

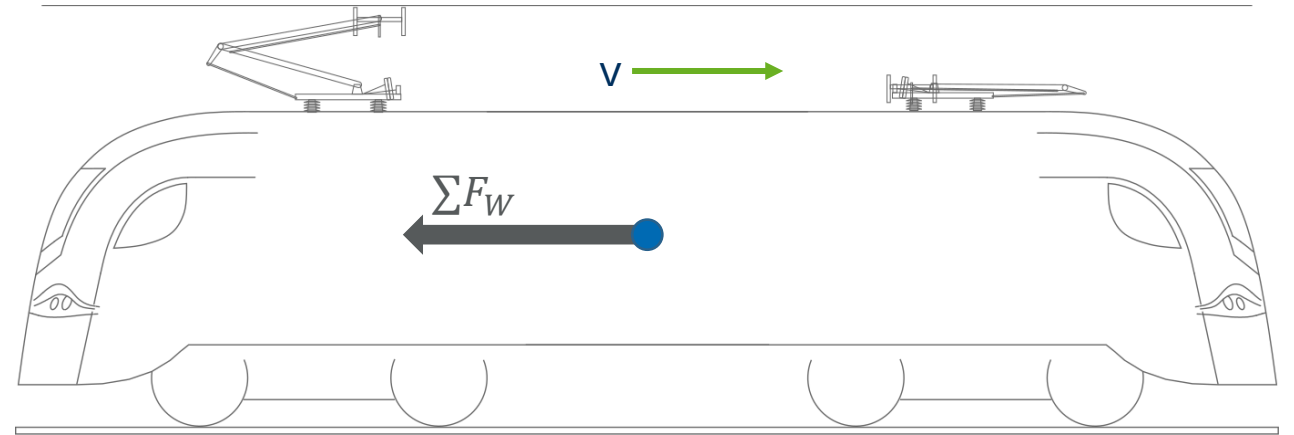
Dipl.-Ing. Tobias Bregulla  
Professur für Elektrische Bahnen

# Fahrdynamik für Verkehrsingenieure

## VL 02: Fahrwiderstandskräfte

Sommersemester 2022

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



# Fahrwiderstand – Größenordnung (Personenverkehr)

## Triebwagen



ca. 100 t

Fahrzeugwiderstand bei 100 km/h  
in der Ebene:

**6,4 kN**

Fahrzeugwiderstand je Passagier  
bei 67% Auslastung (90 Pers.):

**71 N/Pers.**

Massenspezifischer Fahrzeugwiderstand  
bei 67% Auslastung (90 Pers.):

**60 N/t**

## Reisebus



ca. 20 t

Fahrzeugwiderstand bei 100 km/h  
in der Ebene:

**3,7 kN**

Fahrzeugwiderstand je Passagier  
bei 67% Auslastung (40 Pers.):

**93 N/Pers.**

Massenspezifischer Fahrzeugwiderstand  
bei 67% Auslastung (40 Pers.):

**161 N/t**

# Fahrwiderstand – Größenordnung (Güterverkehr)

## Güterzug



$m_z = 1600 \text{ t}$

Nutzlast: 1224 t

Fahrzeugwiderstand bei 80 km/h  
in der Ebene:

**45,3 kN**

Fahrzeugwiderstand je Tonne:

**28 N/t**

Fahrzeugwiderstand je Tonne Nutzlast:

**37 N/t**

## Lkw



$m = 40 \text{ t}$

Nutzlast: 28 t

Fahrzeugwiderstand bei 80 km/h  
in der Ebene:

**5,7 kN**

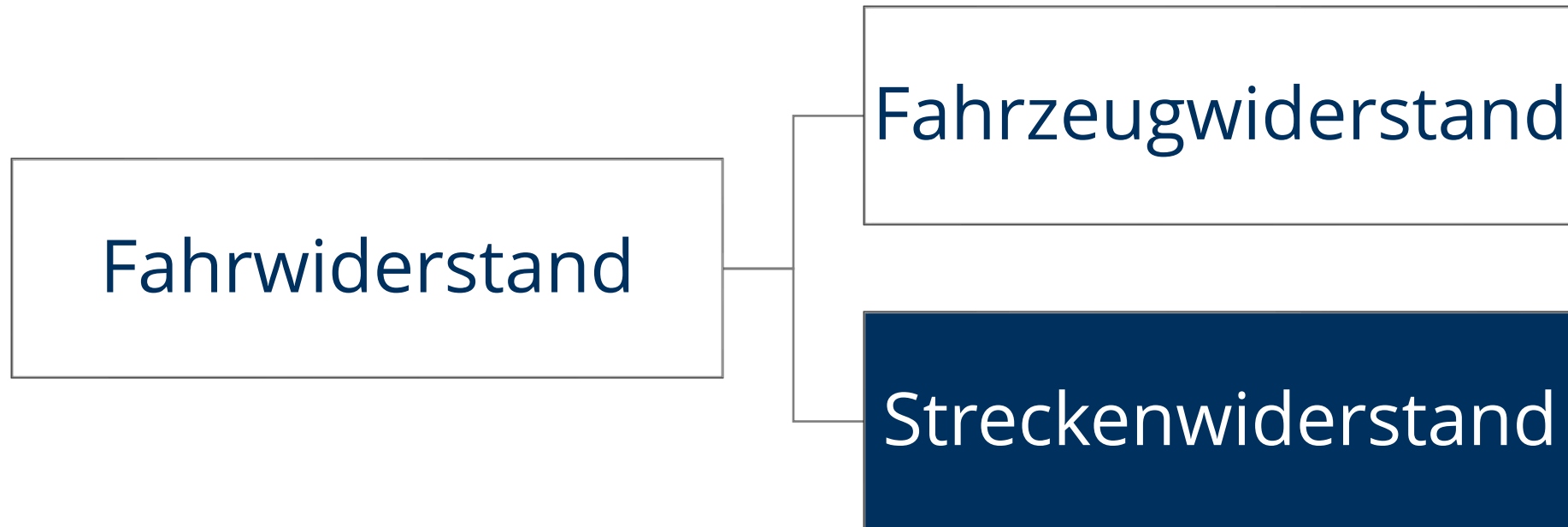
Fahrzeugwiderstand je Tonne:

**142 N/t**

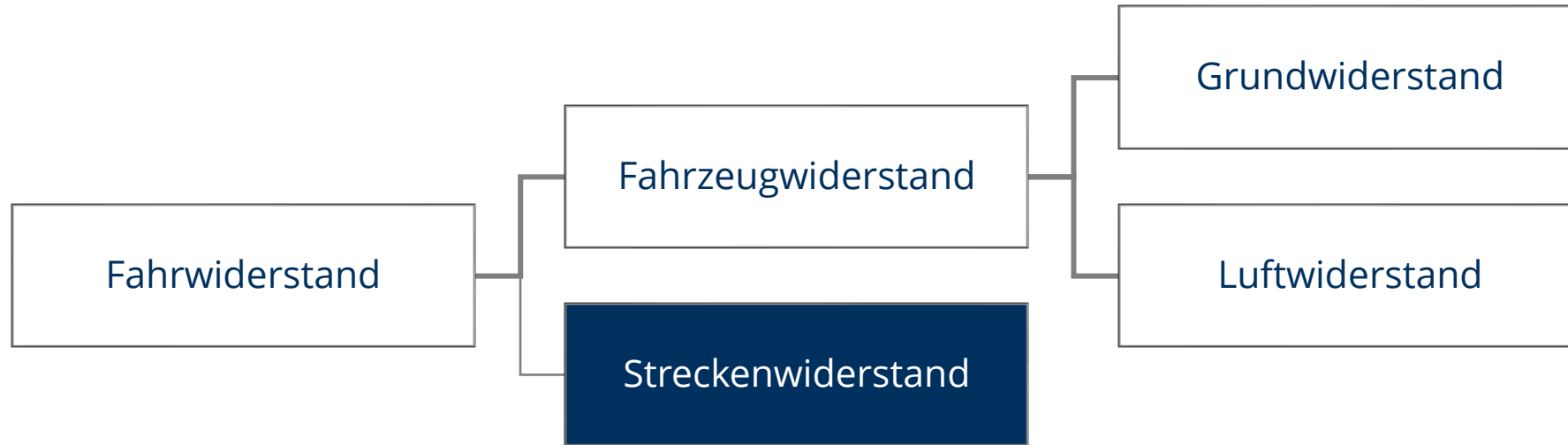
Fahrzeugwiderstand je Tonne Nutzlast:

**204 N/t**

# Fahrwiderstand - Widerstandshierarchie

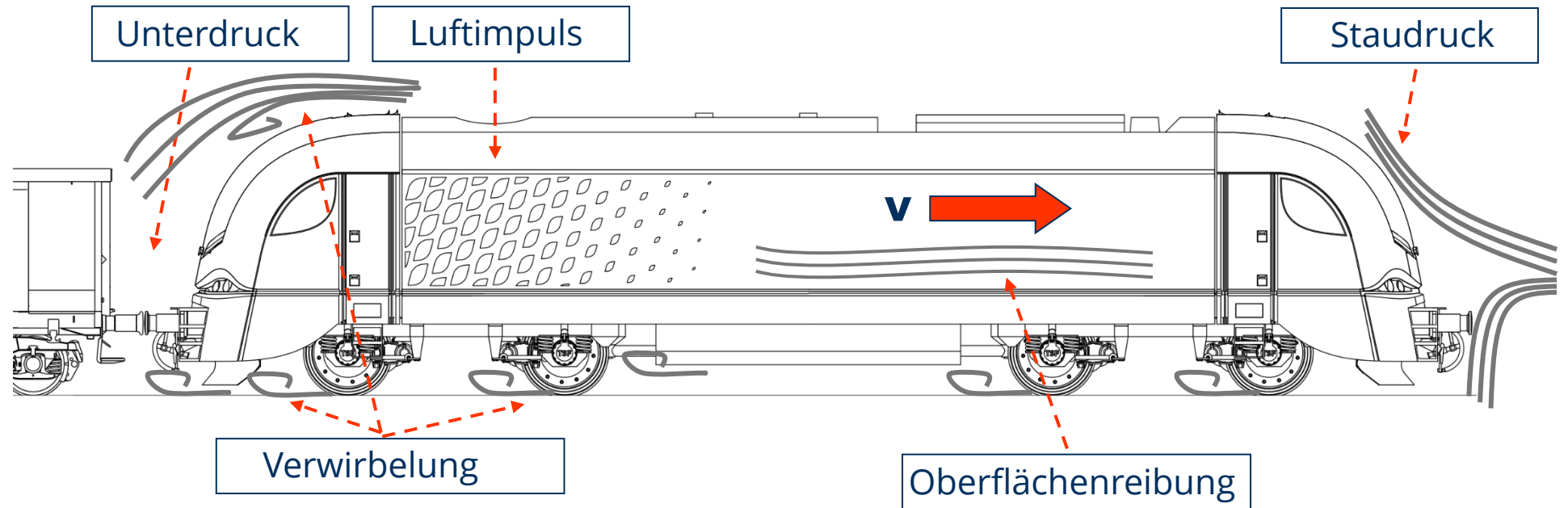


# Fahrwiderstand - Widerstandshierarchie

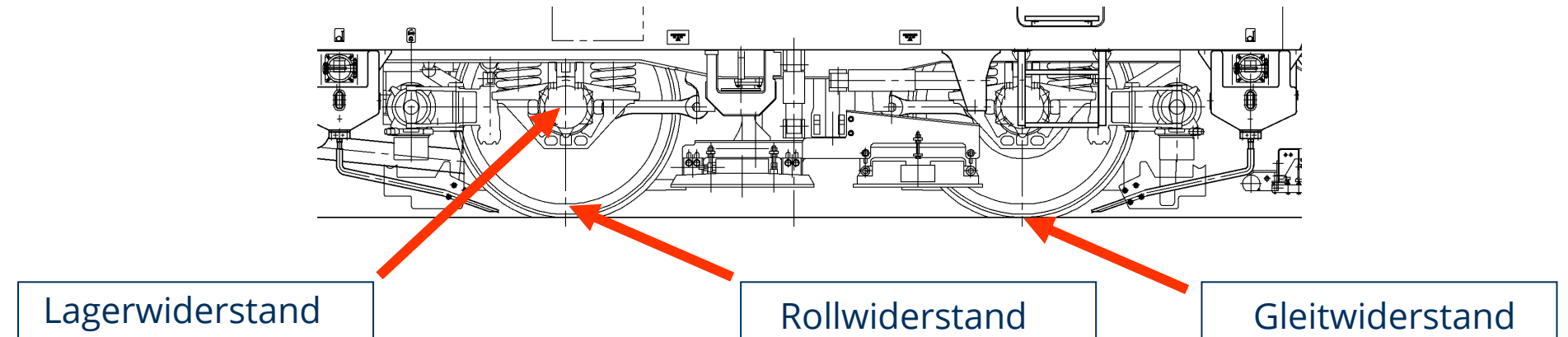


# Fahrzeugwiderstand - Entstehung

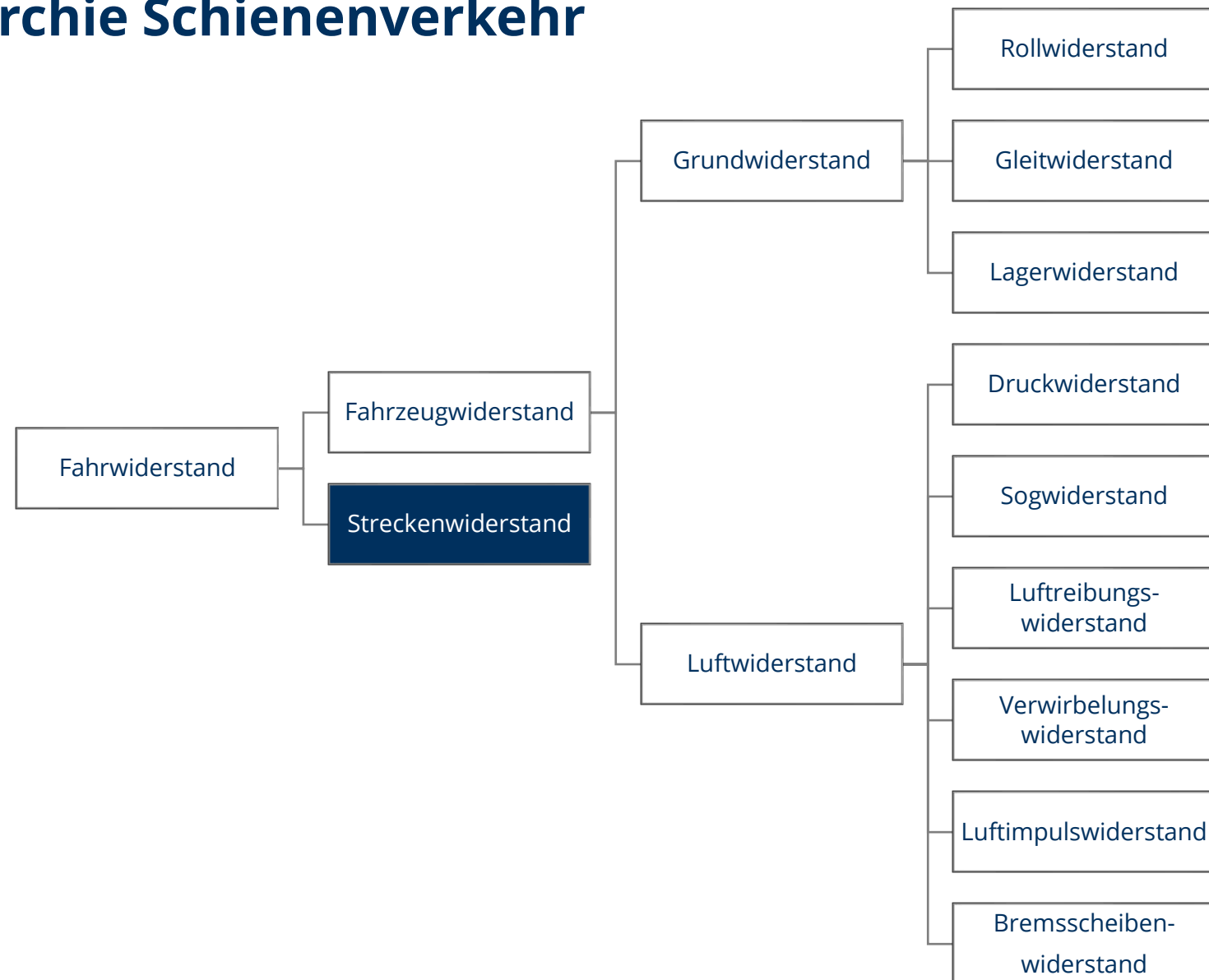
## Luftwiderstand



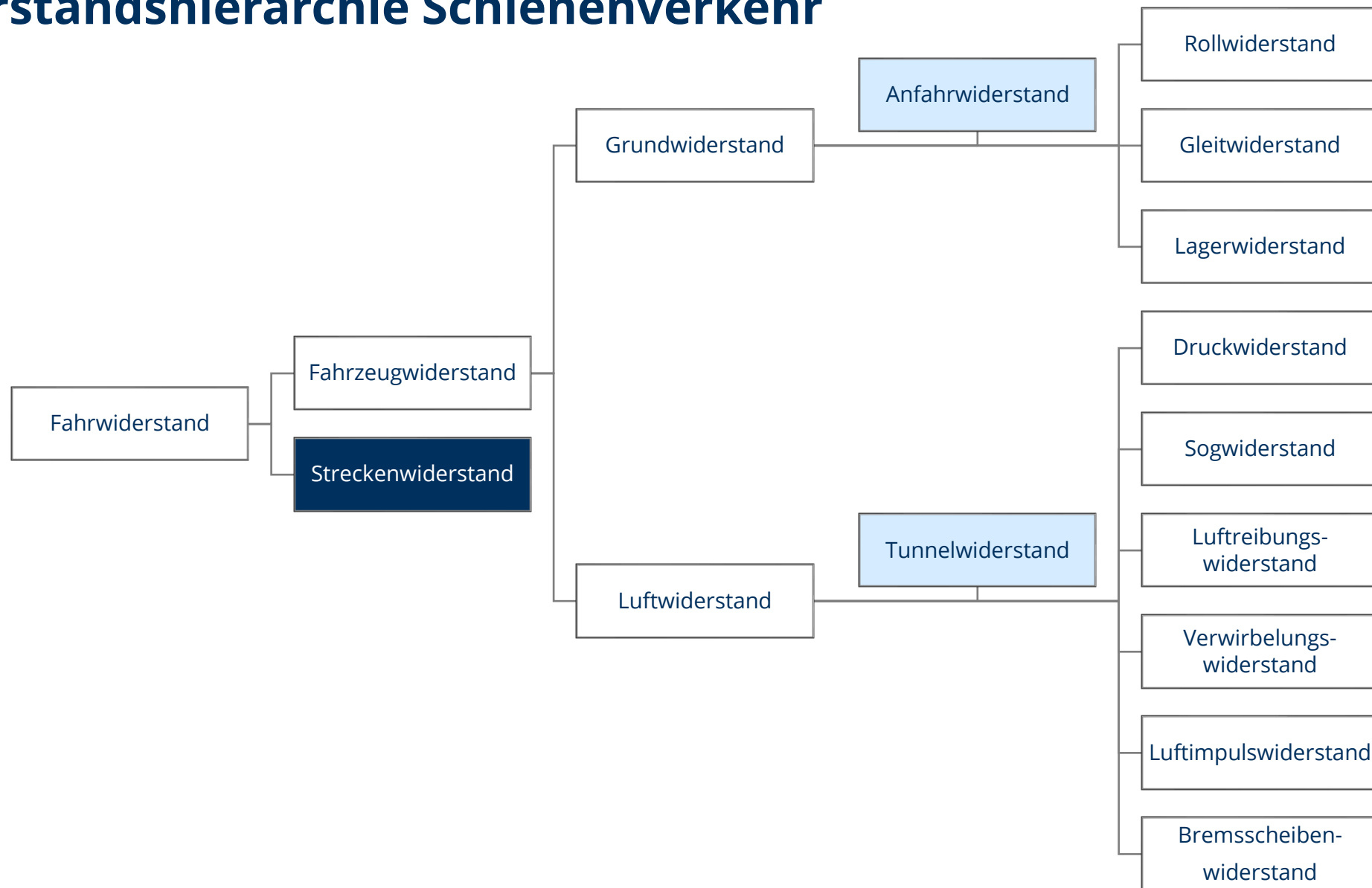
## Grundwiderstand



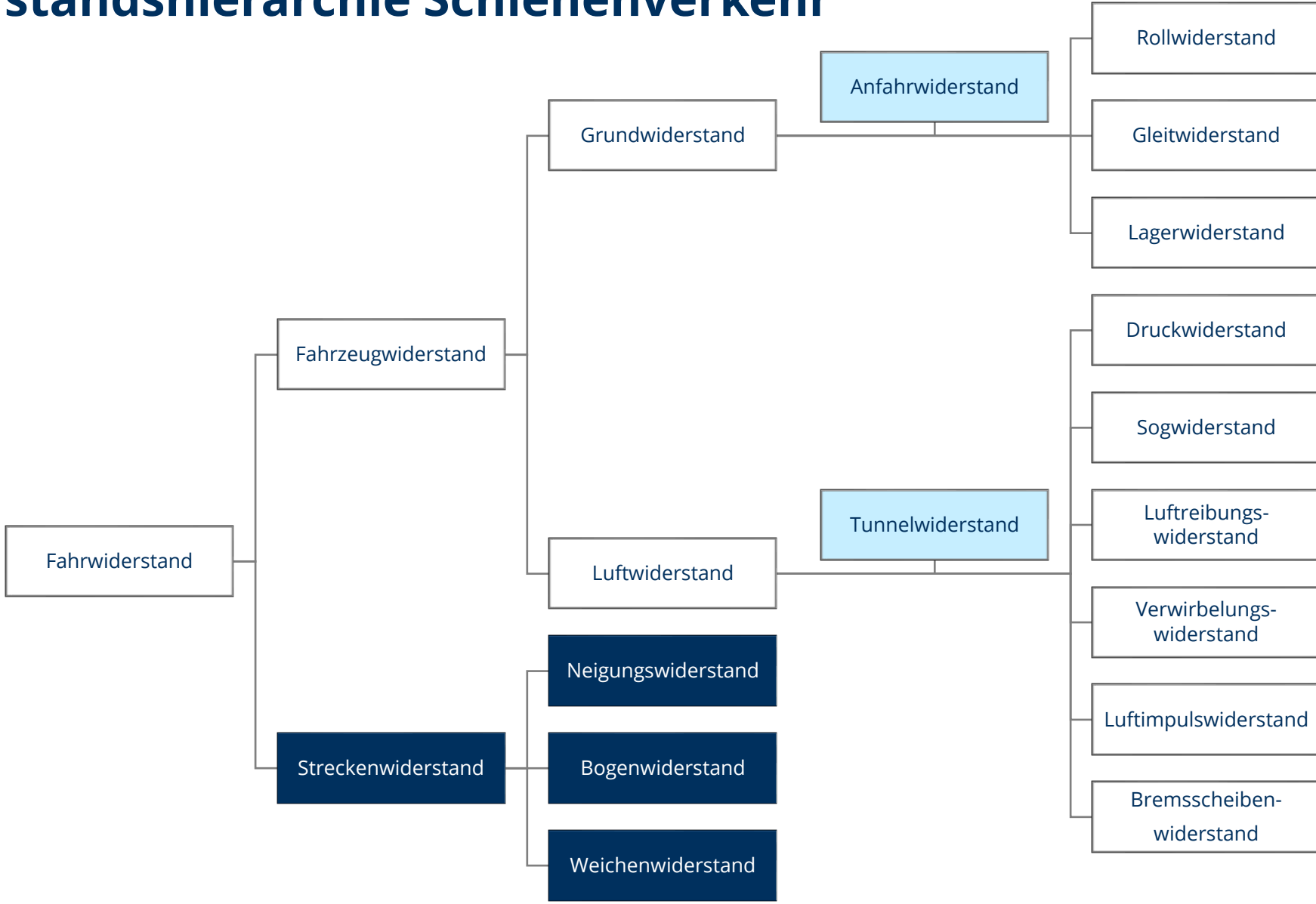
# Fahrwiderstandshierarchie Schienenverkehr



# Fahrwiderstandshierarchie Schienenverkehr



# Fahrwiderstandshierarchie Schienenverkehr

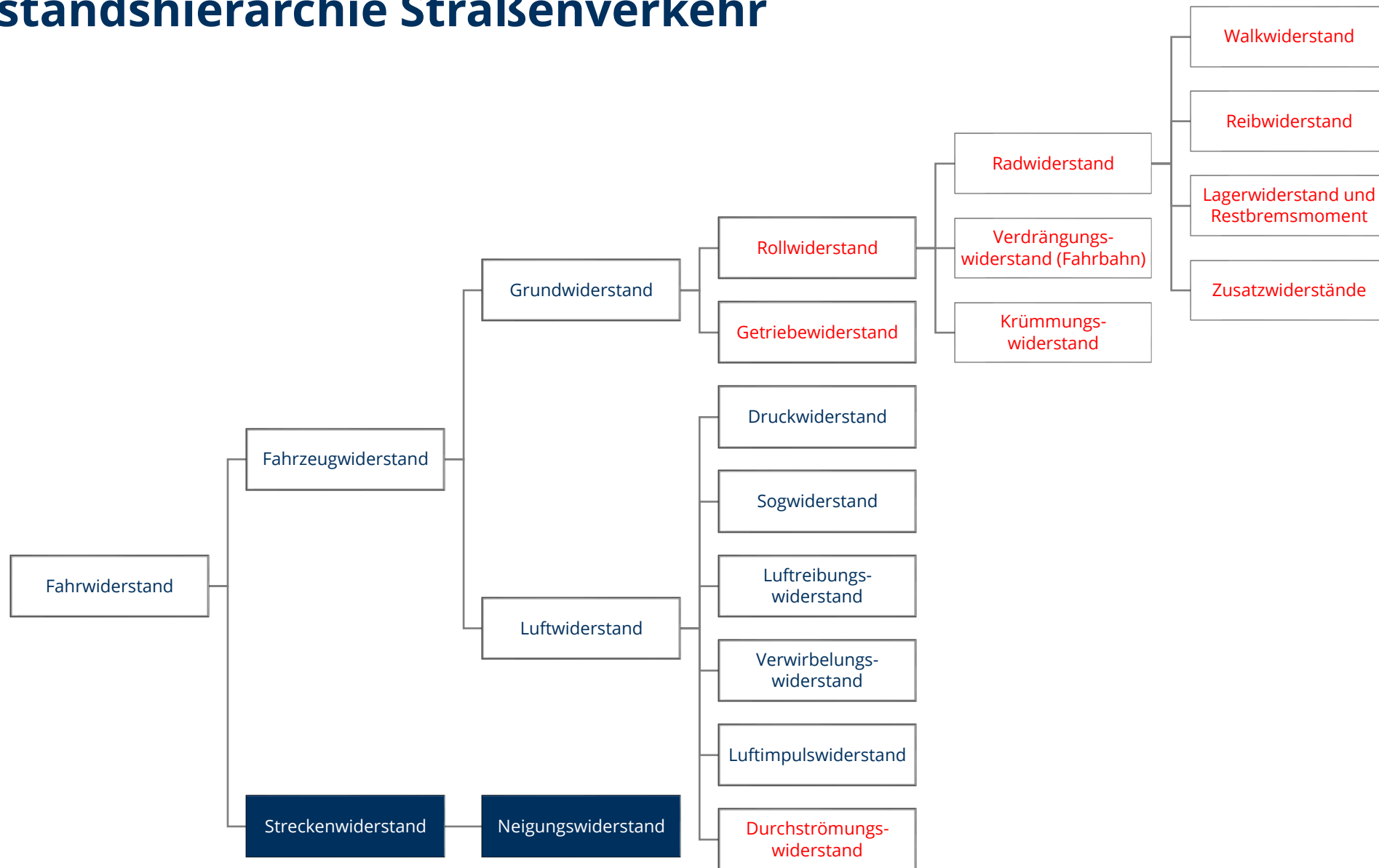


# Fahrwiderstands- hierarchie der Straßenfahrzeuge



© M. Kache

# Fahrwiderstandshierarchie Straßenverkehr



# Infrastrukturseitige Einflussfaktoren



- Gleislage
- Verbindung der Schienen
- Art des Oberbaus



# Fahrzeugwiderstand – Einfluss Fahrweg

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: Schiene vs. Straße

Reisezugwagen



Fahrzeugmasse: ca. 40-45 t

spezifischer Rollwiderstand: 0,0007...0,0033

absolute Rollwiderstandskraft: 0,27...1,3 kN

(Quelle: Messungen DB)

Reisebus



Fahrzeugmasse: ca. 18 t

spezifischer Rollwiderstand: 0,0100

absolute Rollwiderstandskraft: ca. 1,8 kN

Extremer „Schlechtläufer“

Extremer „Gutläufer“

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

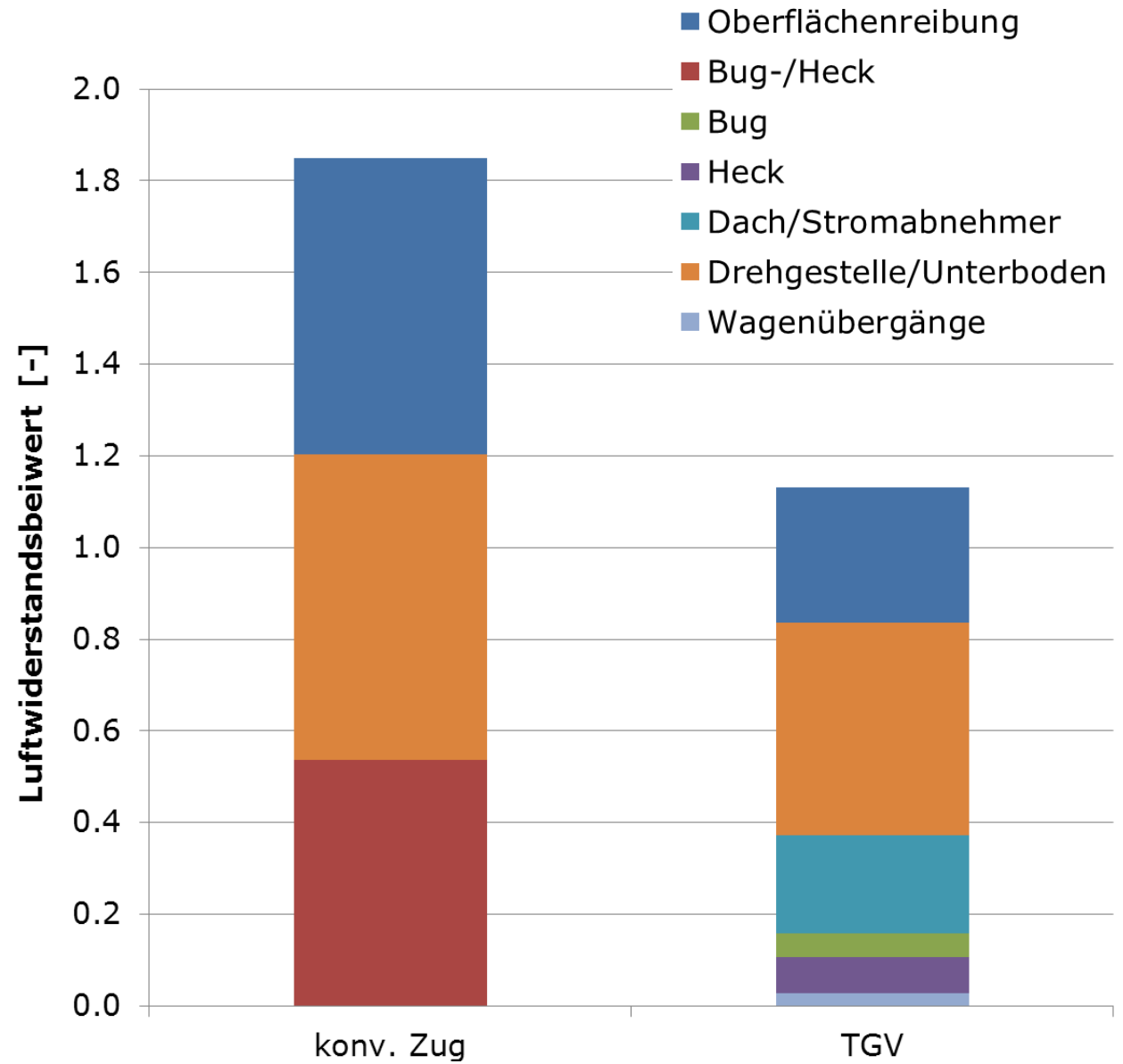
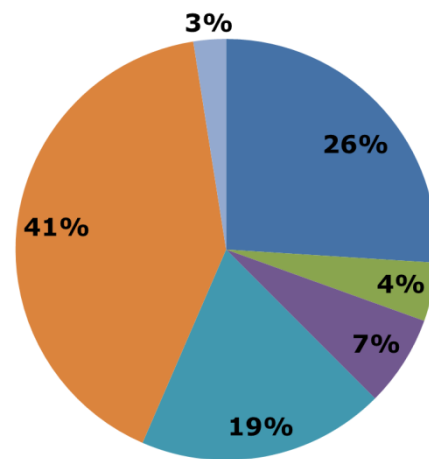
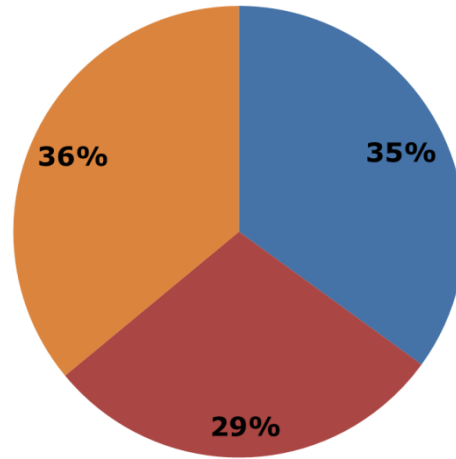
**Daumenregel: Rollwiderstand Straße = 10 x Rollwiderstand Schiene**

# Luftwiderstand



Foto: M. Kache

# Luftwiderstandskomponenten bei Zügen



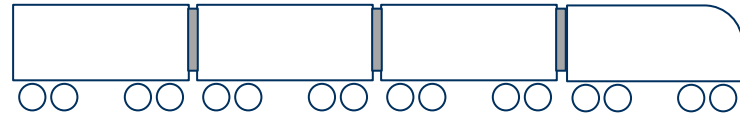
# Einflussfaktoren Luftwiderstand von Zügen



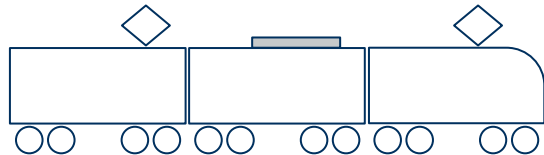
Formgebung Bug/Heck



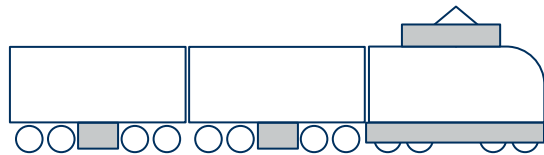
Zuglänge



Wagenübergänge



Dachausrüstung



Verkleidungen



Fahrwerksart

# Luftwiderstand und HGV



# Luftwiderstand und (Güter-)Zugart

Bsp. 1: Containerzug mit unvollkommener Beladung



Bsp. 2: Güterganzzug mit Kesselwagen



Fotos:  
Johannes Stier

# $c_w$ – Werte ausgewählter Fahrzeugarten



© M. Kache

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



© M. Kache

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



© M. Kache

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



© M. Kache

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



© M. Kache

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



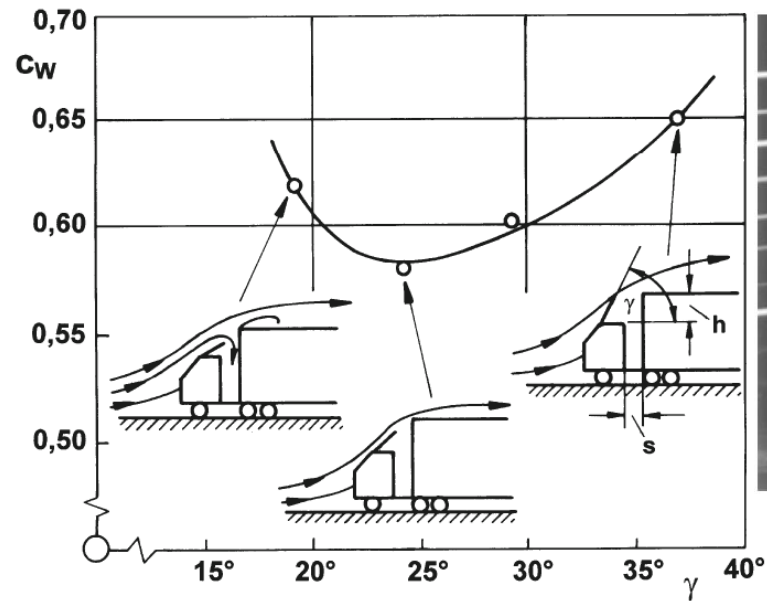
Lkw (Lastzug):  $c_w \approx 0,58...0,88$



© M. Kache

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

# Aerodynamische Optimierung von Nutzfahrzeugen



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

# Tunnelwiderstand



## Ursachen:

- Behinderung der Luftströmung
- Luftreibung im Luftspalt zu Tunnelwänden

## Einflüsse:

- Tunnelquerschnitt
- Tunnellänge
- Rauheit der Tunnelwände

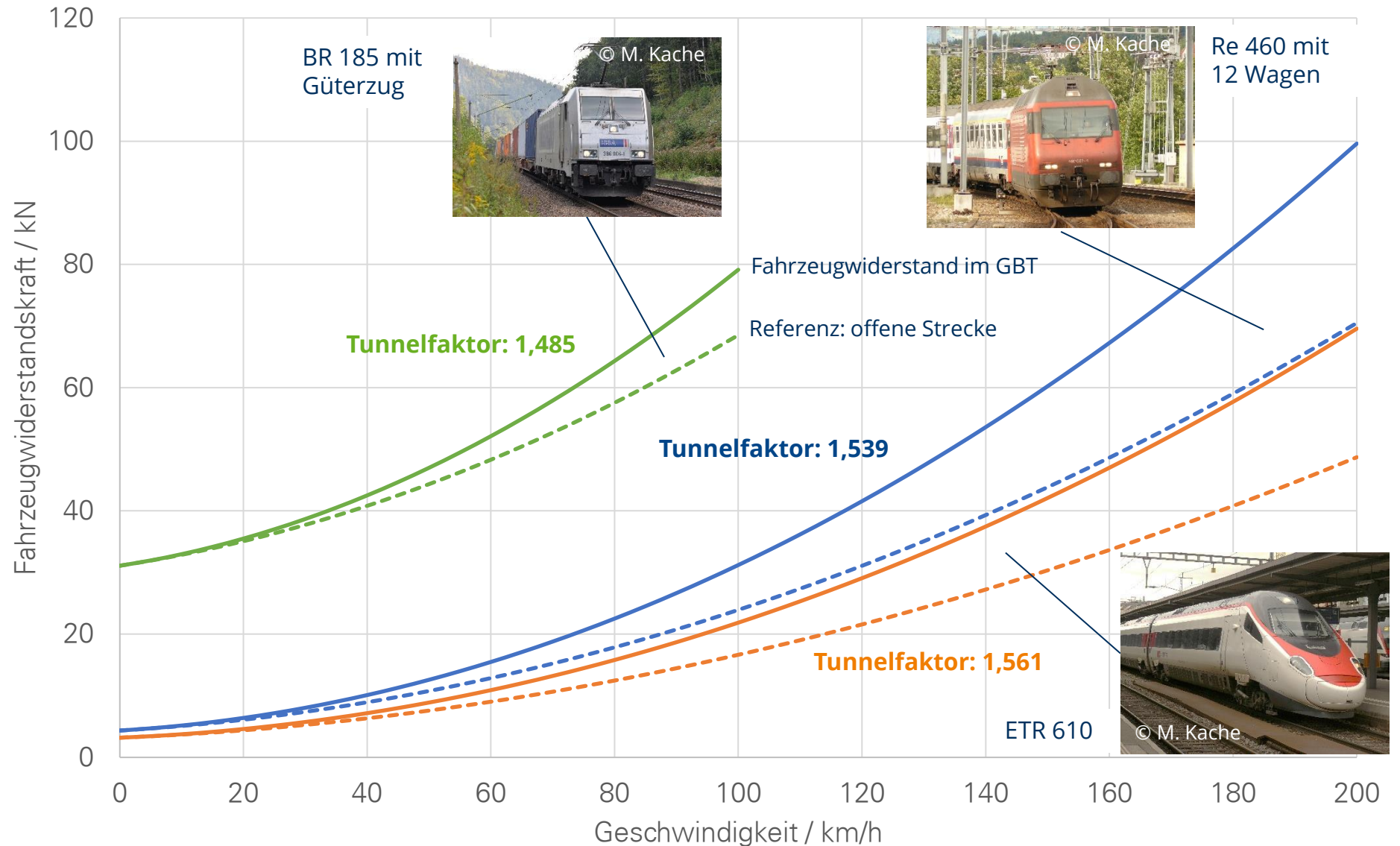
# Luftwiderstand im Gotthard-Basistunnel (GBT)



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.

# Zusammenfassung

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

spezifischer Grundwiderstand  
ca. 10 x kleiner als bei  
Straßenfahrzeugen

## Fahrzeugwiderstand

deutlich erhöht  
in Tunneln



dominant bei hohen  
Geschwindigkeiten

beeinflussbar  
durch  
Fahrzeugkonfiguration

Rollen, Gleiten, Lager

an das **rollende Rad** gebunden

Grundwiderstand

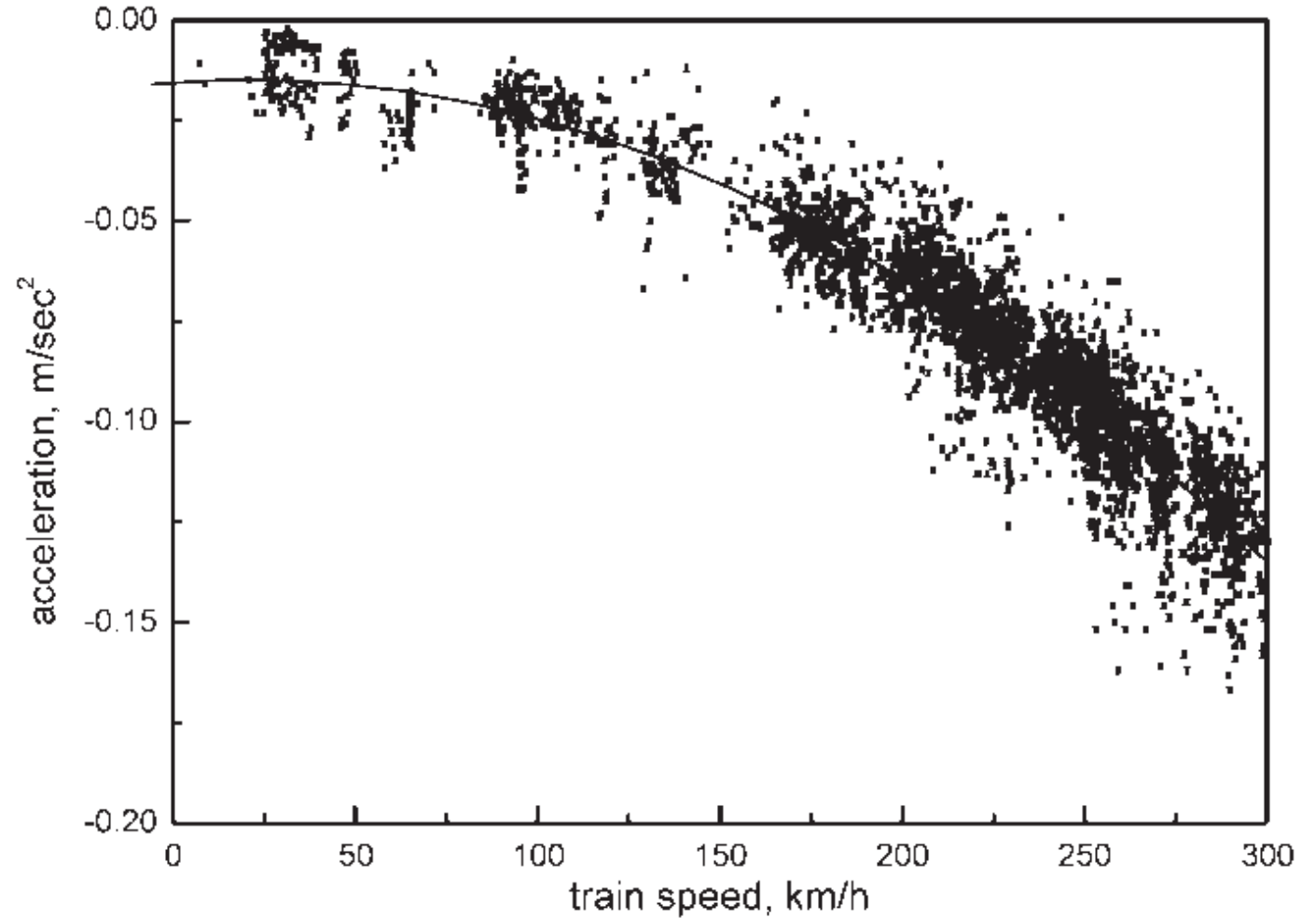
Luftwiderstand

resultiert aus der  
**Luftströmung** um das Fahrzeug

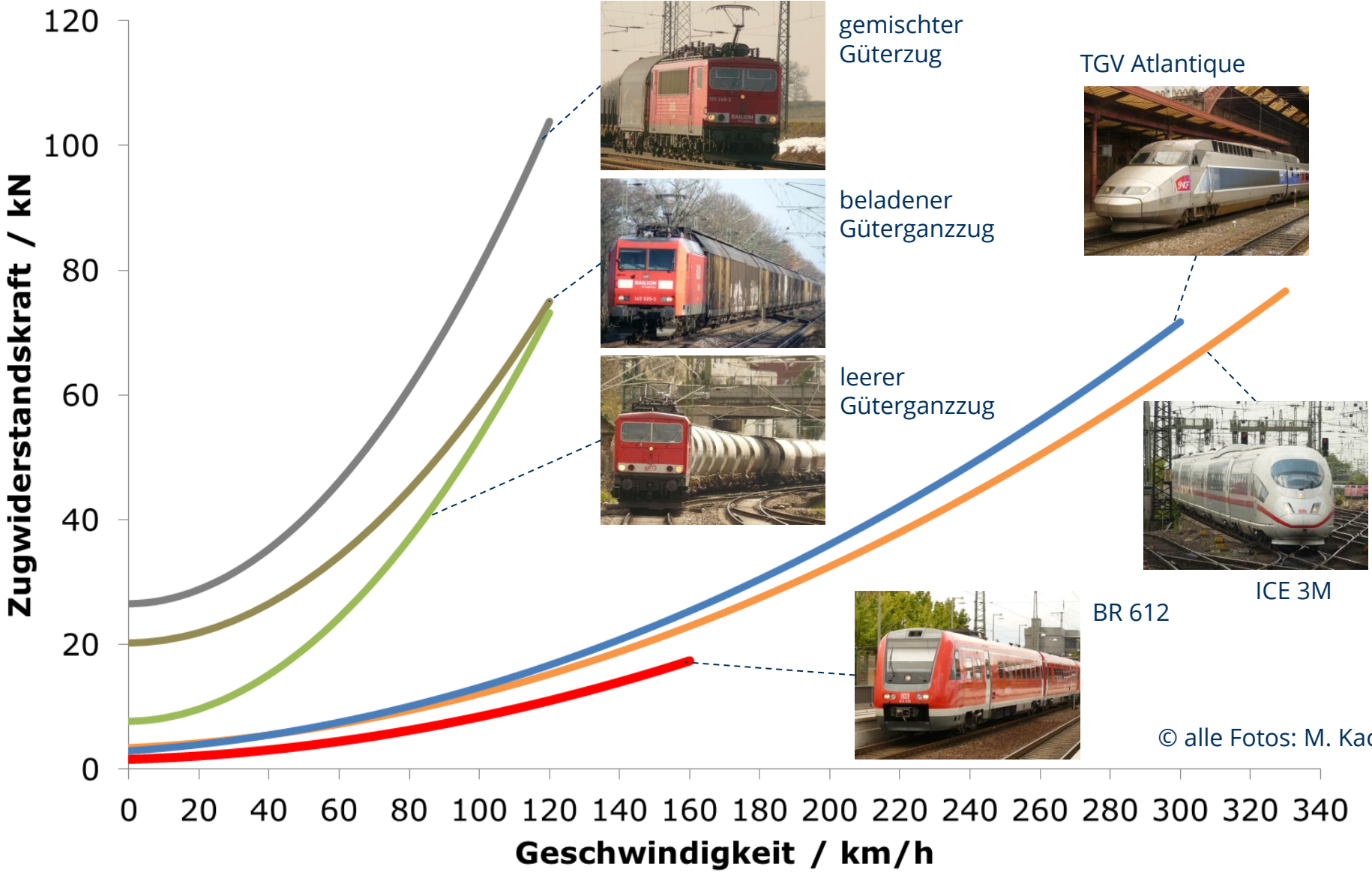
Druck, Sog, **Wirbel**,  
Oberflächenreibung,  
**Luftimpuls**

# Ermittlung von Fahrzeugwiderständen

Beispiel:  
HSR-350x (Südkorea) - Auslaufversuche

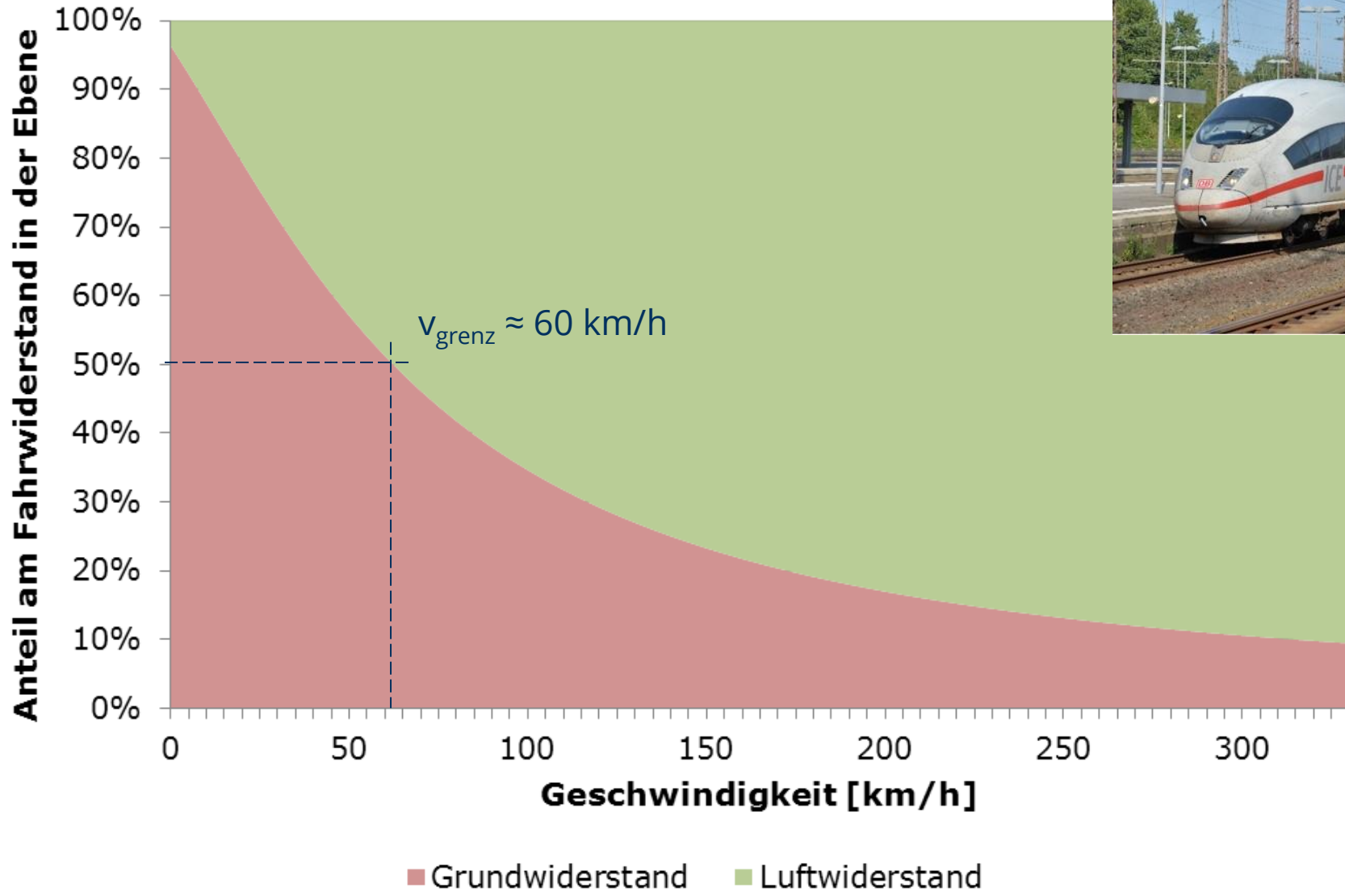


# Fahrzeugwiderstands-kräfte von Zügen



© alle Fotos: M. Kache

# Grund- vs. Luftwiderstand - Hochgeschwindigkeitszüge

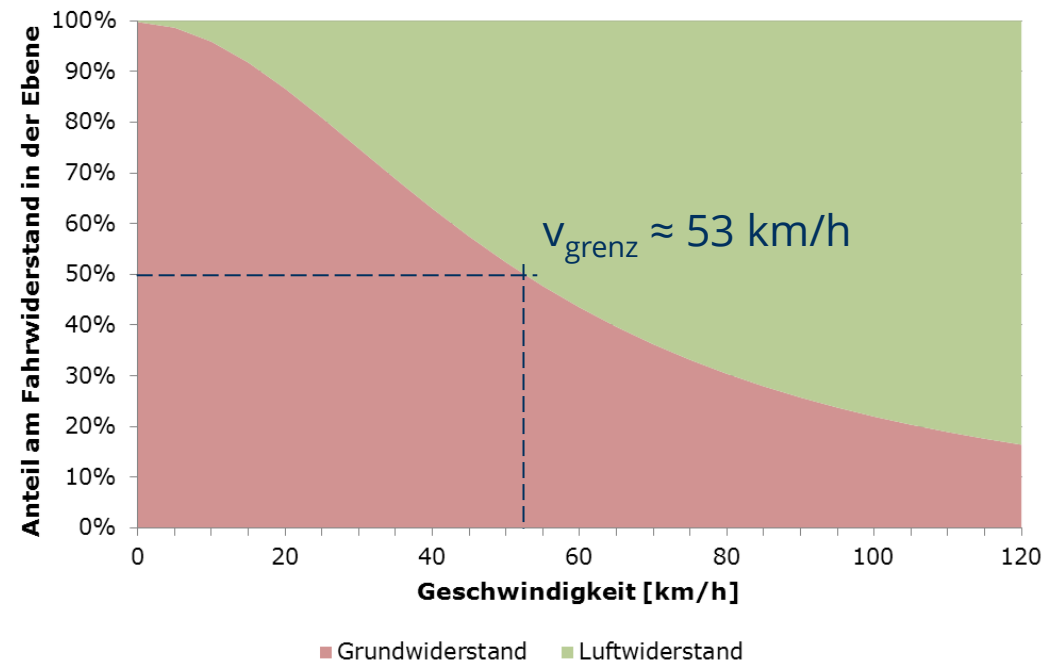
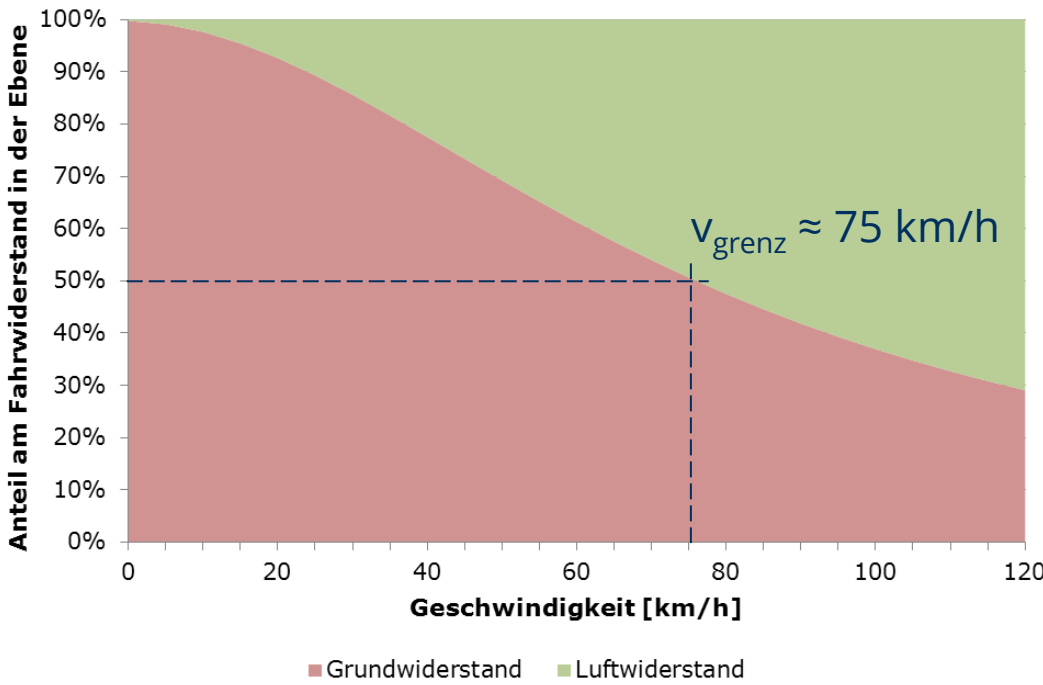


# Grund- vs. Luftwiderstand - Güterzüge



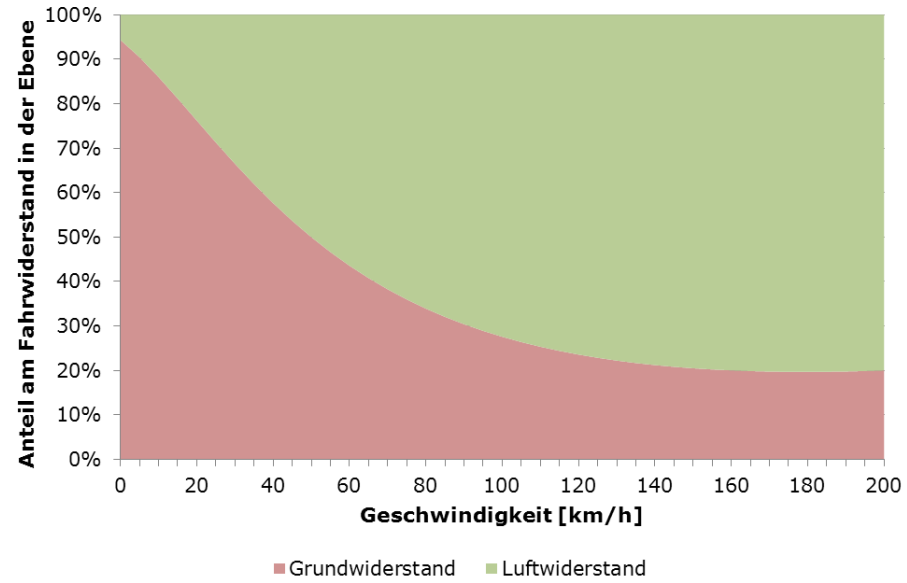
beladener Ganzzug

leerer Ganzzug mit **offenen** Wagen

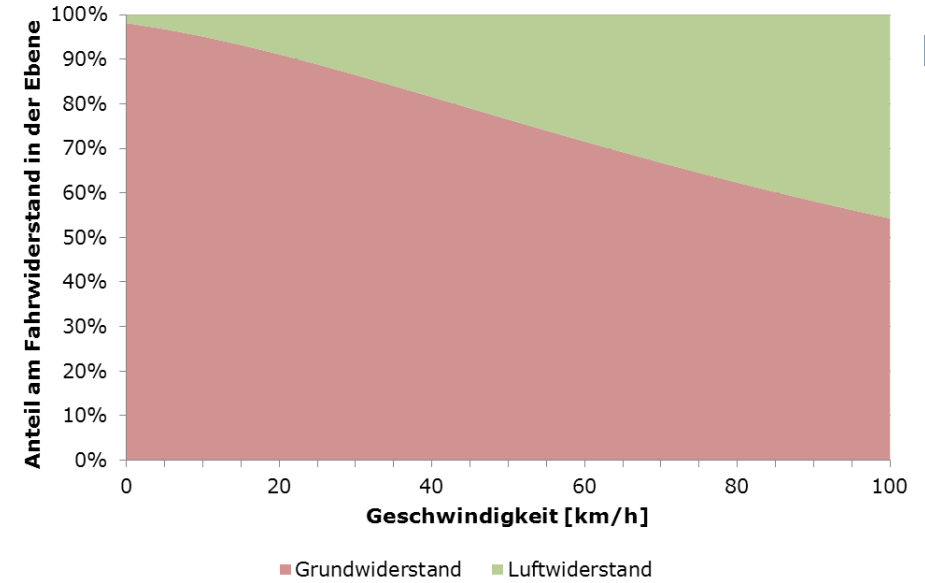


# Grund- vs. Luftwiderstand - Straßenfahrzeuge

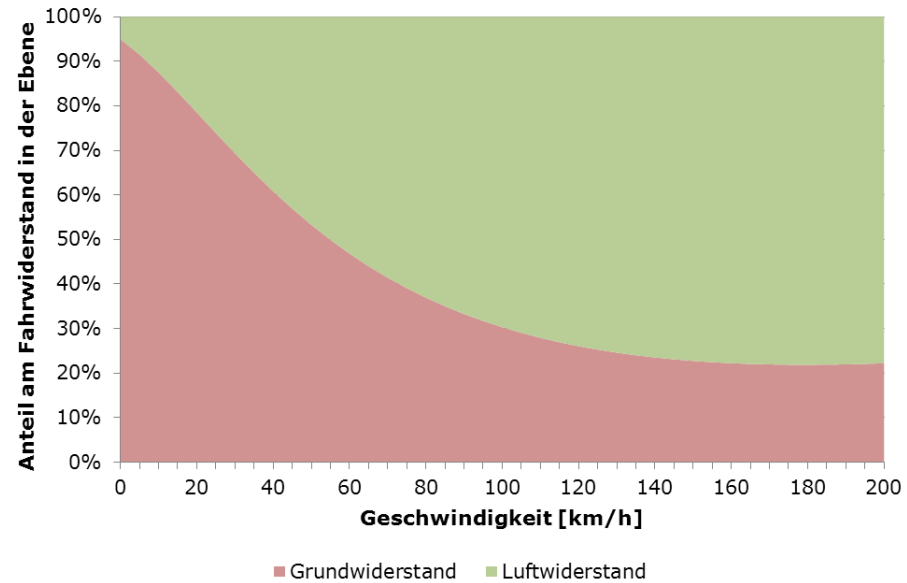
## Kleinwagen



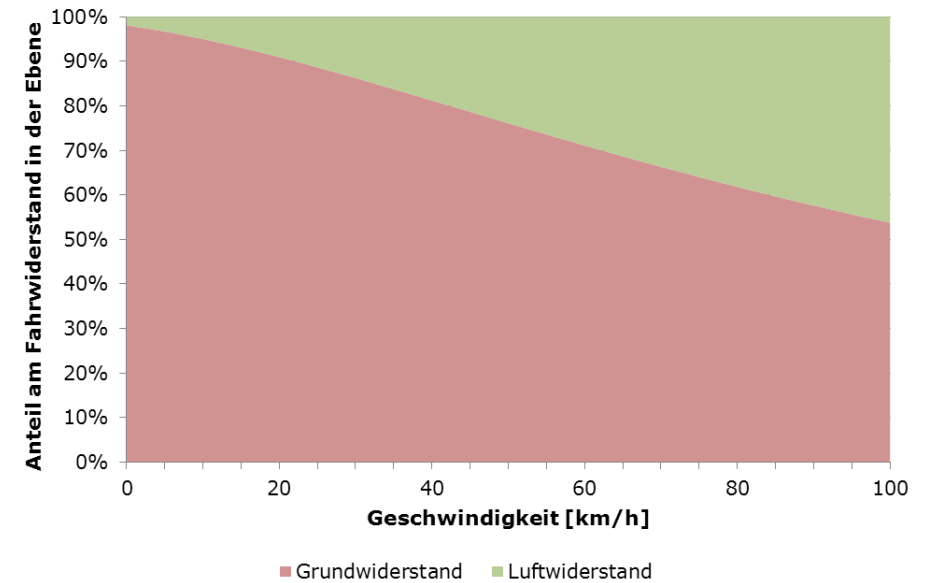
## Reisebus

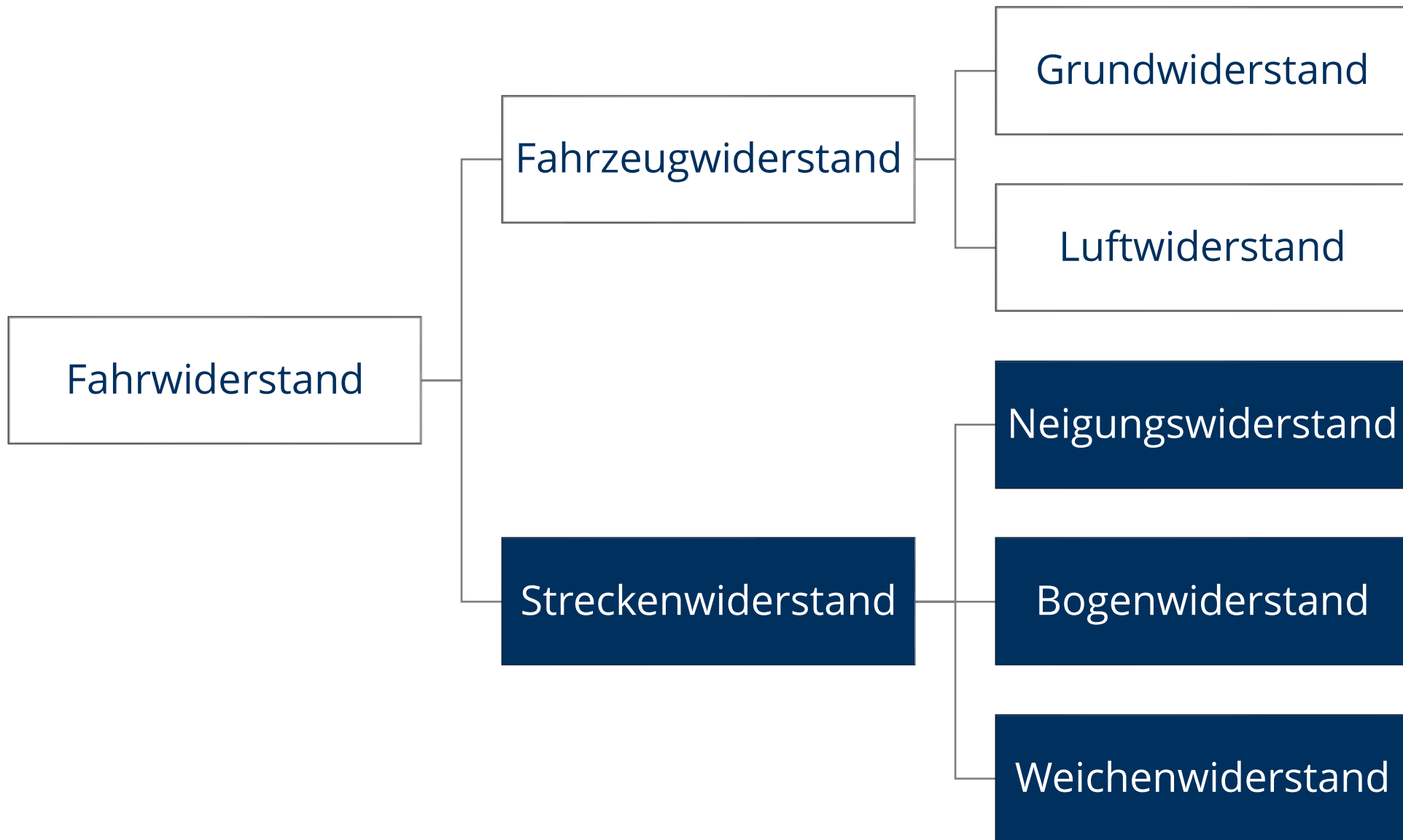


## SUV



## Sattelzug

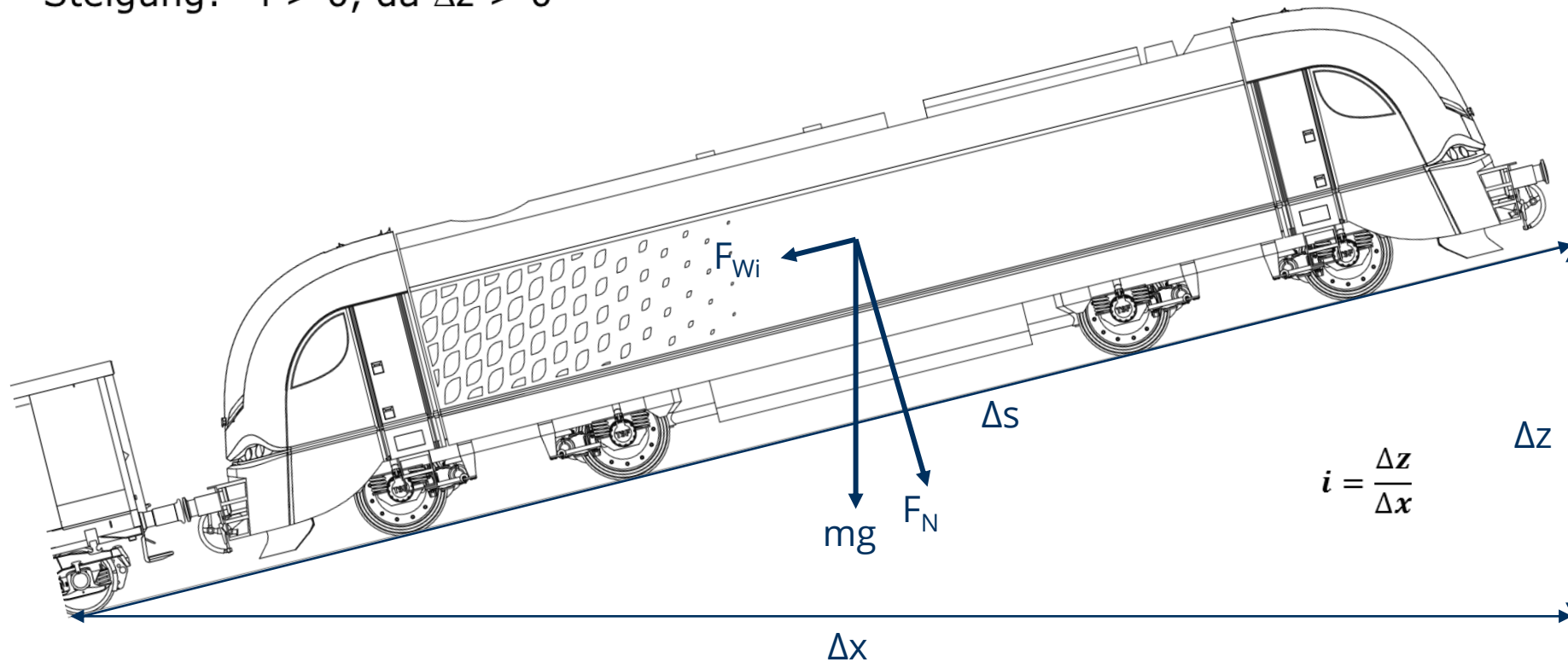




# Neigungswiderstand

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

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

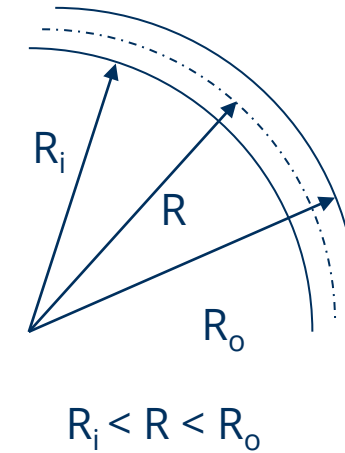
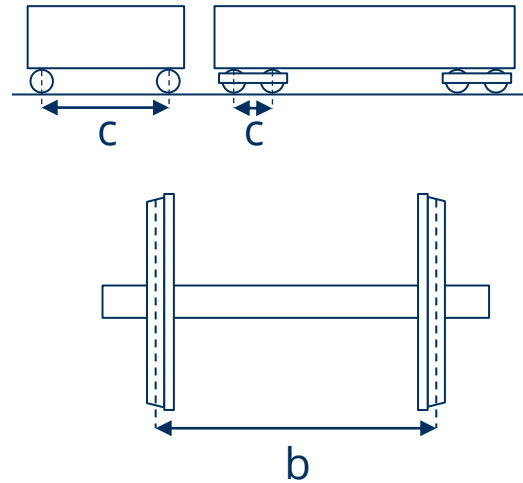


$$F_{wi} = mg \cdot \sin\alpha$$

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)

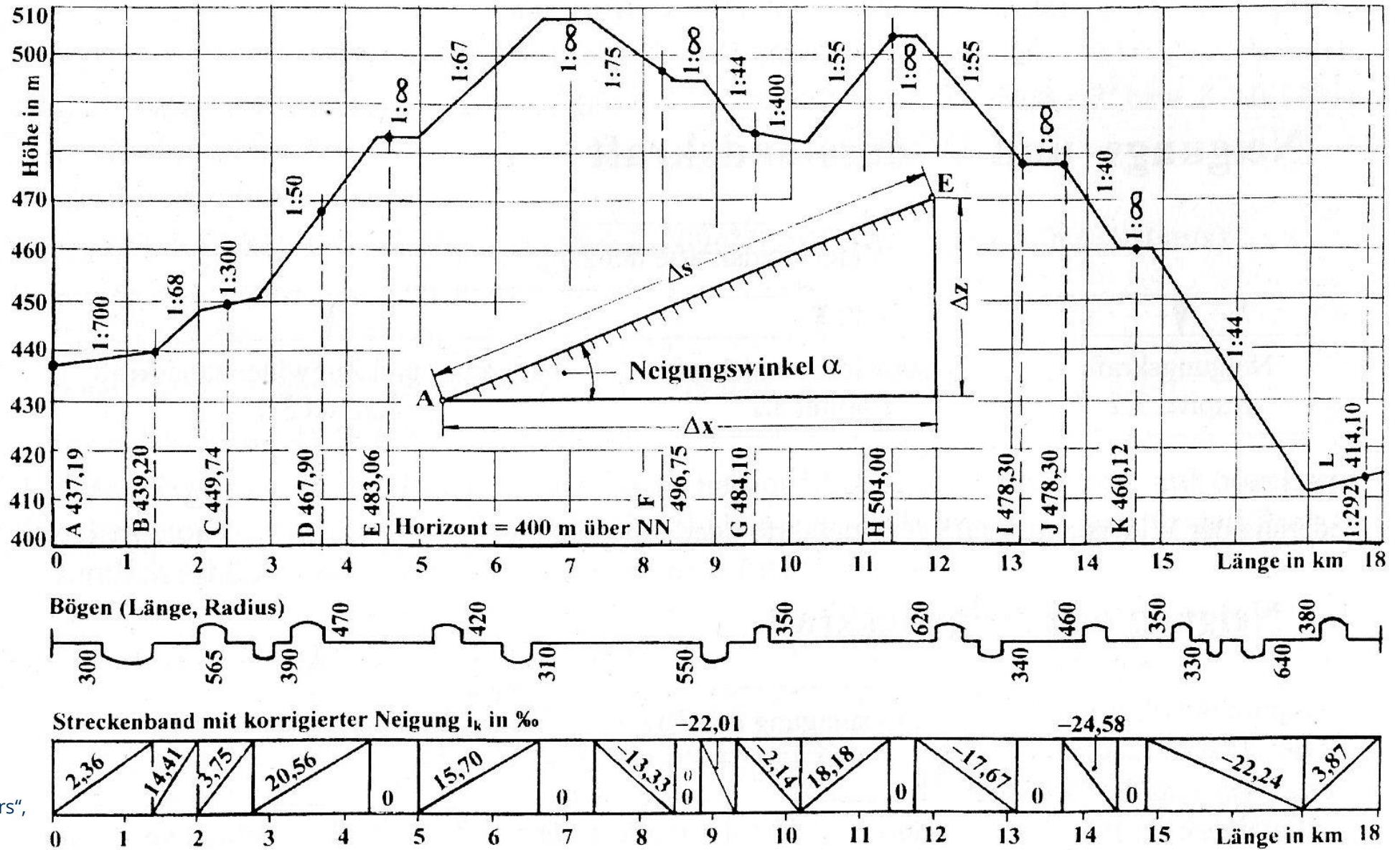
Gleitreibung Rad/Schiene      Laufkreisabstand (Regelspur: 1,5 m)

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

Gleisbogenradius

Radsatzabstand (im DG)

# Streckenband



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

# Streckendatei

	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

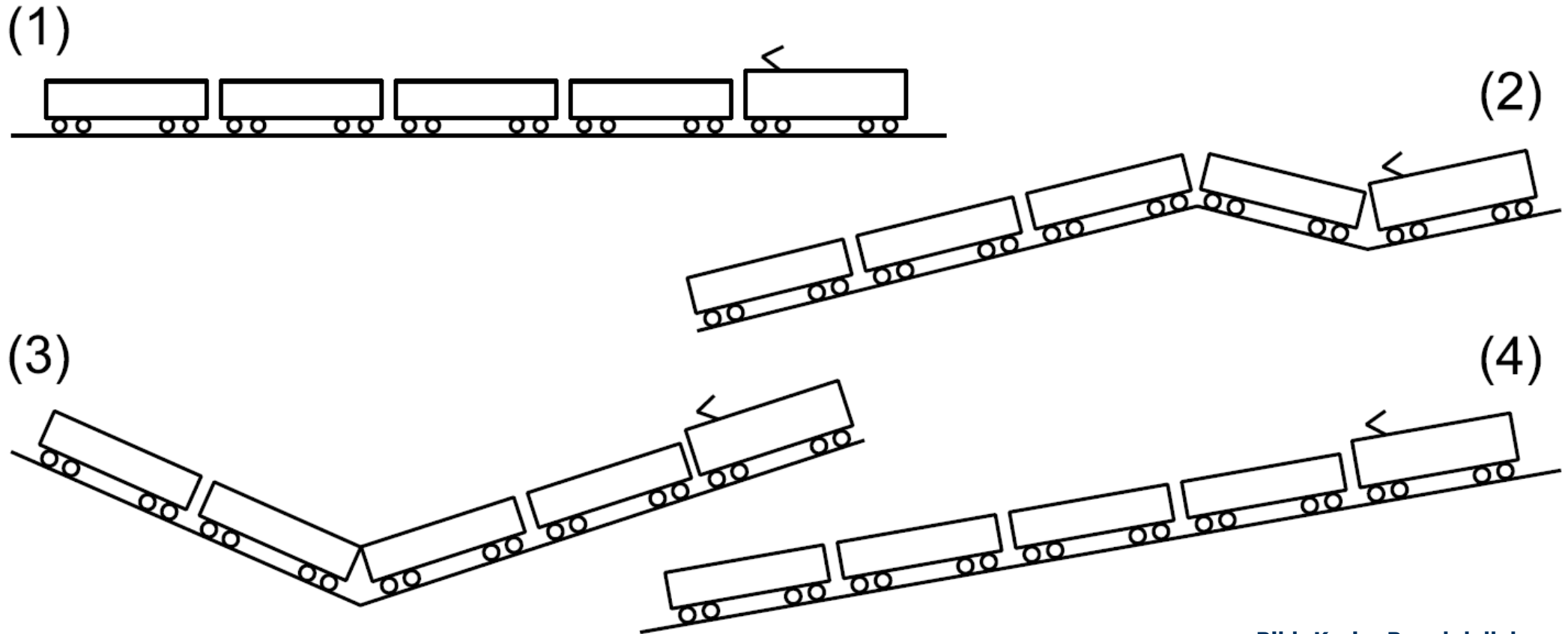


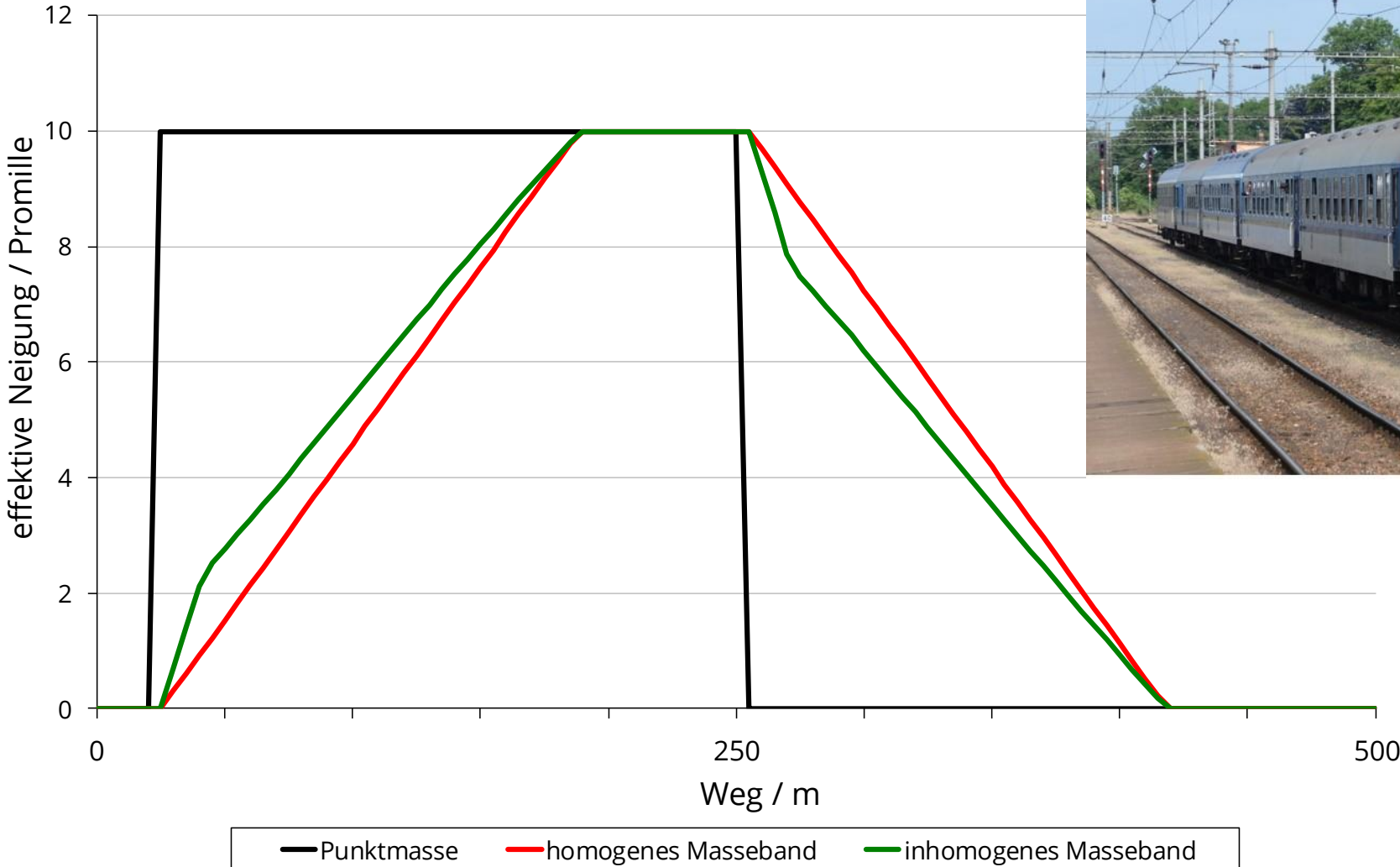
Bild: Karim Benabdellah

Längenausdehnung: Gefällewechsel unter Zugverband (Fälle 2 und 3)

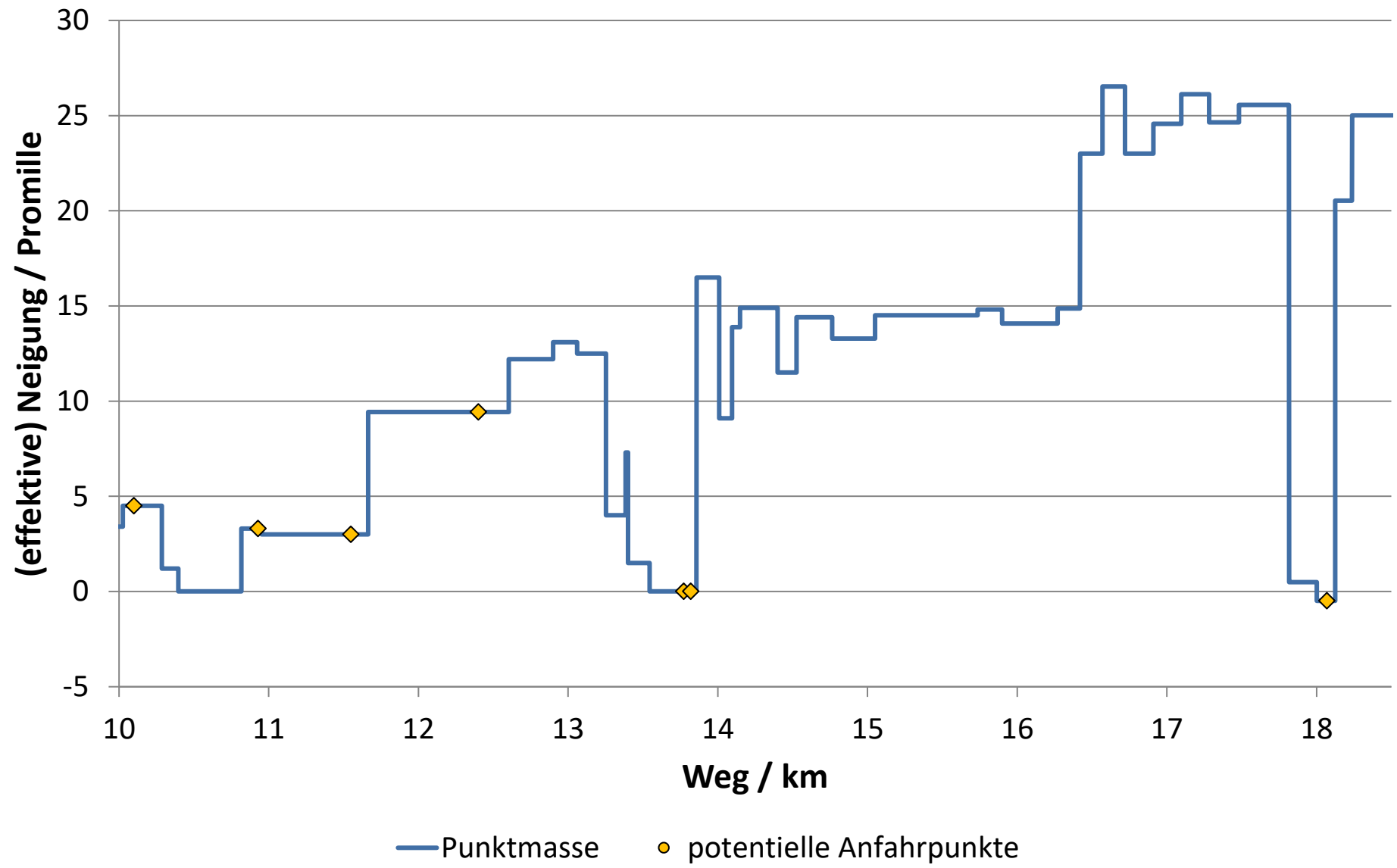
Bestimmung der effektiven Neigung: Massenband (homogen/inhomogen)

# Vergleich der Modellierungsansätze

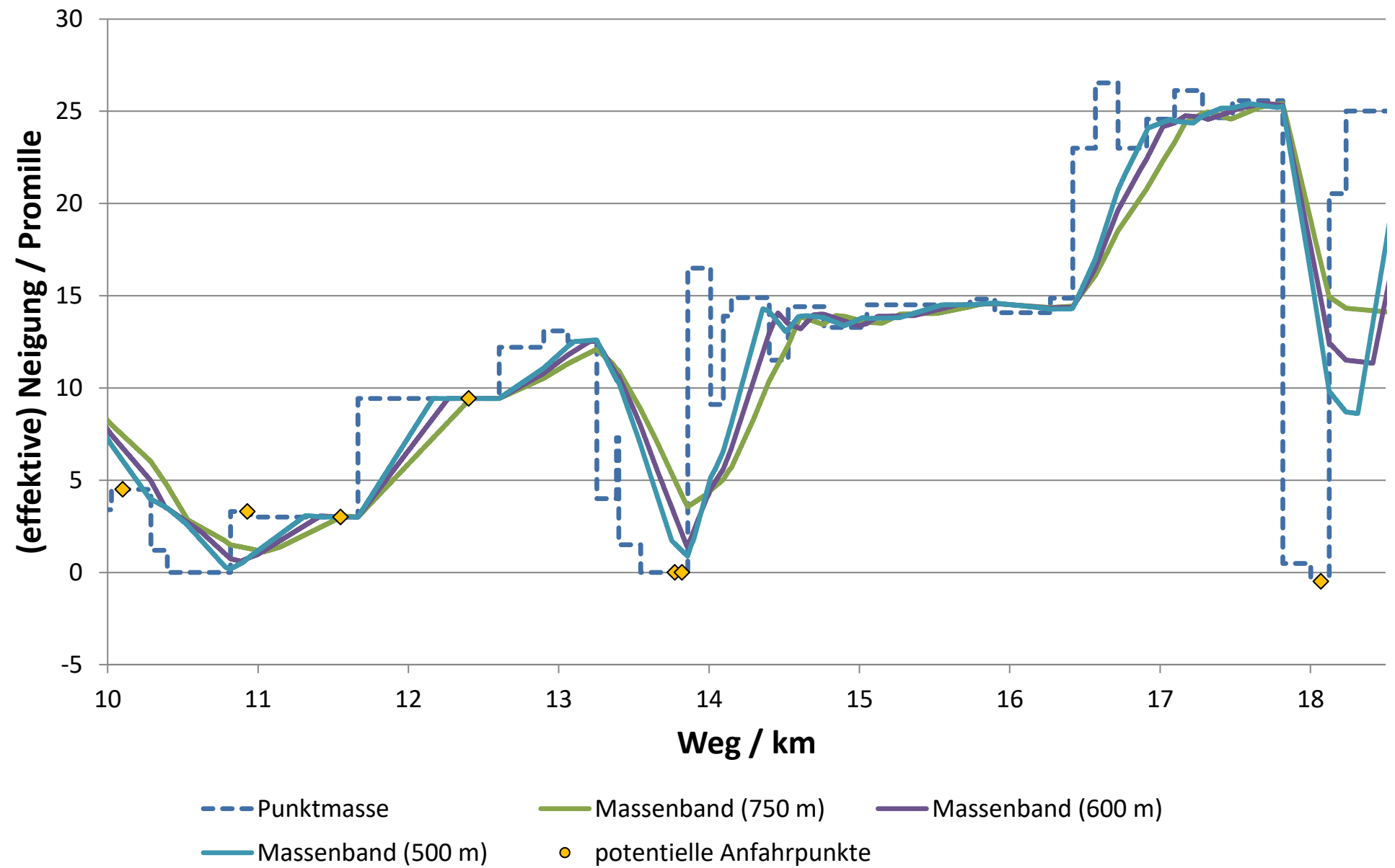
effektive Neigung Reisezug



# Effektive Neigung und Zuglänge



# Effektive Neigung und Zuglänge

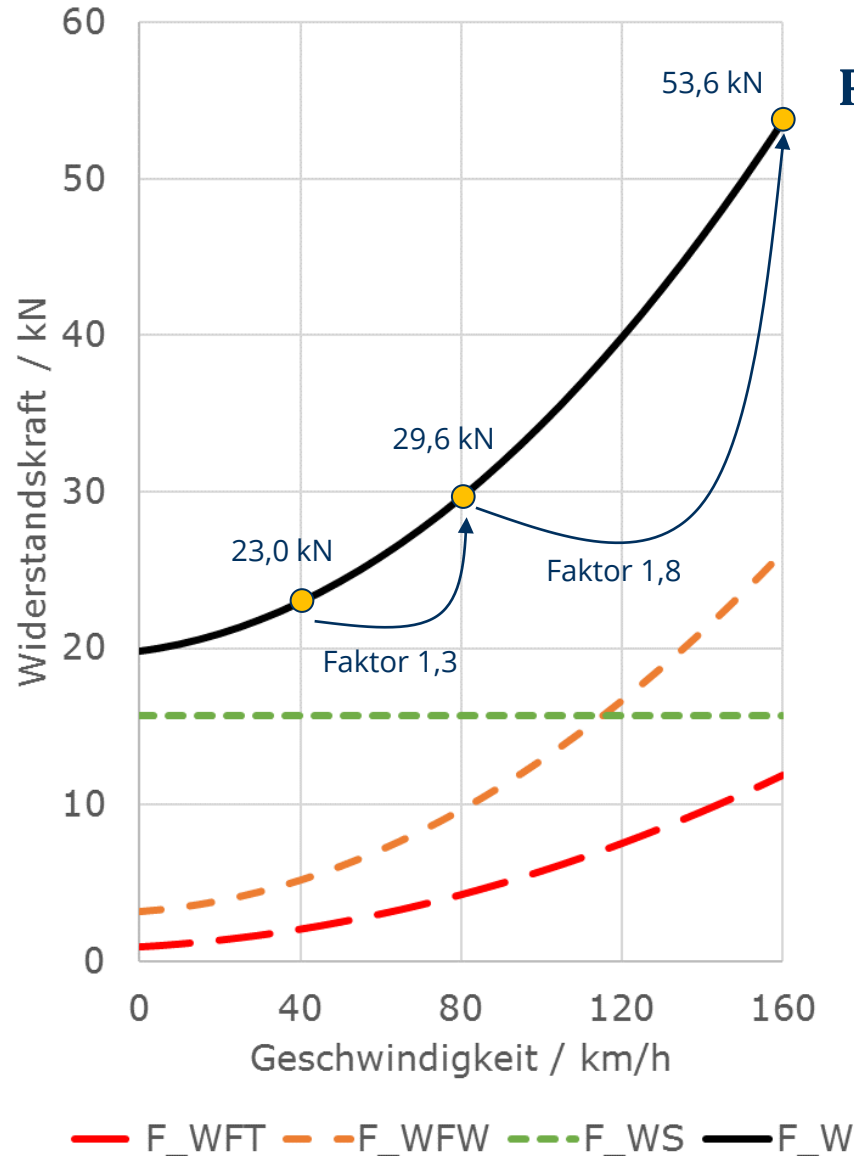


# Fahrwiderstand und Leistungsbedarf

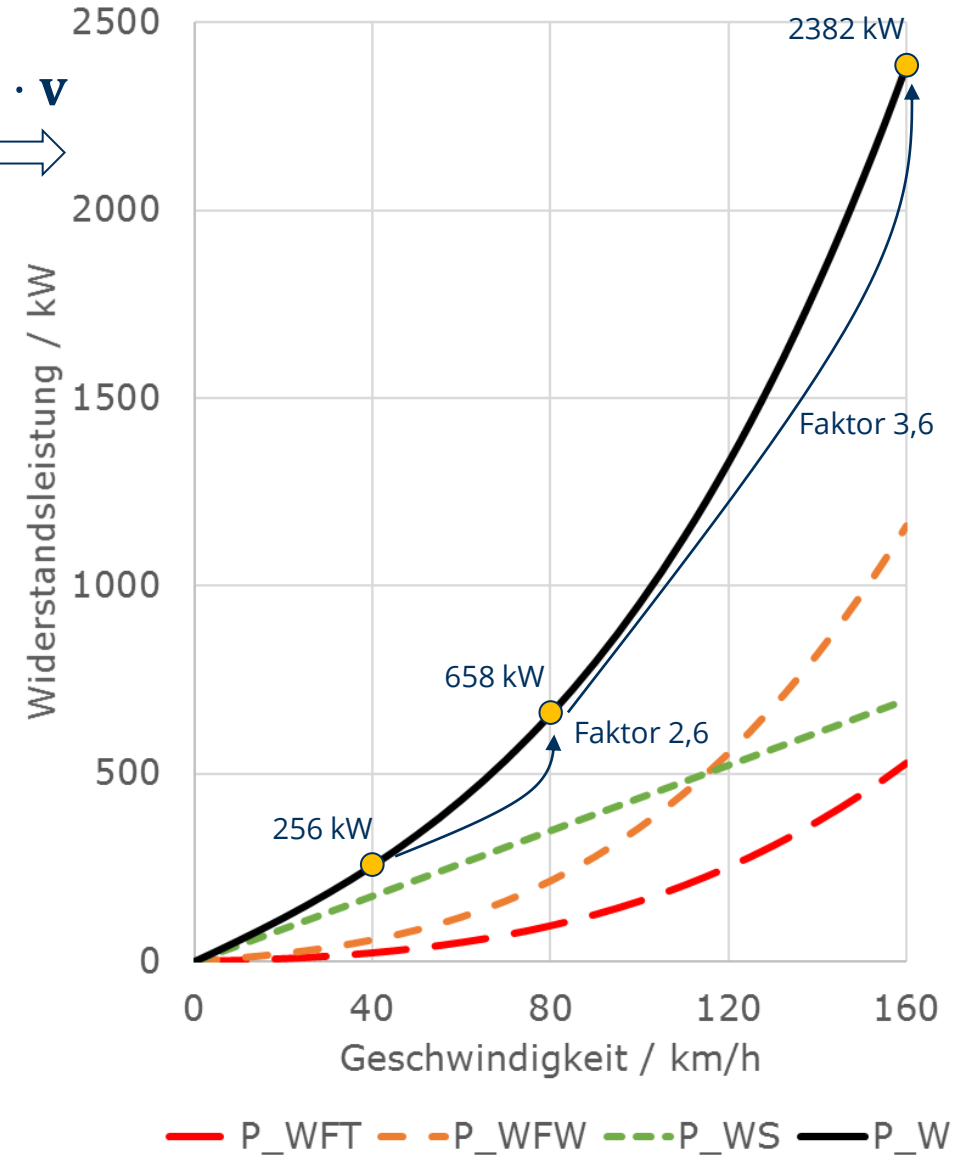


© M. Kache

Bsp: Reisezug



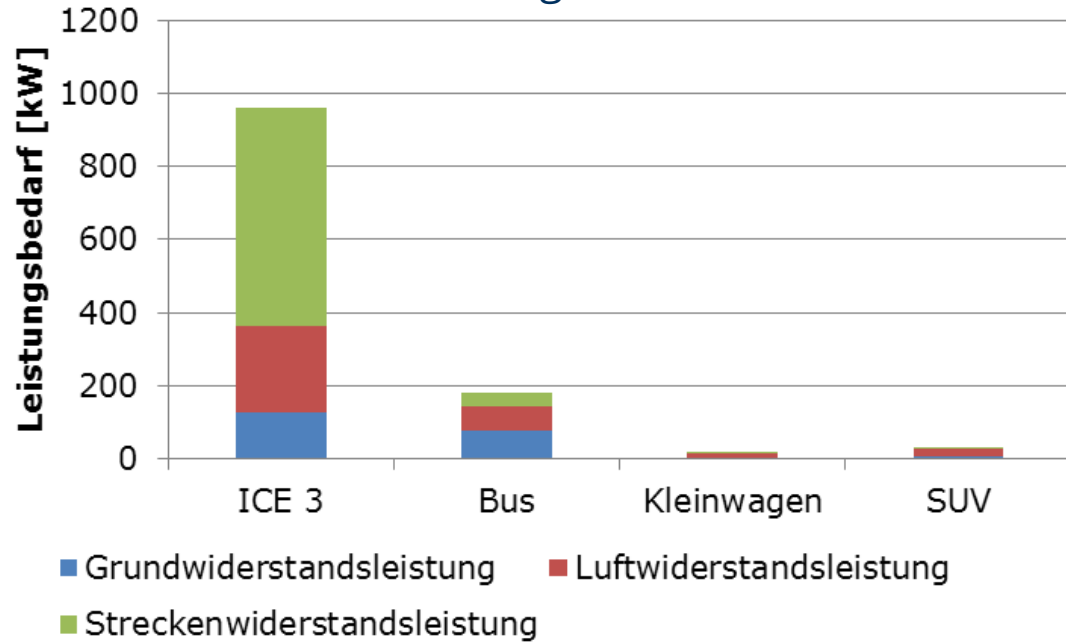
$$P = F \cdot v$$



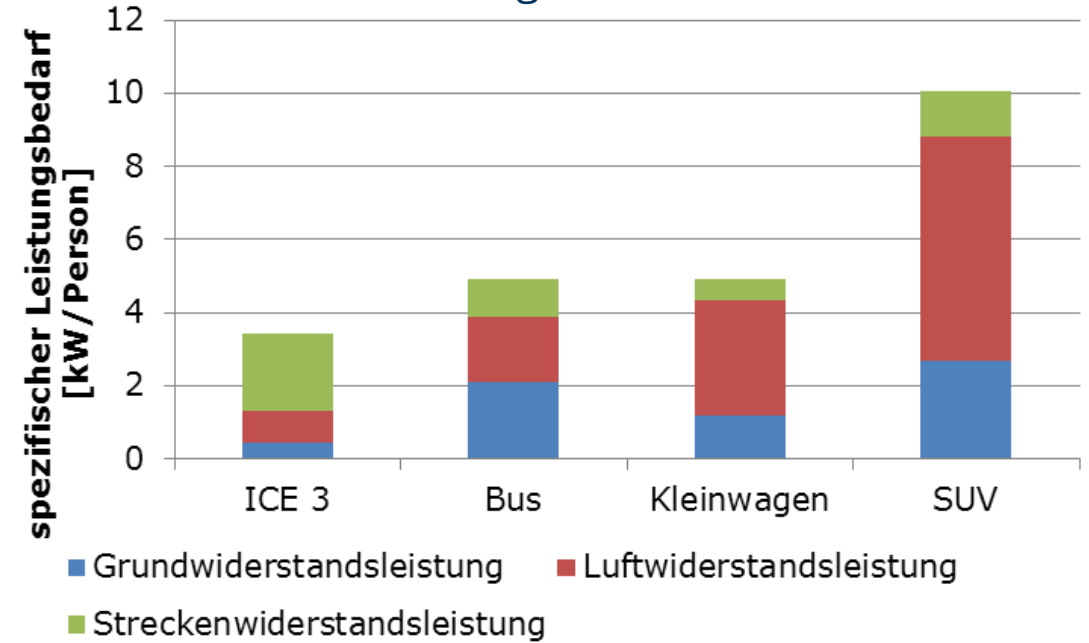
# Leistungsbedarf der Fahrwiderstände

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

absoluter Leistungsbedarf



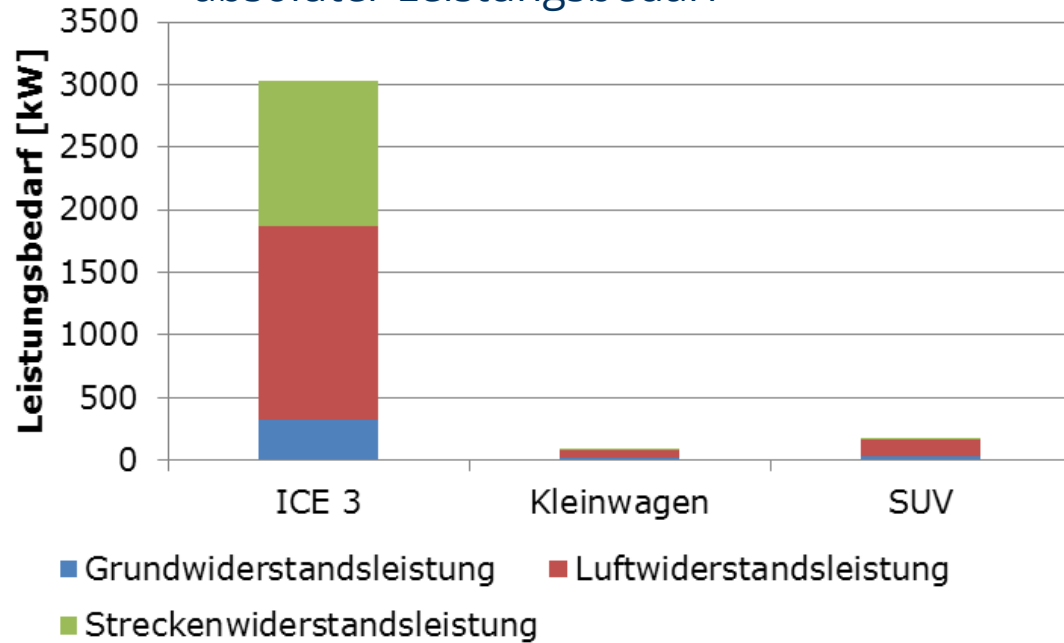
relativer Leistungsbedarf



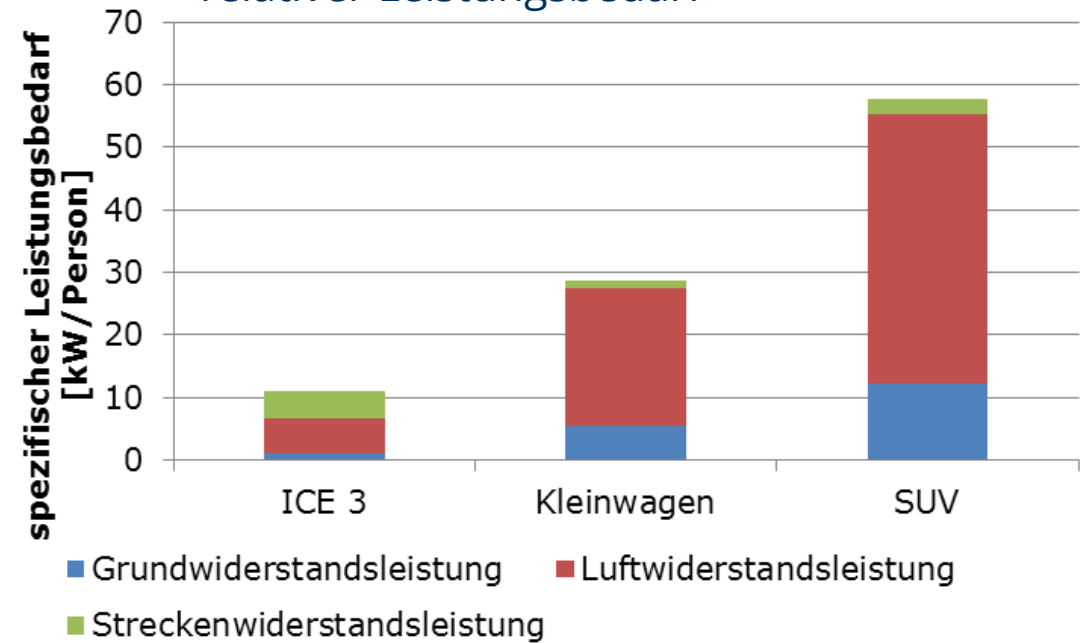
# Leistungsbedarf der Fahrwiderstände

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

absoluter Leistungsbedarf



relativer Leistungsbedarf



# Leistungsbedarf der Fahrwiderstände

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

