

Dipl.-Ing. Tobias Bregulla  
Professur für Elektrische Bahnen

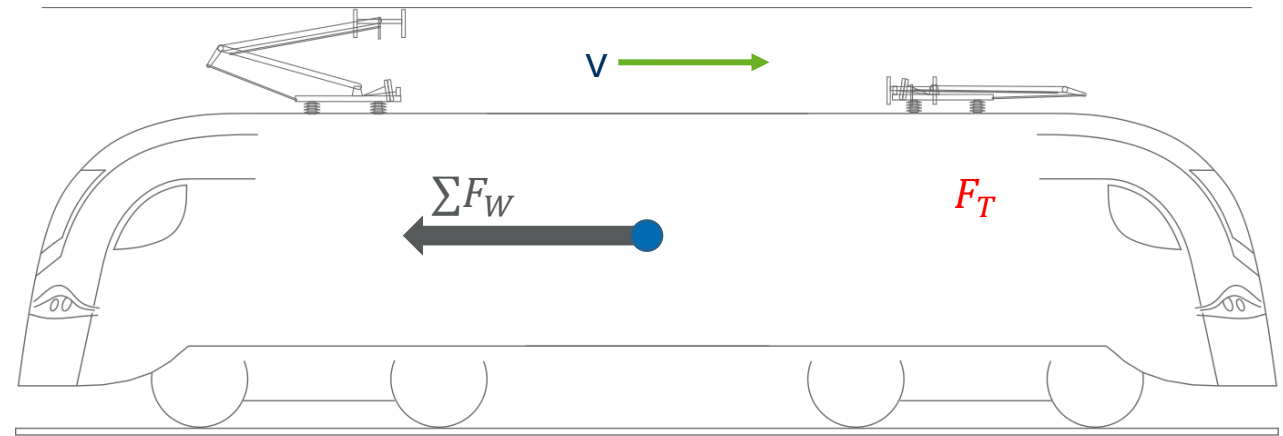
# Fahrdynamik Bahnfahrzeuge

## 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**.

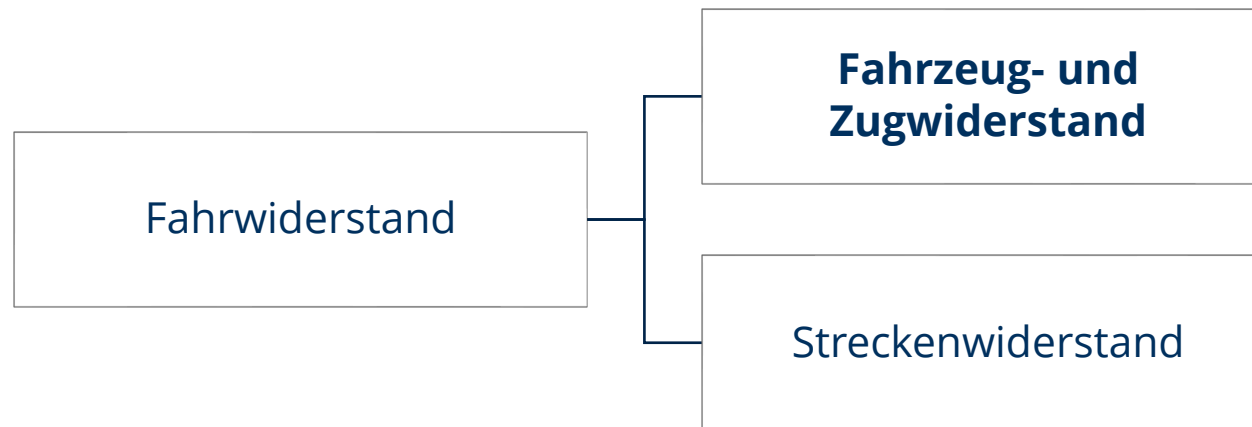
Fahrwiderstand

# 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**.

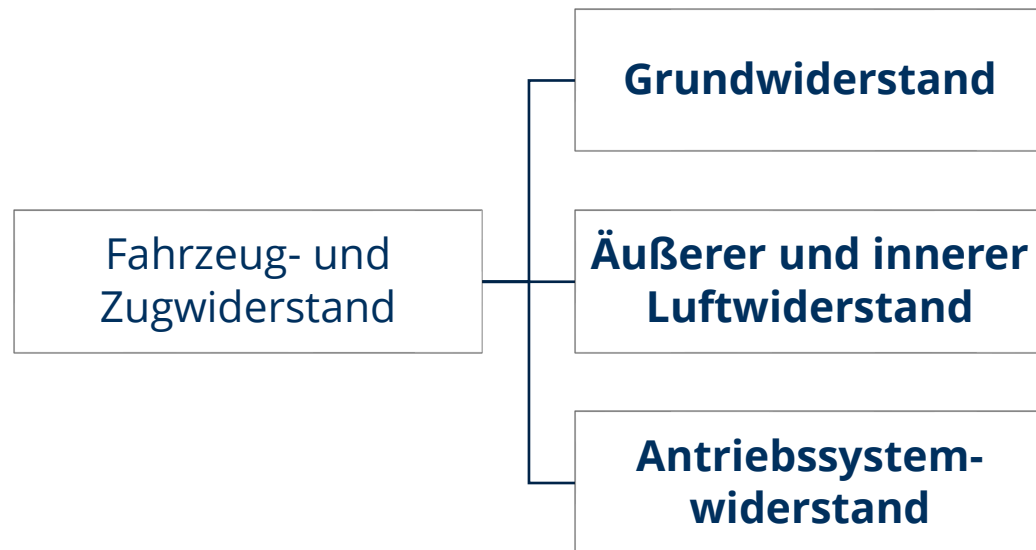
Im Fall der Bezugnahme auf das **Einzelfahrzeug** wird sie als **Fahrzeugwiderstandskraft** und bei Bezugnahme auf den **Zug** als **Zugwiderstandskraft** bezeichnet“ [Wende, S 109]



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

# Fahrwiderstand

## Einteilung



**Grundwiderstand:** Geschwindigkeitsunabhängige\* Festkörperreibungsvorgänge.

**Luftwiderstand:** Widerstände durch Luftkontakt oder Luftdurchsatz.

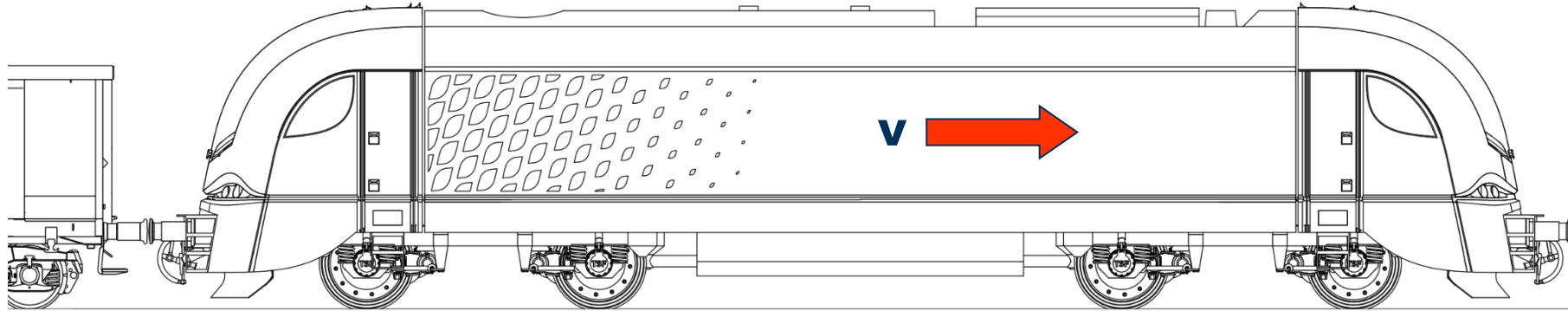
**Antriebssystemwiderstand:** Hervorgerufen durch Baugruppen der Leistungsübertragung.

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

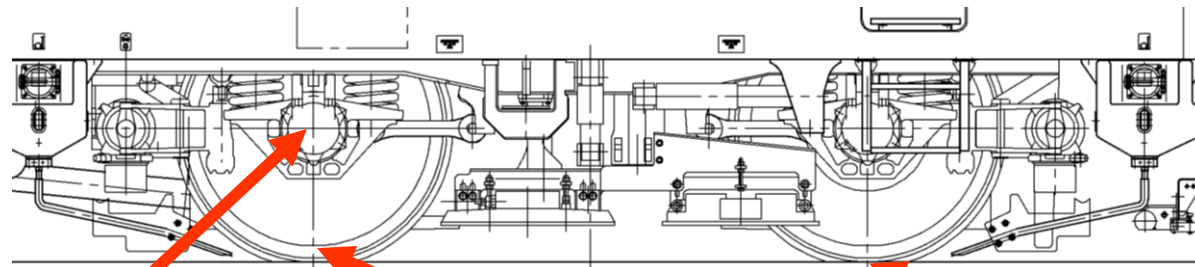
\*Mit Grundwiderstand wird auch der Faktor A bezeichnet, der nur in empirischen Widerstandsformeln geschwindigkeitsunabhängig ist. Die bezeichneten Reibungsvorgänge besitzen u.U. Geschwindigkeitsabhängigkeit.

# 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

# Infrastrukturseitige Einflussfaktoren

## Grundwiderstand



### Einflussfaktoren

- Gleislage
- Verbindung der Schienen
- Art des Oberbaus



# 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“

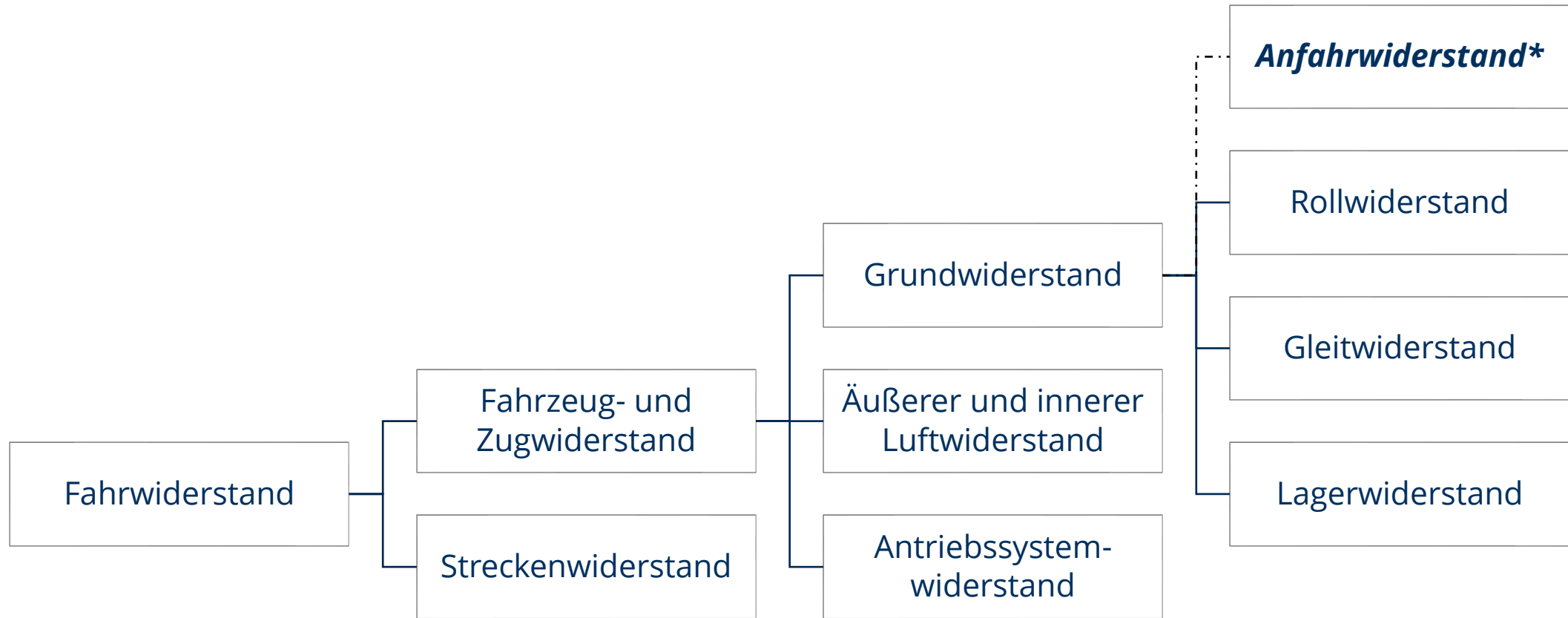
**spez. Grundwiderstand Straße/Schiene: Faktor 3...14**

**Daumenregel: Rollwiderstand Straße = 10 x Rollwiderstand Schiene**

\*Quelle: Messungen DB

# Fahrwiderstand

## Einteilung

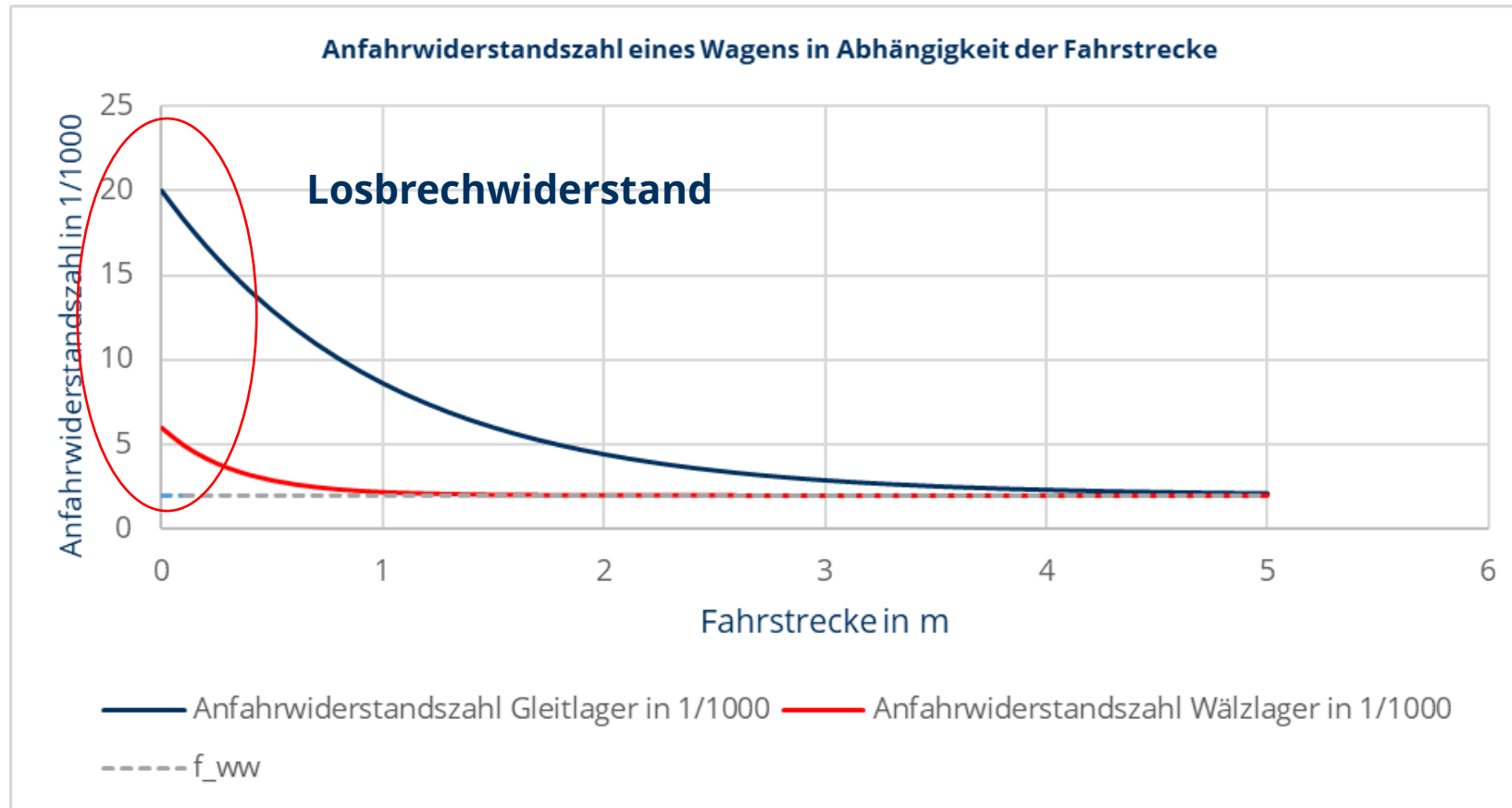


Einteilung nach D. Wende, Fahrdynamik des Schienenverkehrs, Teubner, 2003 (S 108 ff.)

\*Anfahrwiderstand wirkt als Faktor auf den Wagenwiderstand

# Fahrwiderstand

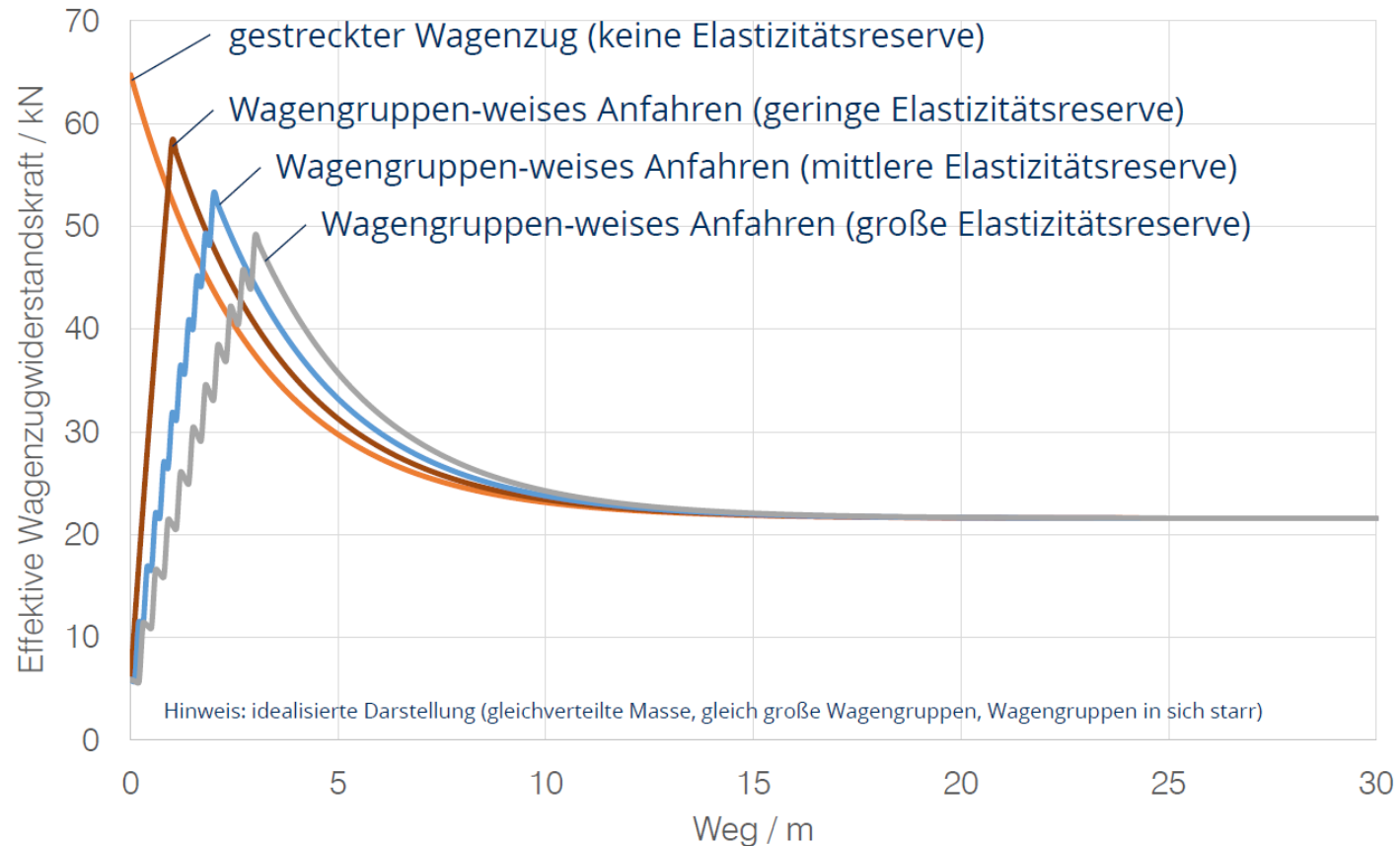
## Anfahrwiderstand



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

# Anfahrwiderstand

## Einfluss der Elastizität des Wagenzuges



# 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

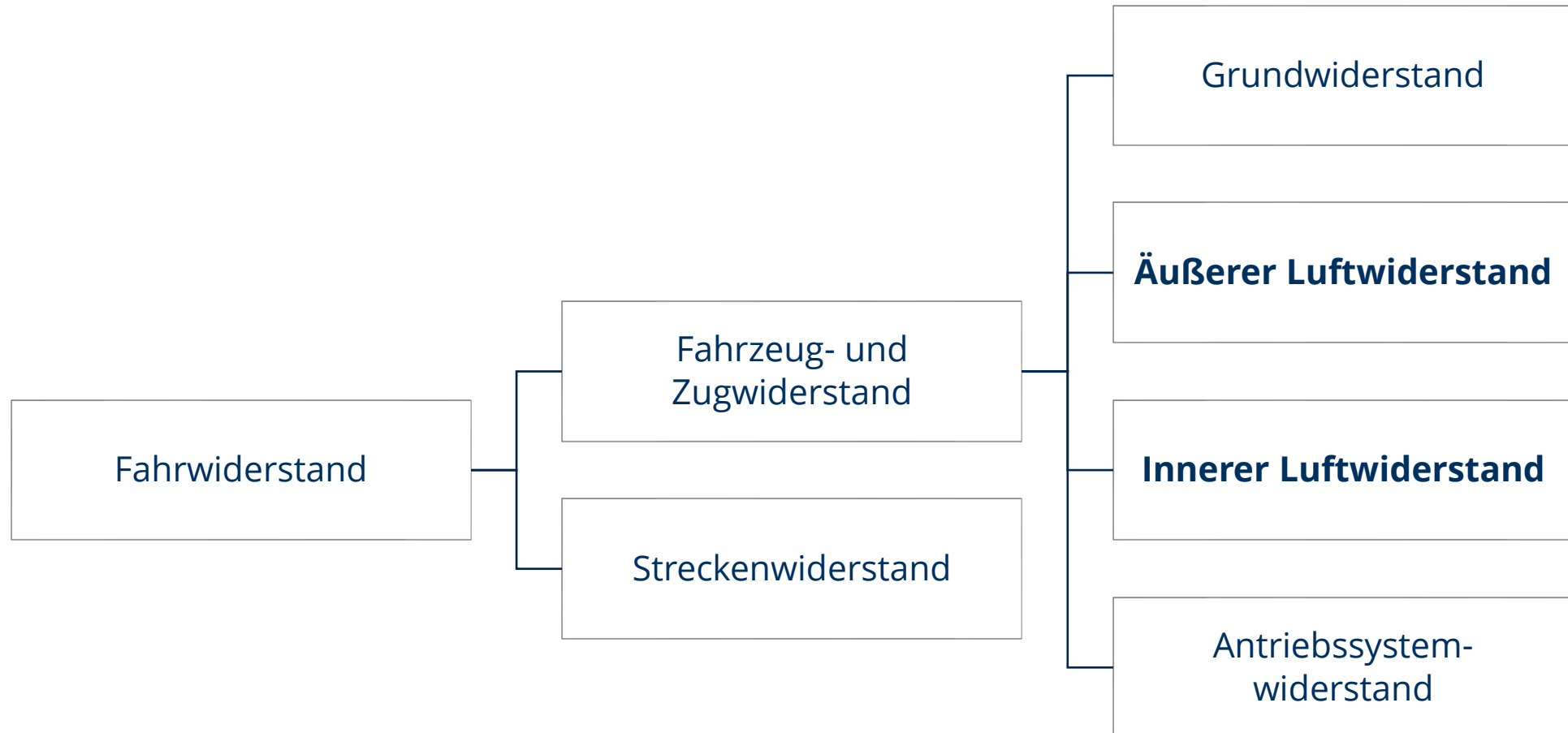
# Luftwiderstand



Foto: M. Kache

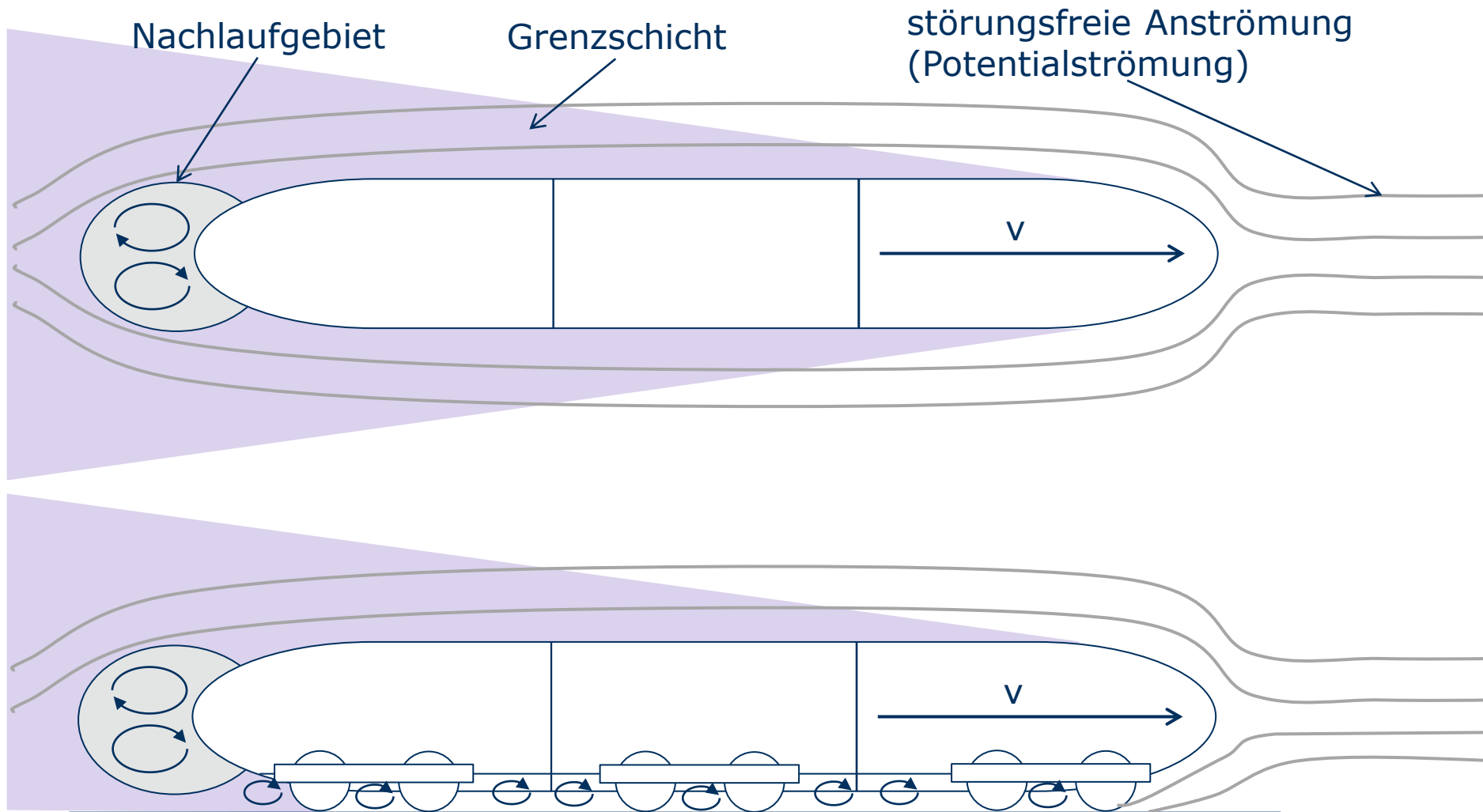
# Luftwiderstand

## Einordnung



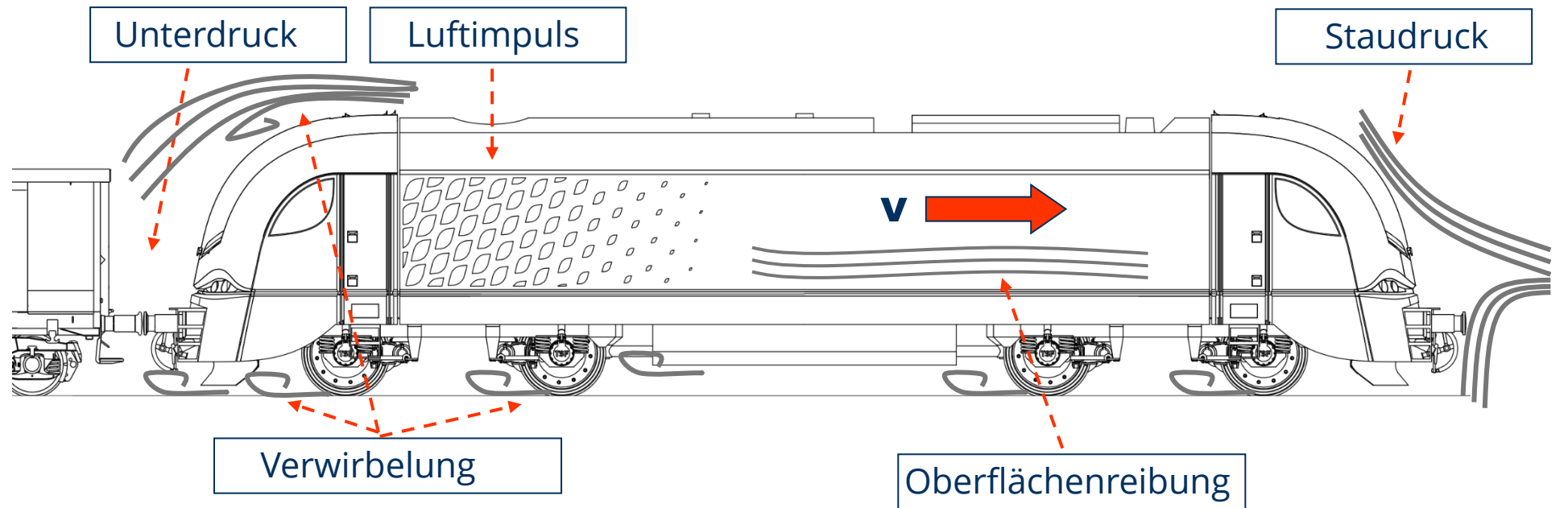
Einteilung nach D. Wende, Fahrdynamik des Schienenverkehrs, Teubner, 2003 (S 108 ff.)

# Zonenbildung bei der Fahrzeugumströmung



# Fahrzeugwiderstand

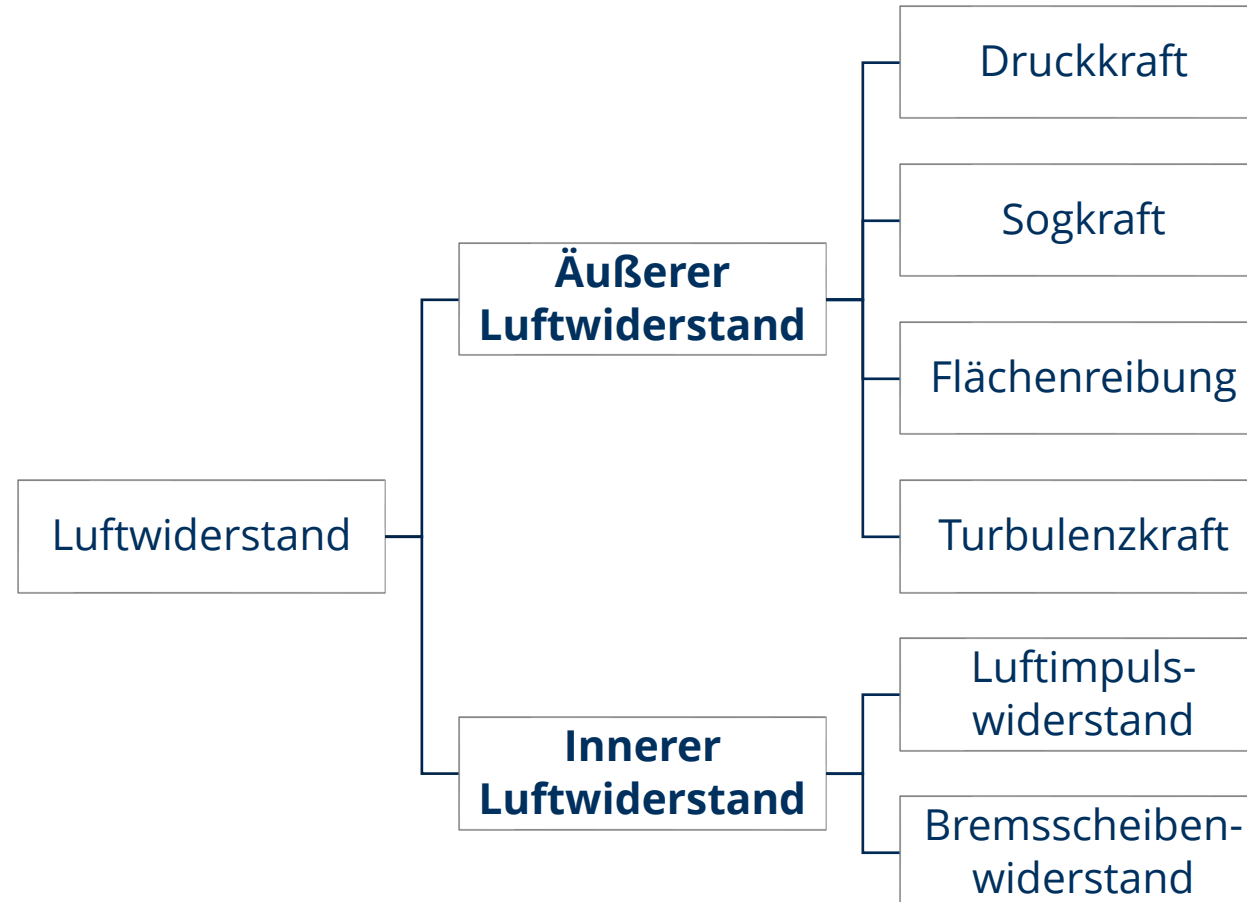
## Luftwiderstand



Luftwiderstand

# Luftwiderstand

## Einordnung



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

# 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  $c_W \mathbf{A}$**  – 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

# 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)



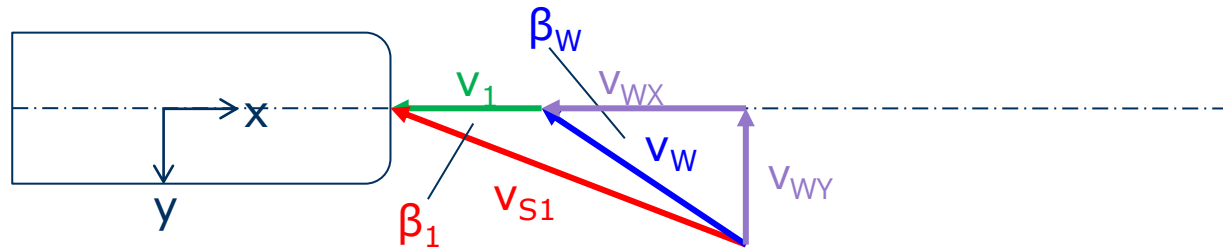
**ex BR 403:**  
 $c_w = 0,68$  (3-teilig.)



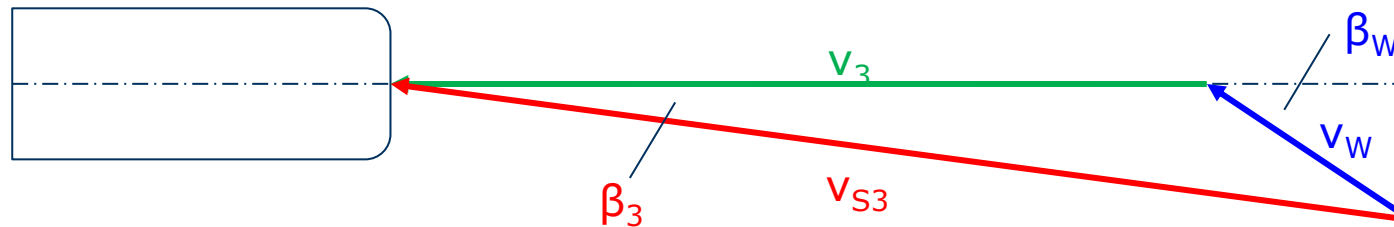
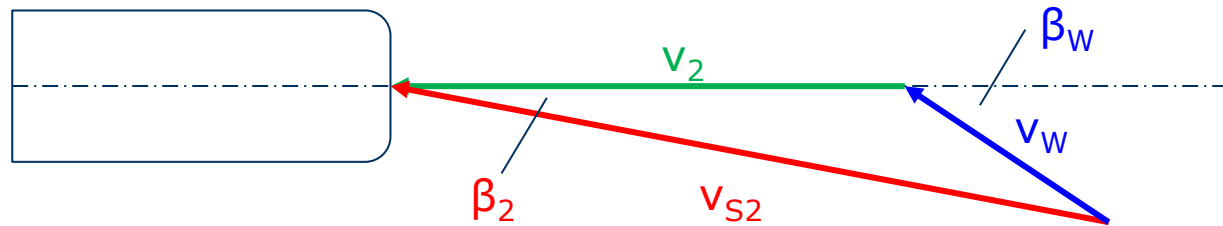
**BR 401 (TK):**  
 $c_w = 0,21$   
**BR 401 (Ganzzug):**  
 $c_w = 1,55$

# Luftwiderstand

## Anströmwinkel

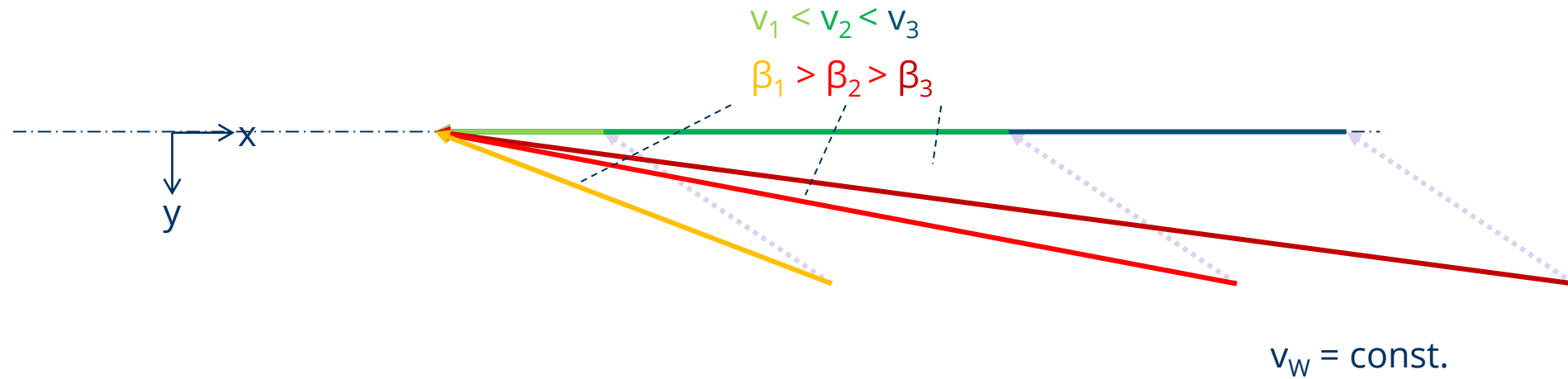


$\beta_W$  Windangriffswinkel  
 $\beta_i$  Anströmwinkel  
 $v_i$  Fahrgeschwindigkeit  
 $v_W$  Windgeschwindigkeit  
 $v_{Si}$  Anströmgeschwindigkeit



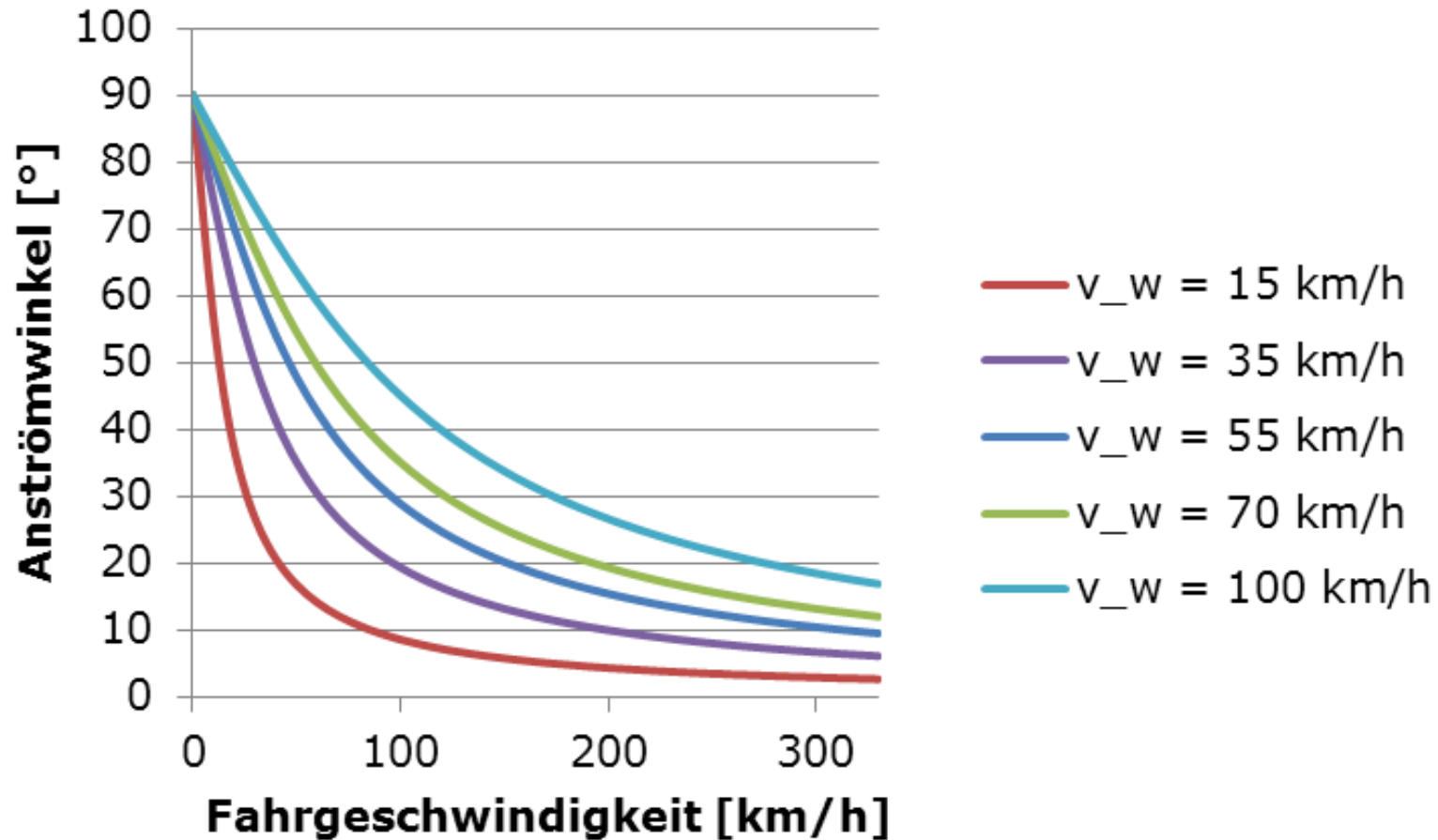
# Luftwiderstand

## Resultierender Anströmwinkel



# Luftwiderstand

## Resultierender Anströmwinkel



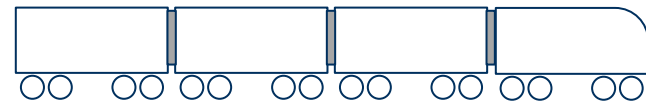
# Einflussfaktoren Luftwiderstand von Zügen



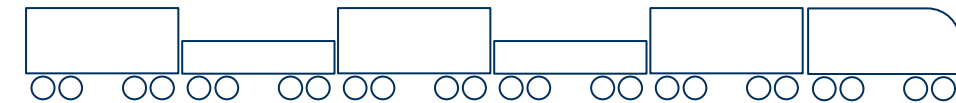
Formgebung Bug/Heck



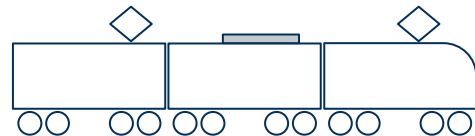
Zuglänge



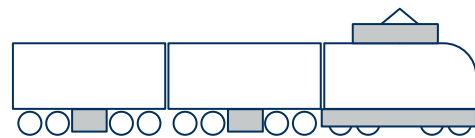
Wagenübergänge



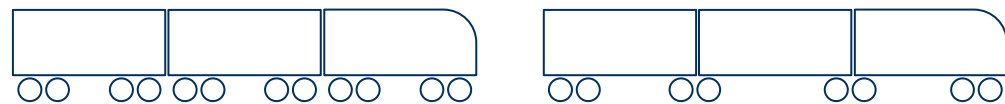
Querschnittswechsel



Dachausrüstung

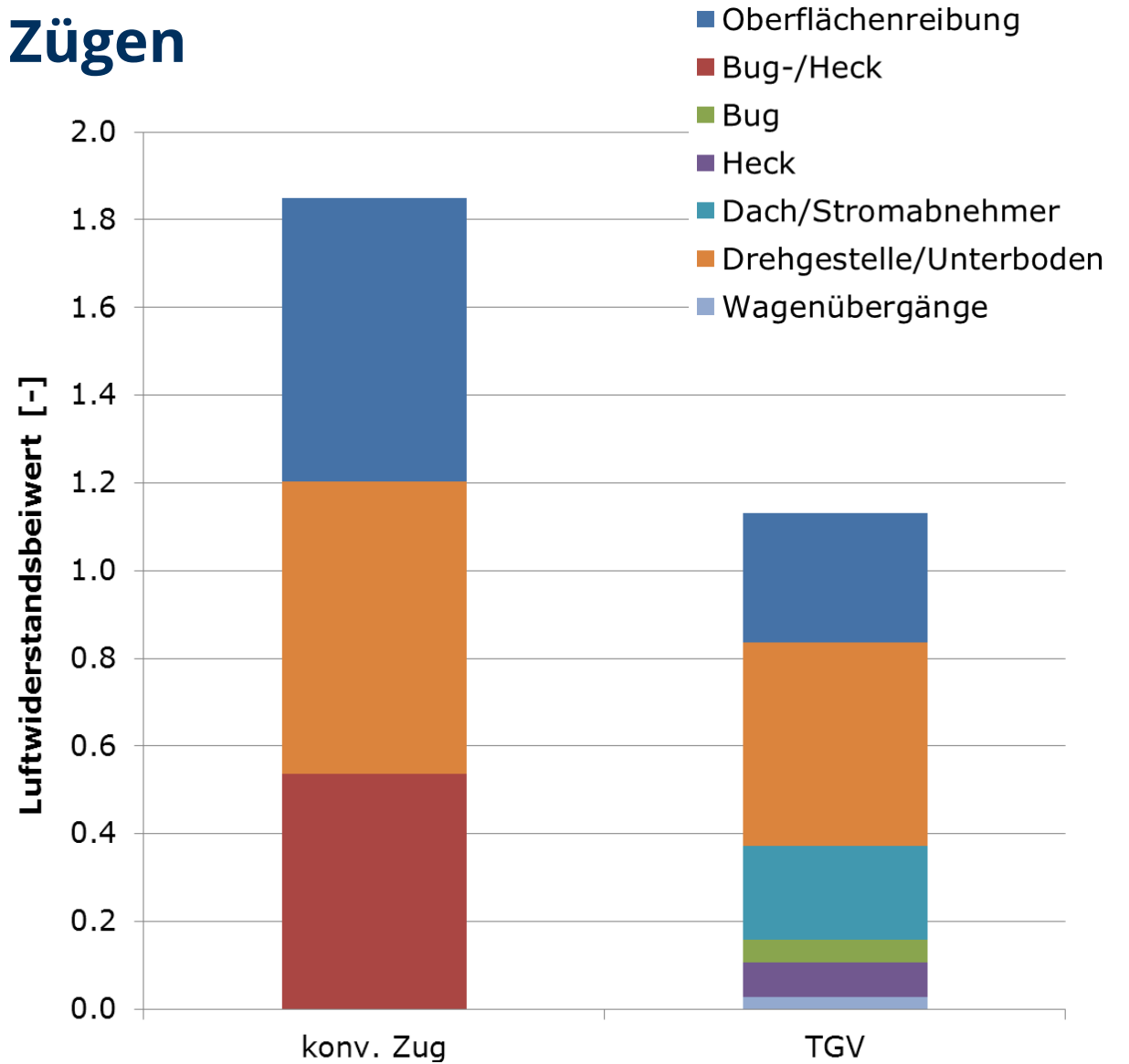
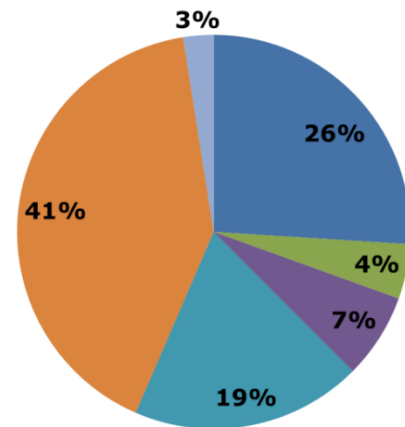
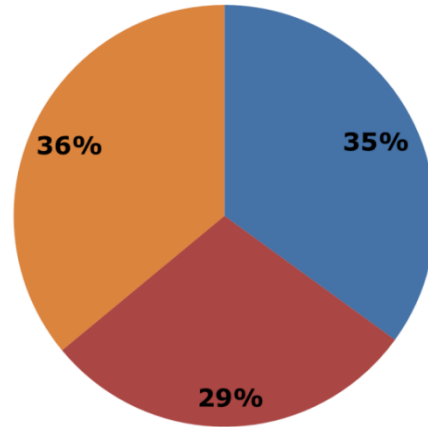


Verkleidungen



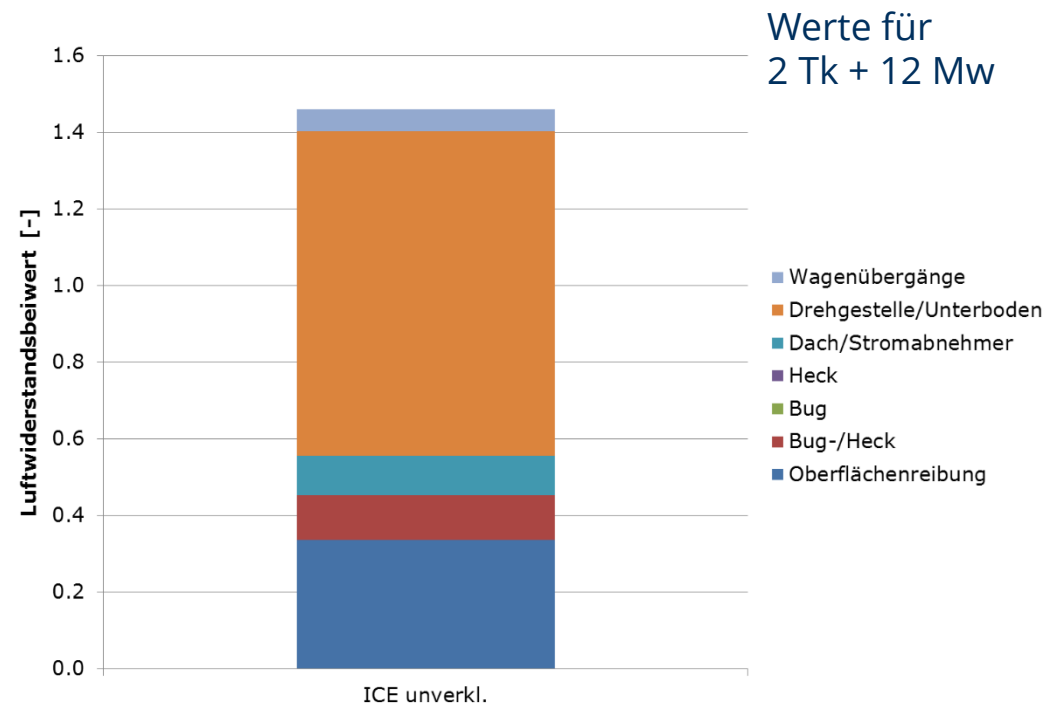
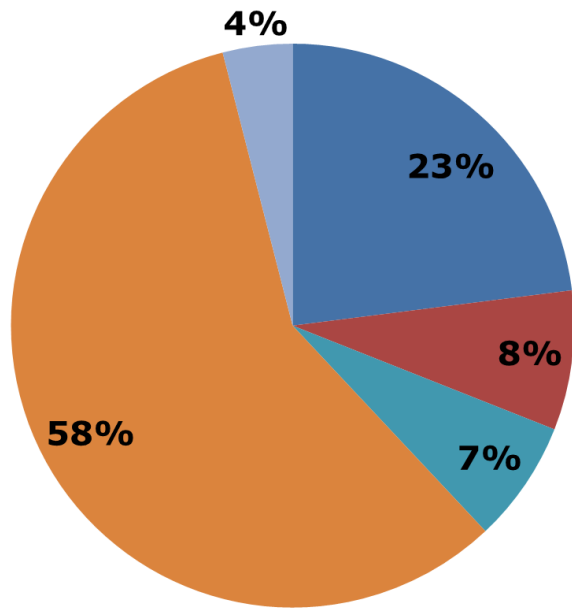
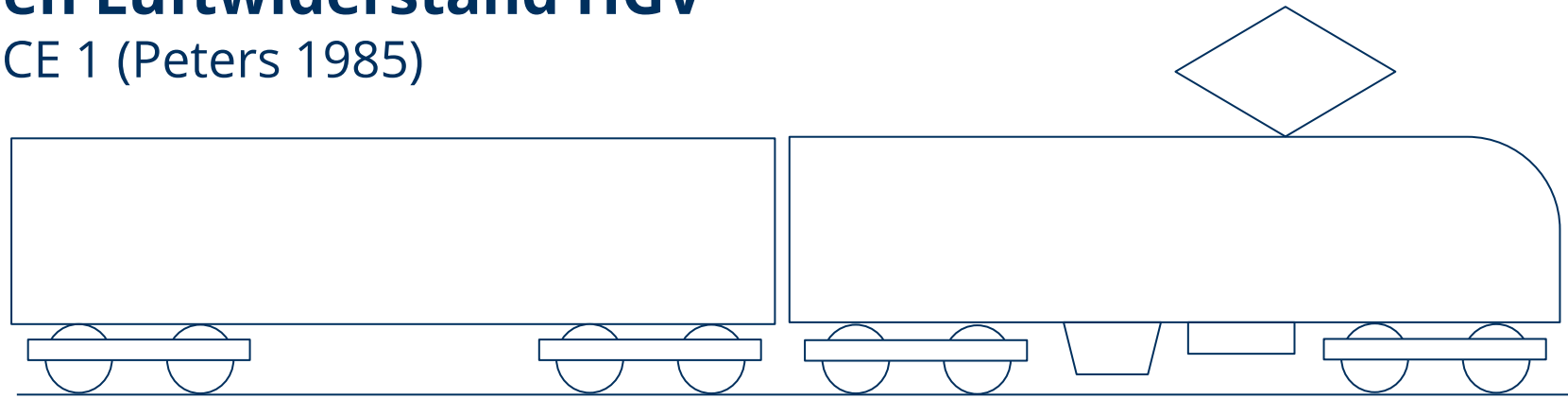
Fahrwerksart

# Luftwiderstandskomponenten bei Zügen



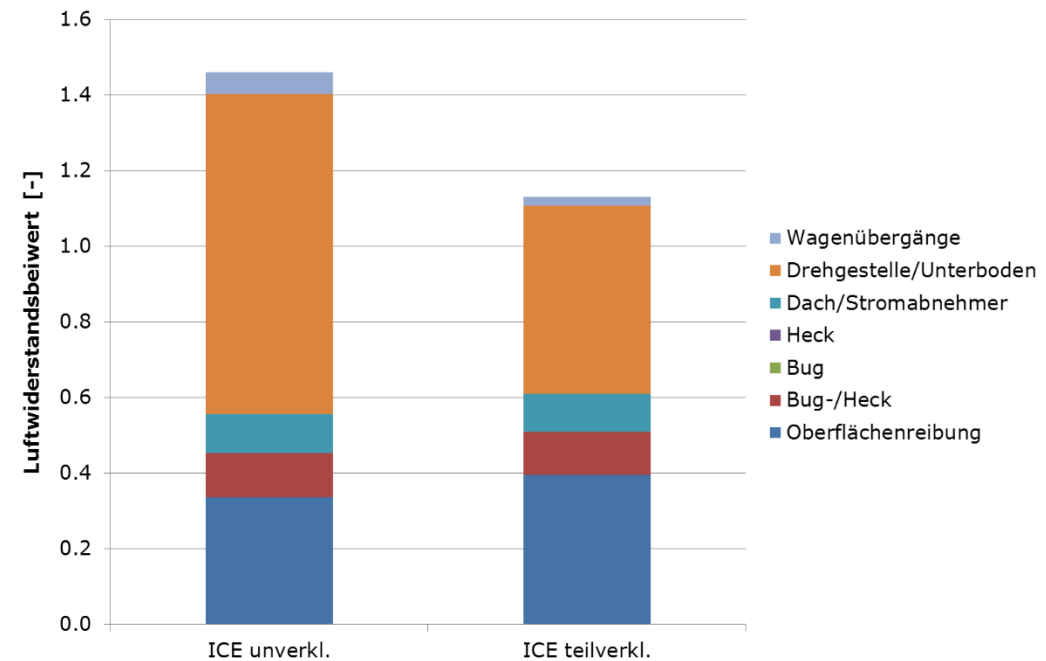
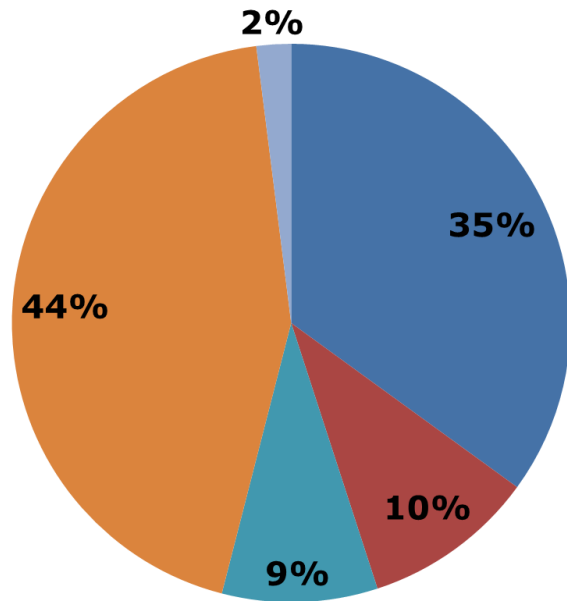
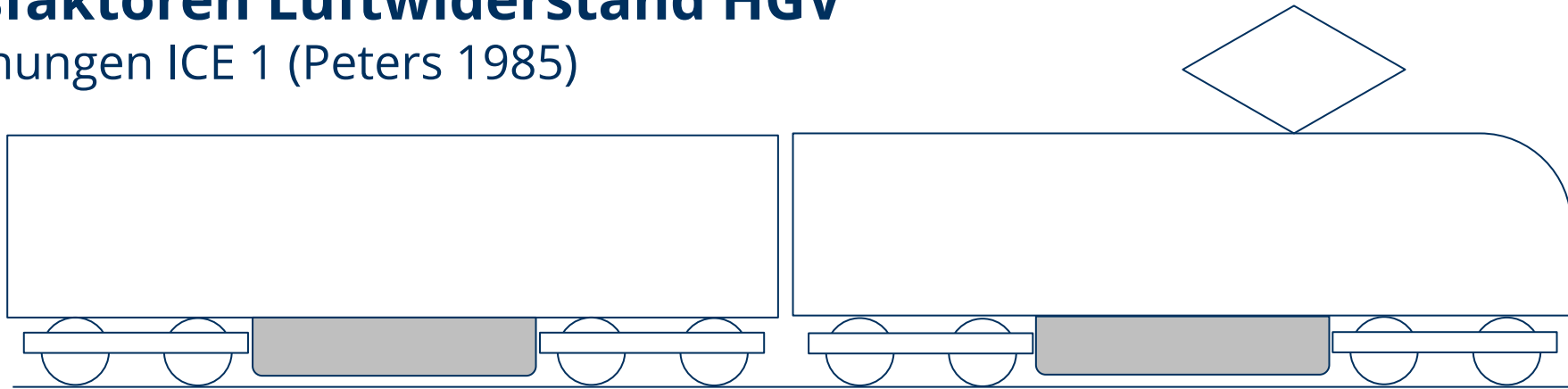
# Einflussfaktoren Luftwiderstand HGV

Untersuchungen ICE 1 (Peters 1985)



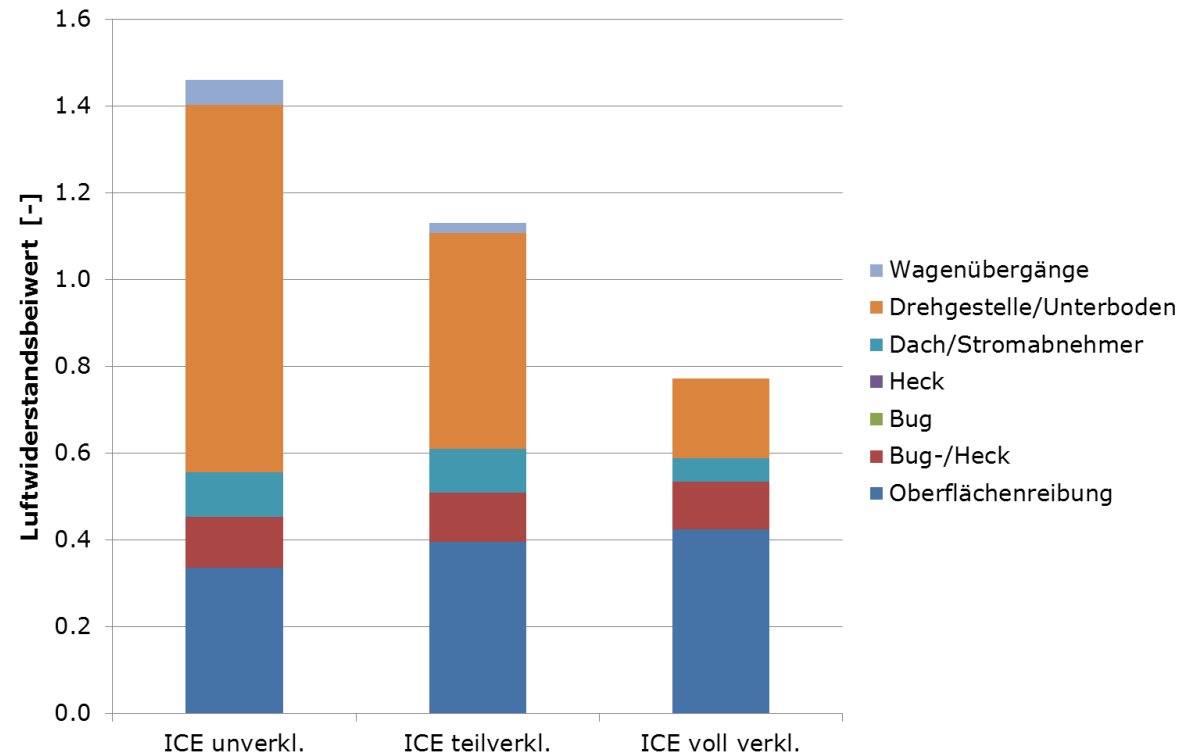
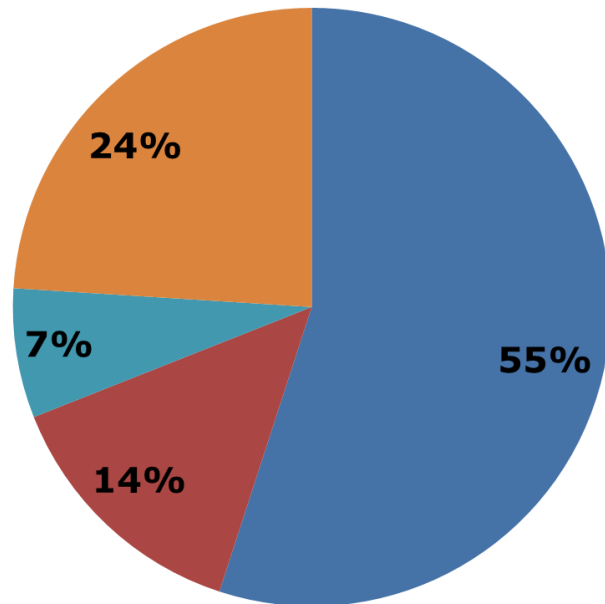
# Einflussfaktoren Luftwiderstand HGV

Untersuchungen ICE 1 (Peters 1985)

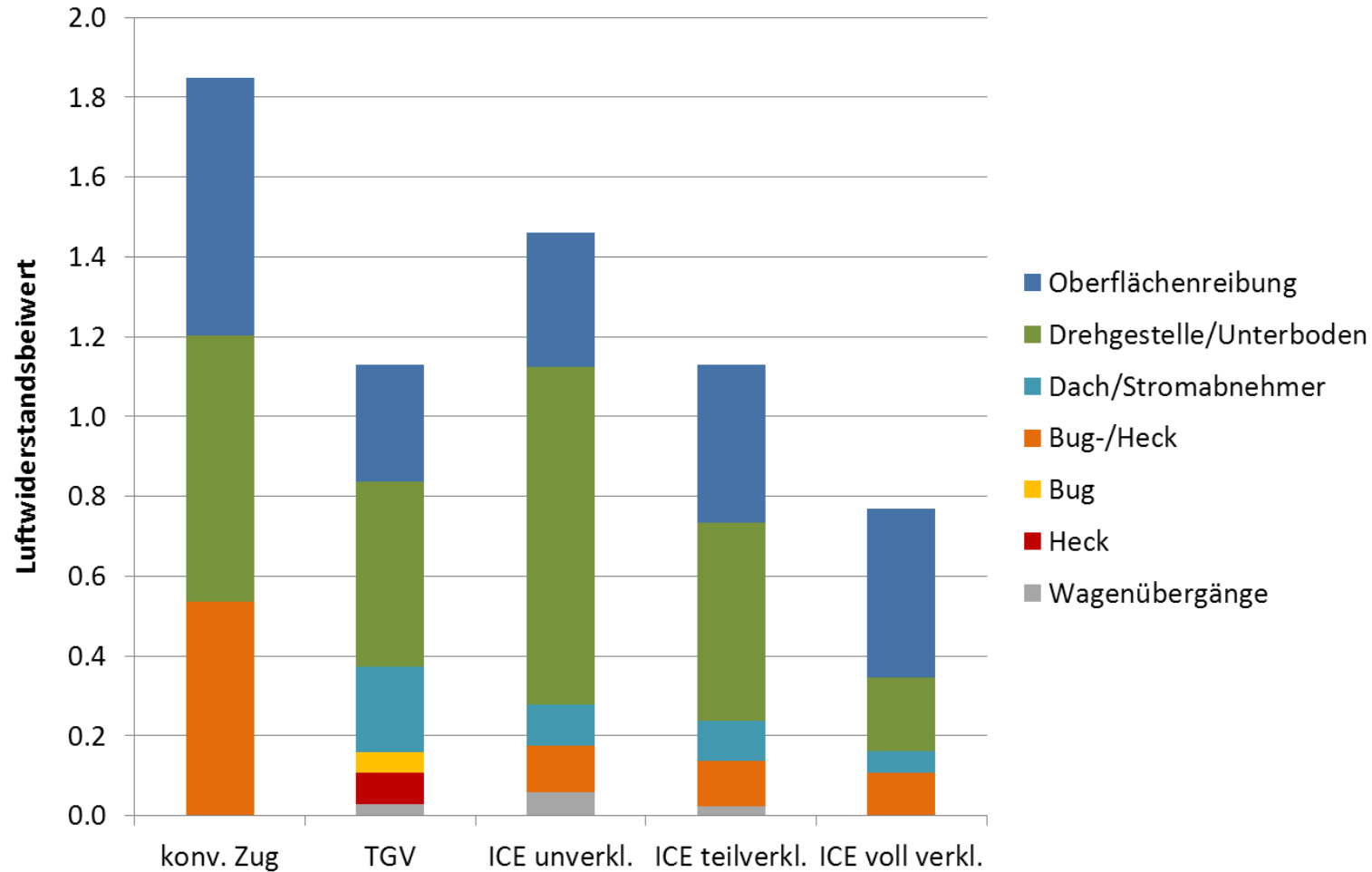


# Einflussfaktoren Luftwiderstand HGV

Untersuchungen ICE 1 (Peters 1985)



# 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

Unterboden  
ICE-T



Vergleich:  
IC/EC-Wagen



# Luftwiderstand und (Güter-)Zugart

Bsp. 1: Containerzug mit unvollkommener Beladung



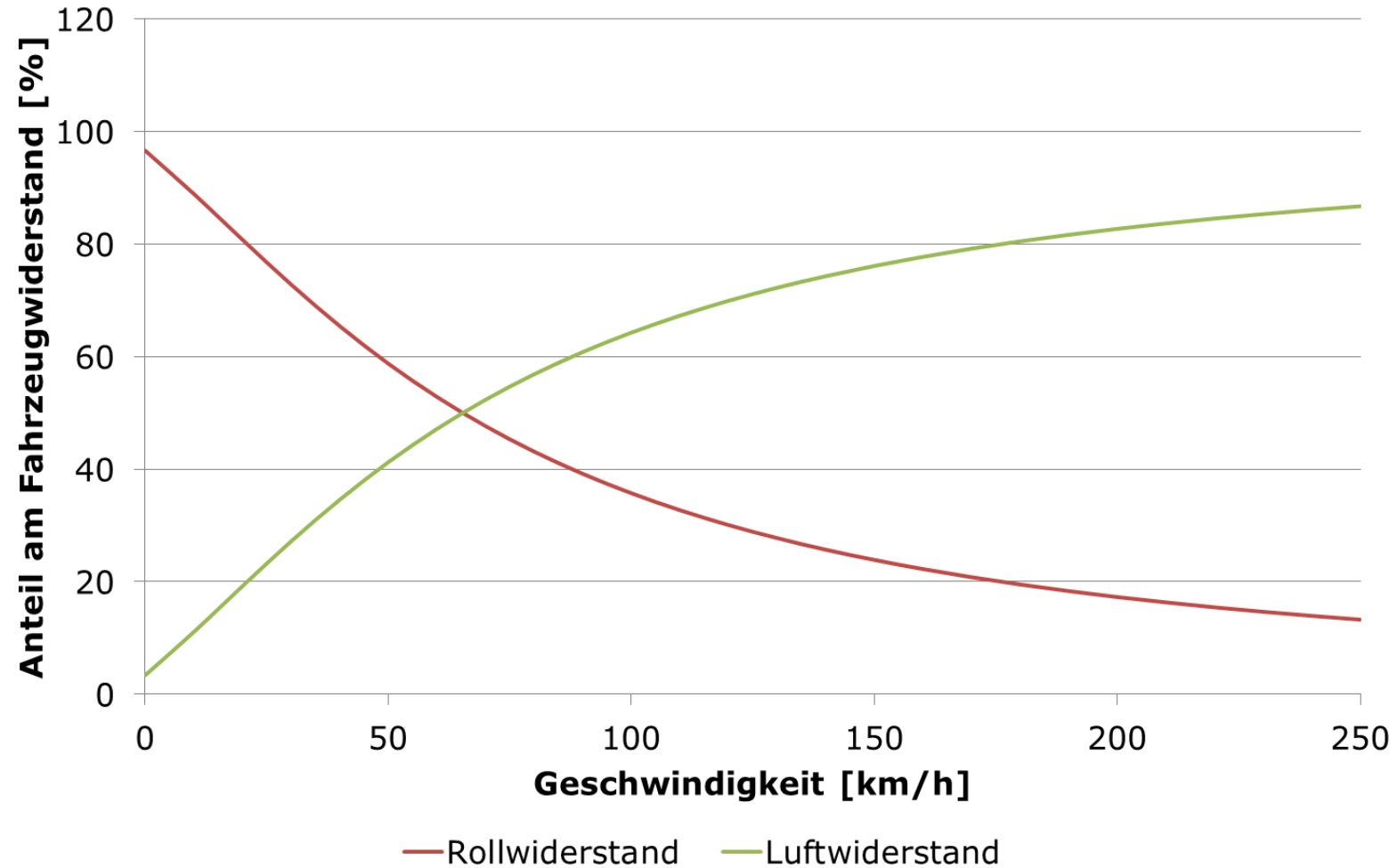
Bsp. 2: Güterganzzug mit Kesselwagen



Fotos:  
Johannes Stier

# Anteil Luftwiderstand

Beispiel HGV



# Anteil Luftwiderstand

## Beispiel HGV



ICE 1



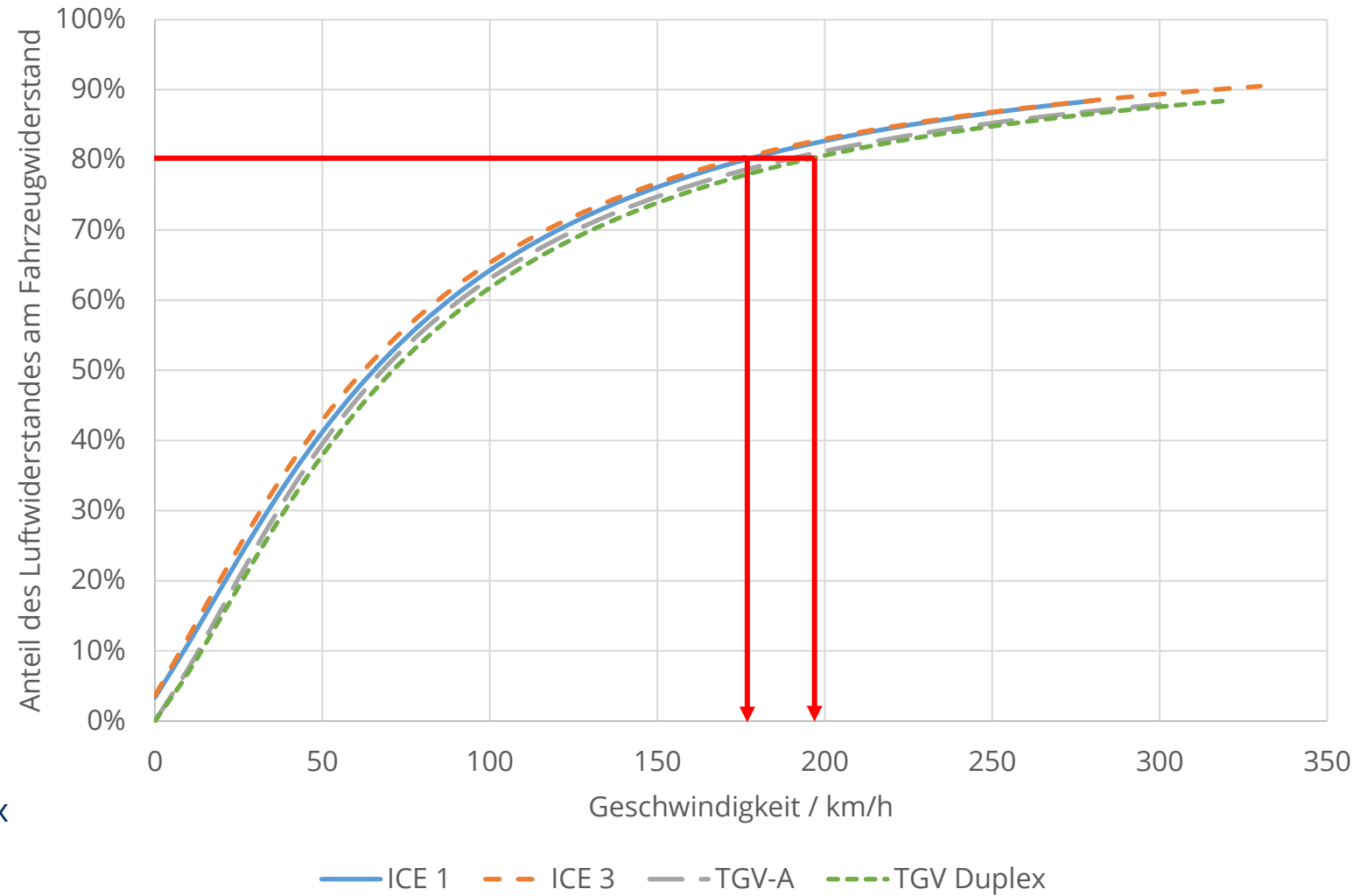
ICE 3



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

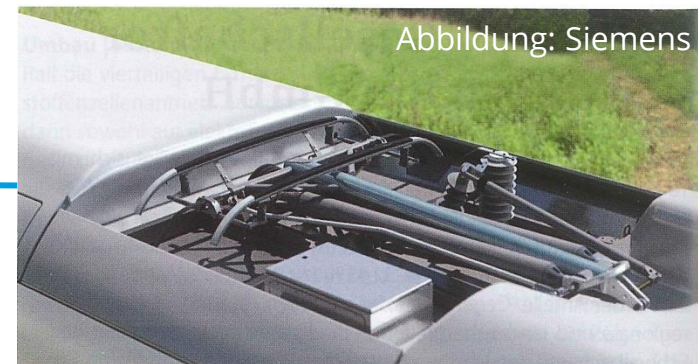


Abbildung: Siemens

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

\* Herstellerangaben

# Luftwiderstand

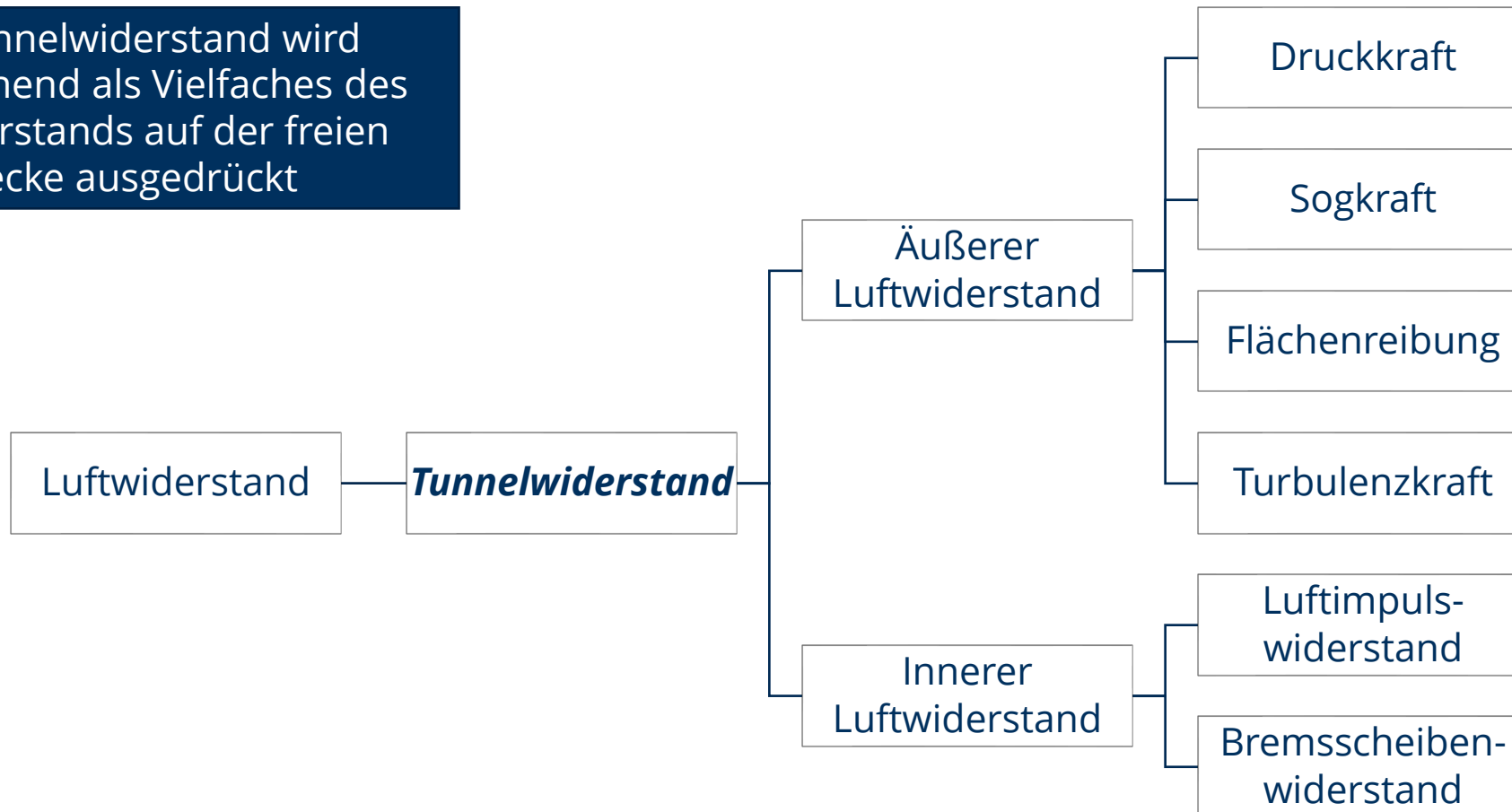
## Teil Tunnelwiderstand



# 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:

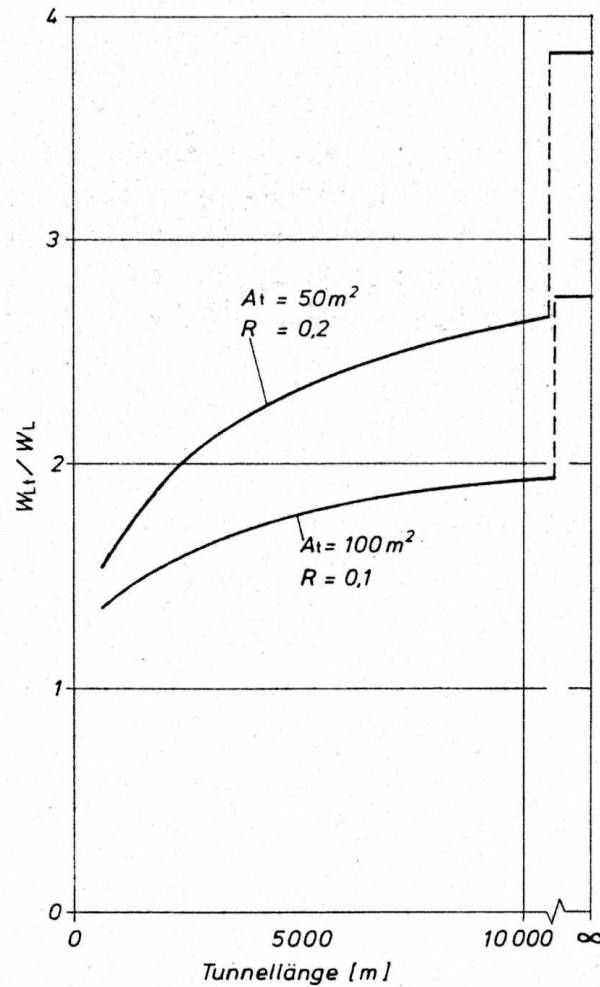
- Tunnellänge
- Tunnelquerschnittsfläche (Versperrungskoeffizient:  $A_{\text{norm}}/A_{\text{Tunnel}}$ )
- Rauigkeit der Tunnelwände
- Zugart (Länge, Oberflächenbeschaffenheit)

Modellvorstellung: Kolben in Zylinderrohr

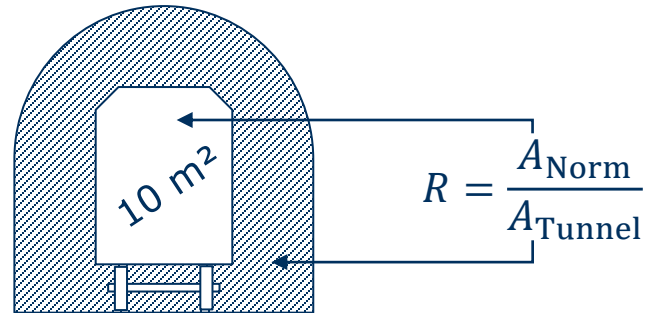


# Luftwiderstand im Tunnel

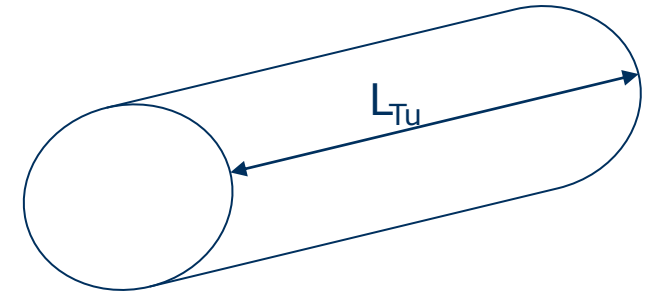
## Einflussfaktoren



### Versperrungskoeffizient



### Tunnellänge



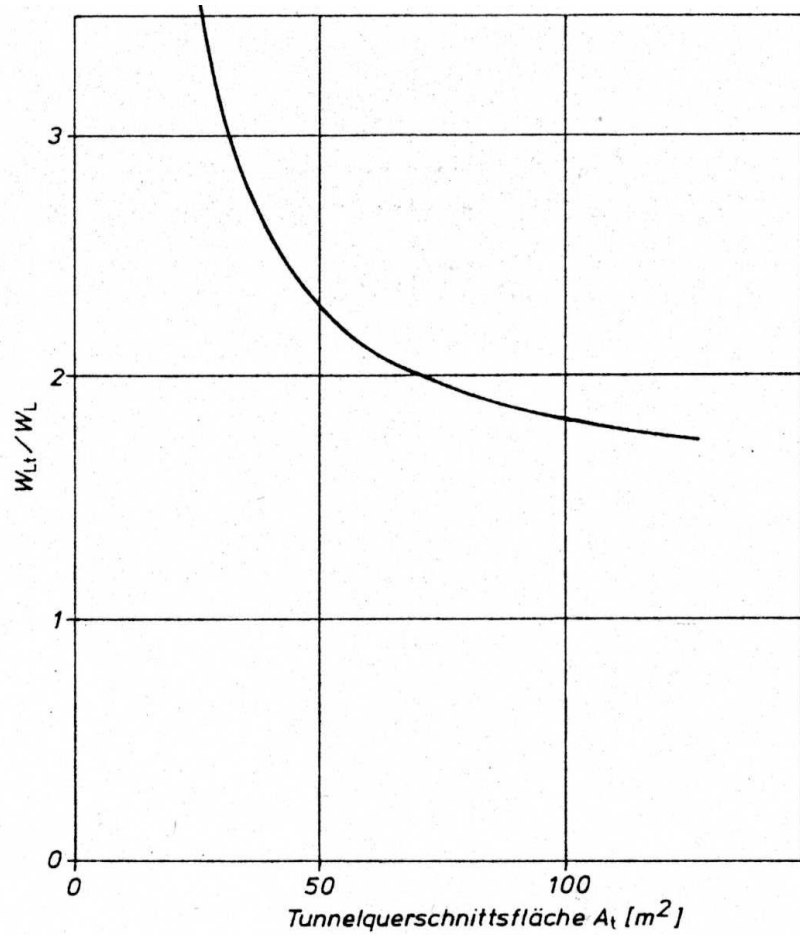
### Beispiele:

- Gotthard-Basistunnel:  $2 \times 41 \text{ m}^2$ ;  $R=0,24$ ;  $L=57.100 \text{ m}$
- Tunnel Sandberg:  $1 \times 92 \text{ m}^2$ ;  $R=0,10$  (1);  $L=1.320 \text{ m}$
- Katzenbergtunnel:  $2 \times 62 \text{ m}^2$ ;  $R=0,16$ ;  $L=9.385 \text{ m}$

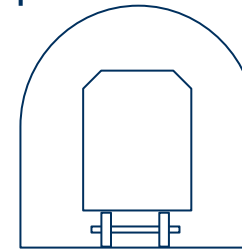
Quelle: Gackenholtz „Der Luftwiderstand der Züge im Tunnel!“  
ZEV-Glas. Ann. 98 (1974) Nr.3 März

# Luftwiderstand im Tunnel

## Einflussfaktoren



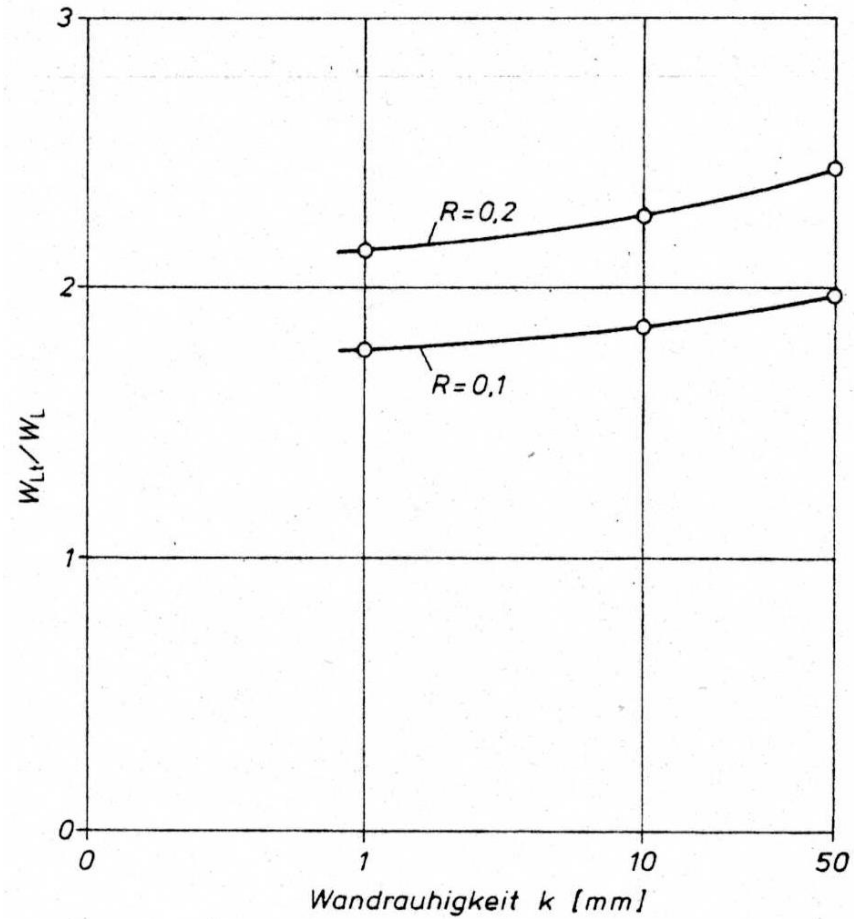
Tunnelquerschnitt



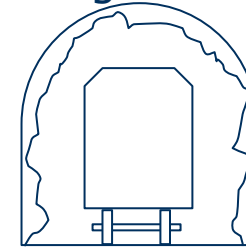
Quelle: Gackenholtz „Der Luftwiderstand der Züge im Tunnel“  
ZEV-Glas. Ann. 98 (1974) Nr.3 März

# Luftwiderstand im Tunnel

## Einflussfaktoren



Wandrauhigkeit

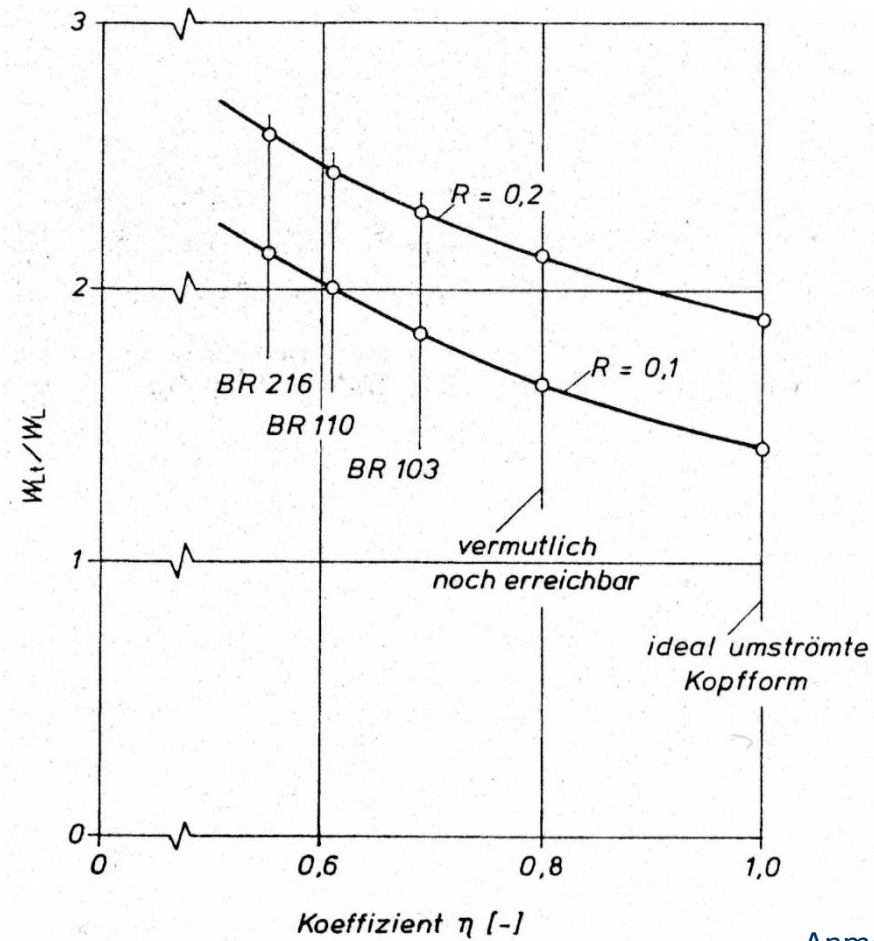


Anmerkung: R - Versperrungskoeffizient

Quelle: Gackenholtz „Der Luftwiderstand der Züge im Tunnel“  
ZEV-Glas. Ann. 98 (1974) Nr.3 März

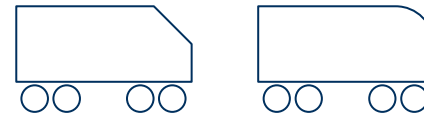
# Luftwiderstand im Tunnel

## Einflussfaktoren



Anmerkung: R - Versperrungskoeffizient

Kopfform



Quelle: Gackenholtz „Der Luftwiderstand der Züge im Tunnel“  
ZEV-Glas. Ann. 98 (1974) Nr.3 März

# Luftwiderstand im Tunnel

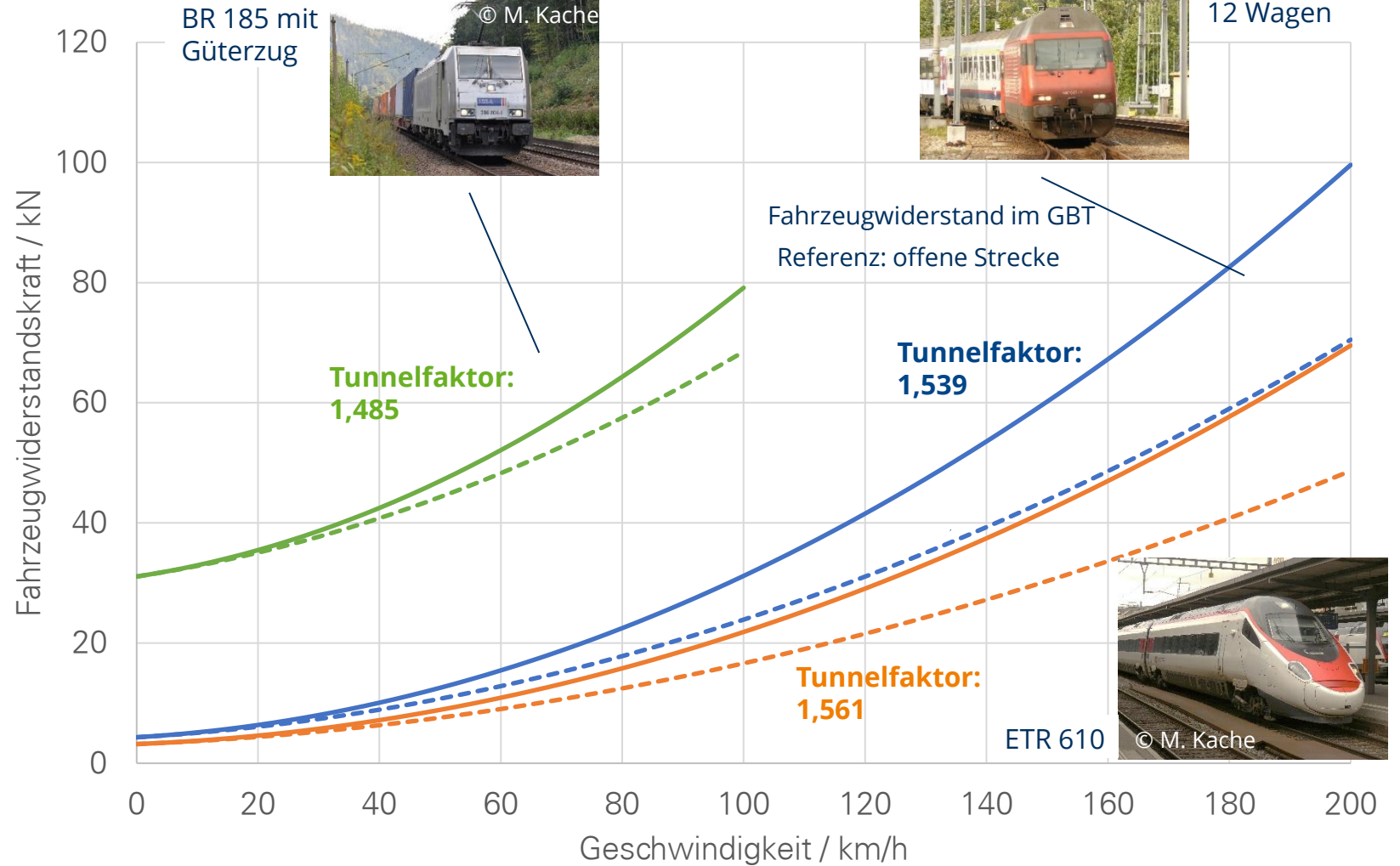
## Beispiel GBT



Karte: wikipedia (User: Tschubby)



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



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

# Luftwiderstand im Tunnel

## Beispiel LBT



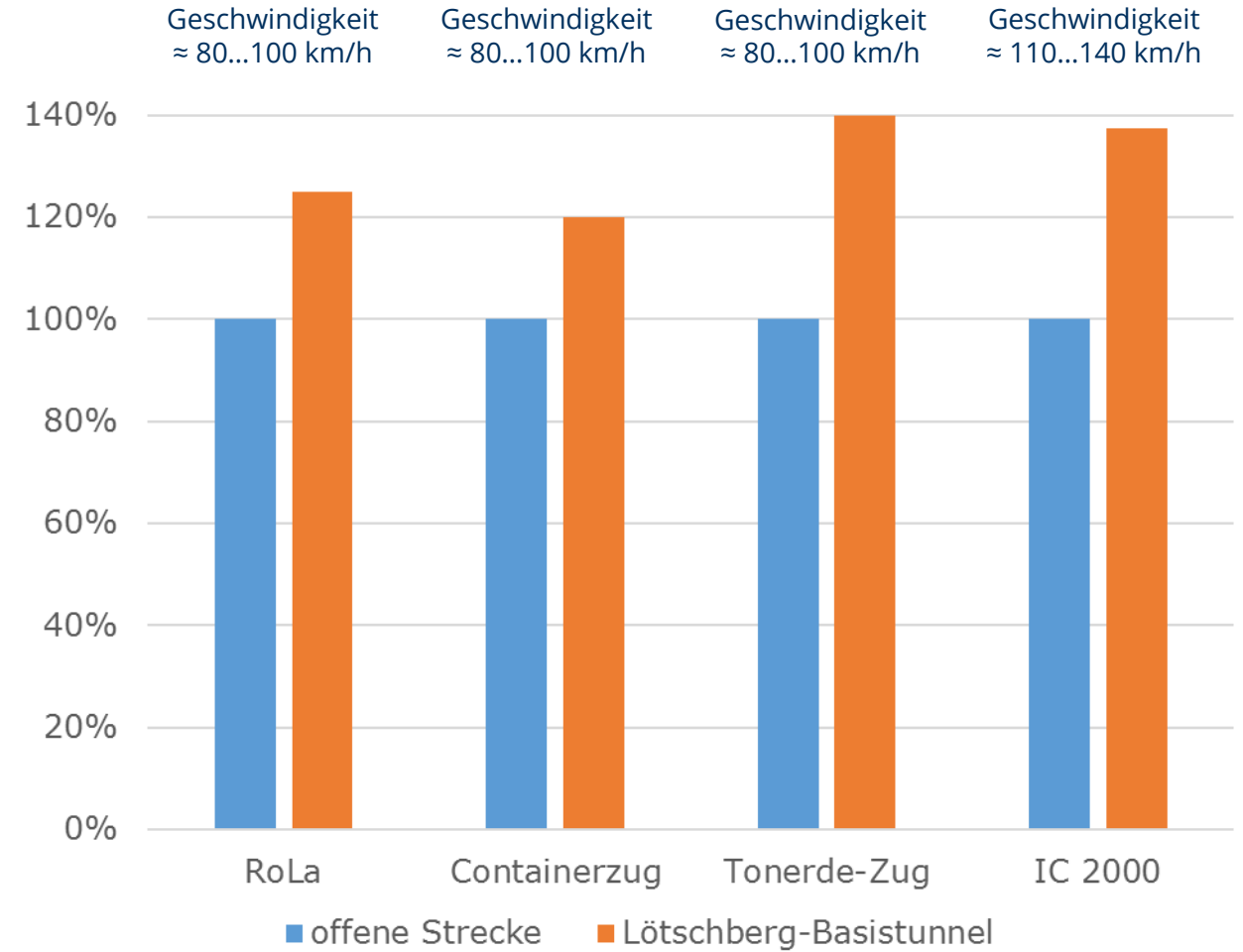
Rollende Landstraße



Containerzug



IC 2000



Datenbasis: Voegeli, Heinz: „Fahrwiderstände im Lötschberg-Basistunnel“, eb 106(2008) Heft 6, S. 260ff.

# 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

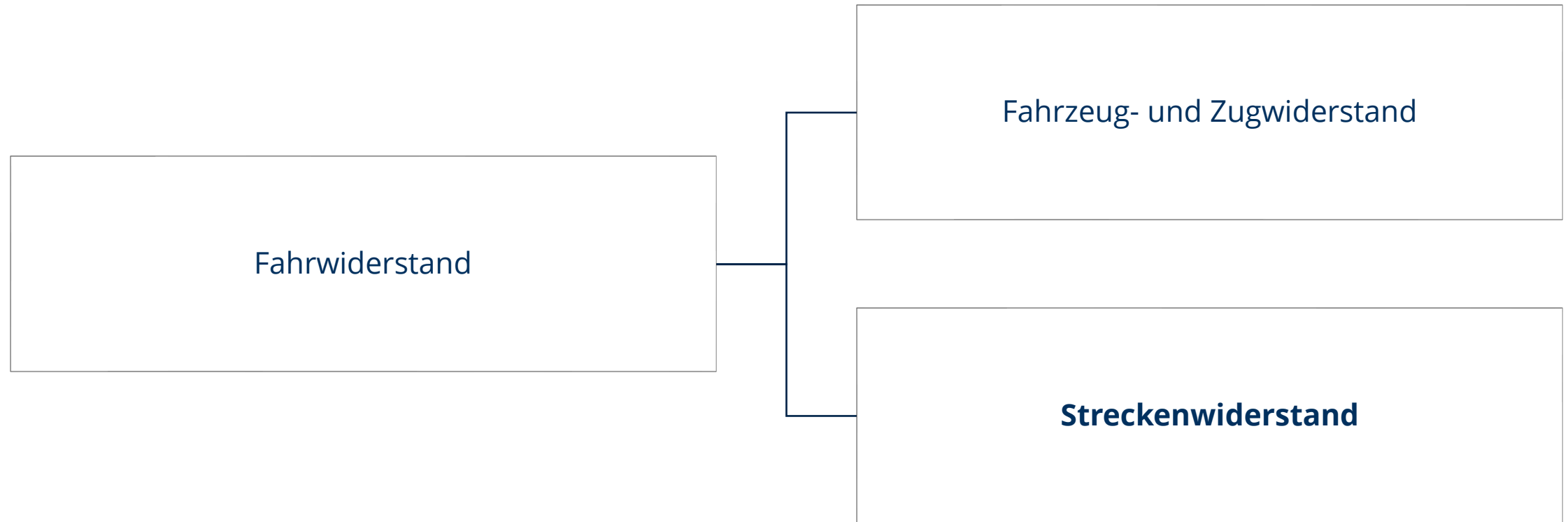


dominant bei hohen  
Geschwindigkeiten

beeinflussbar  
durch  
Fahrzeugkonfiguration

# Fahrwiderstand

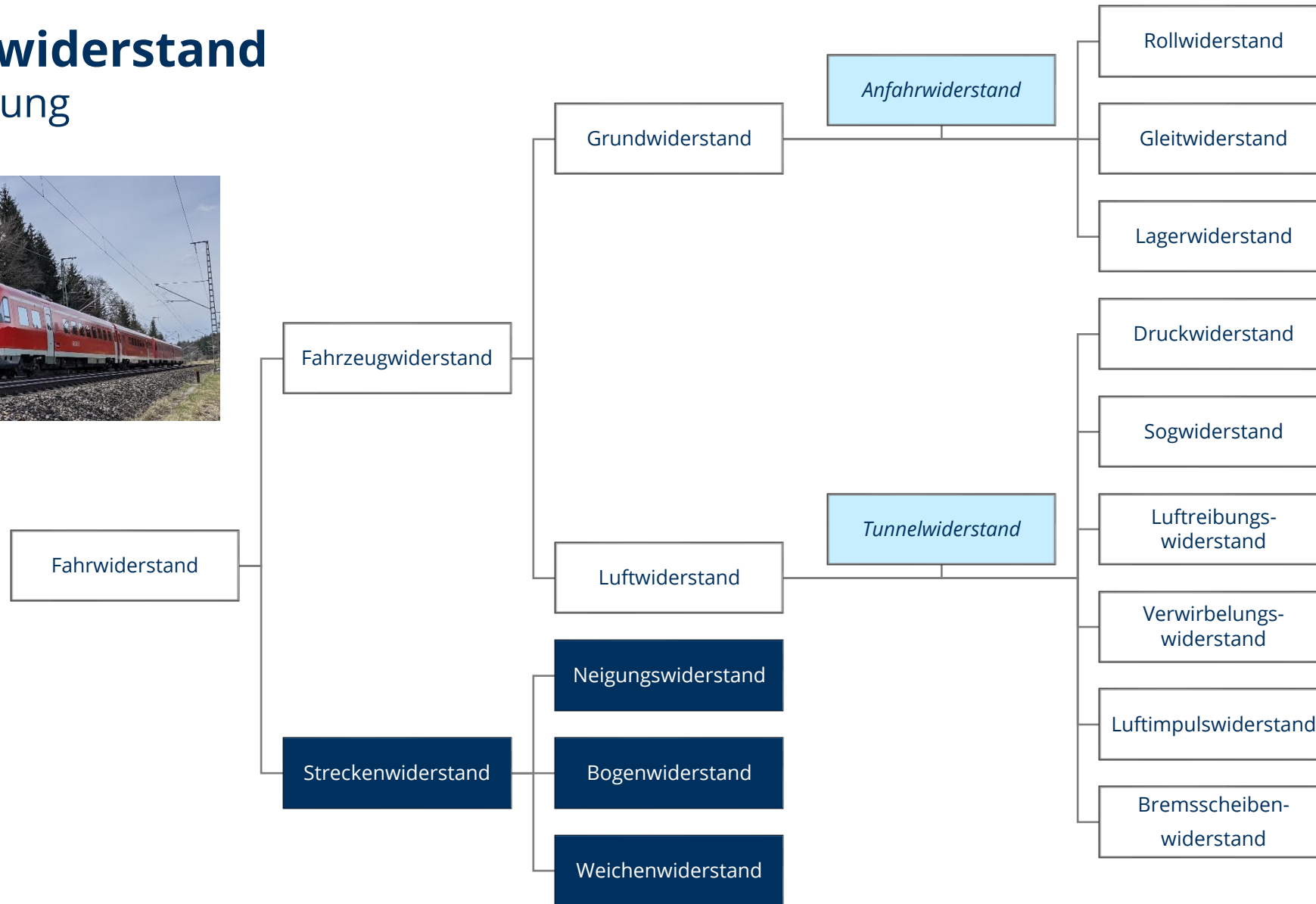
## Einteilung



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

# Fahrwiderstand

## Einteilung



# 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



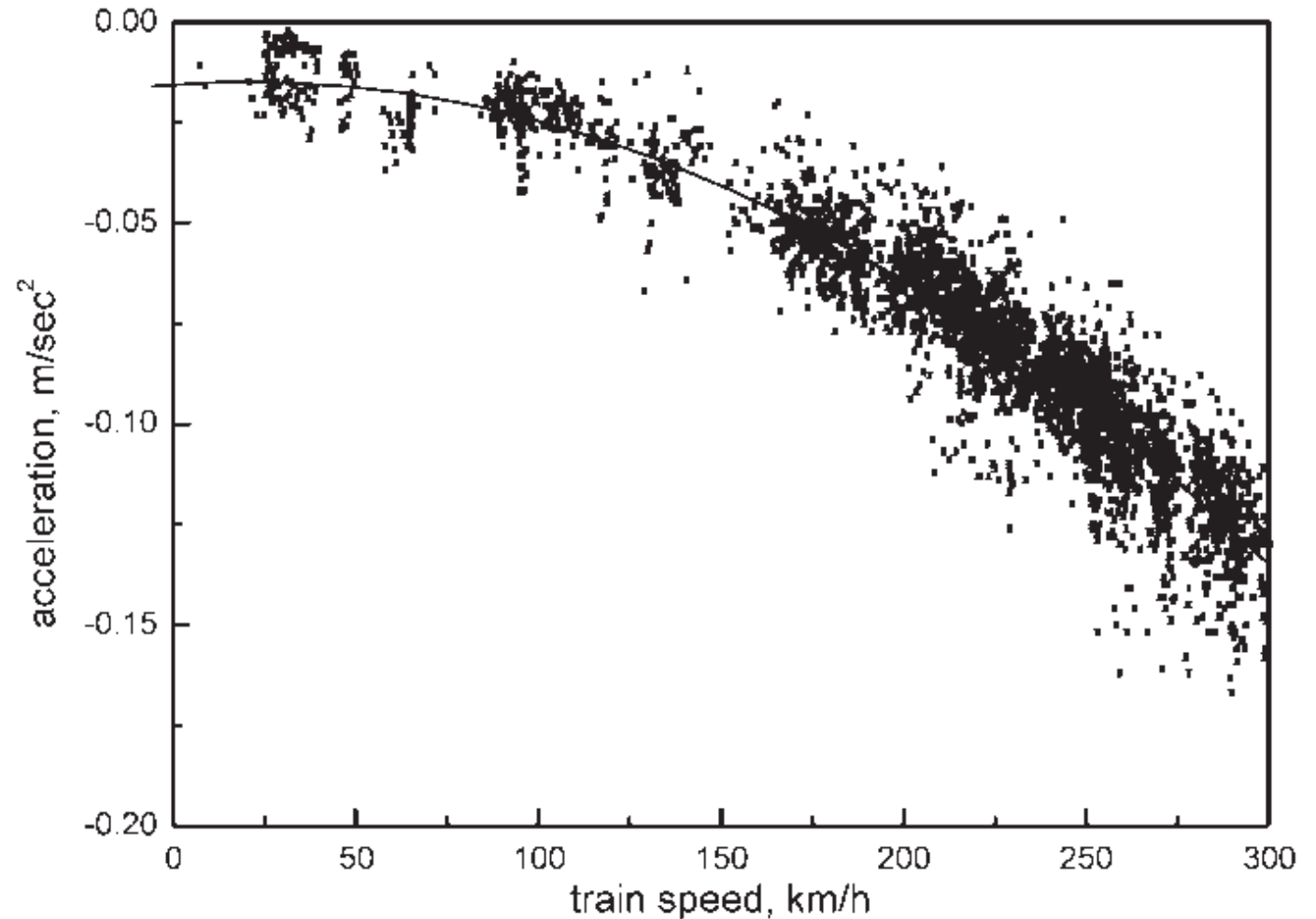
$$F_{WFZ} = F_{WFT}$$

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

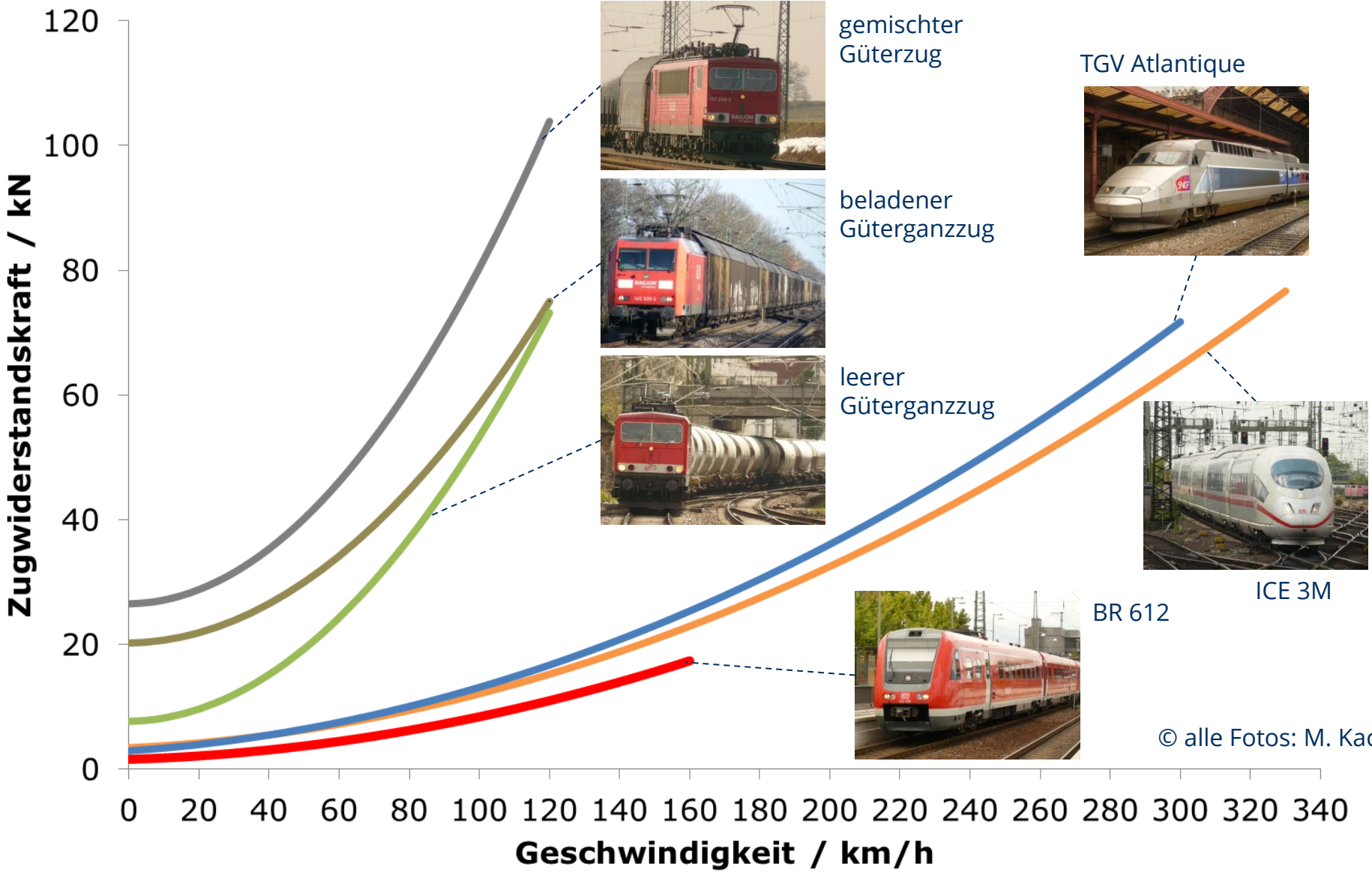
In empirische Formeln  
setzen Sie v in km/h ein

# Ermittlung von Fahrzeuwiderstandsgleichungen

Beispiel:  
HSR-350x (Südkorea) - Auslaufversuche

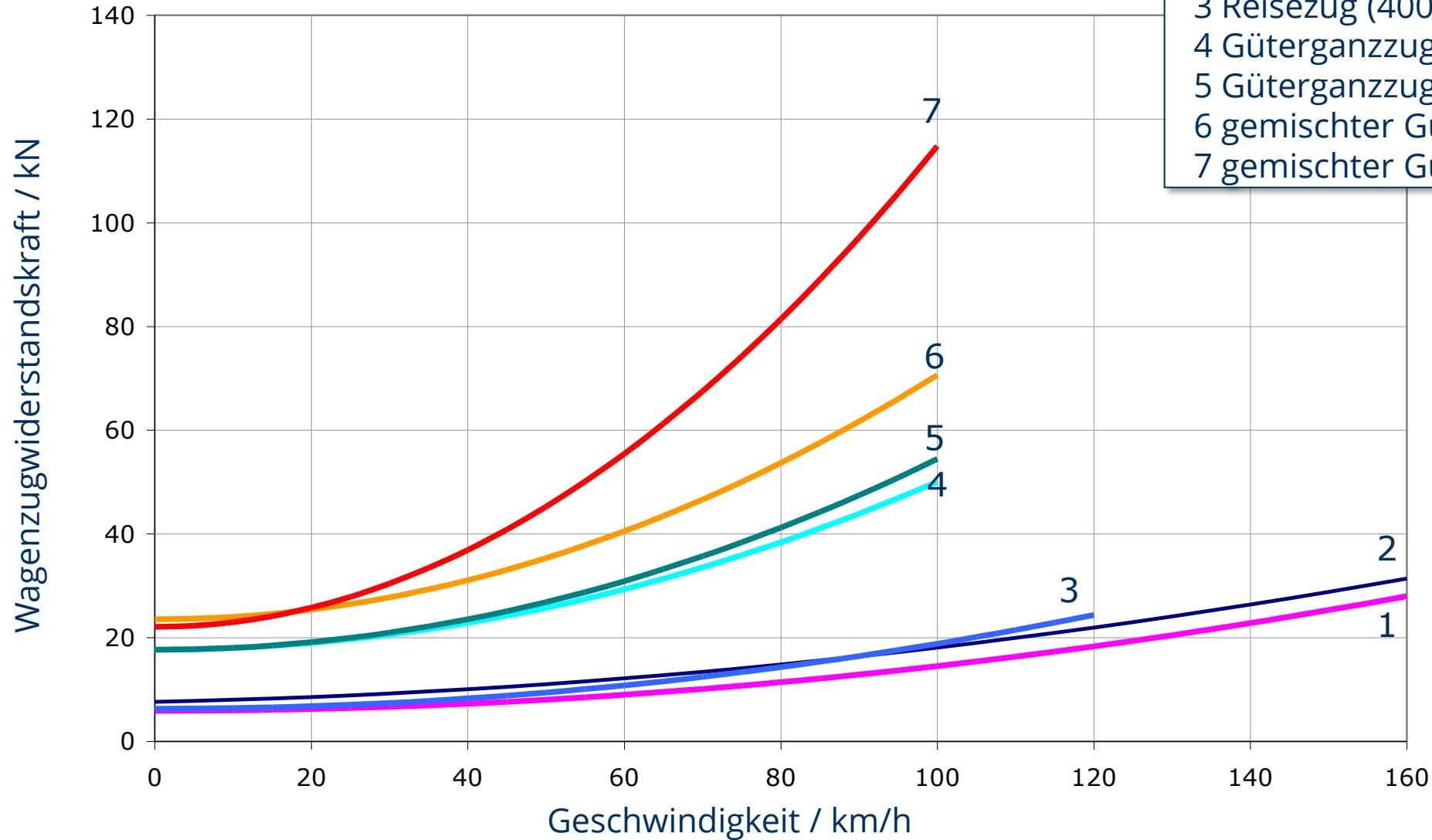


# Fahrzeugwiderstands-kräfte von Zügen



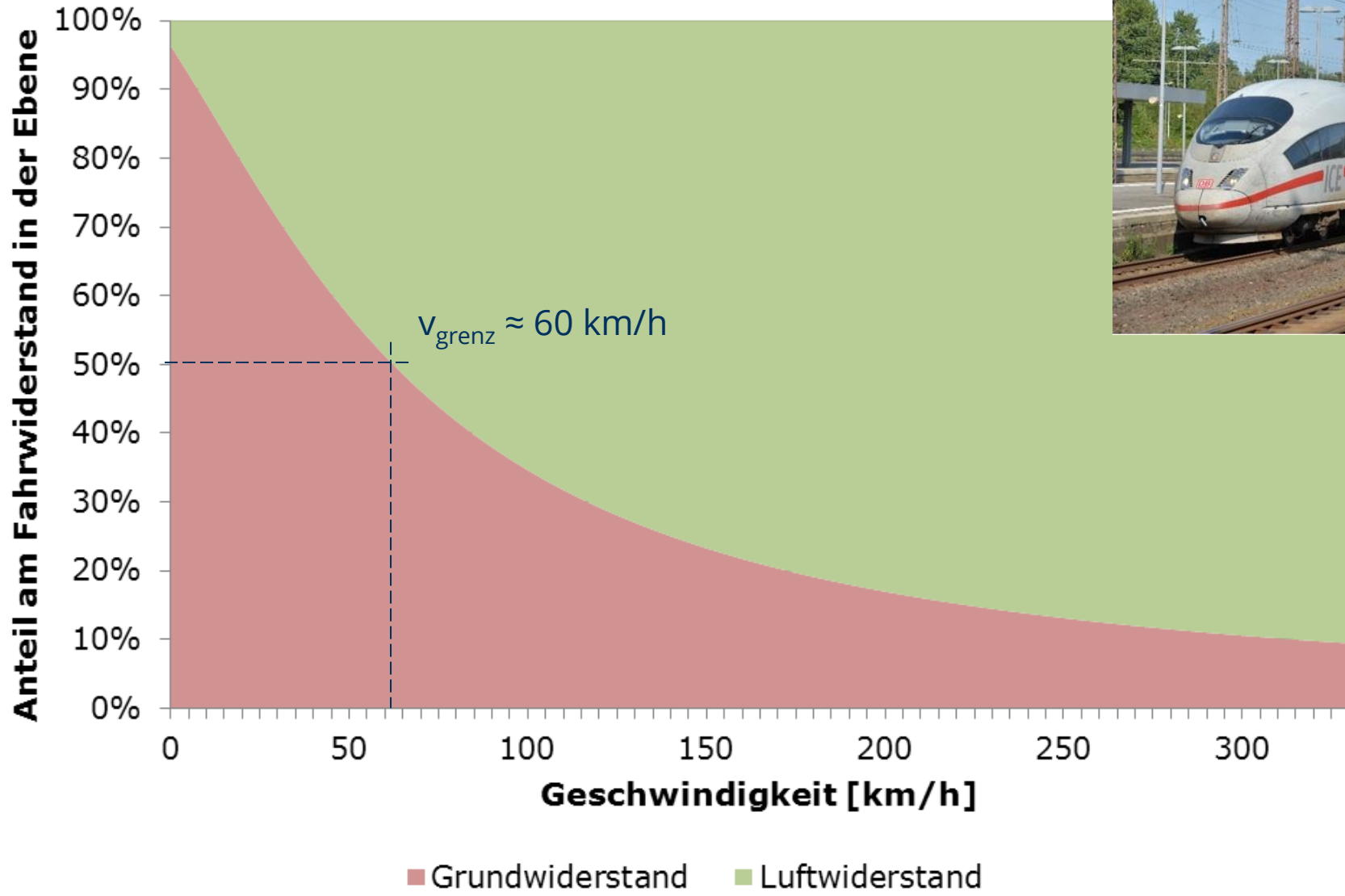
© alle Fotos: M. Kache

# Widerstandskräfte



- 1 Reisezug (400t) SNCF-Formel
- 2 Reisezug (400t) DB-Formel
- 3 Reisezug (400t) DR-Formel
- 4 Güterganzzug (1500t) DR-Formel
- 5 Güterganzzug (1500t) SNCF-Formel
- 6 gemischter Güterzug (1500t) DR-Formel
- 7 gemischter Güterzug (1500t) SNCF-Formel

# Grund- vs. Luftwiderstand - Hochgeschwindigkeitszüge



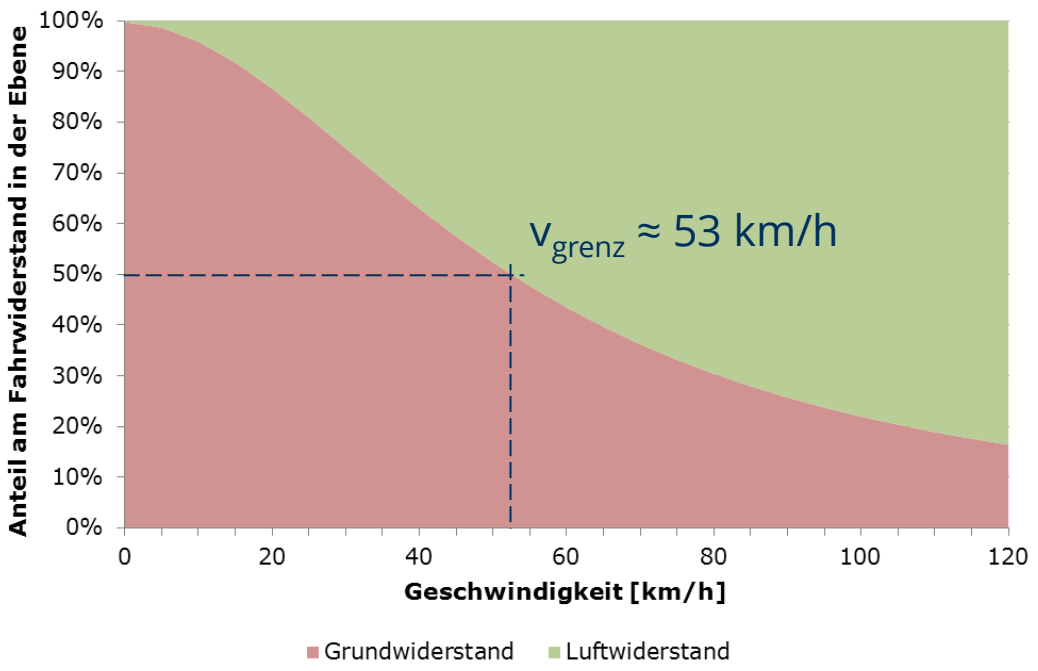
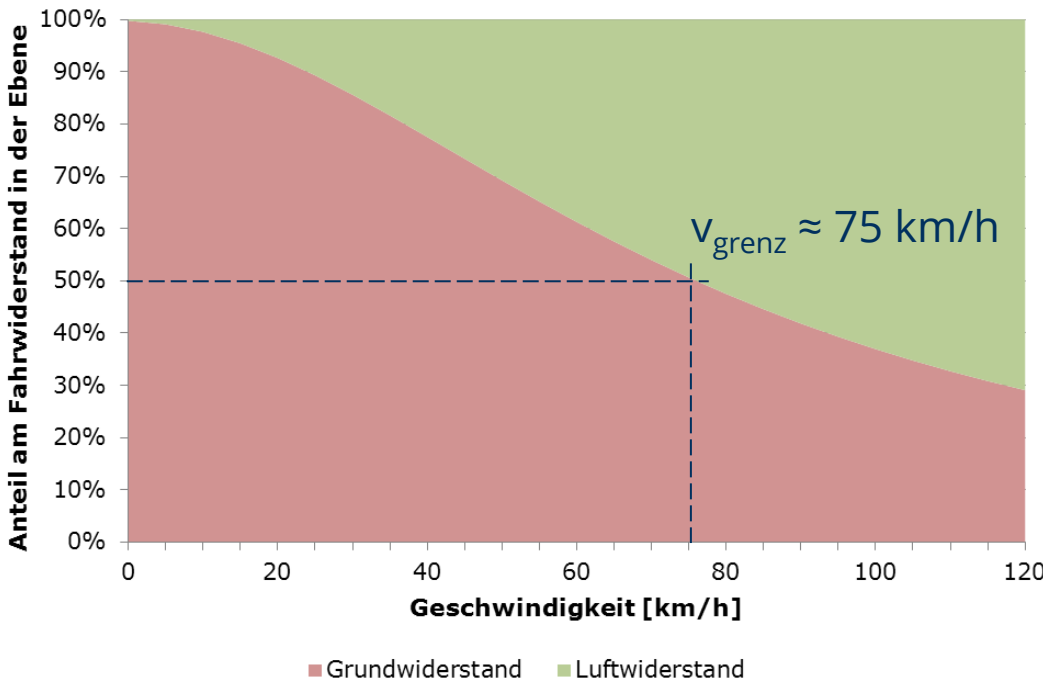
© M. Kache

# Grund- vs. Luftwiderstand - Güterzüge



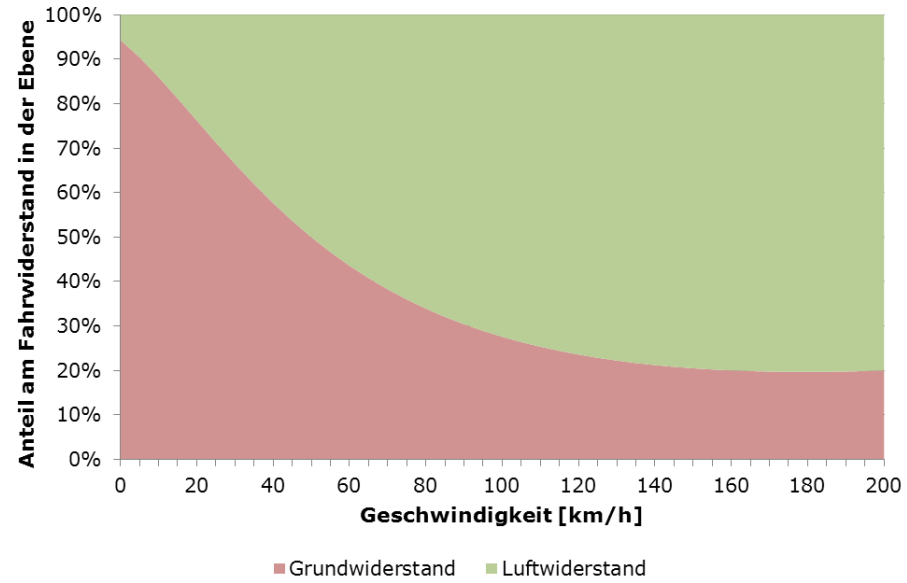
beladener Ganzzug

leerer Ganzzug mit **offenen** Wagen

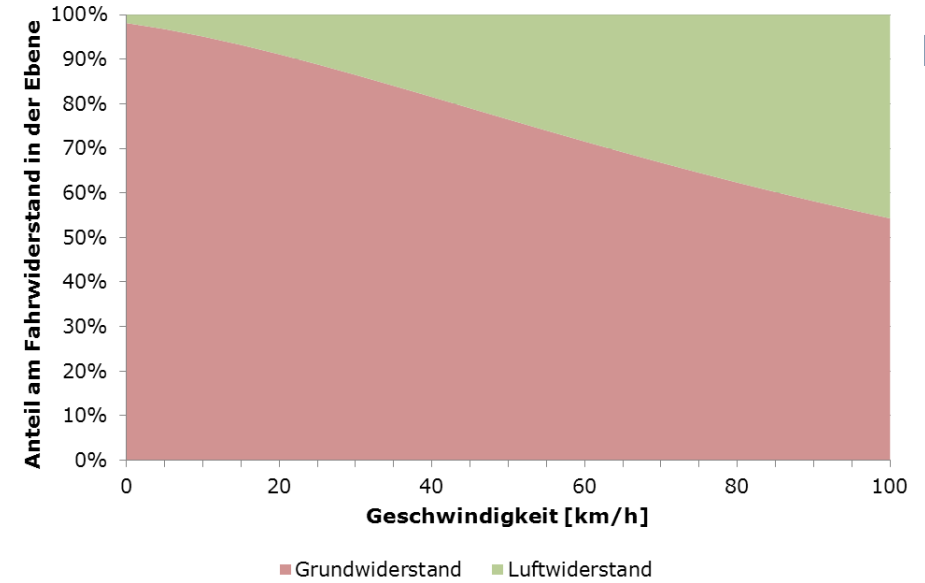


# Grund- vs. Luftwiderstand - Straßenfahrzeuge

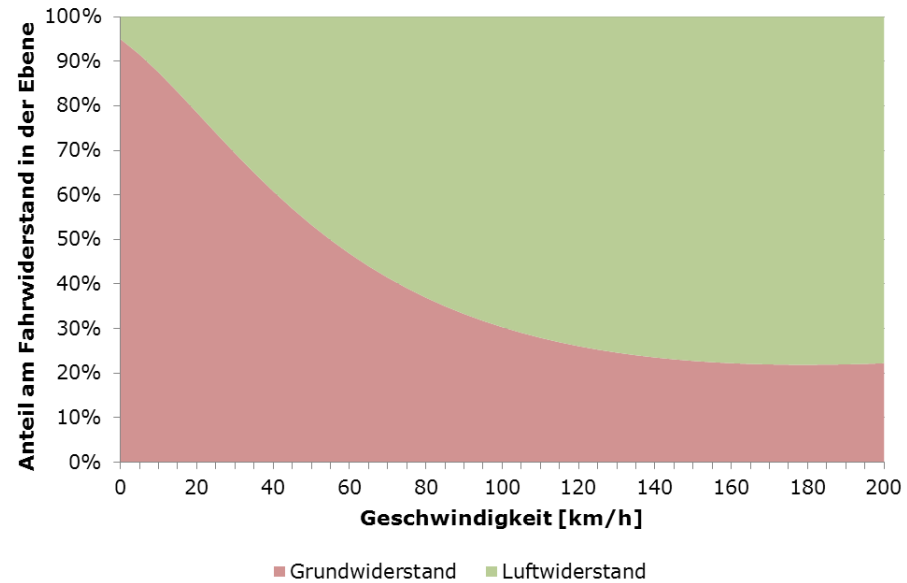
## Kleinwagen



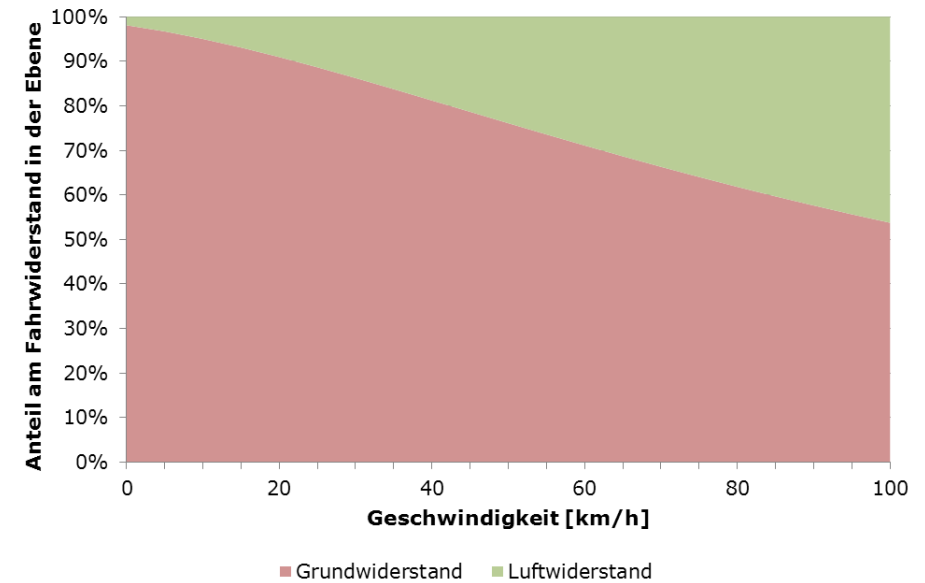
## Reisebus

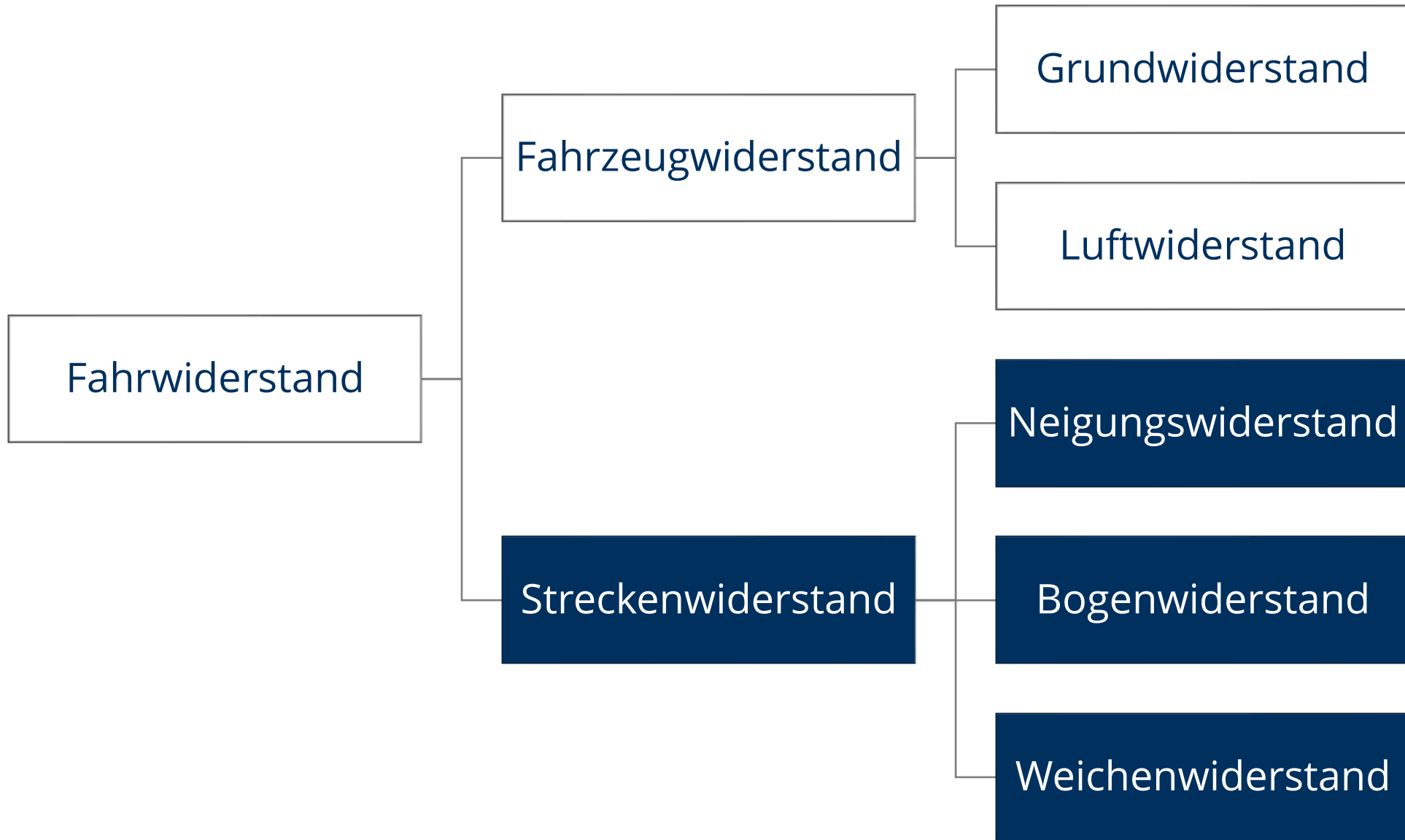


## SUV



## Sattelzug

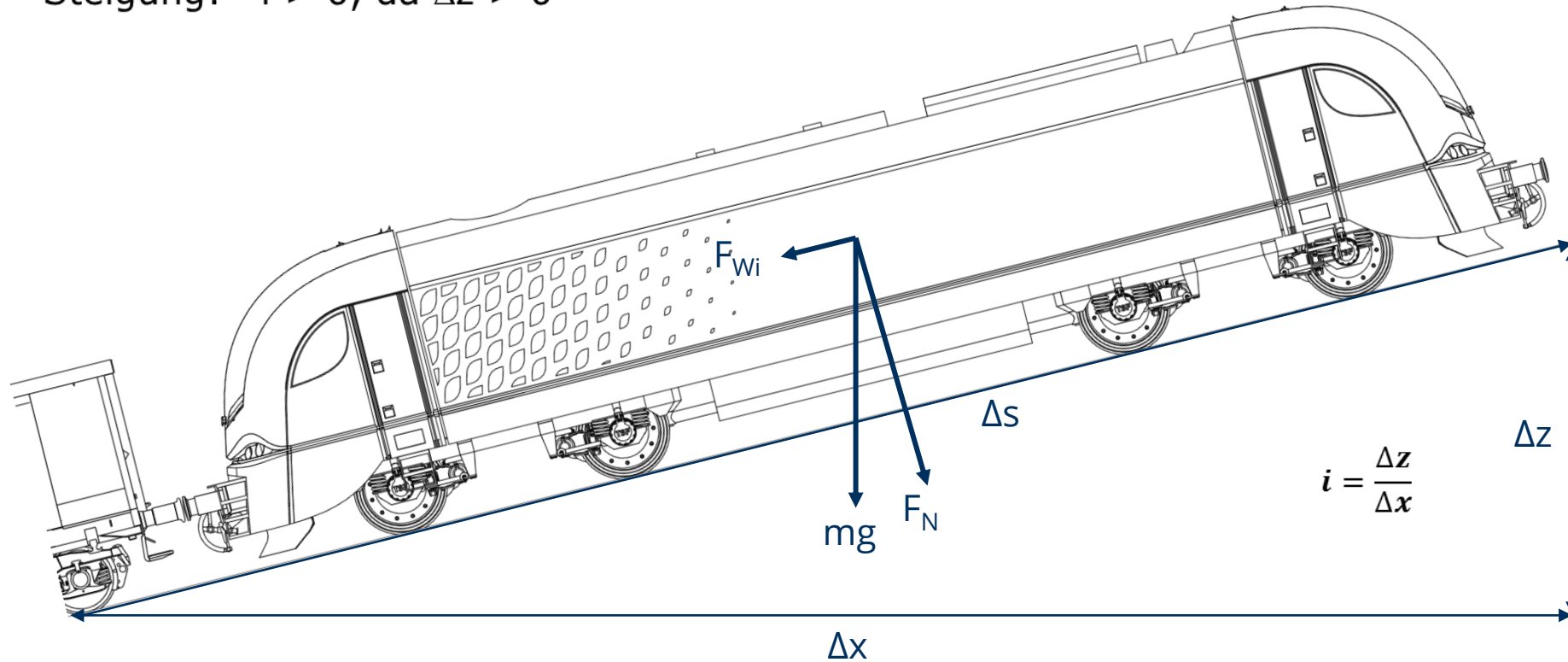




# Neigungswiderstand

Gefälle:  $i < 0$ , da  $\Delta z < 0$

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

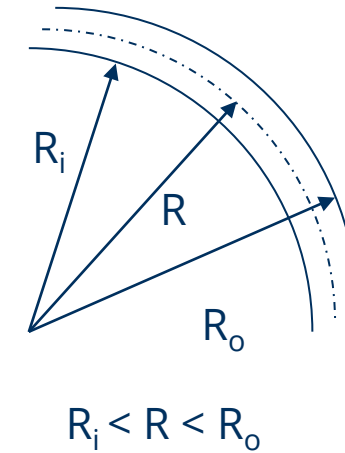
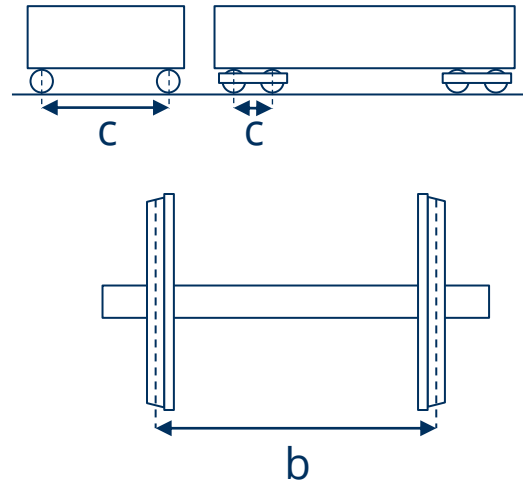


$$F_{wi} = mg \cdot \sin\alpha$$

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



## Formel von Protopapadakis (1937)

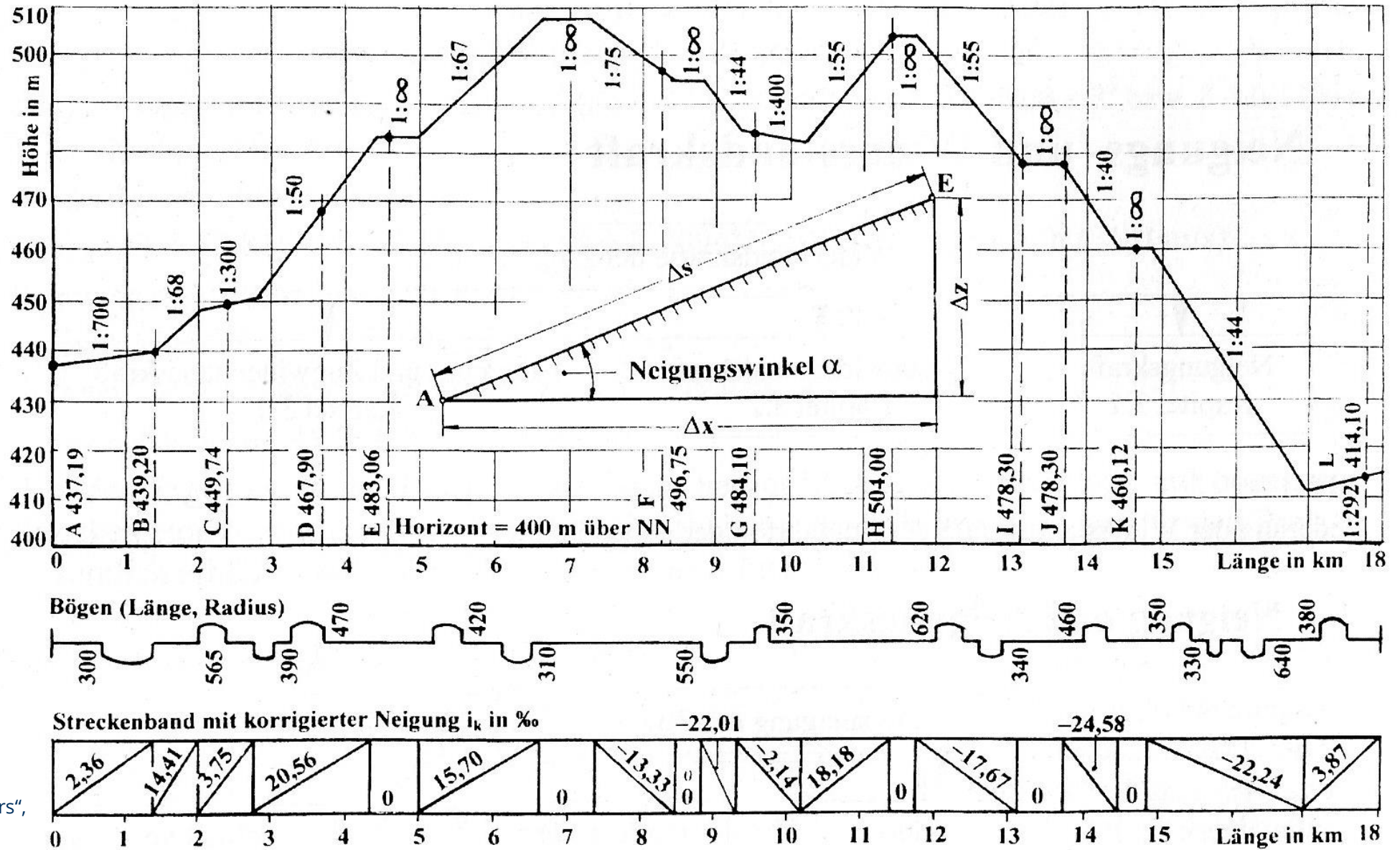
Gleitreibung Rad/Schiene      Laufkreisabstand (Regelspur: 1,5 m)

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

Gleisbogenradius

Radsatzabstand (im DG)

# Streckenband



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

# Streckendatei

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

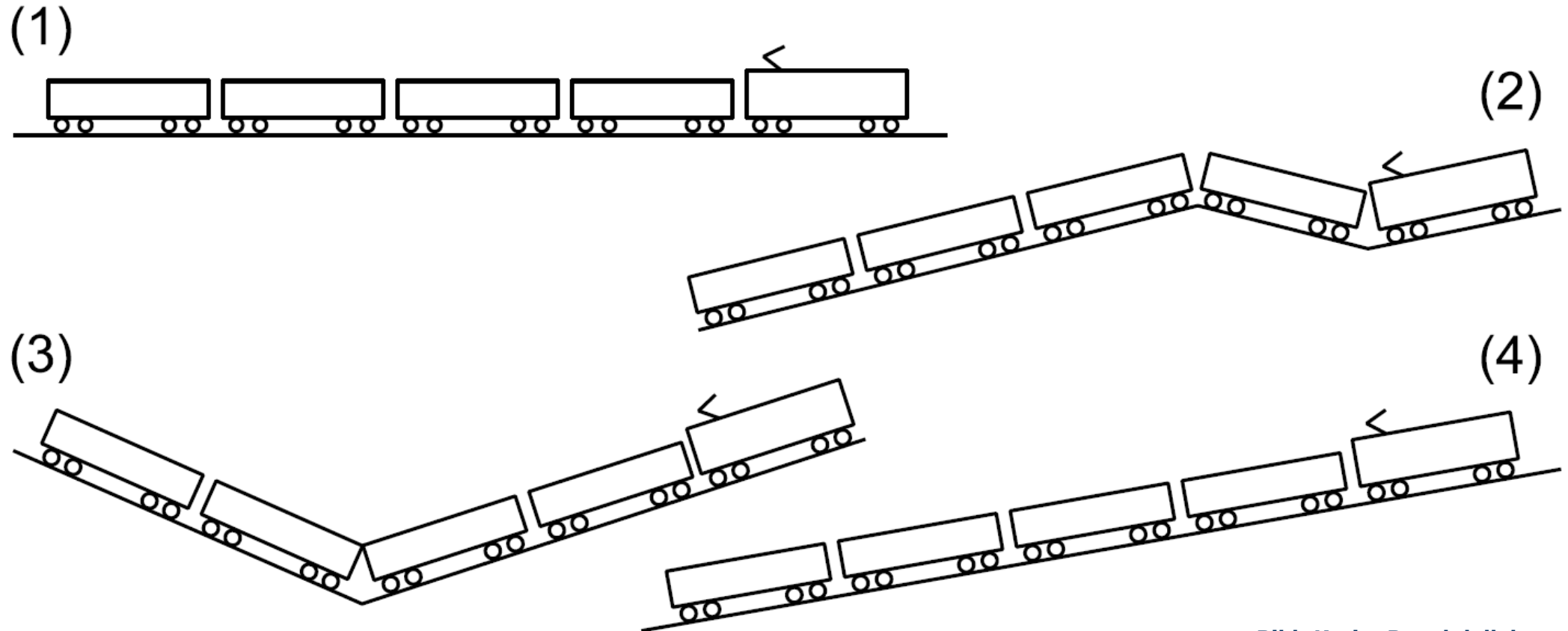


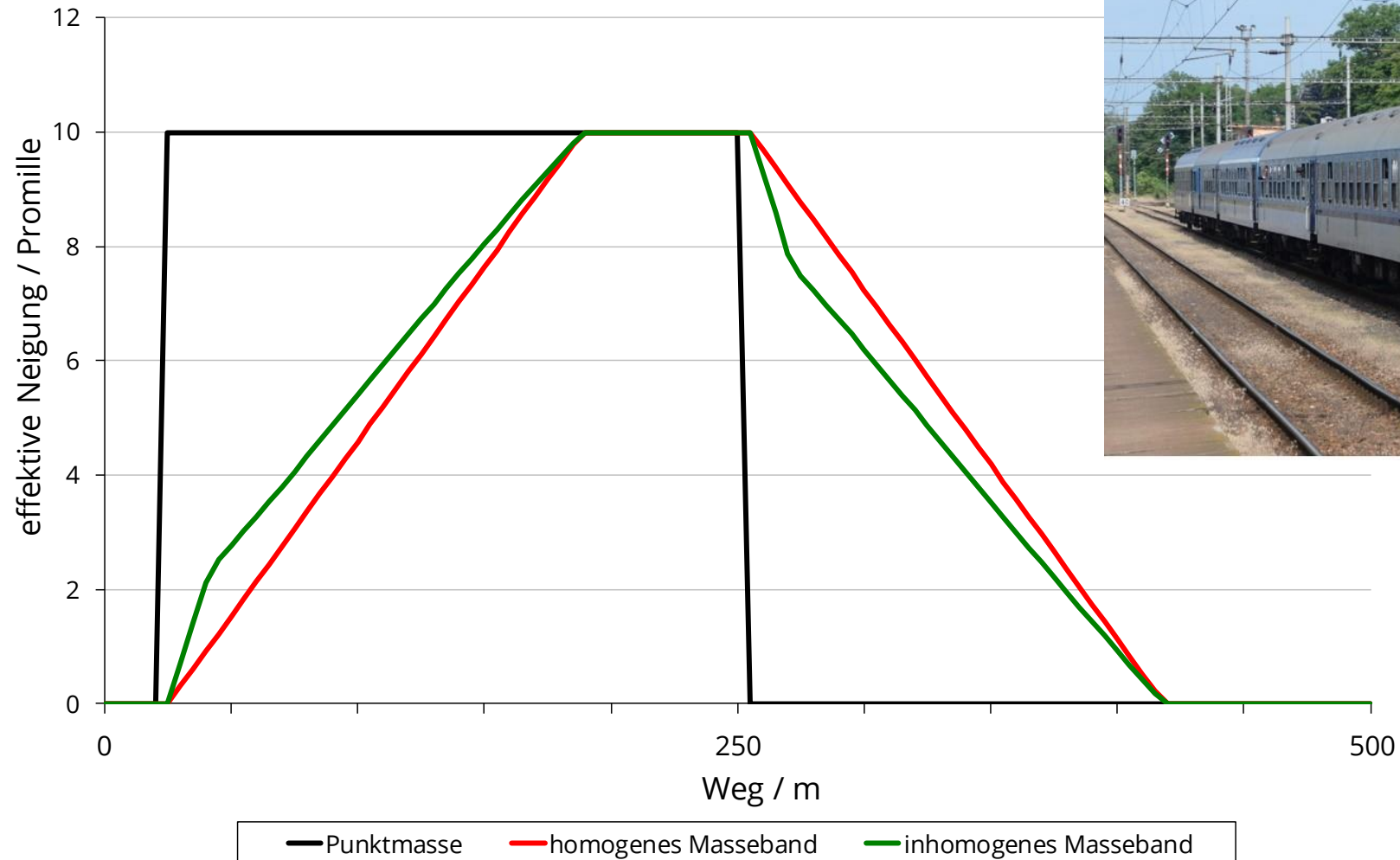
Bild: Karim Benabdellah

Längenausdehnung: Gefällewechsel unter Zugverband (Fälle 2 und 3)

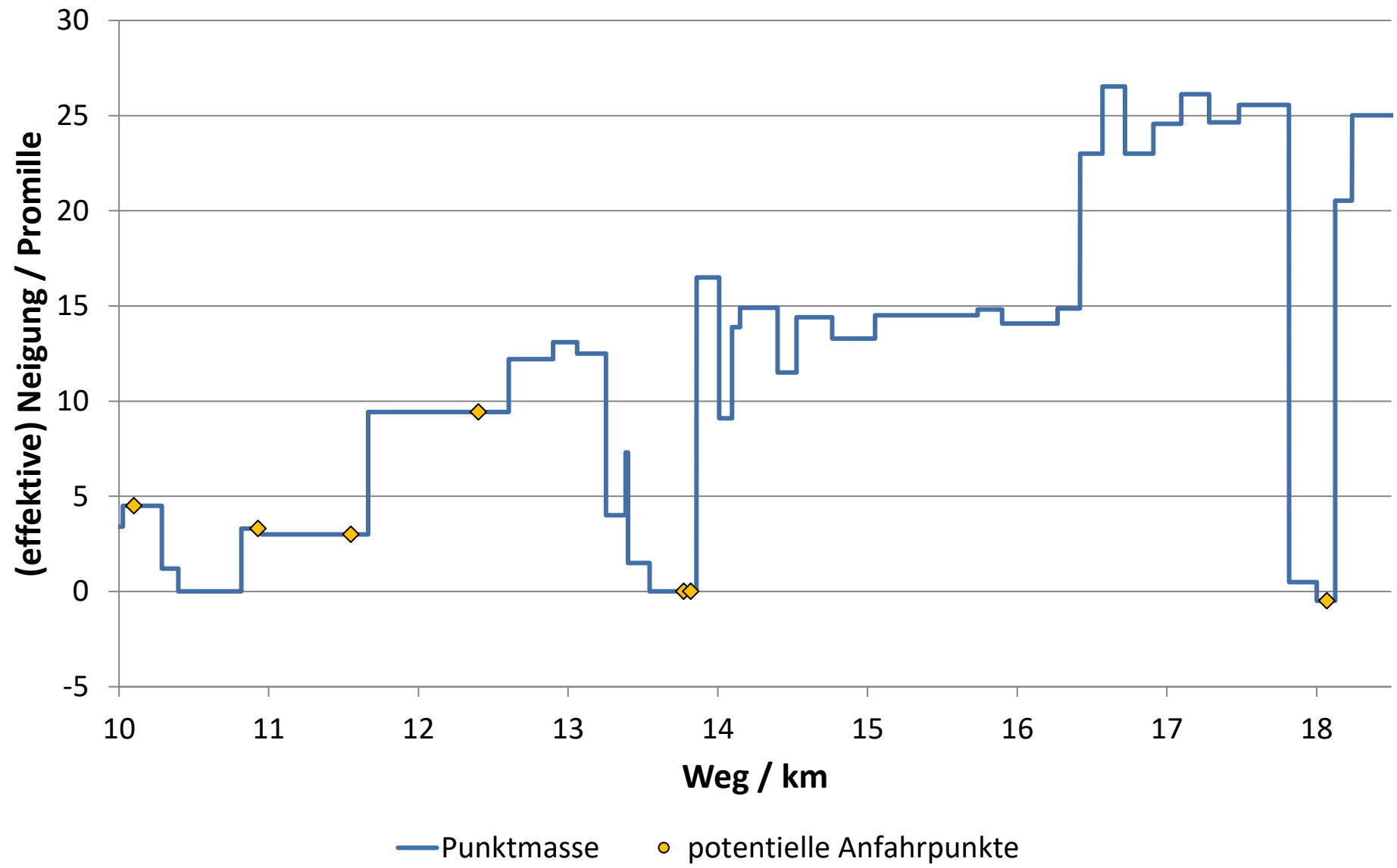
Bestimmung der effektiven Neigung: Massenband (homogen/inhomogen)

# Vergleich der Modellierungsansätze

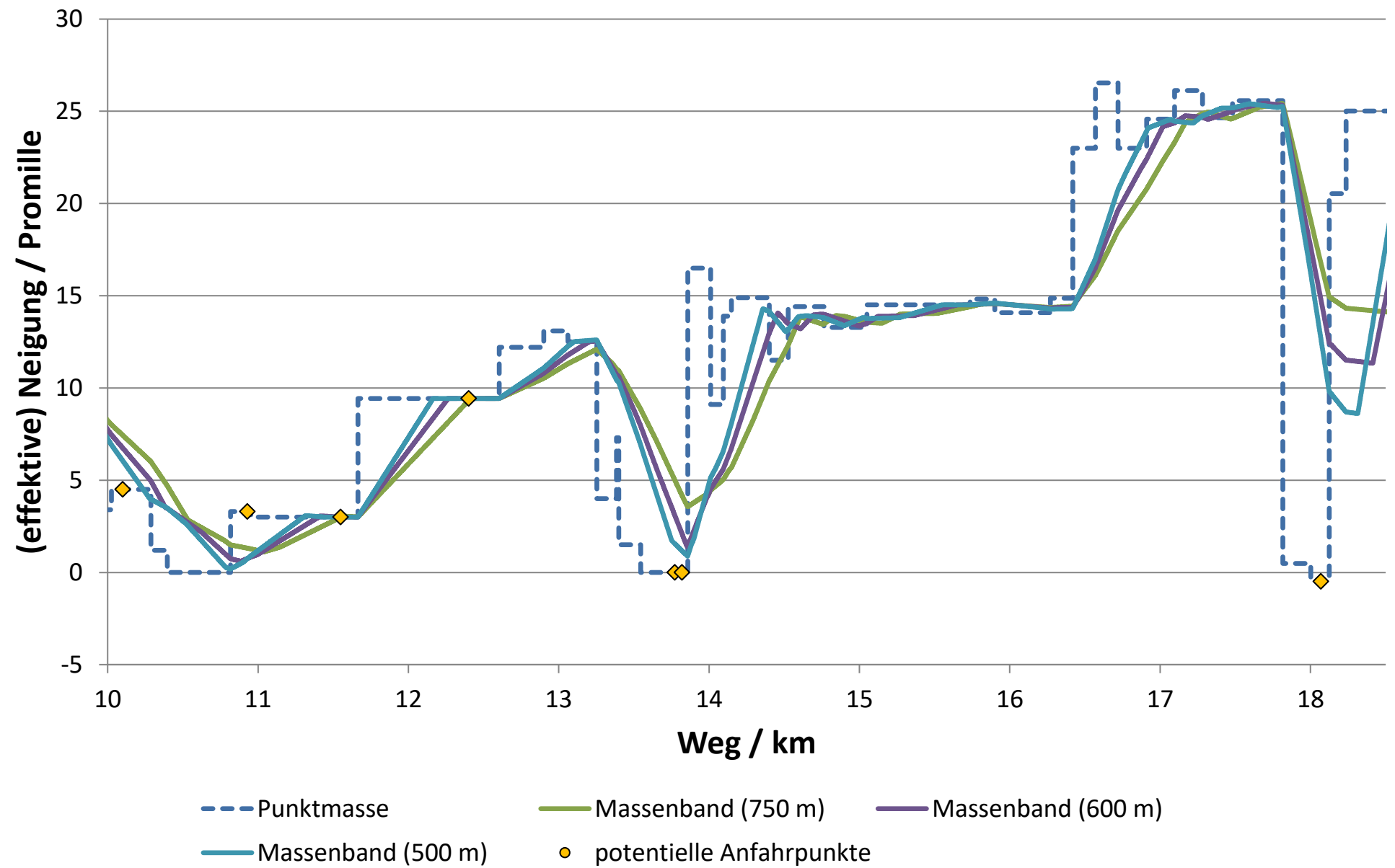
effektive Neigung Reisezug



# Effektive Neigung und Zuglänge



# Effektive Neigung und Zuglänge



# Fahrwiderstandsanteile



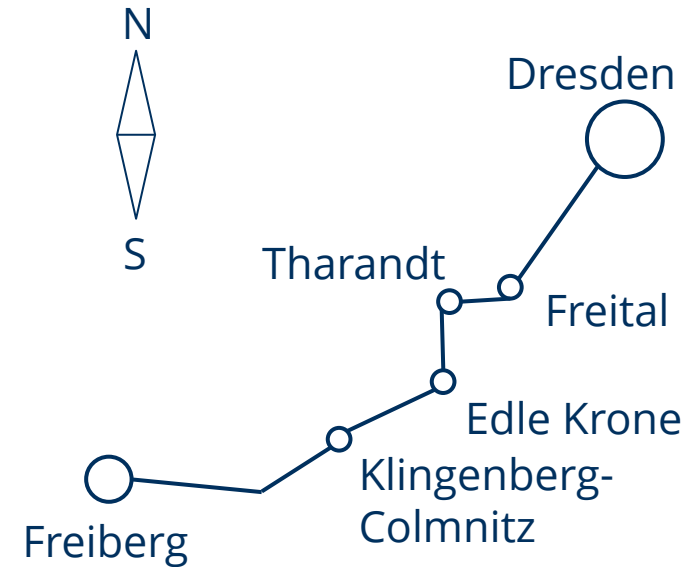
## Fahrzeug

Masse: 106 t

Leistung: 2 x 560 kW

$v_{\max}$  : 160 km/h

$$F_{\text{WFT}} = 1,58 + 10,3v + 0,29 (v+15)^2$$



## Strecke

$v_{\text{zul,max}}$  : 120 km/h

Länge: 40 km

max. Steigung: 26,5 ‰

max. Gefälle: 20,4 ‰

min. Bogenradius: 190 m

# Fahrwiderstandsanteile

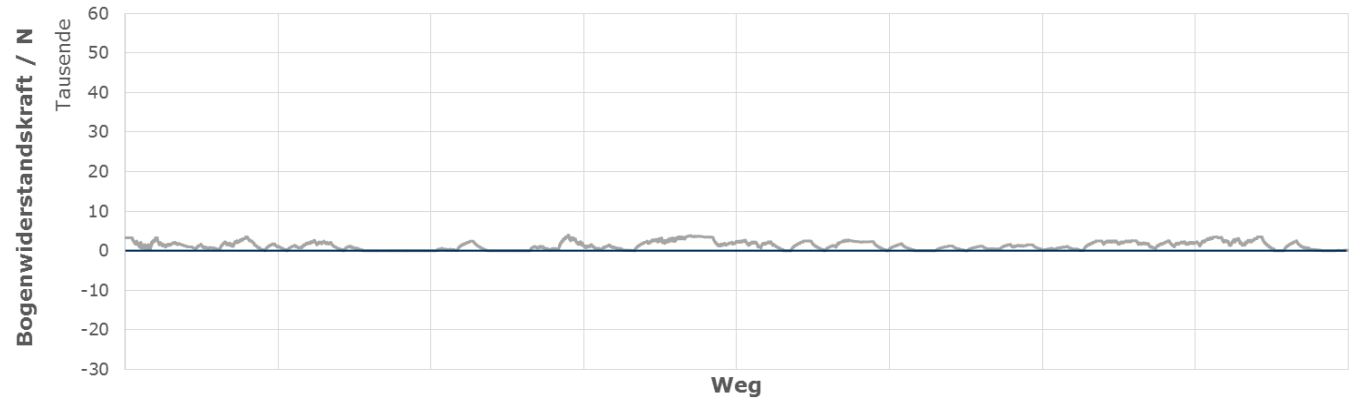
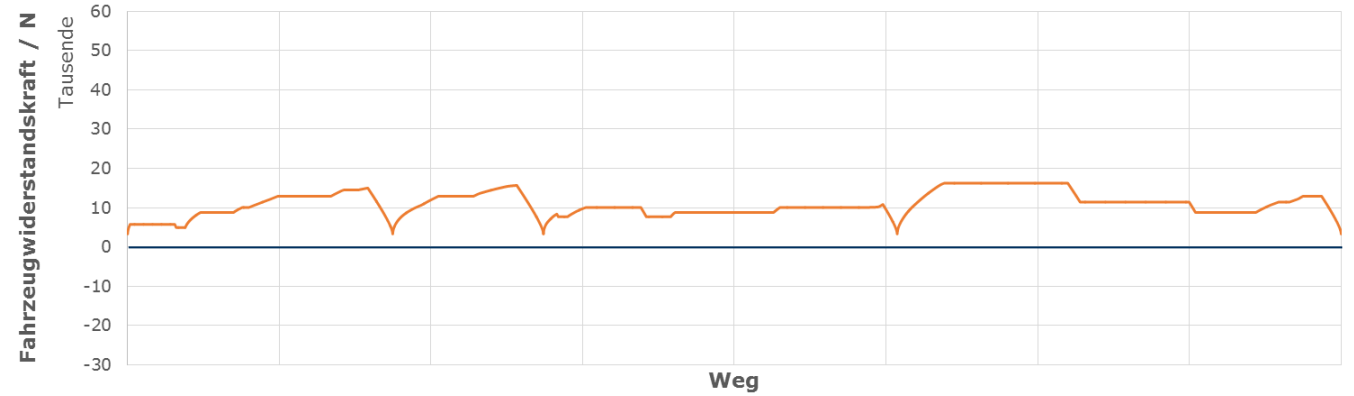
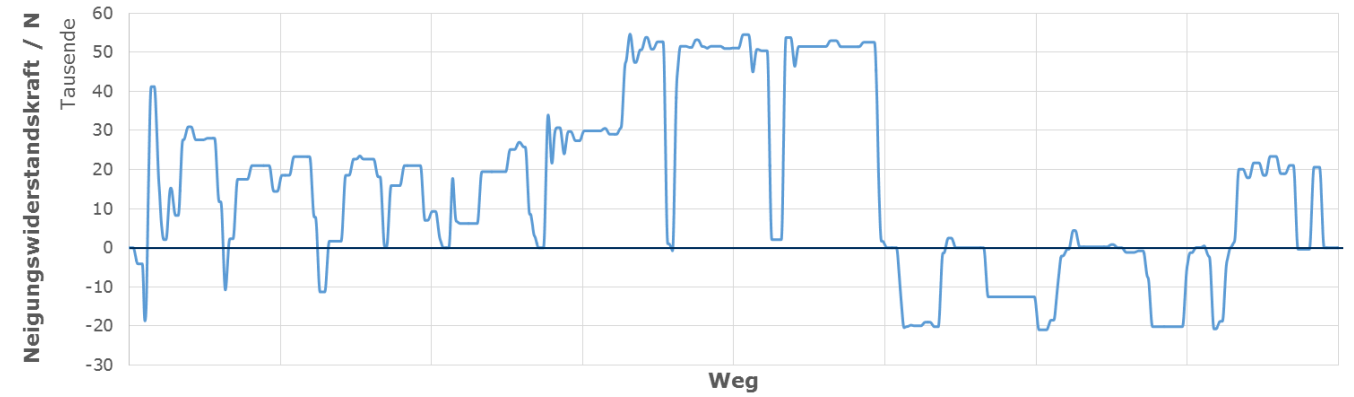
Dresden –  
Klingenberg-Colmnitz



Neigungswiderstand

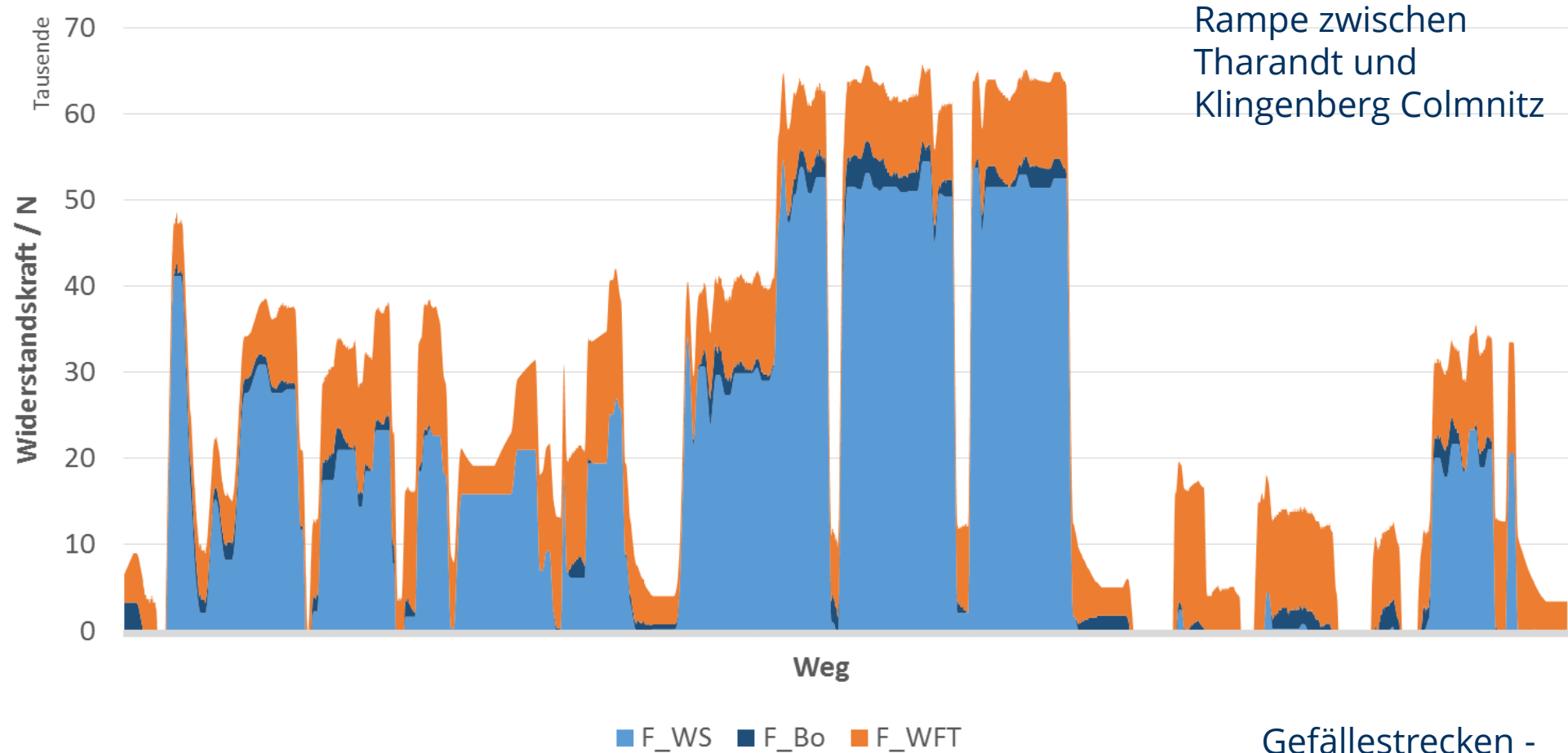
Fahrzeugwiderstand

Gleisbogenwiderstand



# Fahrwiderstandsanteile

Dresden –  
Klingenberg-Colmnitz



Rampe zwischen  
Tharandt und  
Klingenberg Colmnitz

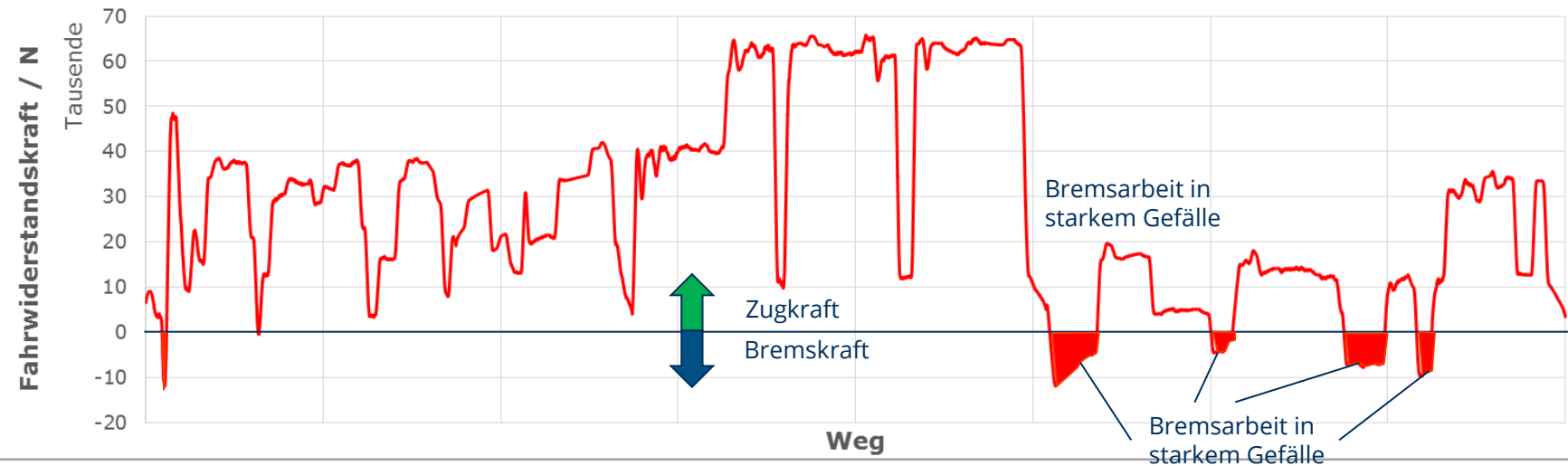
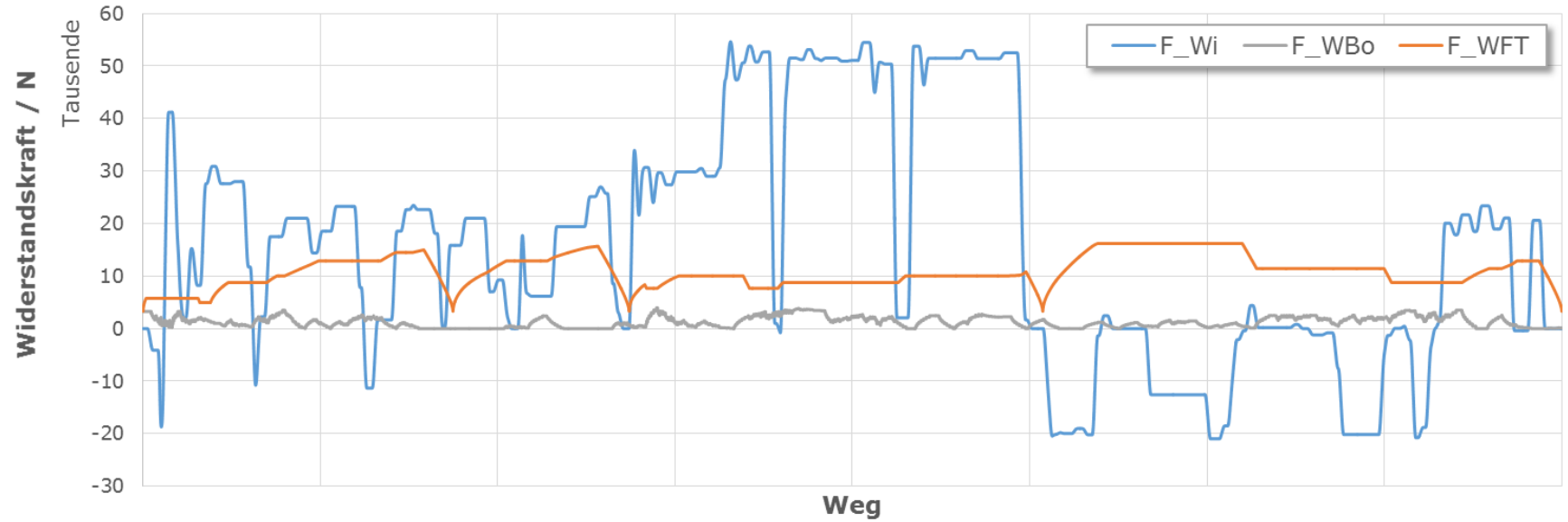
Gleisbogen nach Ausfahrt  
DD Hbf in Richtung Freital

Gleisbogen vor  
Bf. Klingenberg-Colmnitz

Gefällestrecken -  
Neigungswider-  
stand wirkt be-  
schleunigend

# Fahrwiderstandsanteile

Dresden –  
Klingenberg-Colmnitz

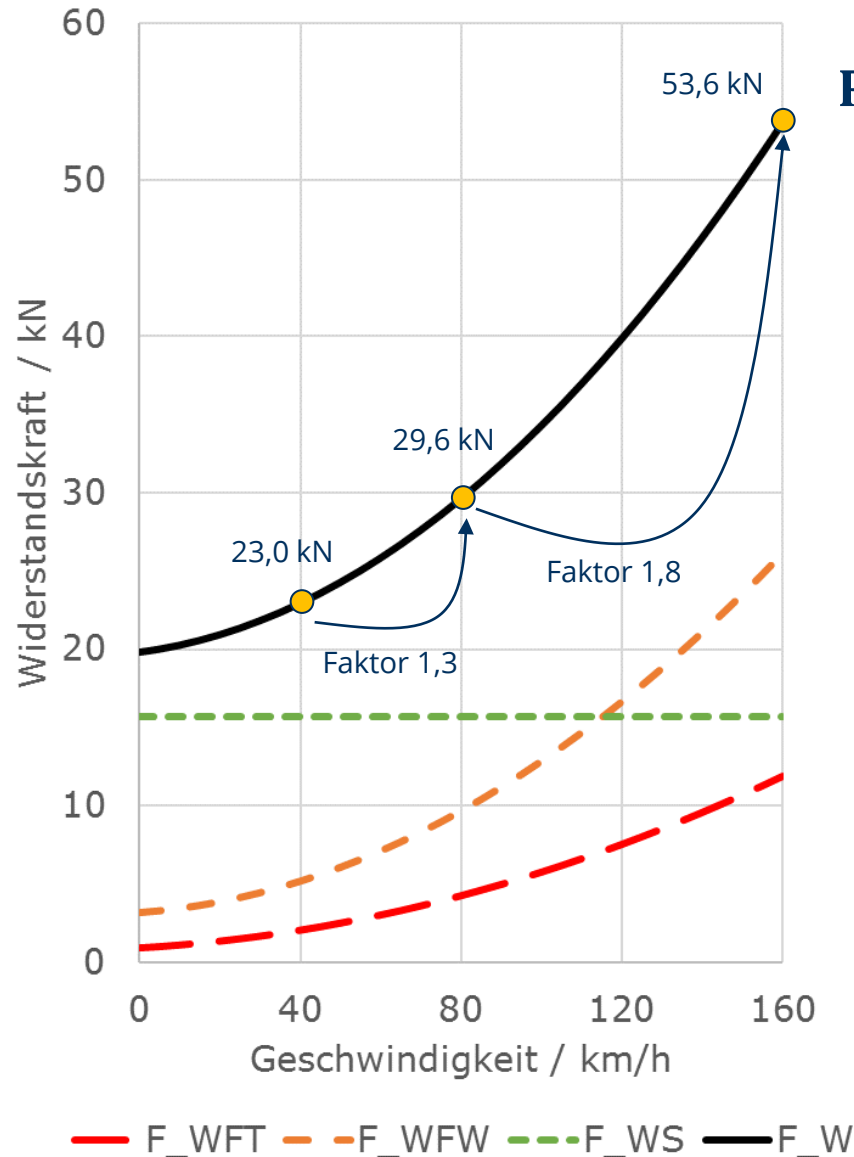


# Fahrwiderstand und Leistungsbedarf

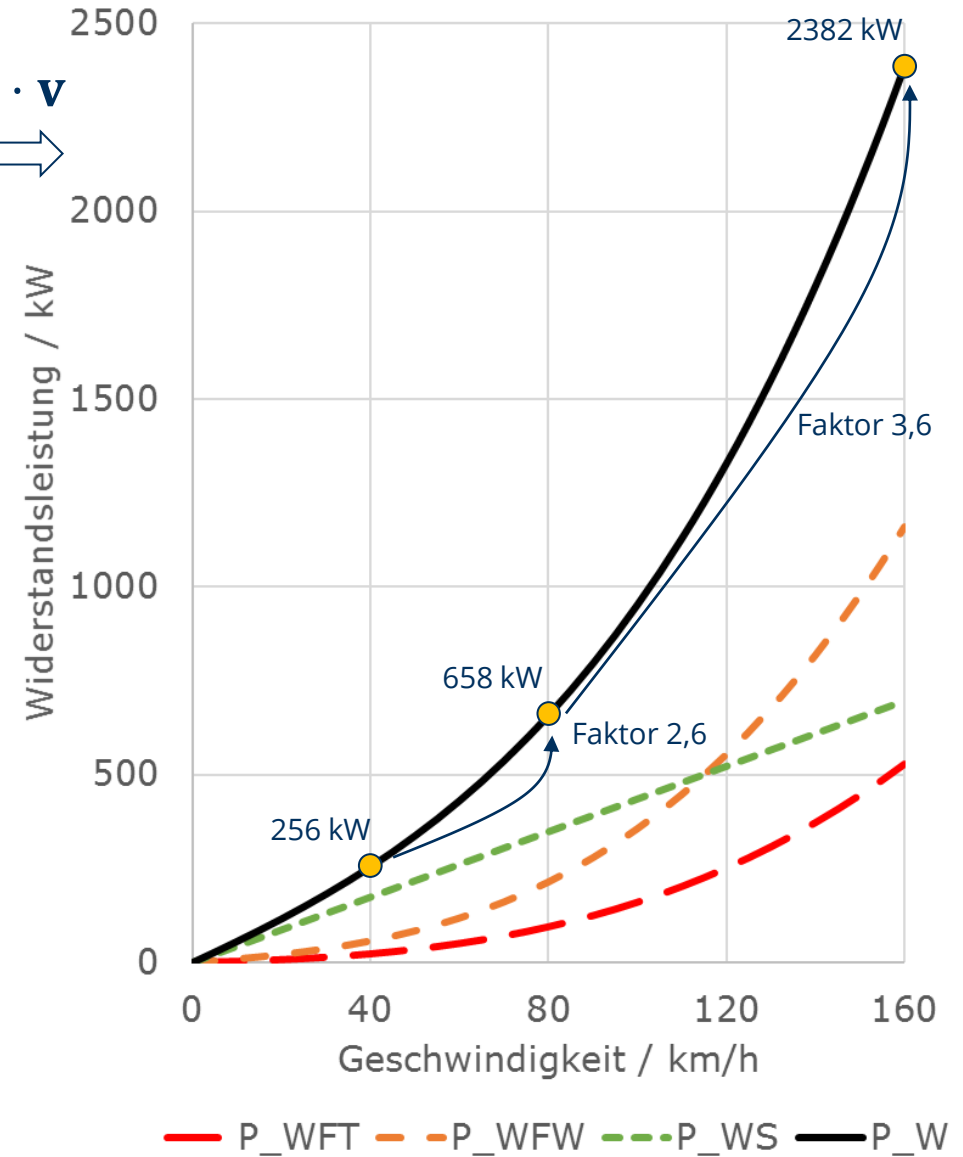


© M. Kache

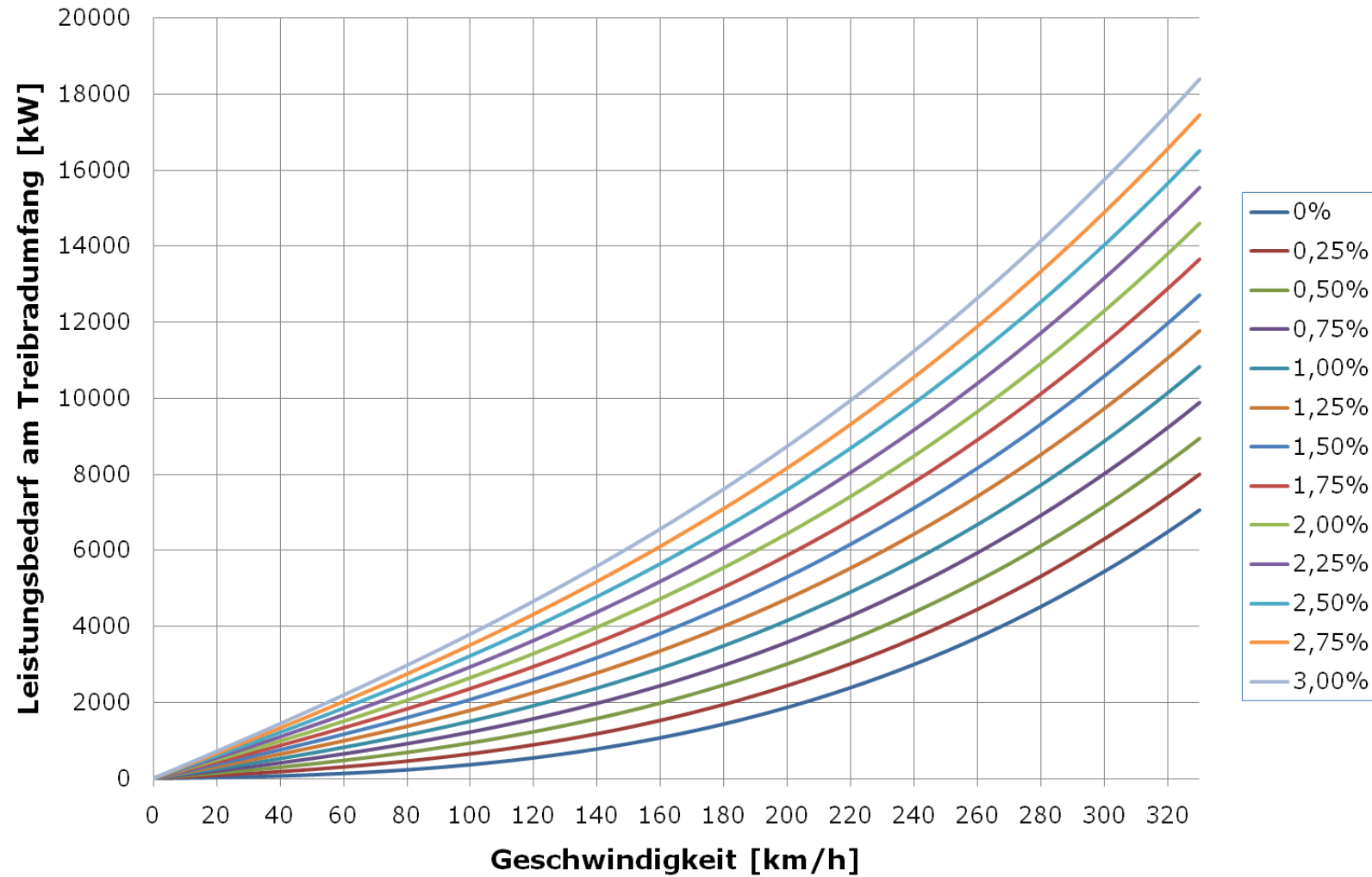
Bsp: Reisezug



$$P = F \cdot v$$



# Fahrwiderstand und Leistungsbedarf



© M. Kache

**TGV Duplex: ca. 9,3 MW**



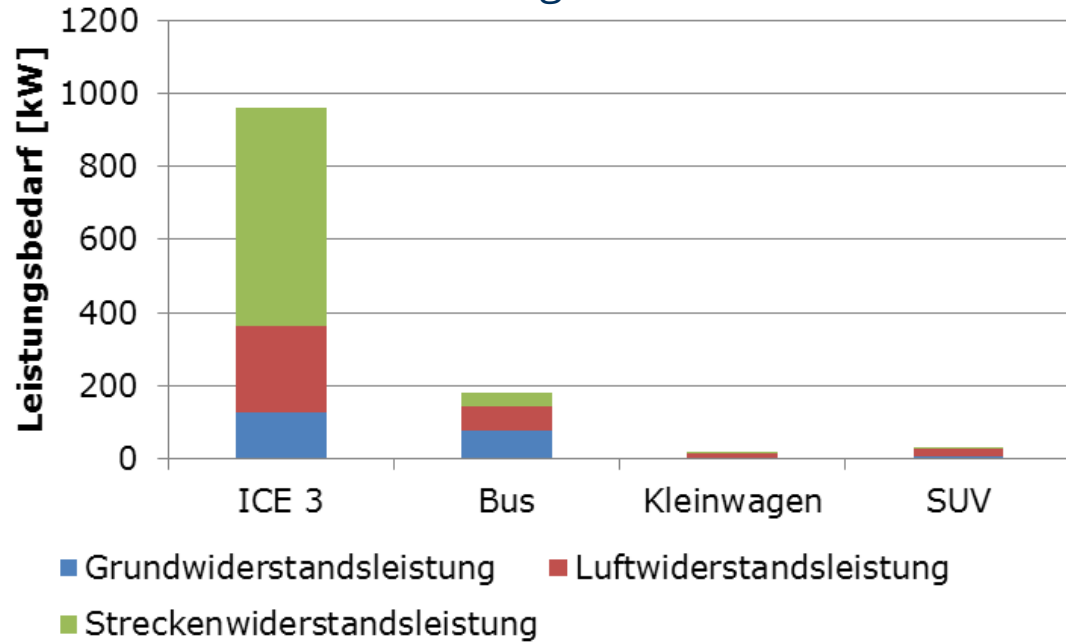
© M. Kache

**ICE 3: ca. 8 MW**

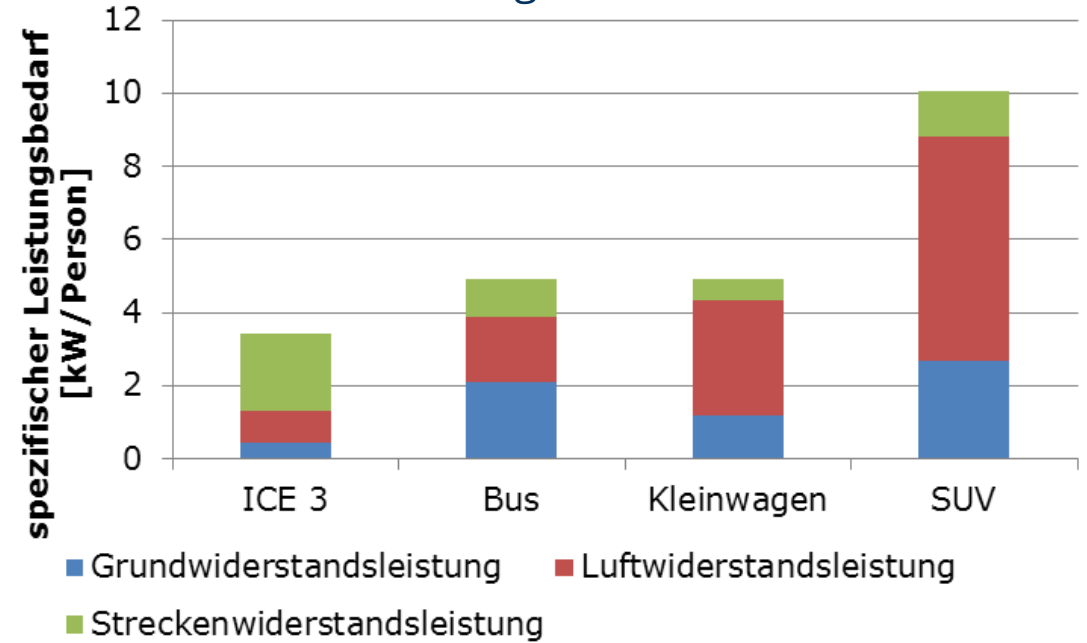
# Leistungsbedarf der Fahrwiderstände

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

absoluter Leistungsbedarf

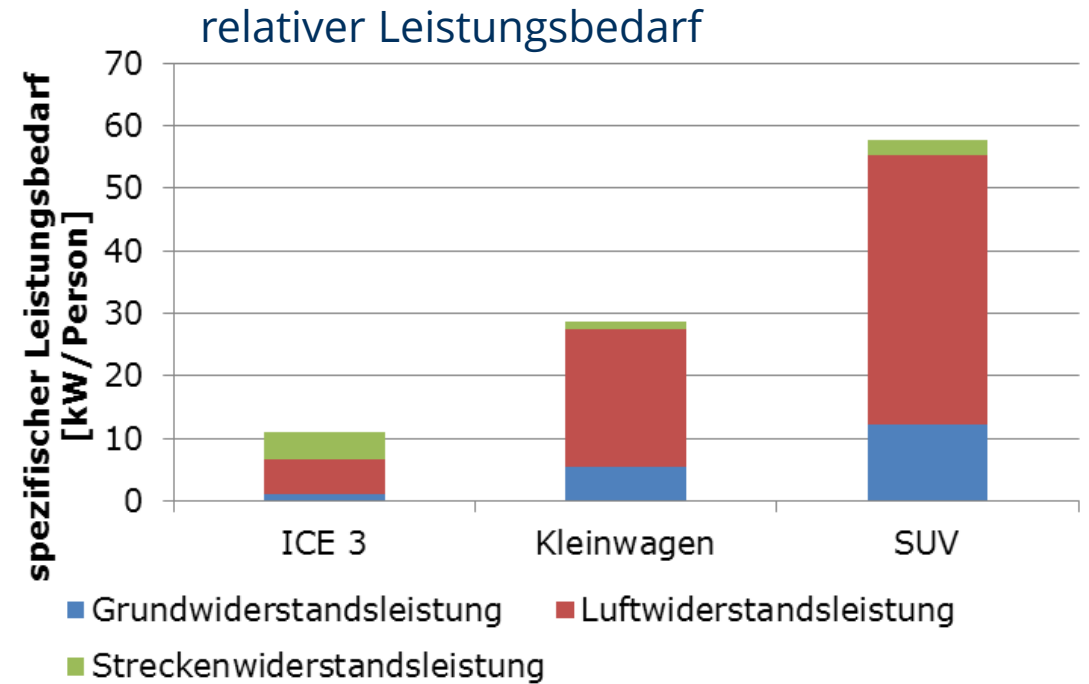
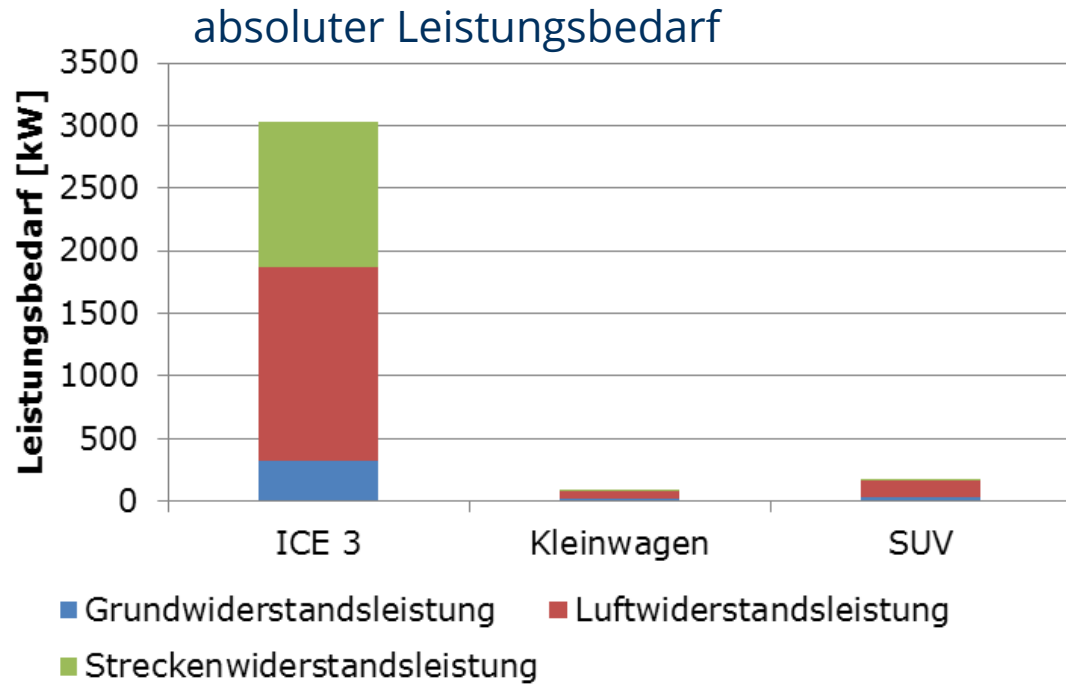


relativer Leistungsbedarf



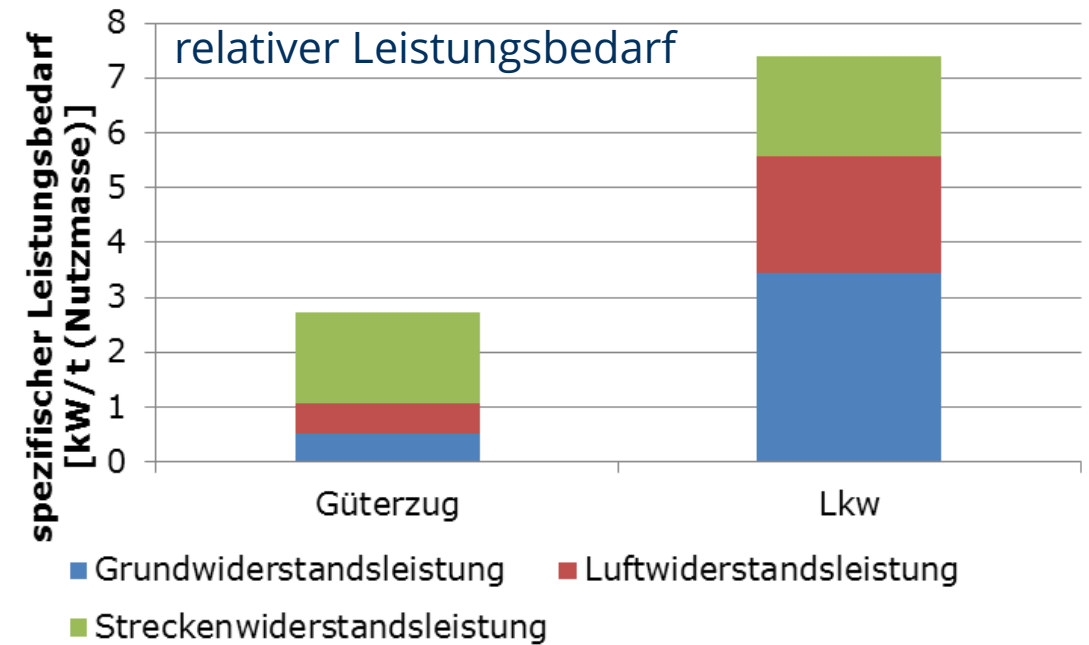
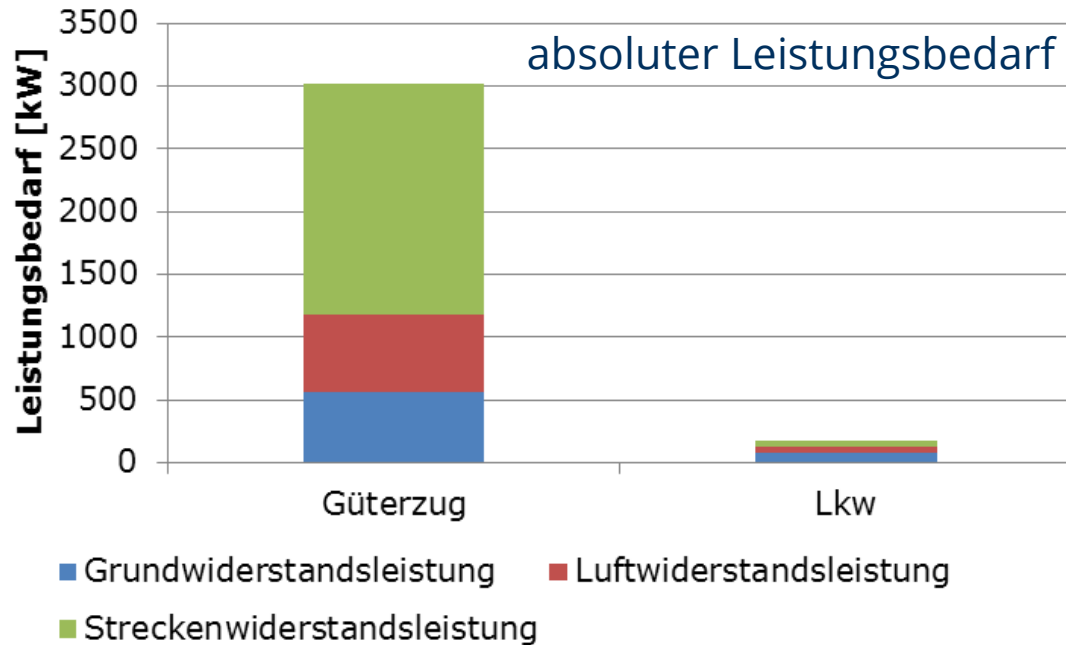
# Leistungsbedarf der Fahrwiderstände

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



# Leistungsbedarf der Fahrwiderstände

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



# Verzeichnis der verwendeten Symbole (Fahrodynamik)

A,B,C	Koeffizienten der empirischen Fahrzeugwiderstandsgleichungen	n	Drehzahl
$A_{\text{Norm}}$	Norm-Querschnittsfläche von Schienenfahrzeugen (10 m <sup>2</sup> )	$P_T$	Leistung am Treibradumfang (installierte) Traktionsleistung
$A_{\text{TUQ}}$	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
$f_{\text{Bo}}$	spezifische Bogenwiderstandskraft	T	Temperatur
$F_N$	Normalkraft	t	Zeit
$F_{\text{WFT}}$	Triebfahrzeugwiderstandskraft	v	Geschwindigkeit
$F_{\text{WFW}}$	Wagenzugwiderstandskraft	$v_{\text{ü}}$	Übergangsgeschwindigkeit
$f_{\text{WFW}}$	spezifische Wagenzugwiderstandskraft (bezüglich der Gewichtskraft $m_w \cdot g$ )	$\Delta v$	Gegenwindzuschlag (in empirischen Fahrzeugwiderstandsgleichungen)
$F_{\text{WS}}$	Streckenwiderstandskraft	u	Ruck
$F_{\text{WS,i}}$	Neigungswiderstandskraft		
$f_{\text{WS}}$	spezifische Streckenwiderstandskraft (bezüglich der Gewichtskraft)	$\xi$	fahrdynamischer Massenfaktor
$F_T$	Zugkraft am Radumfang	$\alpha, \beta, \gamma$	Koeffizienten der spezifischen Wagenzugwiderstandsformeln
$F_Z$	Zugkraft am Zughaken	$\eta$	Wirkungsgrad
g	Erdbeschleunigung	$\mu$	Gleitreibungsbeiwert
i	Streckenlängsneigung	$\tau$	Kraftschlussbeiwert
J	Massenträgheitsmoment um die Hauptrotationsachse	$\omega$	Winkelgeschwindigkeit
$l_z$	Zuglänge		
M	Drehmoment		
m	Masse		
$m_T$	Triebfahrzeugmasse		
$m_W$	Wagenzugmasse		
$m_Z$	Zugmasse		
n	Drehzahl		