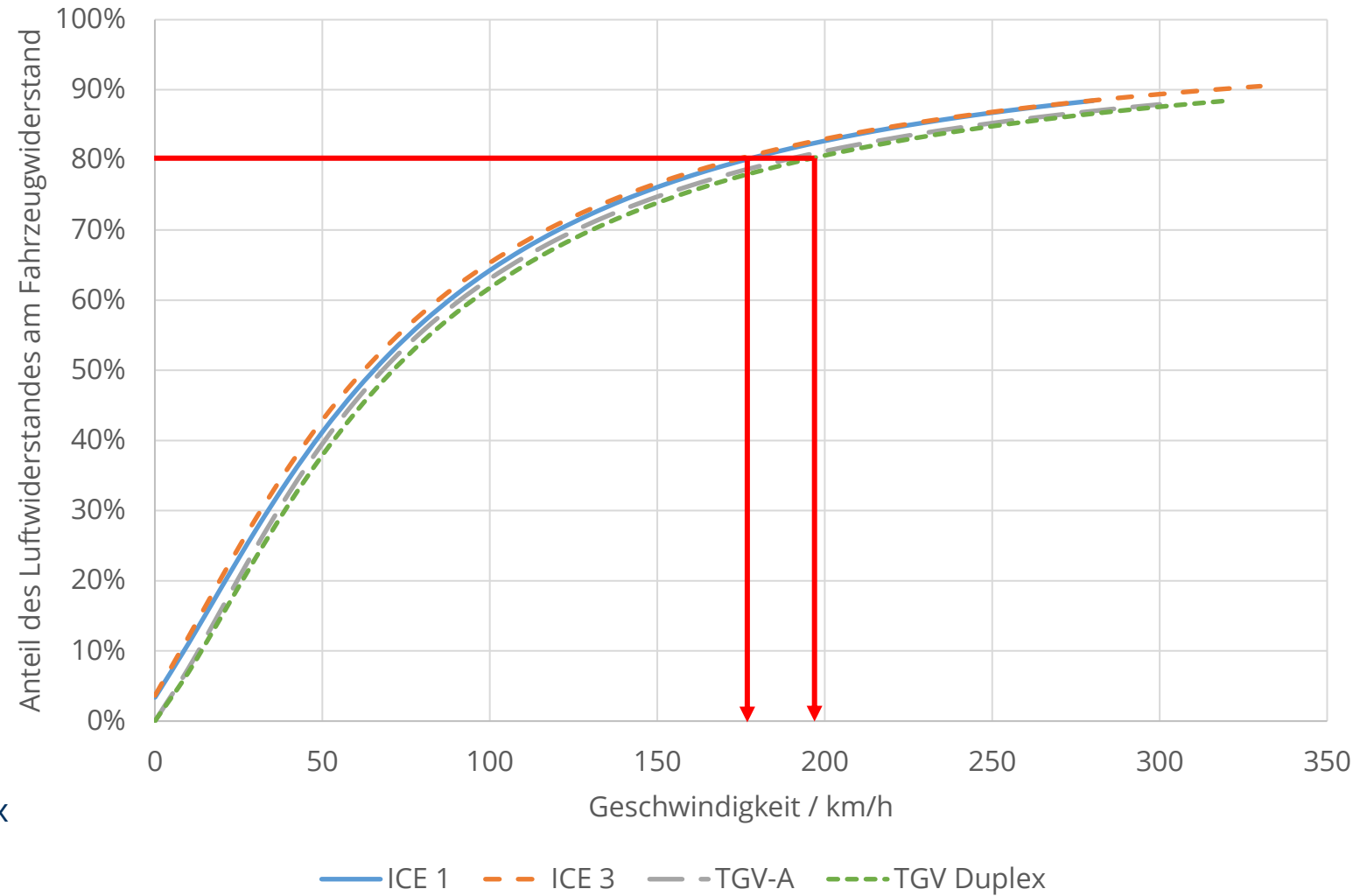
ICE 3



TGV-A



TGV Duplex



Aerodynamische Optimierung

Beispiel: Siemens Velaro Novo



ICE 3 (1997)



Velaro D (2009)



ICE 4 (2016)



Abbildung: Siemens

Velaro Novo (2018)



Abbildung: Siemens

vollverkleidete Drehgestelle:

-15% Energiebedarf*

Vorsicht bei
Herstellerangaben zur
Energieersparnis!
Es gilt die Physik

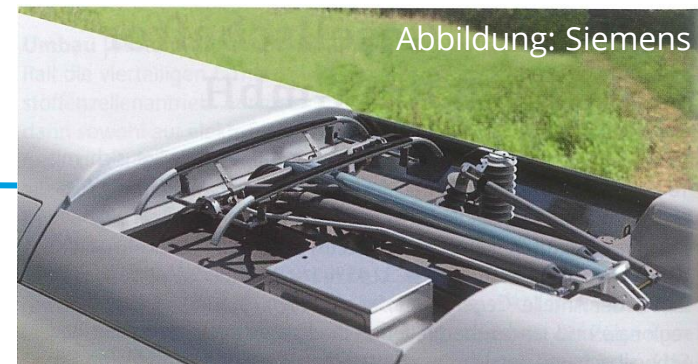


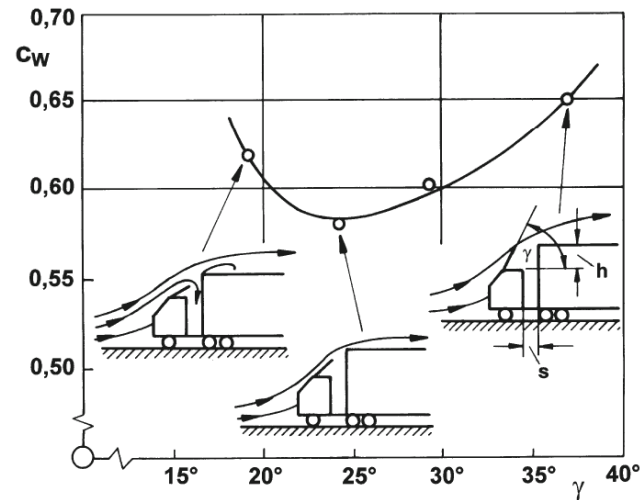
Abbildung: Siemens

versenkte Pantografen + keine weiteren
Hochspannungskomponenten auf dem
Dach: -10% Energiebedarf*

* Herstellerangaben

Aerodynamische Optimierung

Beispiel: Nutzfahrzeuge



Quelle: W.-H. Hucho „Aerodynamik der stumpfen Körper“ Vieweg+Teubner, Wiesbaden 2011

Luftwiderstand

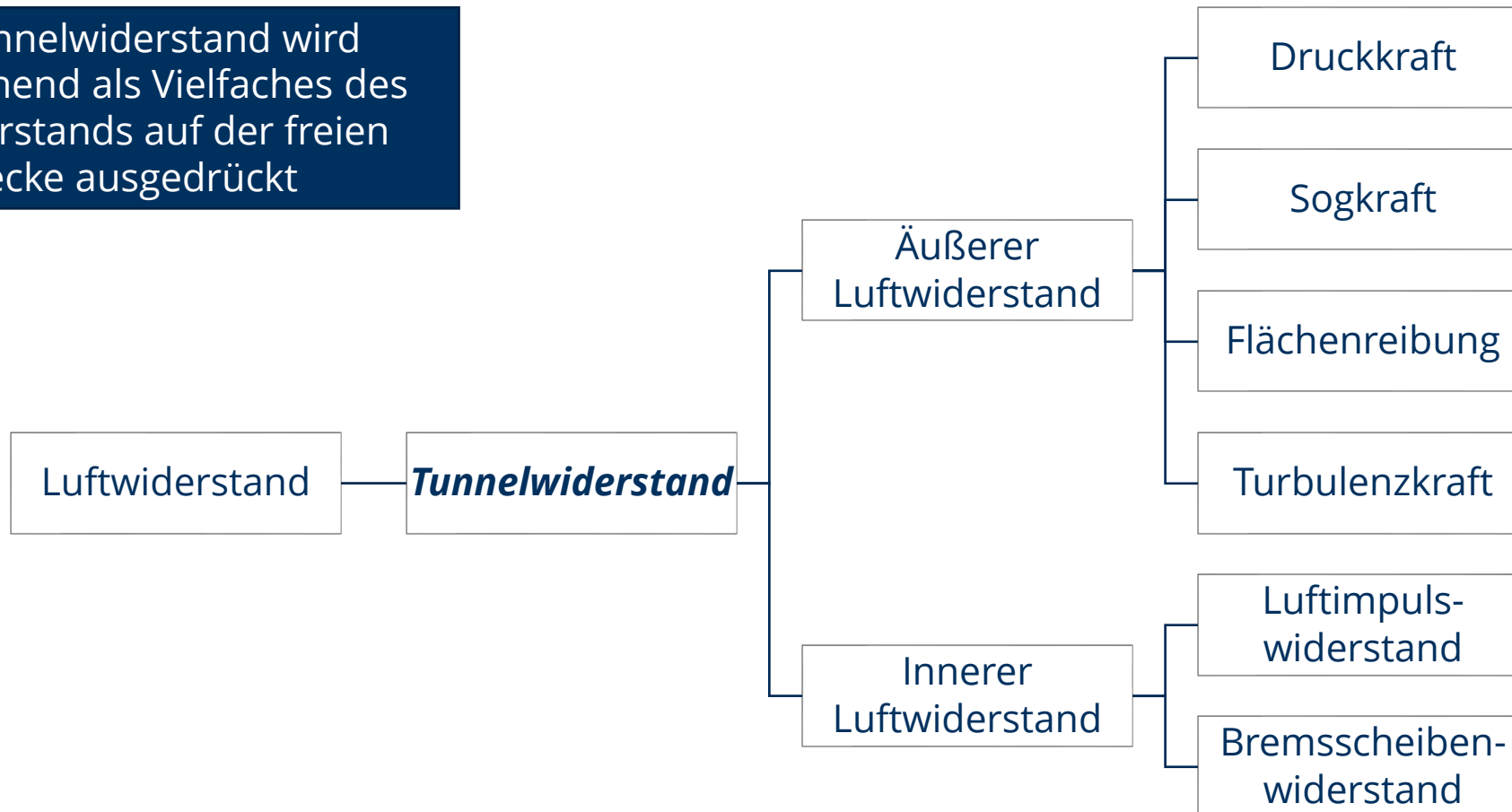
Teil Tunnelwiderstand



Luftwiderstand

Einordnung Tunnelwiderstand

Der Tunnelwiderstand wird vereinfachend als Vielfaches des Luftwiderstands auf der freien Strecke ausgedrückt



Einteilung nach D. Wende, Fahrdynamik des Schienenverkehrs, Teubner, 2003 (S 119 ff., 141 f.)

Luftwiderstand

Einordnung Tunnelwiderstand

Ursache für den erhöhten Luftwiderstand in Tunneln:

- erschwerte Bedingungen für die Strömung vor und hinter dem Zug
- erschwerte Bedingungen für die Strömung im Luftspalt zw. Fahrzeug und Tunnelwand

Wann muss der Tunnelwiderstand berücksichtigt werden?

- Tunnel länger als Zug und Tunnel länger als 500 m

Einflussfaktoren:

- Tunnellänge
- Tunnelquerschnittsfläche (Versperrungskoeffizient: $A_{\text{norm}}/A_{\text{Tunnel}}$)
- Rauigkeit der Tunnelwände
- Zugart (Länge, Oberflächenbeschaffenheit)

Modellvorstellung: Kolben in Zylinderrohr

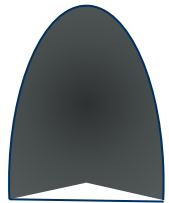


Luftwiderstand im Tunnel

Beispiel GBT



Karte: wikipedia (User: Tschubby)

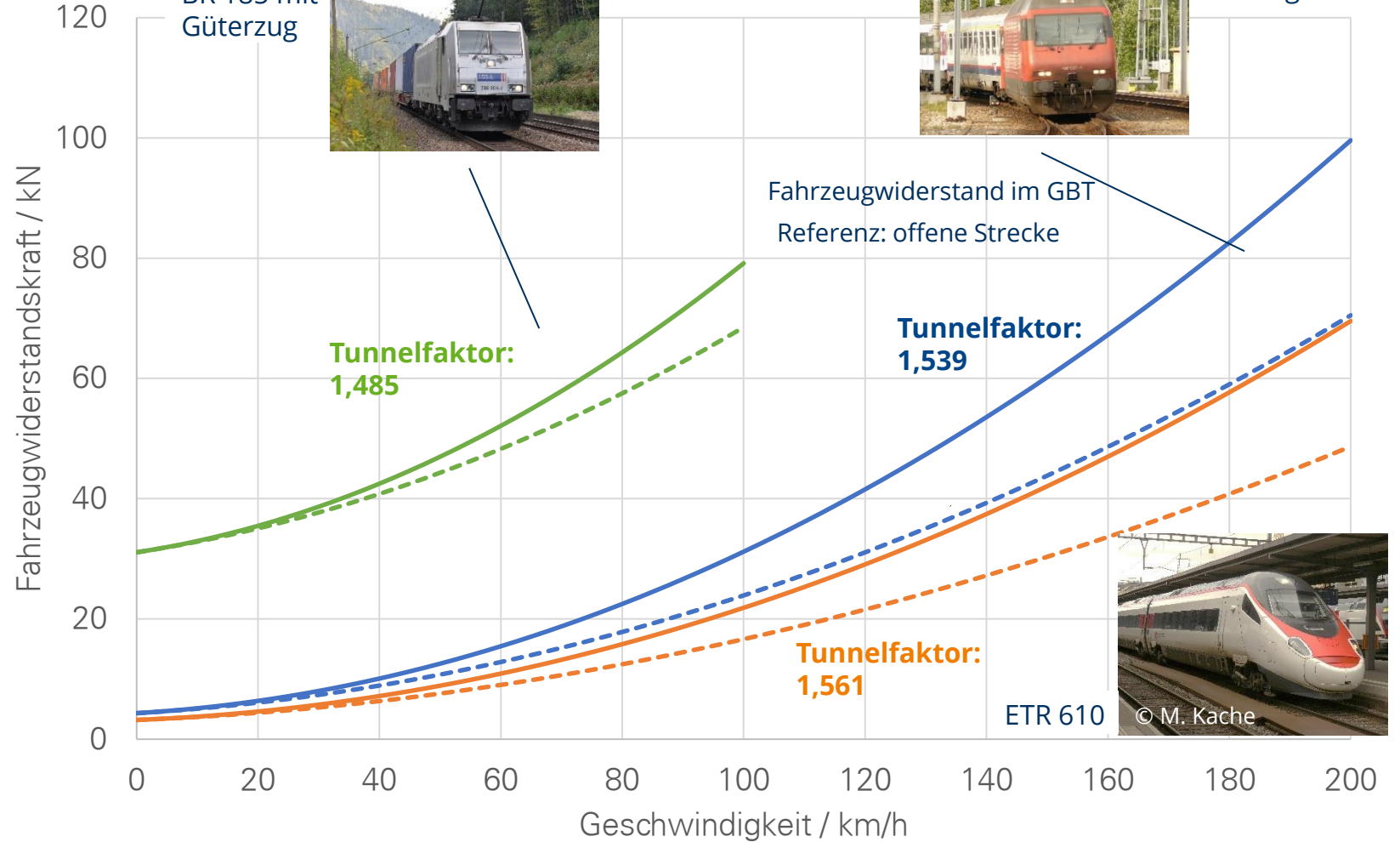


Gotthard-Basistunnel
 Bj. 1999-2016
 $A = 41,0 \text{ m}^2$
 $k_v = 0,24$
 $l_{Tu} = 57,1 \text{ km}$

BR 185 mit Güterzug



Re 460 mit 12 Wagen



Datenbasis: Schranil/Lavanchy: „Fahr-dynamische Messfahrten im Gotthard-Basistunnel“, eb 114 (2016), Heft 7, S. 388ff.

Zusammenfassung

ANFAHRWIDERSTAND
erhöht im Moment des Anfahrens
(Elastizität des Zugverbandes beachten)

spezifischer Grundwiderstand
ca. 10 x kleiner als bei
Straßenfahrzeugen

Fahrzeugwiderstand

Rollen, Gleiten, Lager

an das **rollende Rad** gebunden

Grundwiderstand

Luftwiderstand

resultiert aus der
Luftströmung um das Fahrzeug

Druck, Sog, **Wirbel**,
Oberflächenreibung,
Luftimpuls

deutlich erhöht
in Tunneln

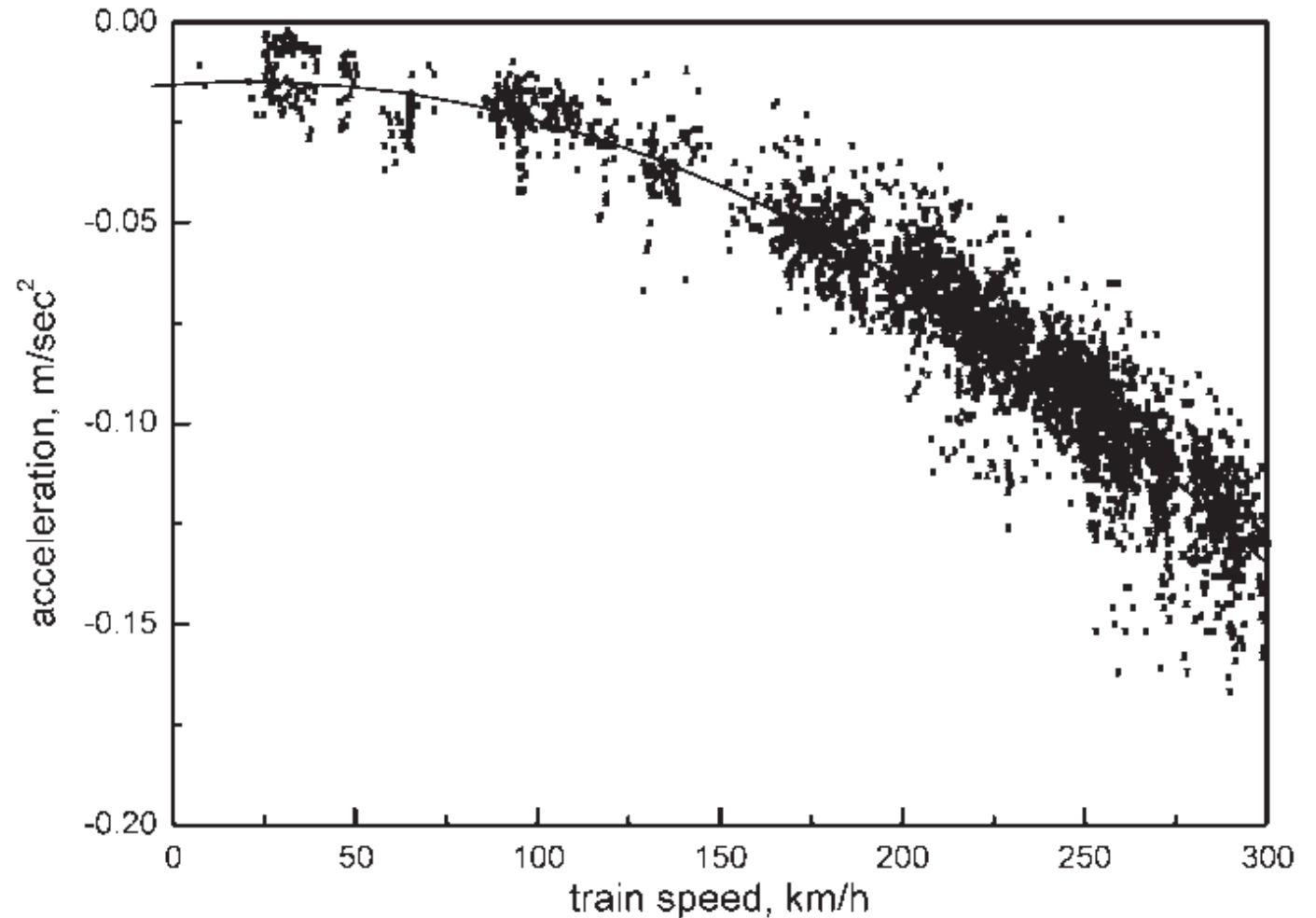


dominant bei hohen
Geschwindigkeiten

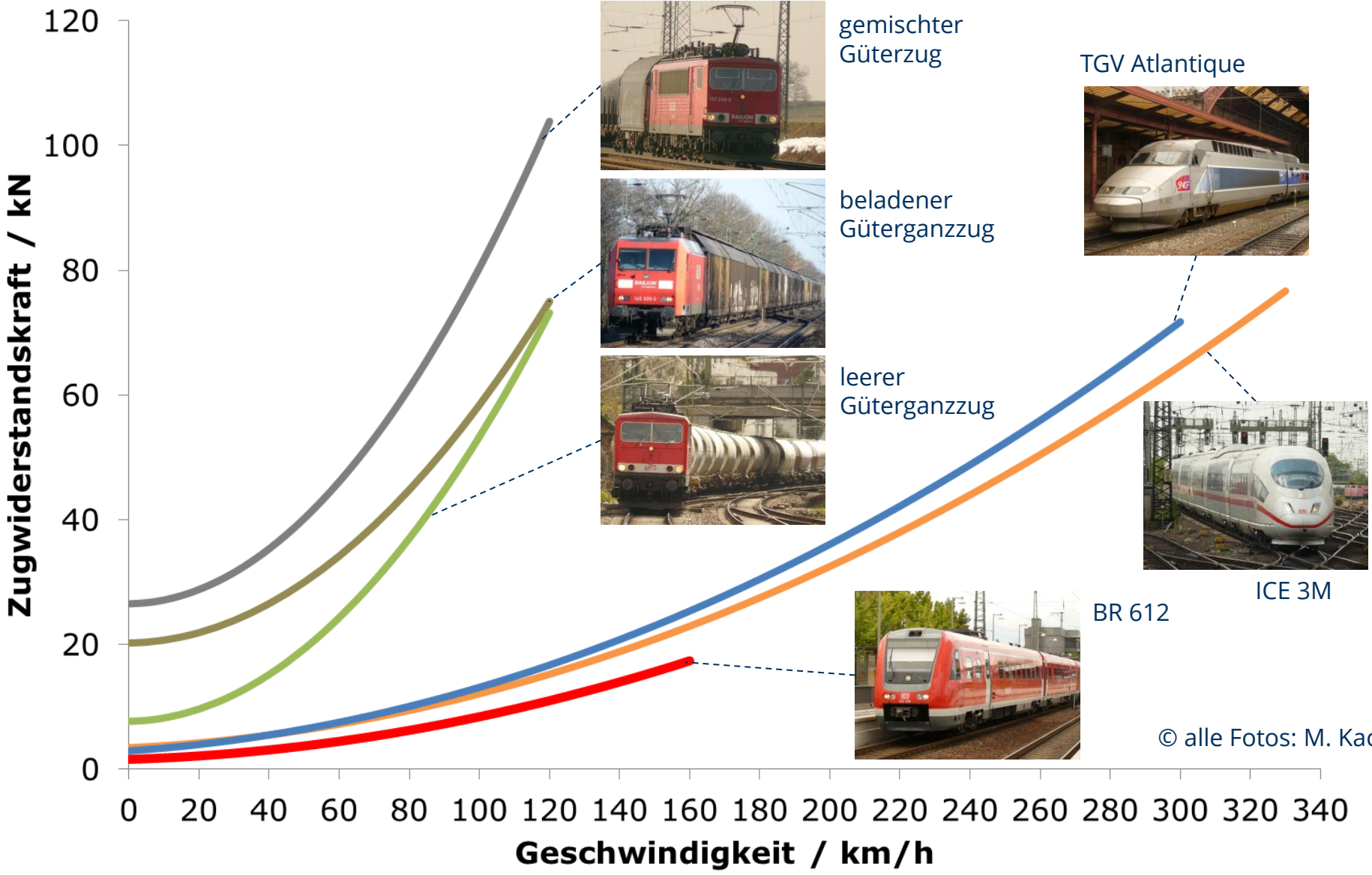
beeinflussbar
durch
Fahrzeugkonfiguration

Ermittlung von Fahrzeugwiderstandsgleichungen

Beispiel:
HSR-350x (Südkorea) - Auslaufversuche

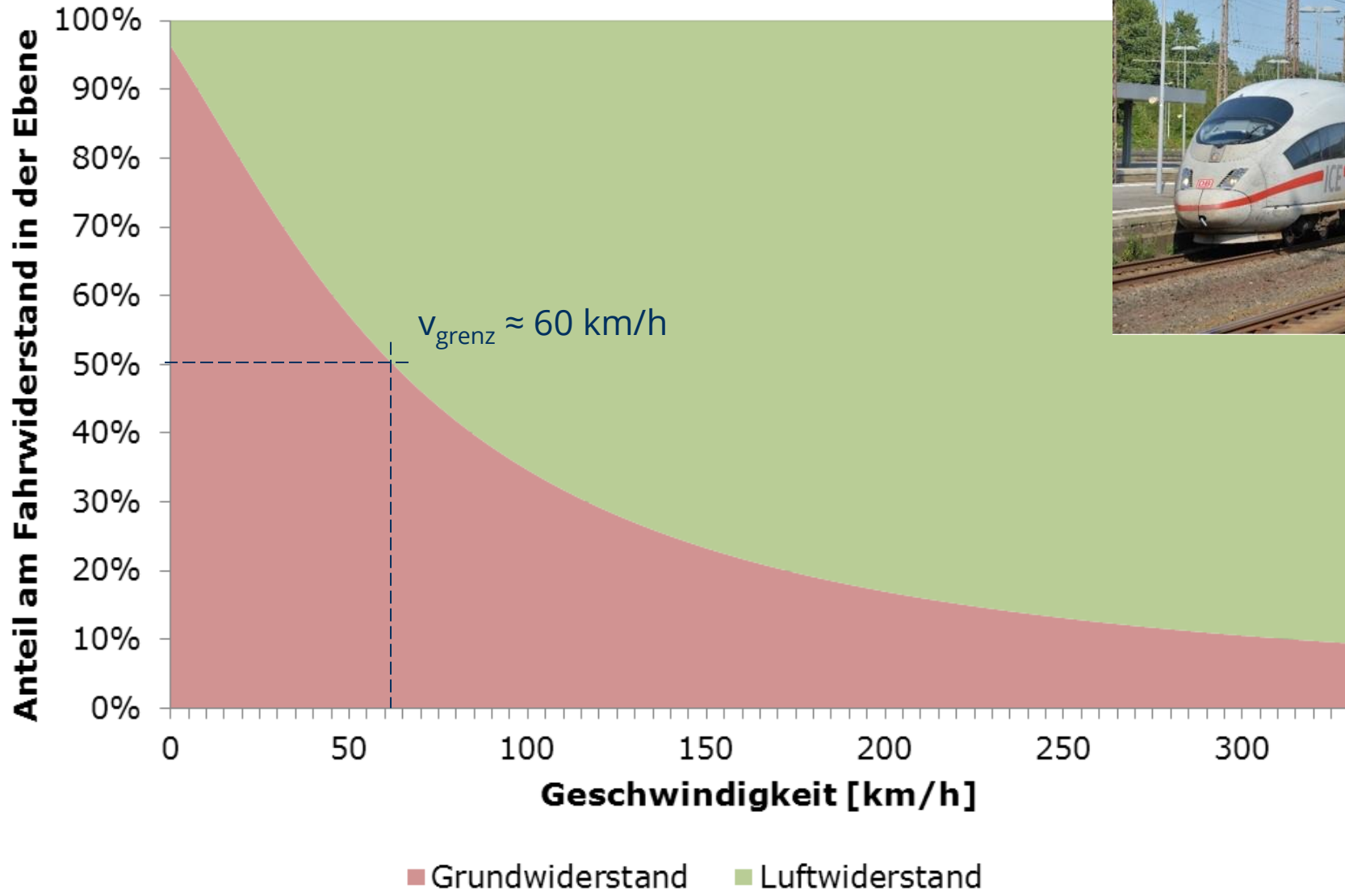


Fahrzeugwiderstands-kräfte von Zügen



© alle Fotos: M. Kache

Grund- vs. Luftwiderstand - Hochgeschwindigkeitszüge

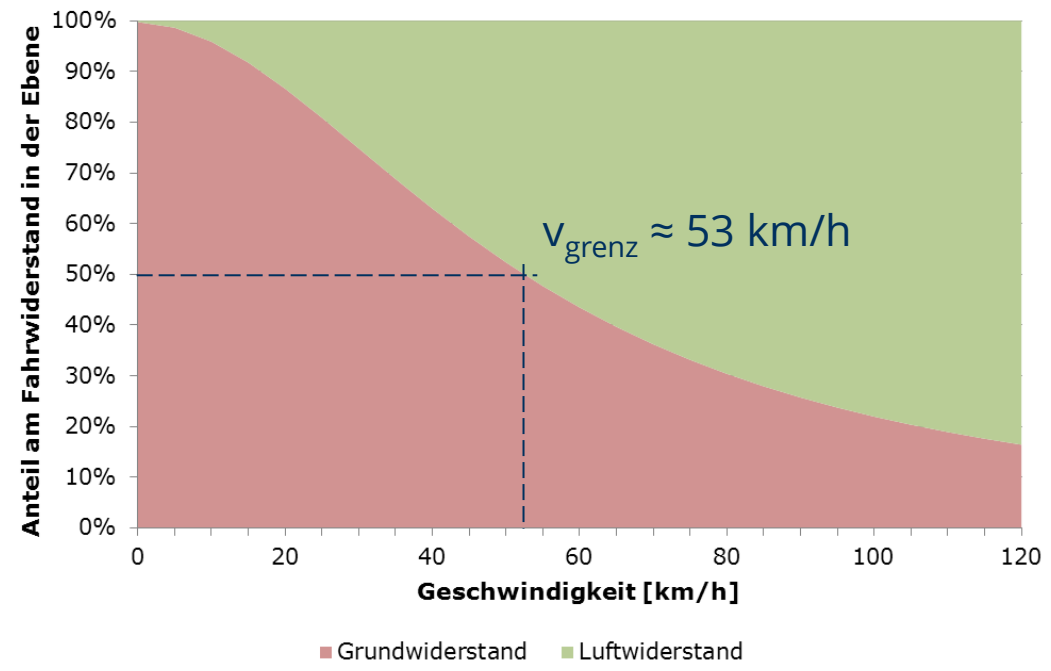
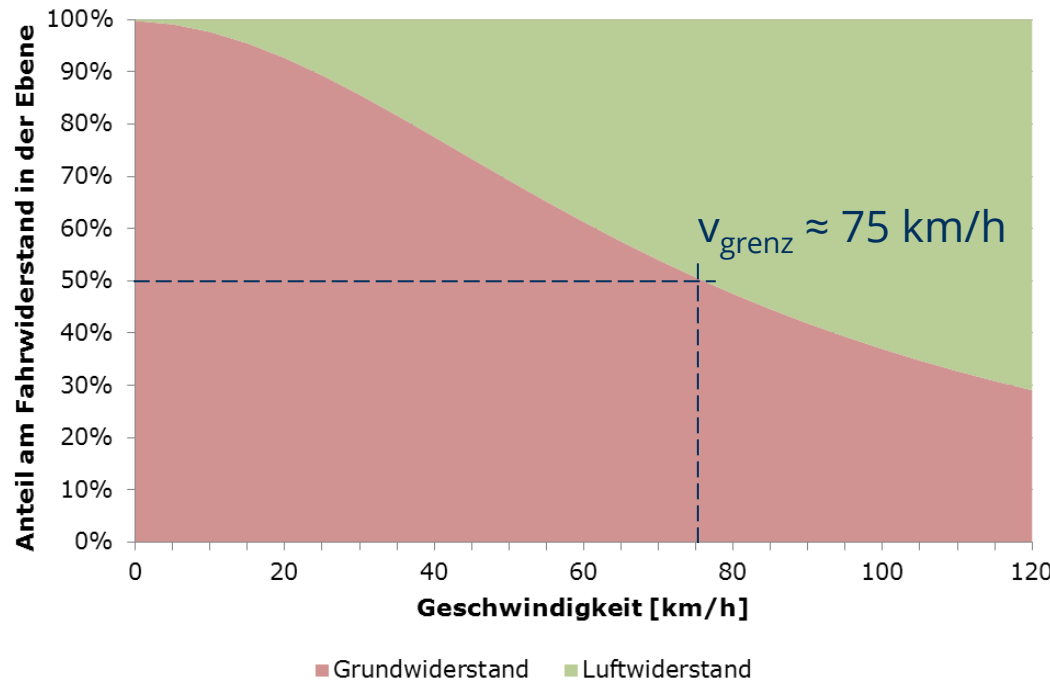


Grund- vs. Luftwiderstand - Güterzüge



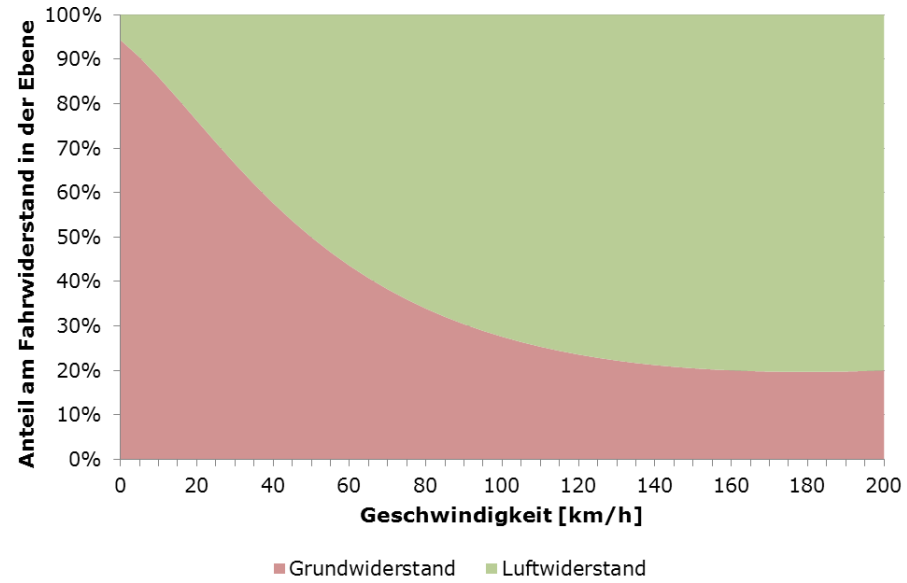
beladener Ganzzug

leerer Ganzzug mit **offenen** Wagen

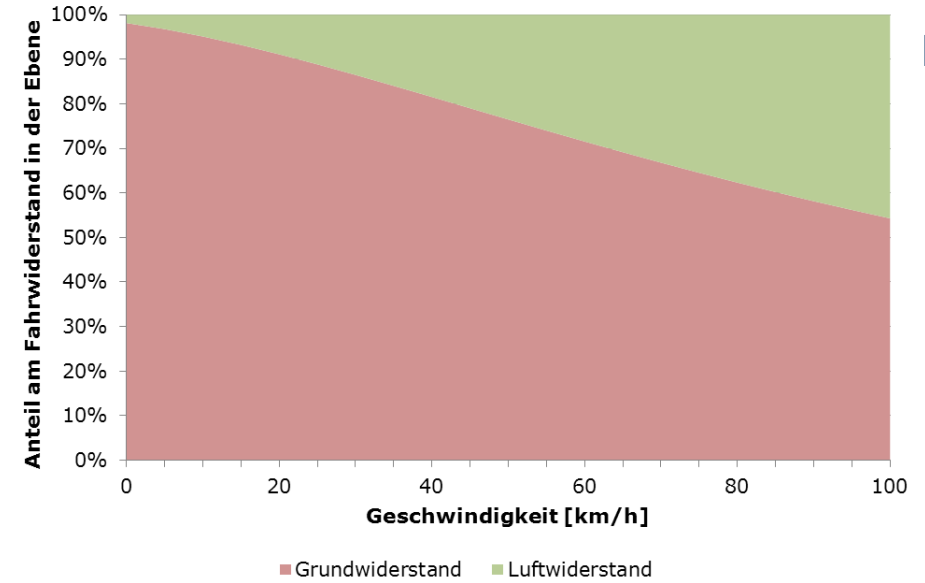


Grund- vs. Luftwiderstand - Straßenfahrzeuge

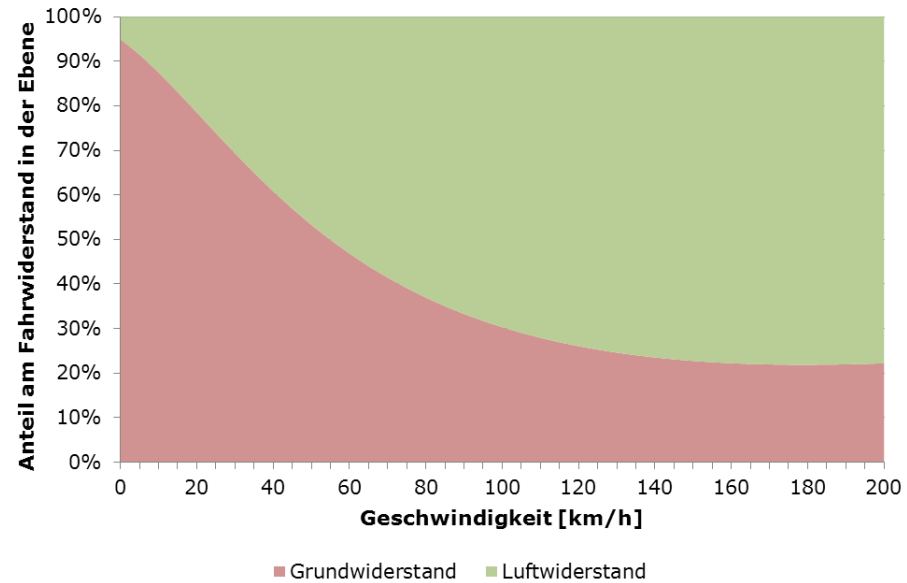
Kleinwagen



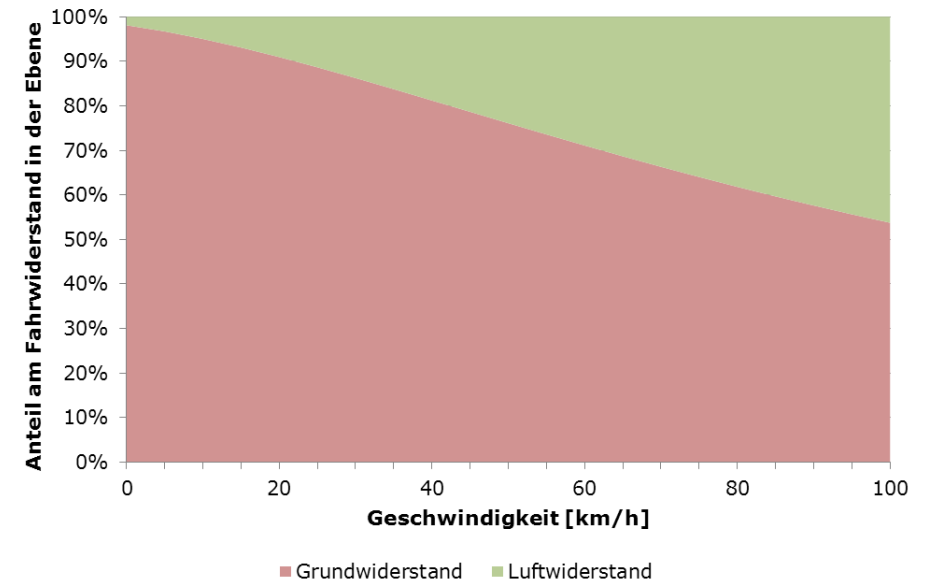
Reisebus



SUV

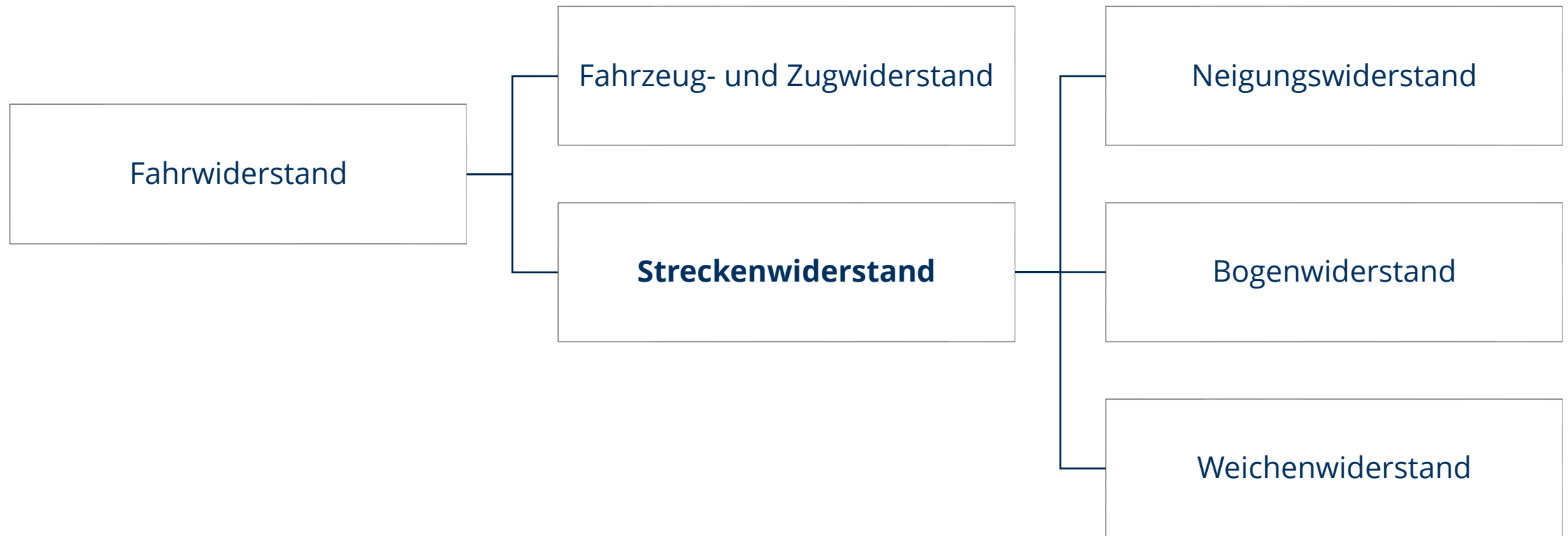


Sattelzug



Fahrwiderstand

Einteilung

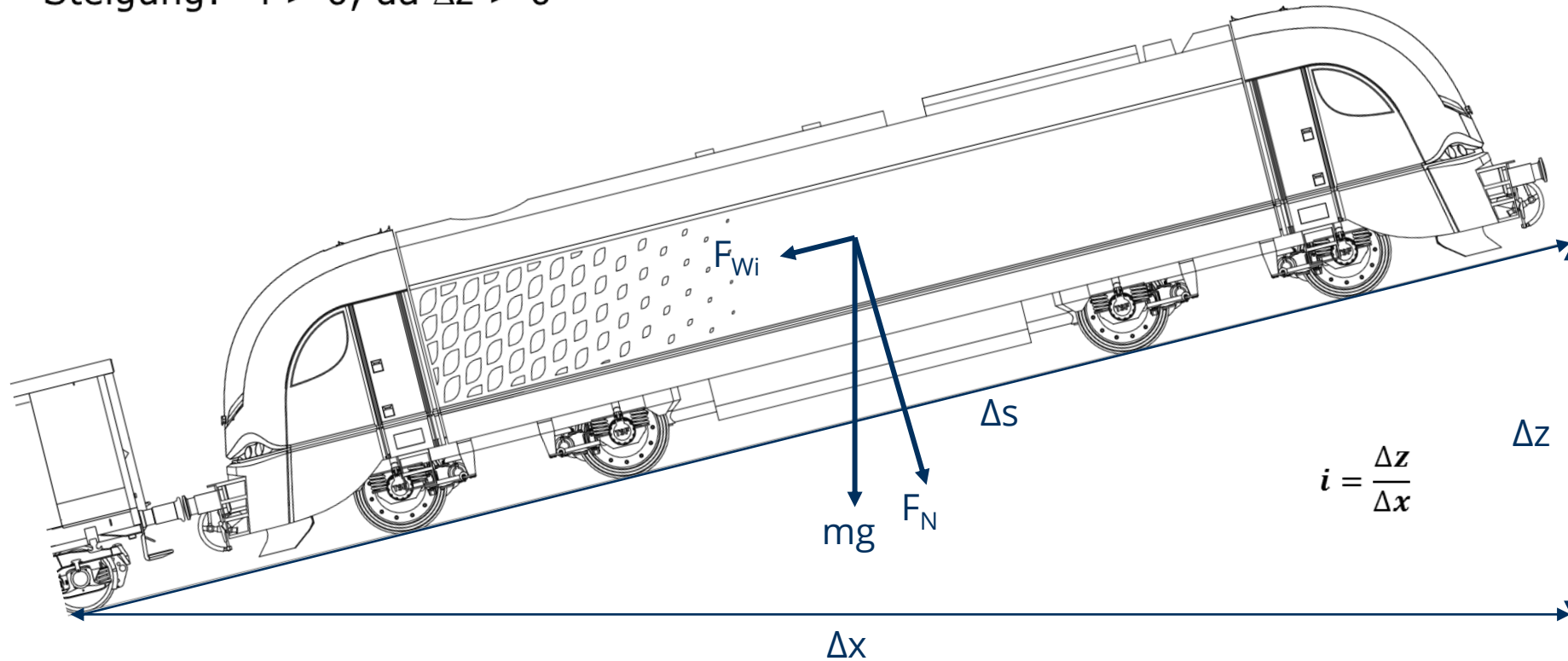


Einteilung nach D. Wende, Fahrdynamik des Schienenverkehrs, Teubner, 2003 (S 108 ff.)

Neigungswiderstand

Gefälle: $i < 0$, da $\Delta z < 0$

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



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

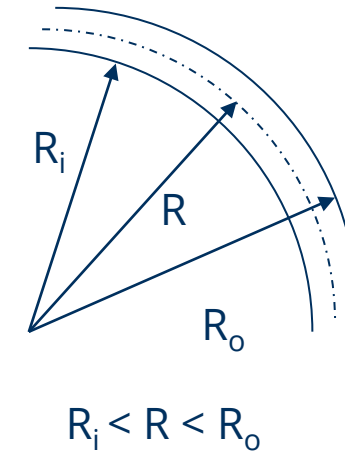
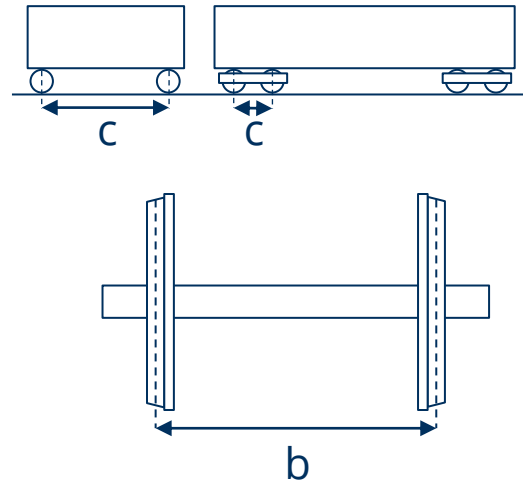
für $i < 100\text{‰}$ (kleine Winkel) gilt:

$$\sin\alpha = \frac{\Delta z}{\Delta s} \approx \frac{\Delta z}{\Delta x} \approx i \implies F_{wi} \approx mgi$$

Krümmungswiderstand



© M. Kache



Formel von Protopapadakis (1937)

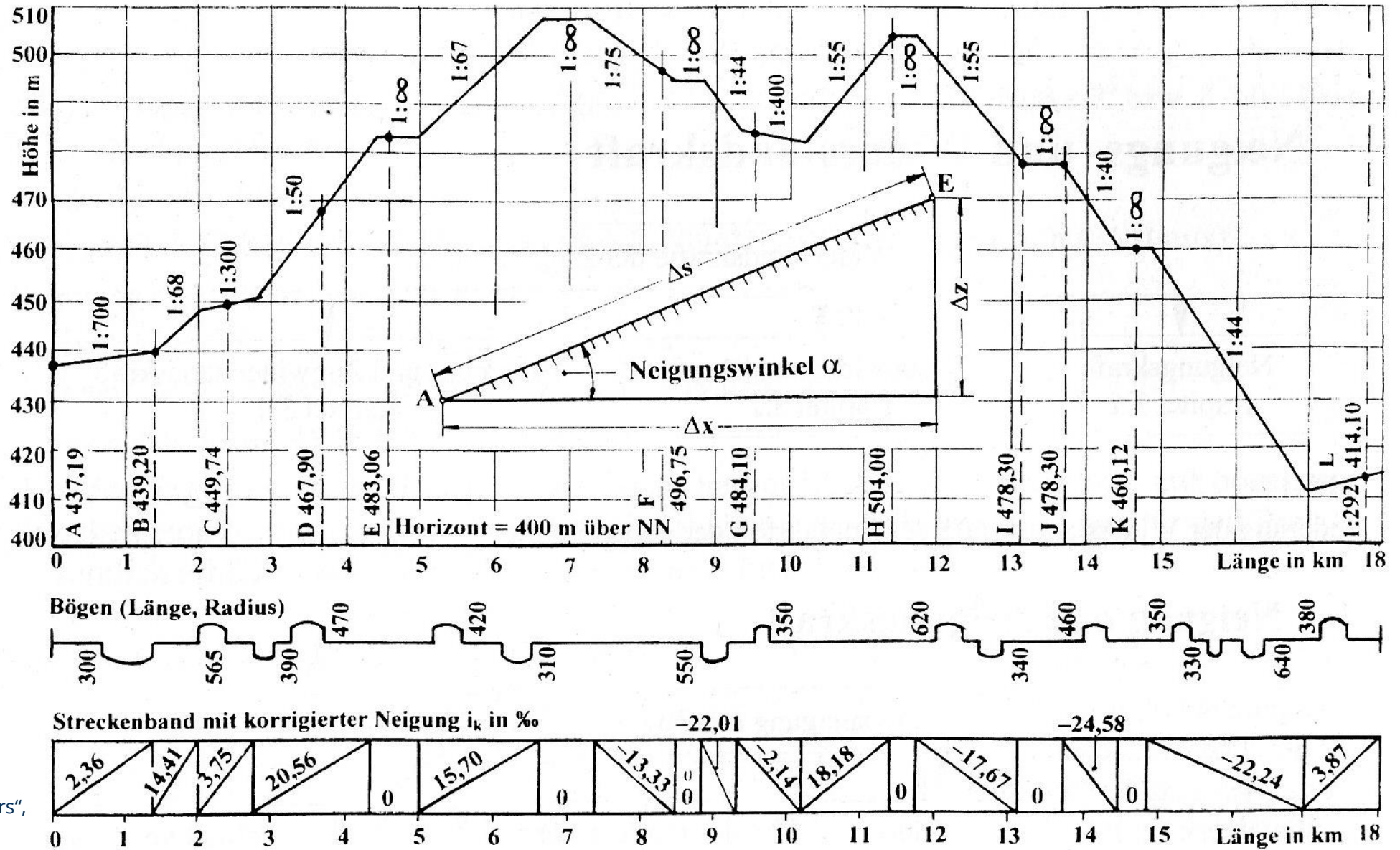
Gleitreibung Rad/Schiene Laufkreisabstand (Regelspur: 1,5 m)

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

Gleisbogenradius

Radsatzabstand (im DG)

Streckenband



Quelle:
 Wende: „Fahrtechnik des Schienenverkehrs“,
 Teubner Verlag, 2003

Streckendatei

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1	Laufwegsuche, Version: 3.0.5.1, erstellt am: 18.03.2008 14:25:25, Beschreibung:																		
2	1	2	3	4	5	6	7	8	17	18	20	21	29	39	42	43	45	46	
3	Streckennummer	Streckentyp	Richtung	Gleis	Kilometer	Art der Betriebsstelle	Name der Betriebsstelle	Abk. nach RL 100	Krümmung	Neigung	Länge des Streckenabschnitts	summierter Weg	Res. Regelgeschwindigkeit aus VzG, Hp2 und BÜ für Simulation	Res. Neitech-Geschw aus Neitech-Geschw, VzG, Hp2 und BÜ für Simulation	Kilometer an (nur bei Fehl.-Überlänge)	Fehlänge	Bogenwiderstand	Streckenwiderstand	
4									[m]	[‰]	[m]	[m]	[km/h]	[km/h]		[m]	[N/kN]	[N/kN]	
5	6212	DB	auf	R	0.0+ 0	BF	Görlitz	DG	0	0	243	0	100	100			0	0	
6	6212	DB	auf	R	0.2+ 43	ASIG	40N9				57	243					0	0	
7	6212	DB	auf	R	0.3+ 0					2,4	95	300					0	2,4	
8	6212	DB	auf	R	0.3+ 95				300		11	395					2,653	5,053	
9	6212	DB	auf	R	0.4+ 6				0		52	406					0	2,4	
10	6212	DB	auf	R	0.4+ 58				190		33	458					3,125	5,525	
11	6212	DB	auf	R	0.4+ 91				0		221	491					0	2,4	
12	6212	DB	auf	R	0.7+ 12				500		23	712					1,461	3,861	
13	6212	DB	auf	R	0.7+ 35					6,3	33	735					1,461	7,761	
14	6212	DB	auf	R	0.7+ 68				0		87	768					0	6,3	
15	6212	DB	auf	R	0.8+ 55					7,4	7	855					0	7,4	
16	6212	DB	auf	R	0.8+ 62				5000		138	862					0,131	7,531	
17	6212	DB	auf	R	1.0+ 0					8,1	120	1000					0,131	8,231	

Quelle: DB Netz

Streckenwiderstand langer Züge

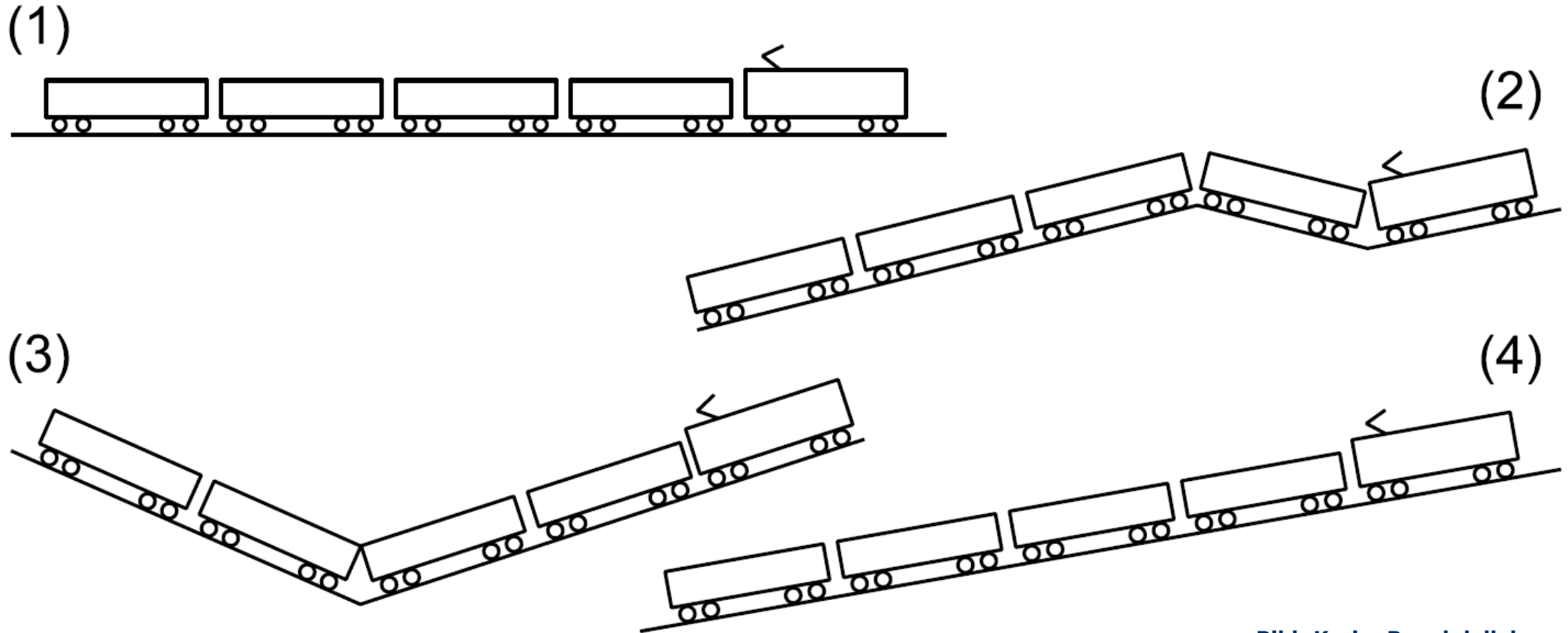


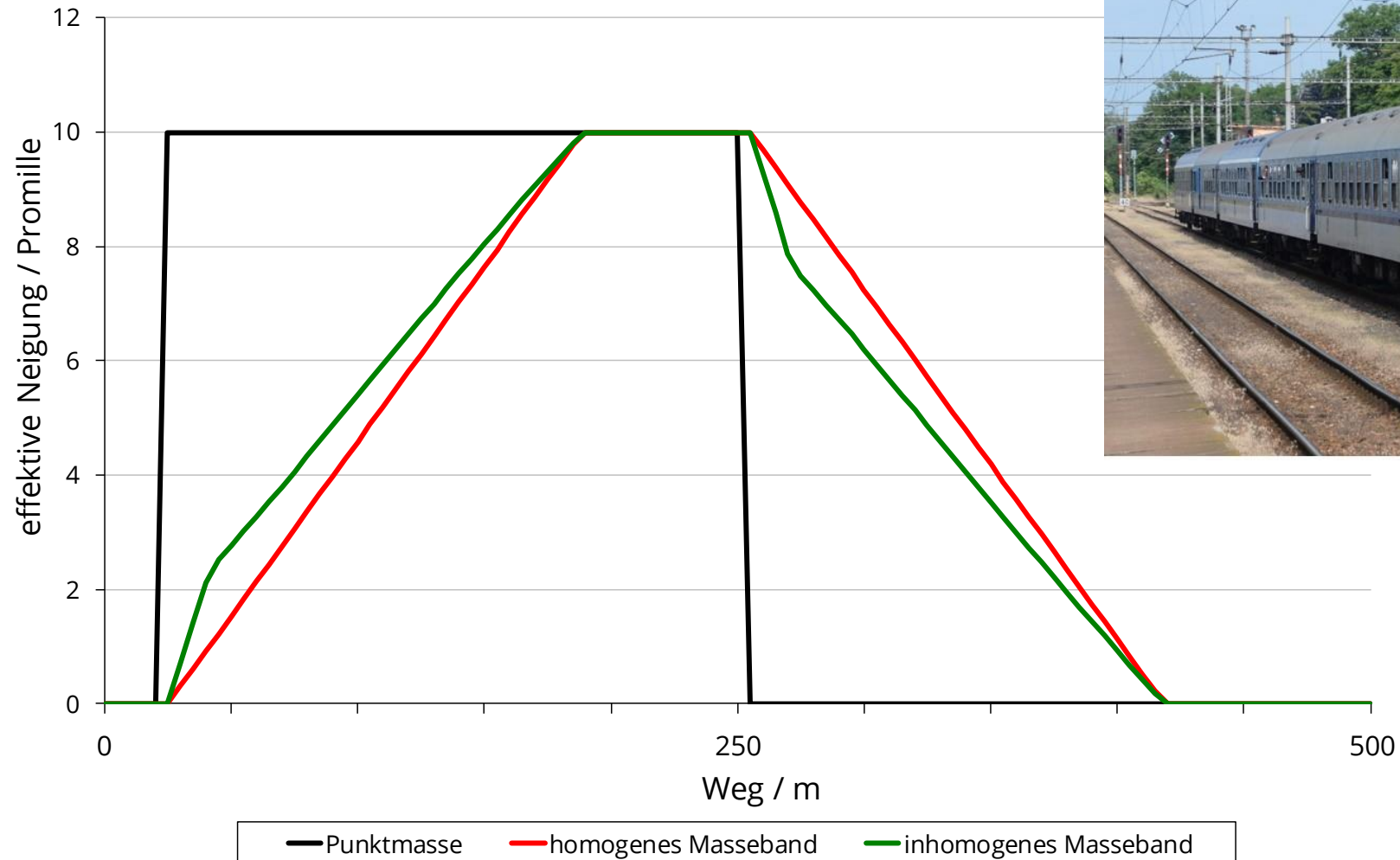
Bild: Karim Benabdellah

Längenausdehnung: Gefällewechsel unter Zugverband (Fälle 2 und 3)

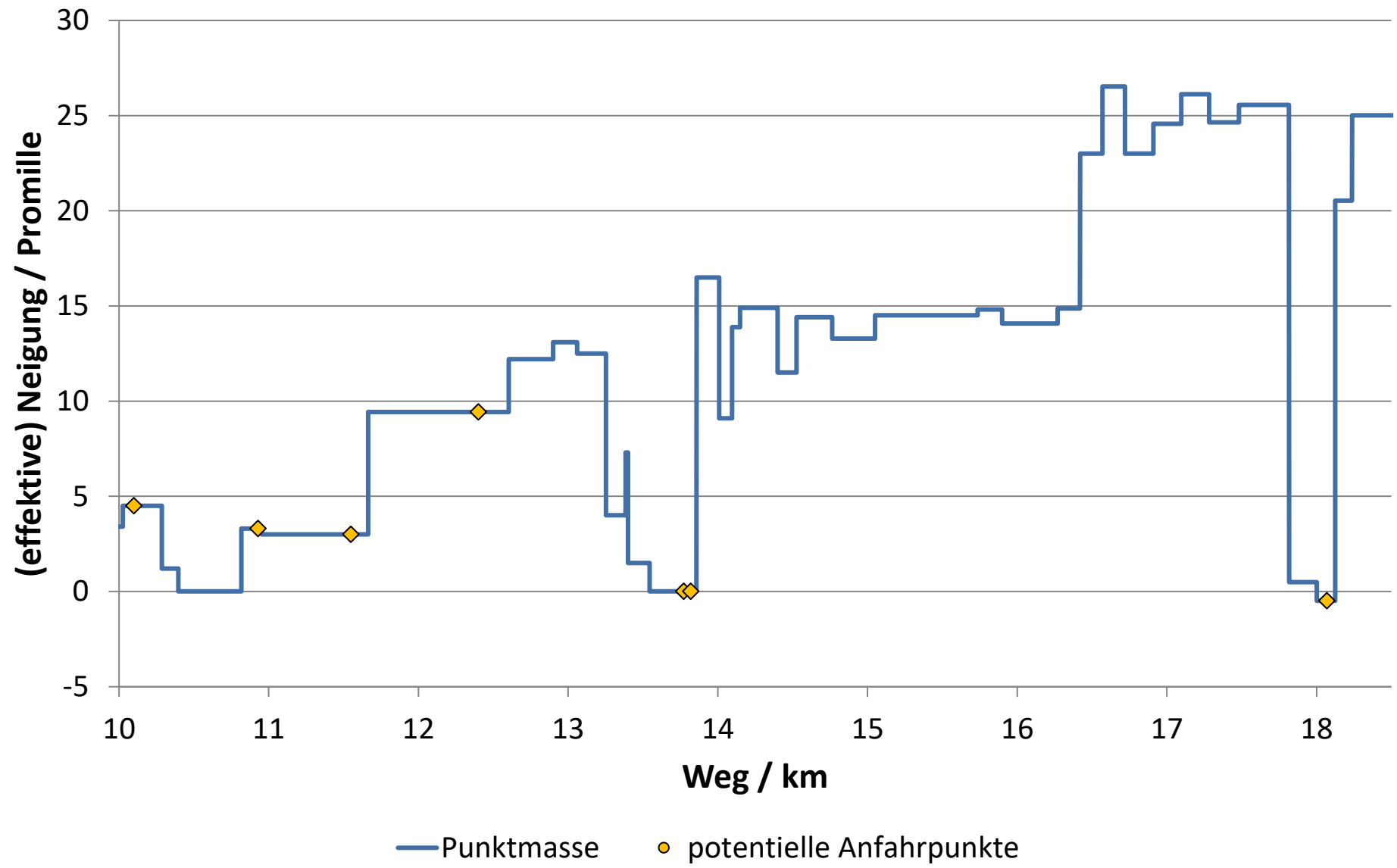
Bestimmung der effektiven Neigung: Massenband (homogen/inhomogen)

Vergleich der Modellierungsansätze

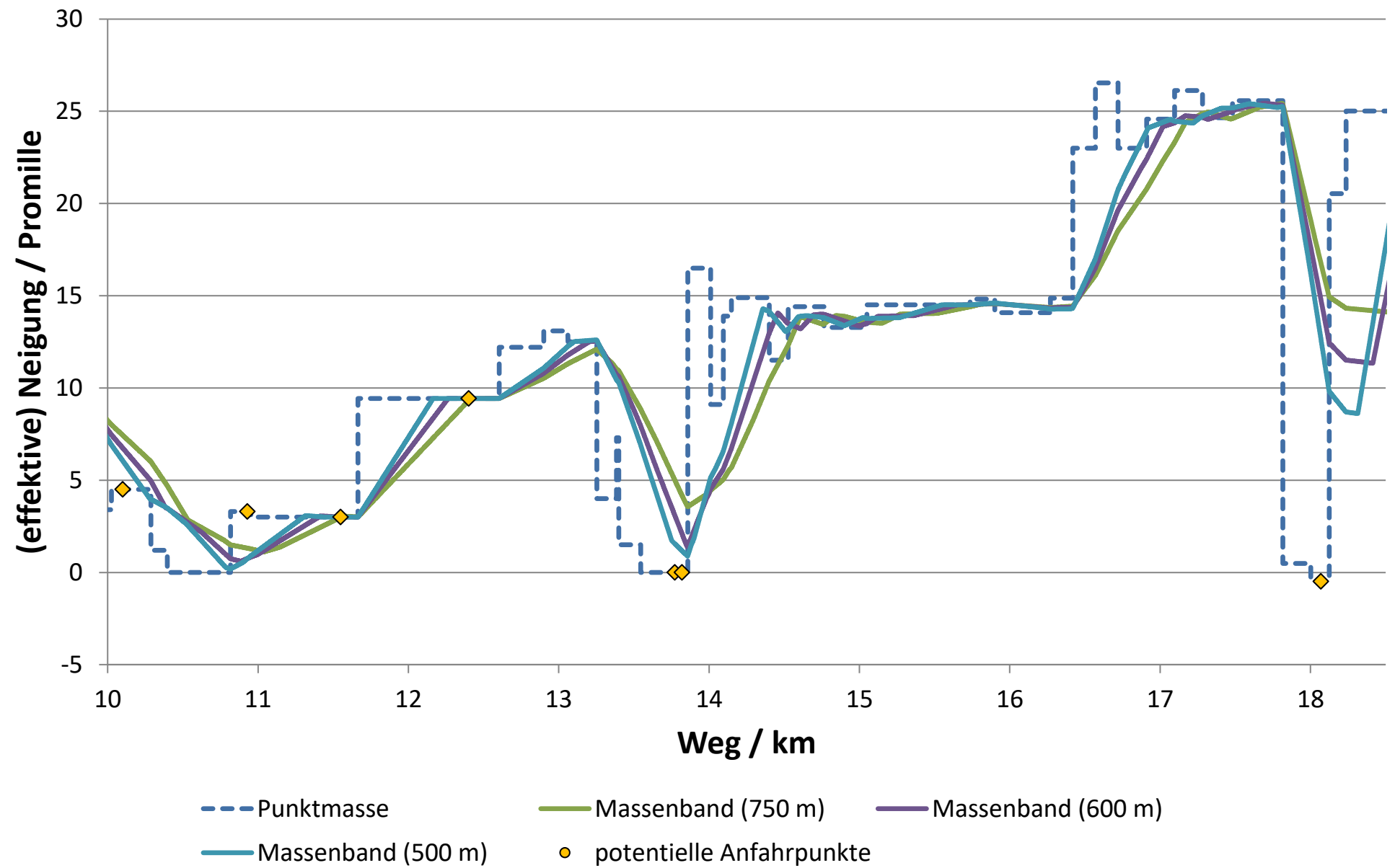
effektive Neigung Reisezug



Effektive Neigung und Zuglänge

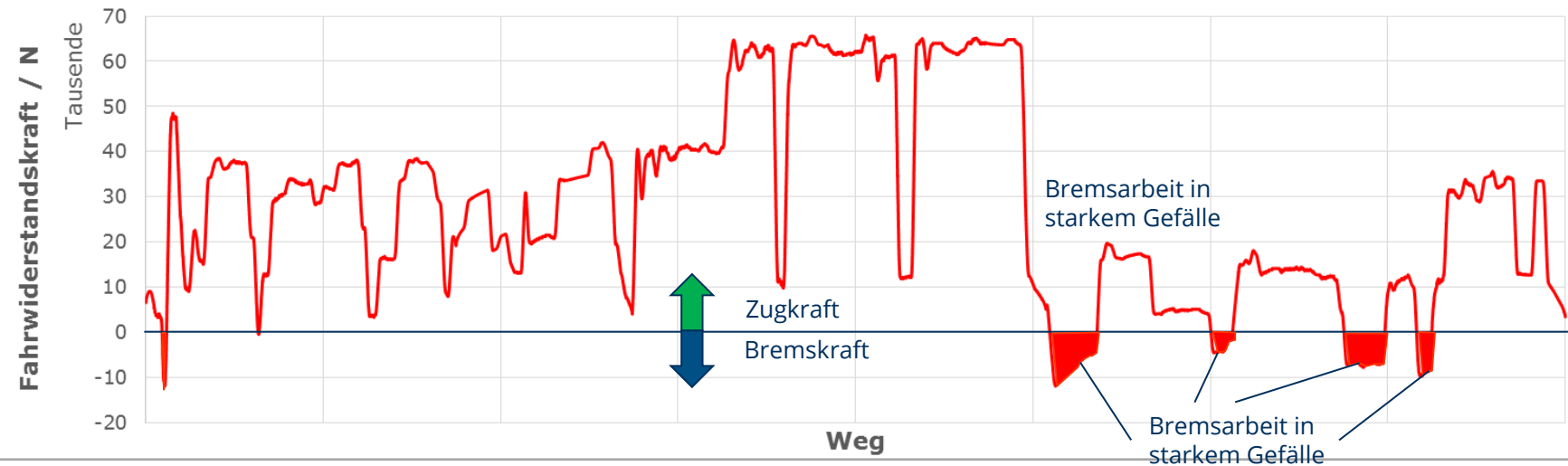
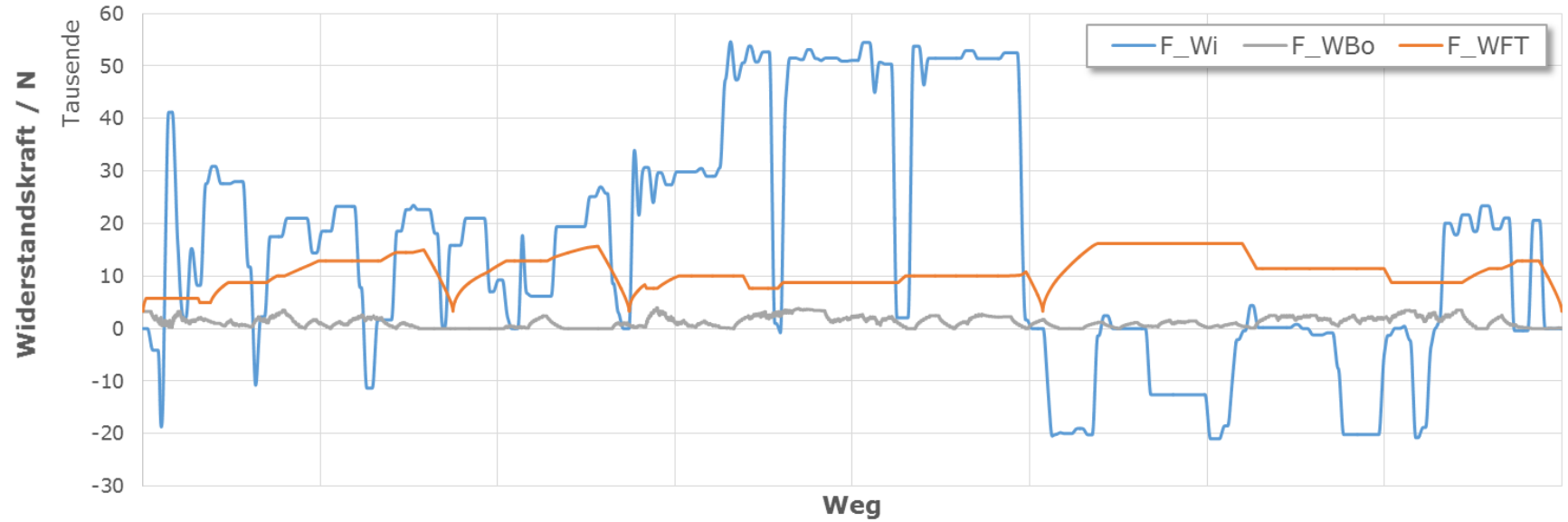


Effektive Neigung und Zuglängen



Fahrwiderstandsanteile

Dresden –
Klingenberg-Colmnitz

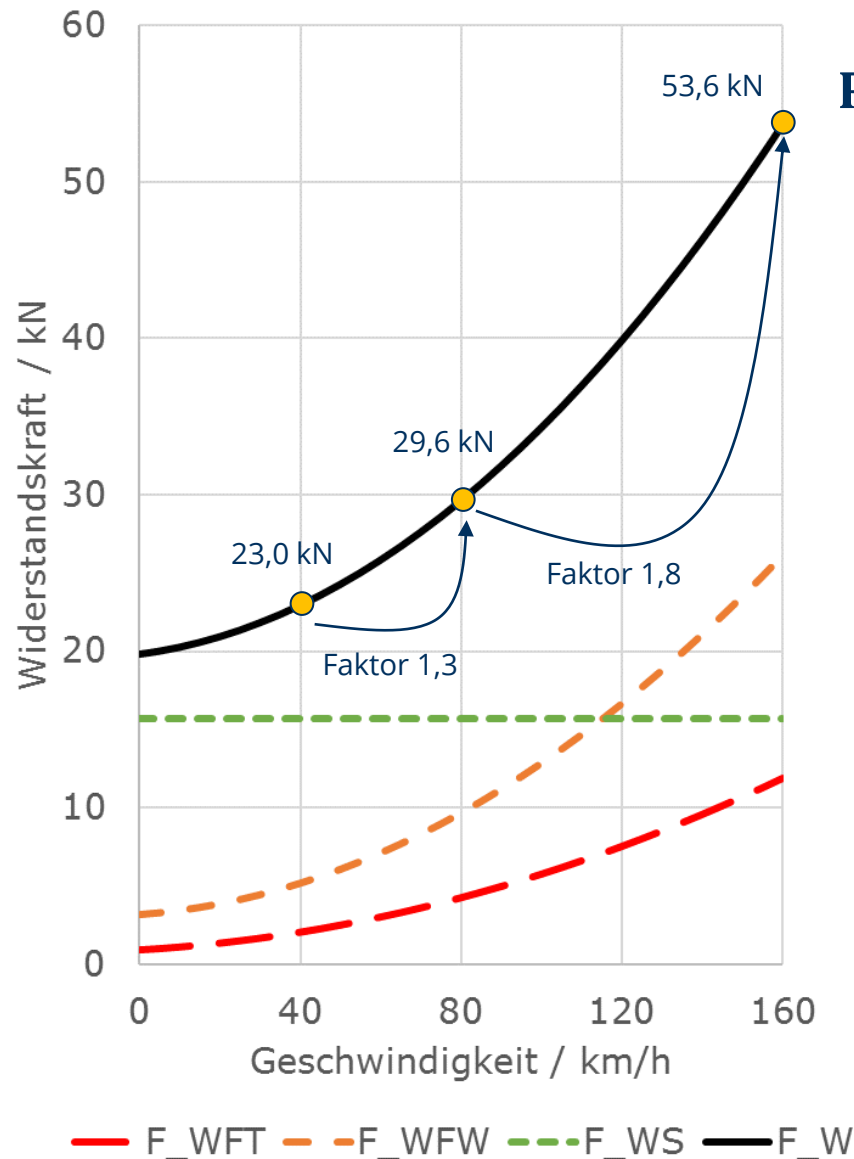


Fahrwiderstand und Leistungsbedarf

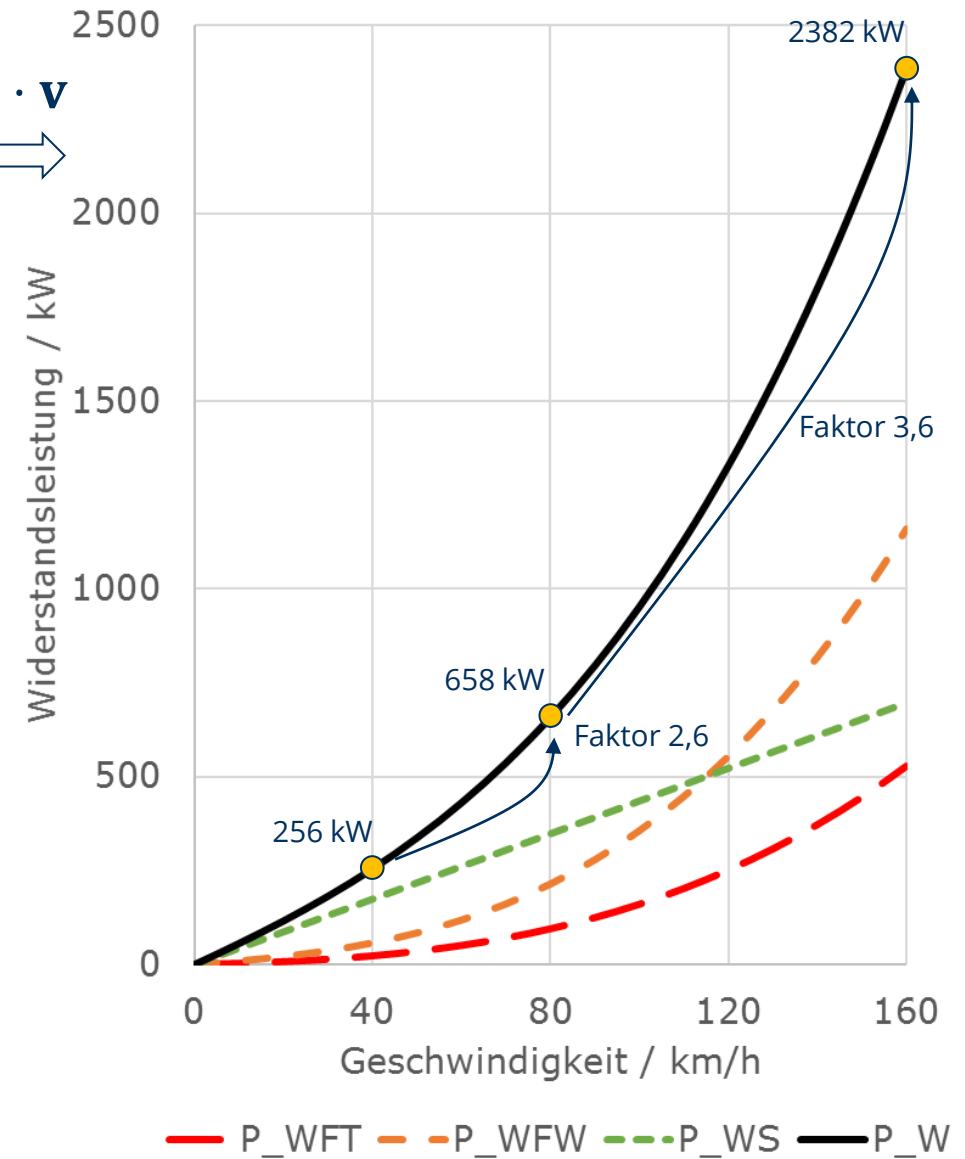


© M. Kache

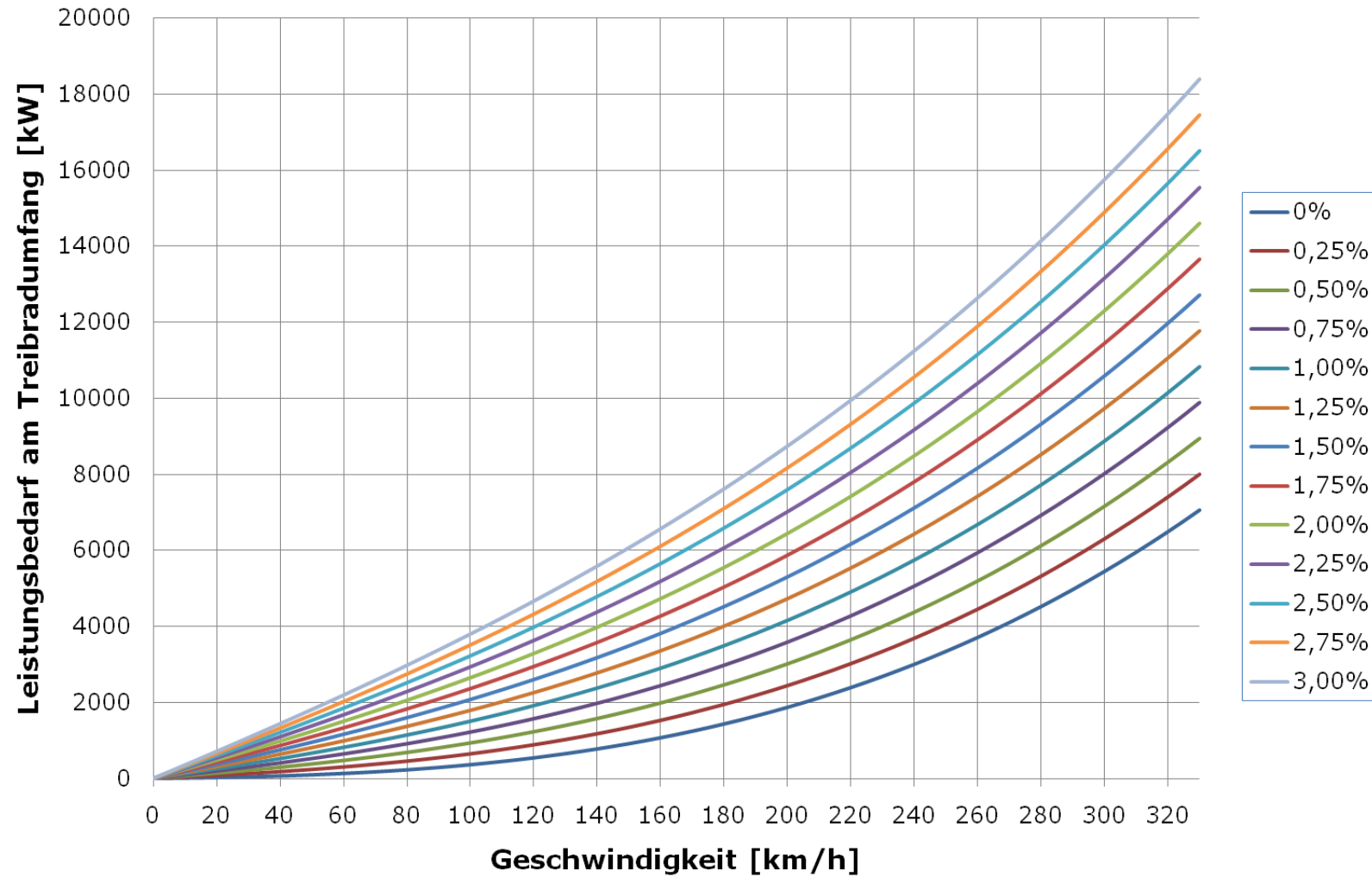
Bsp: Reisezug



$$P = F \cdot v$$



Fahrwiderstand und Leistungsbedarf



© M. Kache

TGV Duplex: ca. 9,3 MW



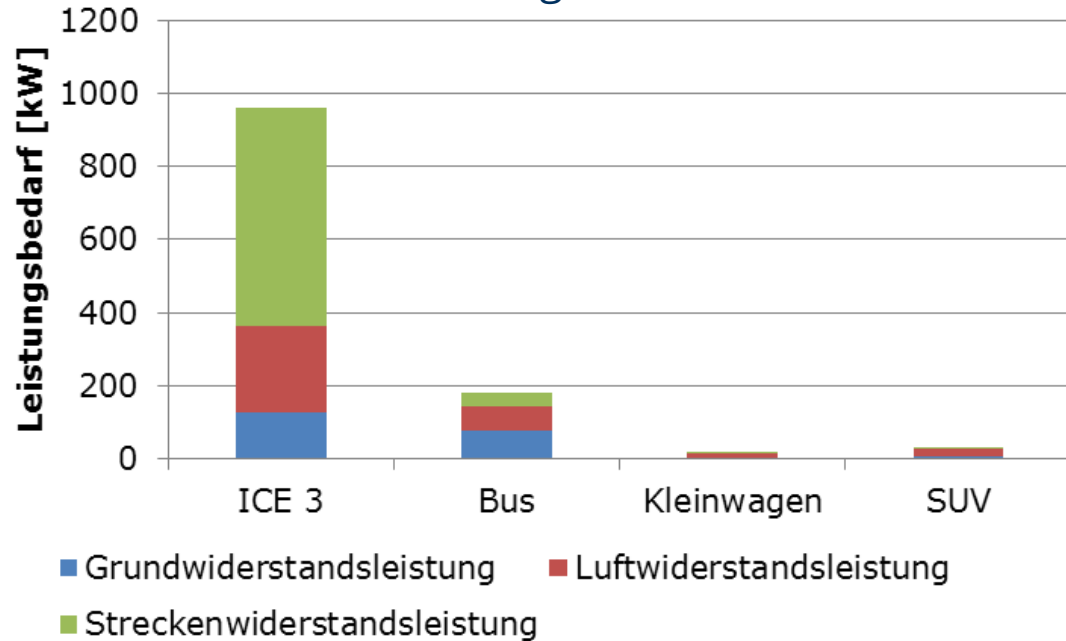
© M. Kache

ICE 3: ca. 8 MW

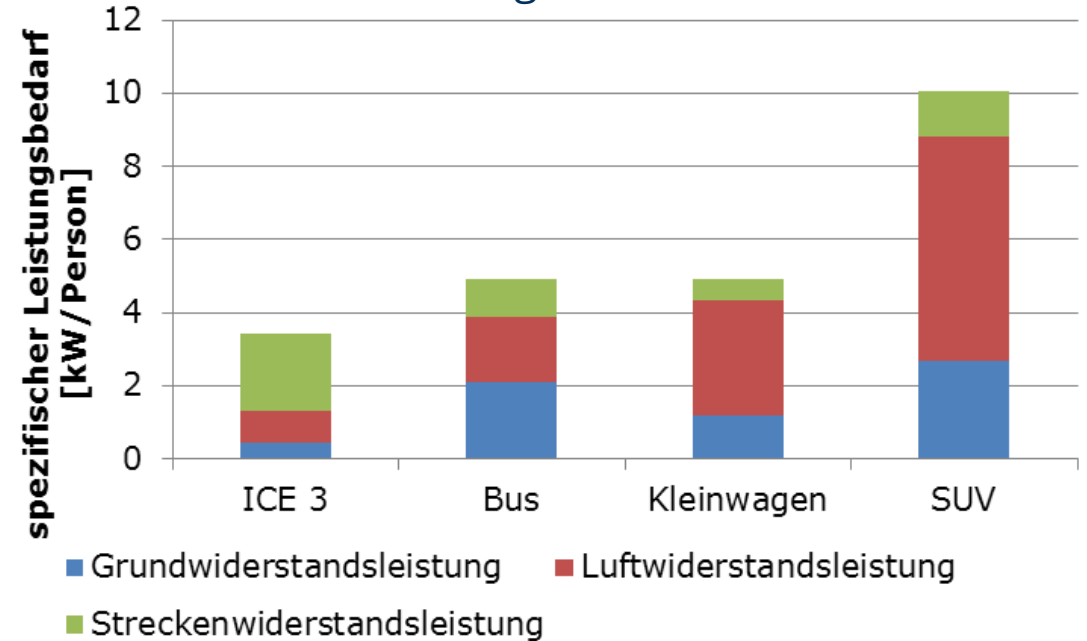
Leistungsbedarf der Fahrwiderstände

$v = 100 \text{ km/h}$, $i = 0,5 \%$, Besetzungsgrad: 60%

absoluter Leistungsbedarf

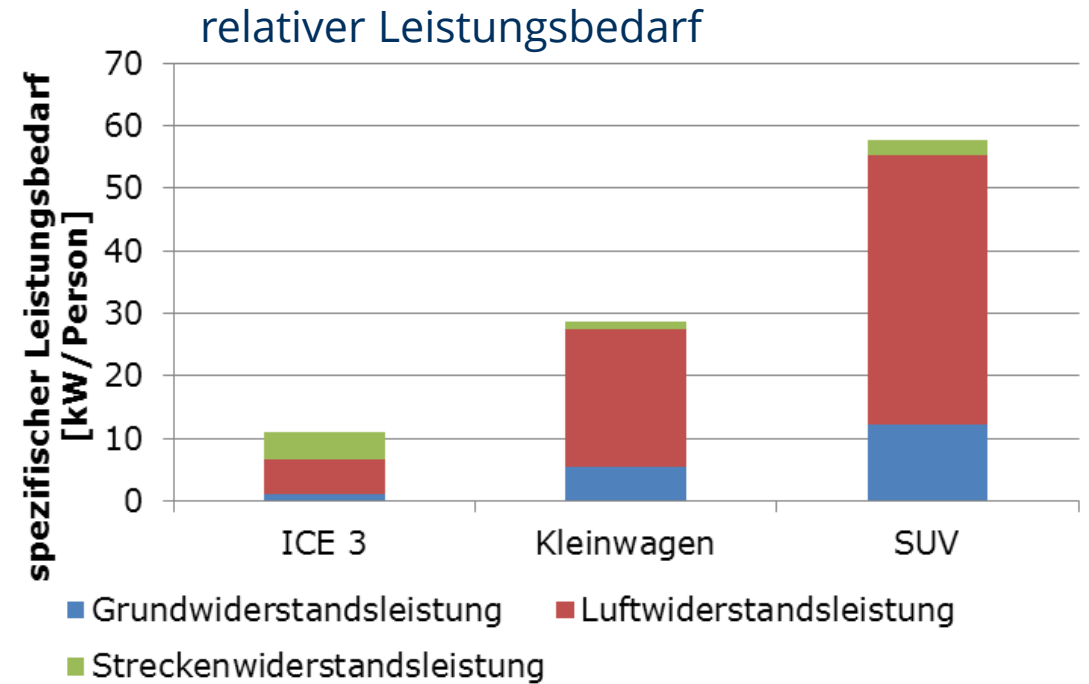
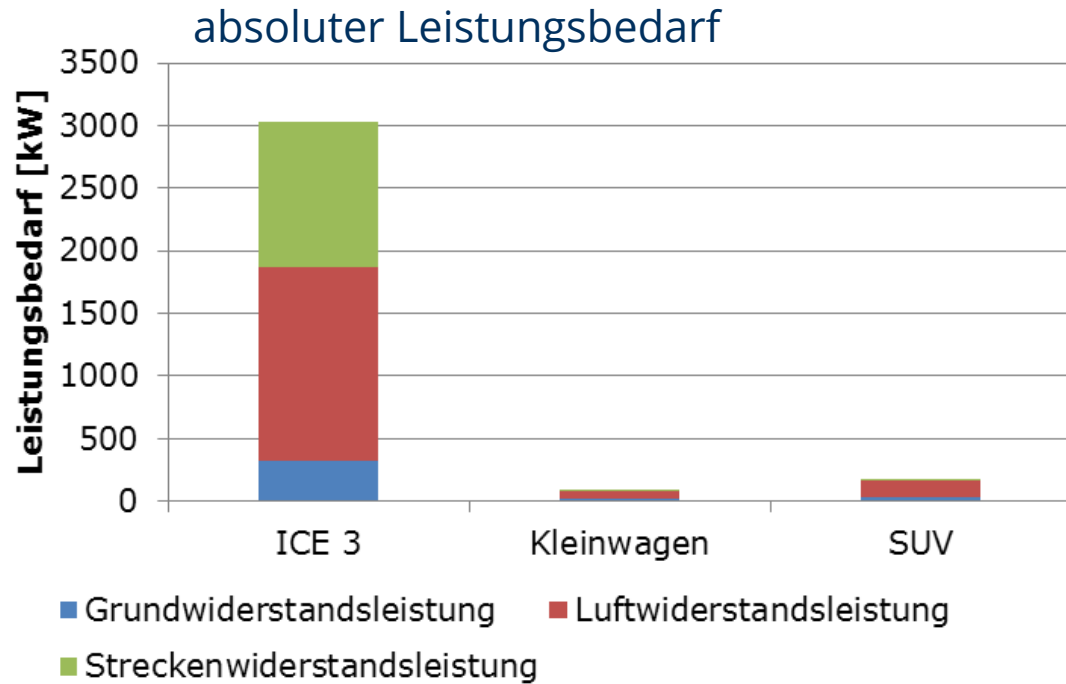


relativer Leistungsbedarf



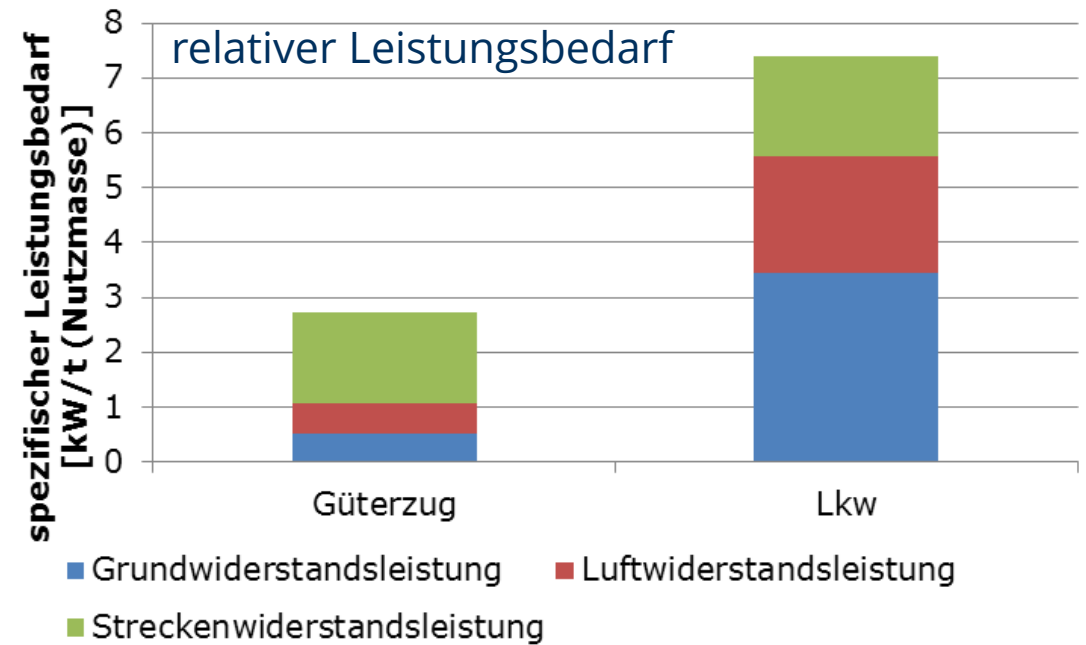
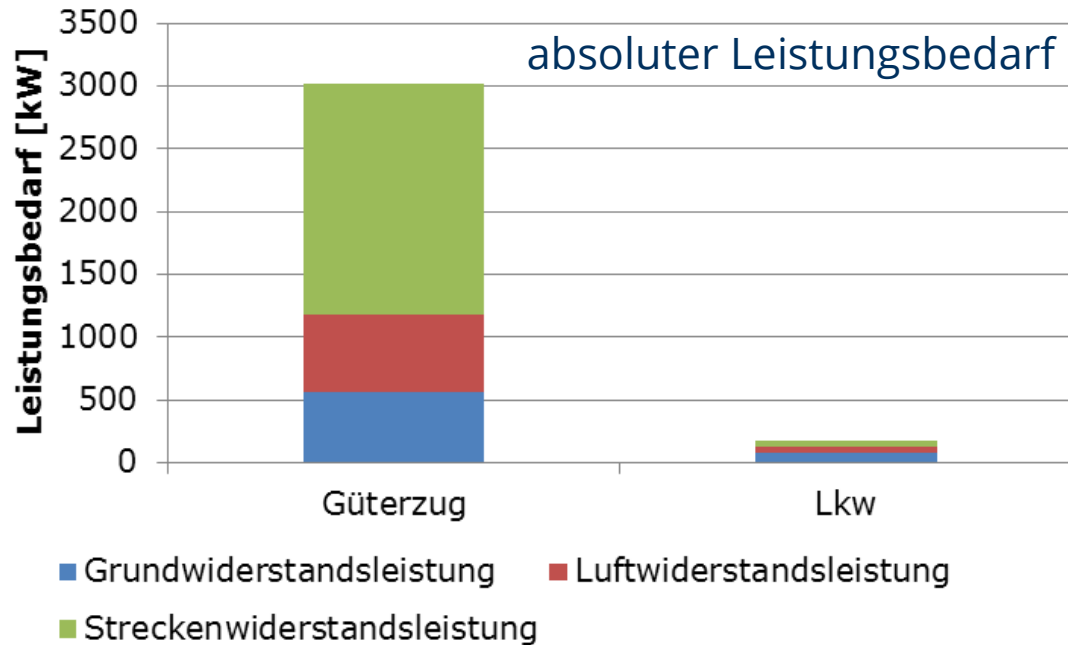
Leistungsbedarf der Fahrwiderstände

$v = 200 \text{ km/h}$, $i = 0,5 \%$, Besetzungsgrad: 60%



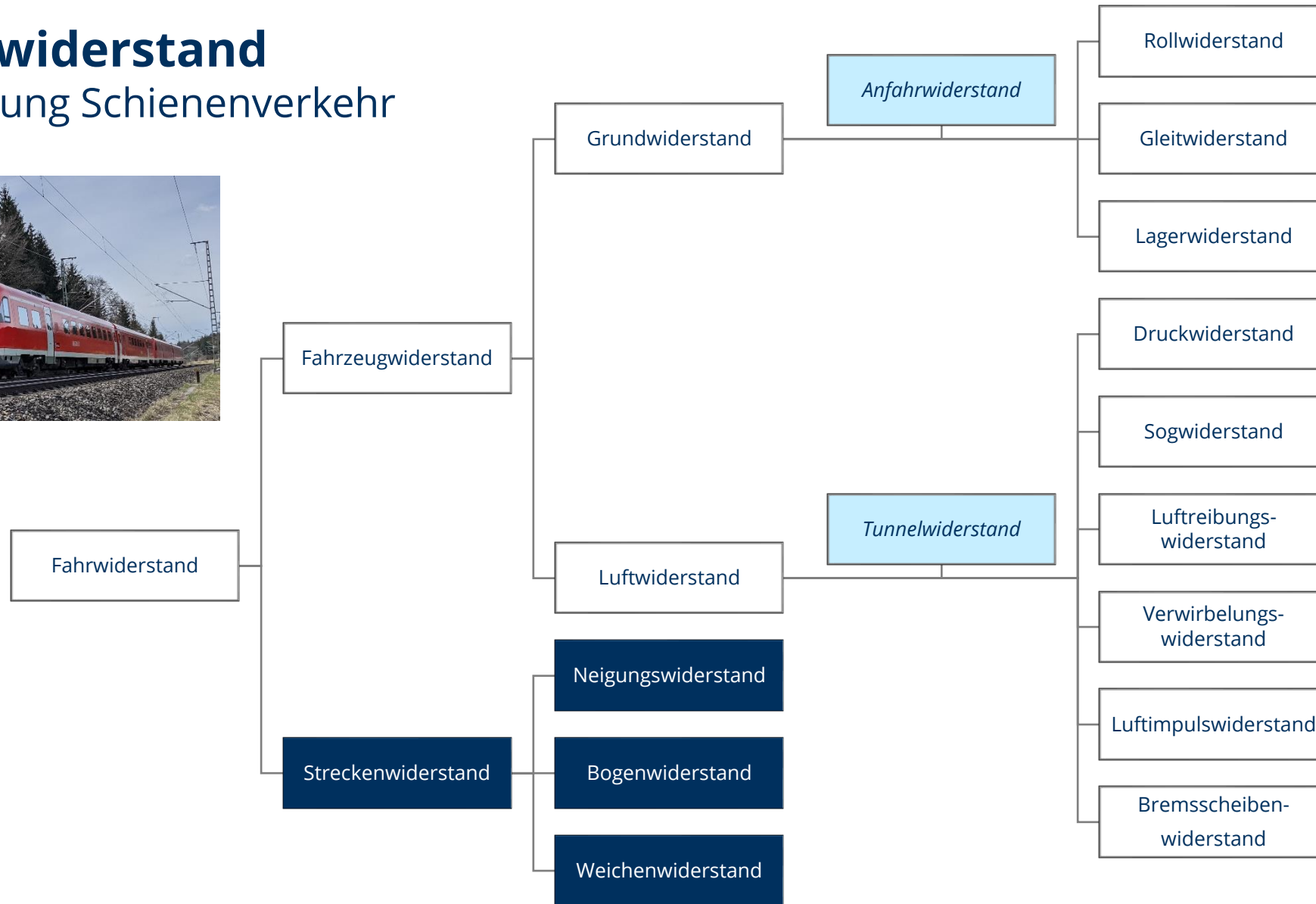
Leistungsbedarf der Fahrwiderstände

Sattelzug (40t) vs. Güterzug (1684t) bei 80 km/h in 5 ‰ Steigung



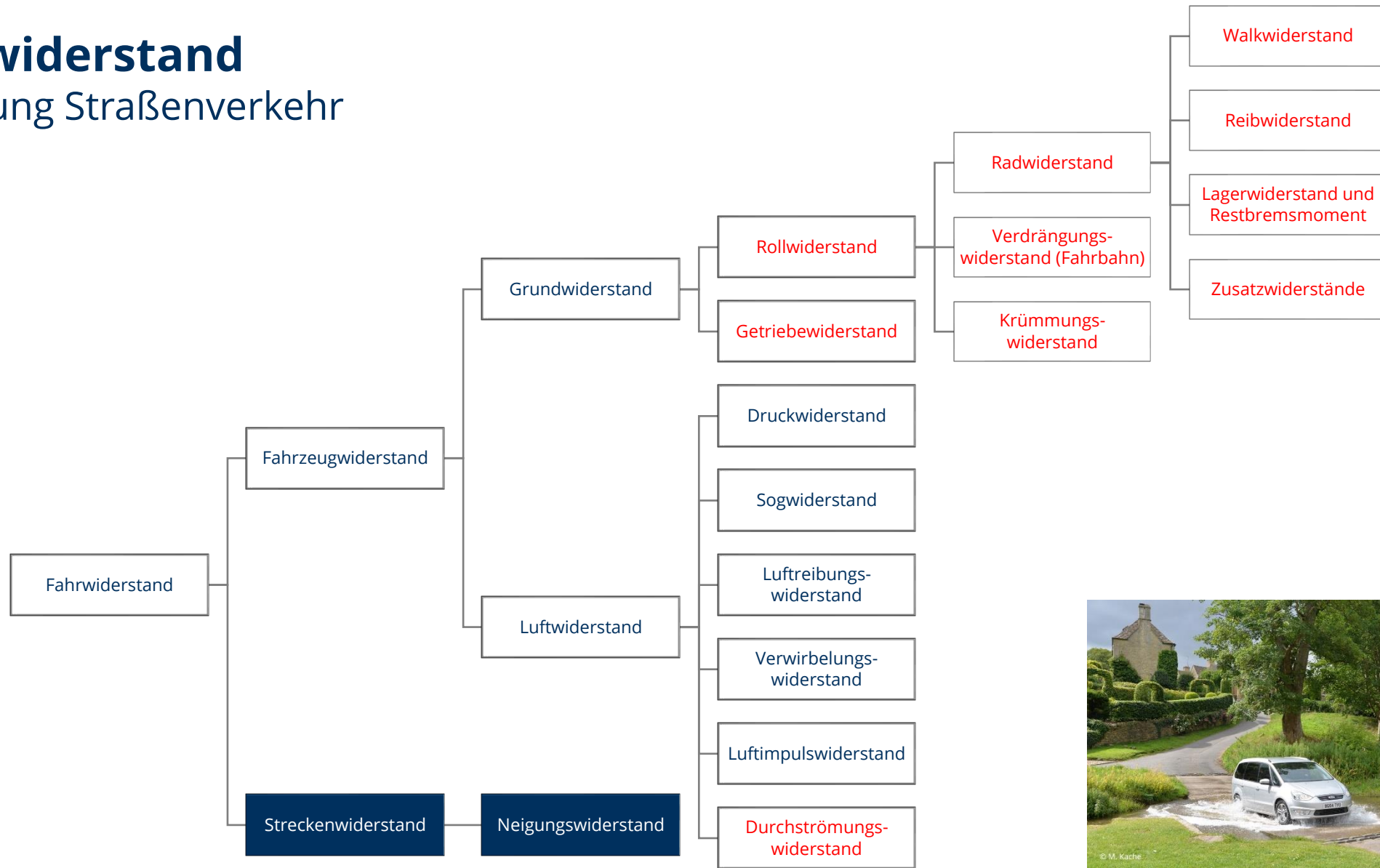
Fahrwiderstand

Einteilung Schienenverkehr



Fahrwiderstand

Einteilung Straßenverkehr



Berechnung des Fahrwiderstands

Empirische Gleichungen

Variable Zugverbände: Triebfahrzeug + Wagenzug



$$F_{WFZ} = F_{WFT} + f_{WFW} \cdot m_w \cdot g$$

$$F_{WFT} = 1,107 + 0,9 \cdot \frac{v}{100} + 3,0 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2$$

$$f_{WFW} = 0,0012 + 0,0022 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2$$

$$F_{WFT} = A + B \cdot \frac{v}{100} + C \cdot \left(\frac{v + \Delta v}{100}\right)^2$$

$$f_{WFW} = \alpha + \beta \cdot \frac{v}{100} + \gamma \left(\frac{v}{100}\right)^2$$

Invariable Zugverbände



$$F_{WFZ} = F_{WFT}$$

$$F_{WFT} = 3,45 + 2,75 \cdot \frac{v}{100} + 5,89 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2$$

In empirische Formeln
setzen Sie v in km/h ein

Fahrwiderstand

Vergleich Fahrwiderstand Personenverkehr



	Triebwagen	Reisebus
Fahrzeugmasse	100 t	20 t
Kapazität	~ 120 Plätze	30-60 Plätz
Fahrzeugwiderstand 100 km/h, ebene	6,4 kN	5,7 kN
Fahrzeugwiderstand 67 % Auslastung	71 N/Pers.	93 N/Pers.
Fahrzeugwiderstand Massenspezifisch	60 N/t	161 N/t

Fahrwiderstand

Vergleich Fahrwiderstand Güterverkehr



	Güterzug	Lkw
Masse / Nutzlast	1600 t / 1224 t	40 t / 28 t
Fahrzeugwiderstand 80 km/h, ebene	45,3 kN	3,7 kN
Fahrzeugwiderstand Je Tonne	28 N/t	142 N/t.
Fahrzeugwiderstand Je Tonne Nutzlast	37 N/t	204 N/t

Verzeichnis der verwendeten Symbole (Fahrodynamik)

A,B,C	Koeffizienten der empirischen Fahrzeugwiderstandsgleichungen	n	Drehzahl
A_{Norm}	Norm-Querschnittsfläche von Schienenfahrzeugen (10 m ²)	P_T	Leistung am Treibradumfang (installierte) Traktionsleistung
A_{TuQ}	Tunnel-Querschnittsfläche	$P_{\text{B,el}}$	elektrische Bremsleistung (am Treibradumfang)
a	Beschleunigung	Q_R	Normalkraft auf einem Radsatz
b	Laufkreisabstand (Radsatz)	Q_T	Normalkraft auf einen angetriebenen Radsatz
c	Radsatzabstand im Fahrzeug oder Drehgestell	R	Bogenradius (allg.)
C_W	Luftwiderstandsbeiwert		Versperrungskoeffizient (im Kontext des Tunnelwiderstandes)
$E_{\text{kin,rot}}$	kinetische Energie der Rotation	s	Weg
$E_{\text{kin,trans}}$	kinetische Energie der Translation	S_x	Längsschlupf
F_B	Bremskraft	S_y	Querschlupf
f_{Bo}	spezifische Bogenwiderstandskraft	T	Temperatur
F_N	Normalkraft	t	Zeit
F_{WFT}	Triebfahrzeugwiderstandskraft	v	Geschwindigkeit
F_{WFW}	Wagenzugwiderstandskraft	$v_{\ddot{u}}$	Übergangsgeschwindigkeit
f_{WFW}	spezifische Wagenzugwiderstandskraft (bezüglich der Gewichtskraft $m_w \cdot g$)	Δv	Gegenwindzuschlag (in empirischen Fahrzeugwiderstandsgleichungen)
F_{WS}	Streckenwiderstandskraft	u	Ruck
$F_{\text{WS,i}}$	Neigungswiderstandskraft	ξ	fahrdynamischer Massenfaktor
f_{WS}	spezifische Streckenwiderstandskraft (bezüglich der Gewichtskraft)	α, β, γ	Koeffizienten der spezifischen Wagenzugwiderstandsformeln
F_T	Zugkraft am Radumfang	η	Wirkungsgrad
F_Z	Zugkraft am Zughaken	μ	Gleitreibungsbeiwert
g	Erdbeschleunigung	τ	Kraftschlussbeiwert
i	Streckenlängsneigung	ω	Winkelgeschwindigkeit
J	Massenträgheitsmoment um die Hauptrotationsachse		
l_z	Zuglänge		
M	Drehmoment		
m	Masse		
m_T	Triebfahrzeugmasse		
m_W	Wagenzugmasse		
m_Z	Zugmasse		
n	Drehzahl		