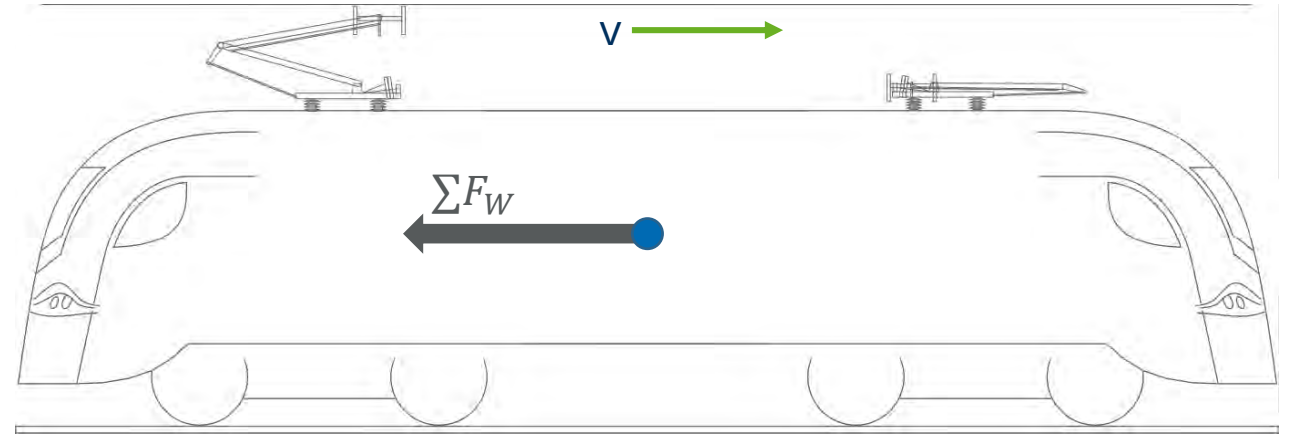


Vorlesungsinhalte

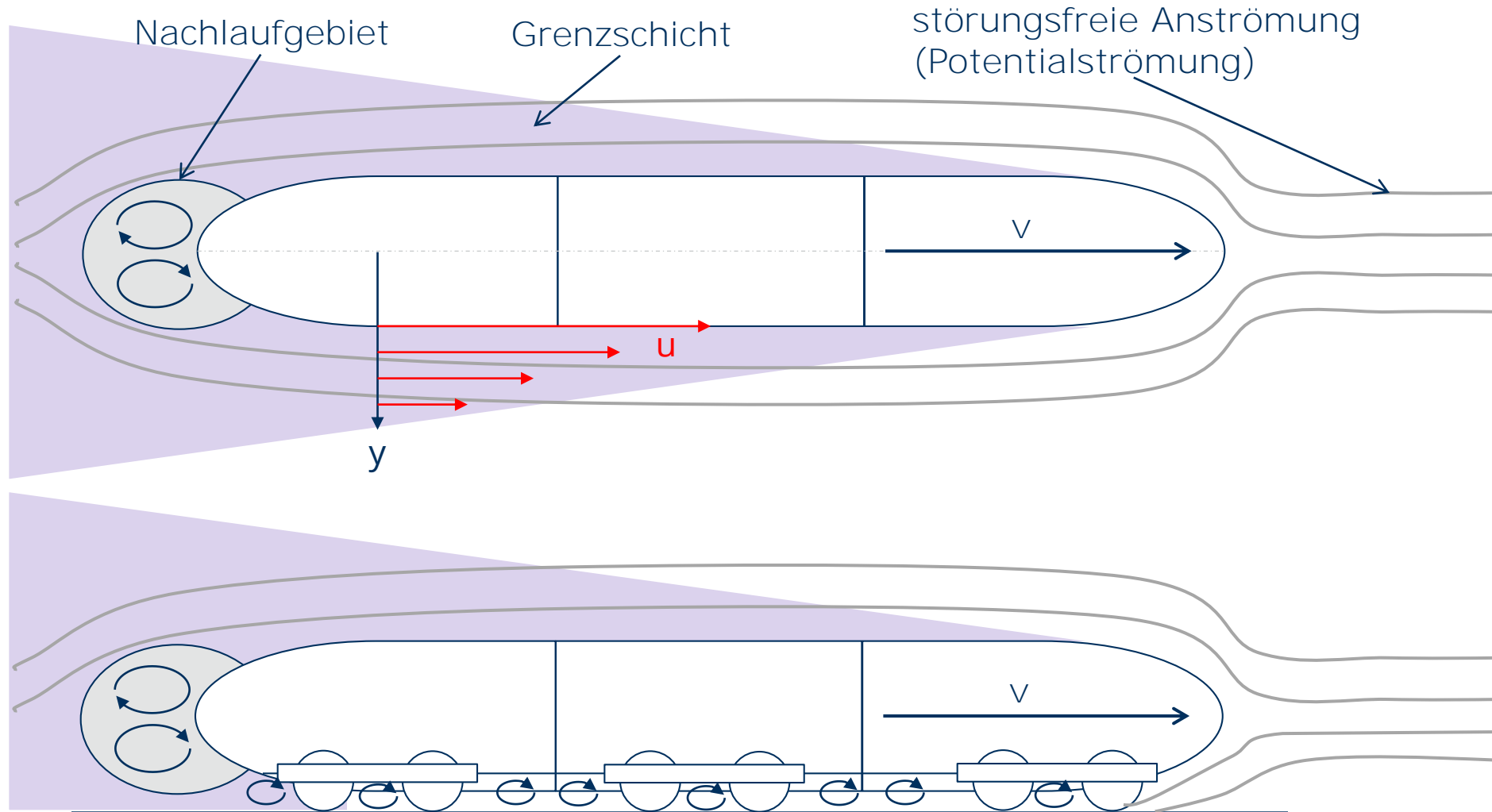
- Einführung
- Grundlagen
- **Fahrwiderstandskräfte**
- Antriebskräfte
- Bewertung des Traktionsvermögens
- Leistungs- und Energiebedarf
- Betrachtungen zu Energie und Fahrzeit
- Grundlagen der Fahrzeitberechnung
- Rechnerpraktikum Zugfahrtsimulation



Luftwiderstand

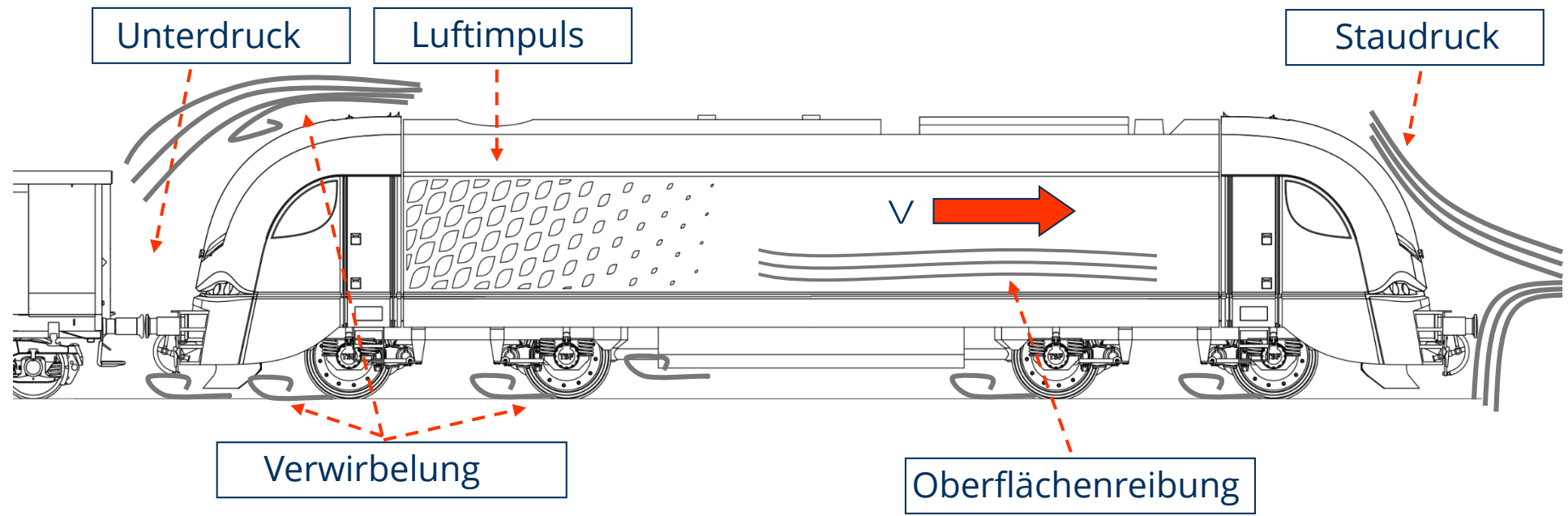


Zonenbildung bei der Fahrzeugumströmung

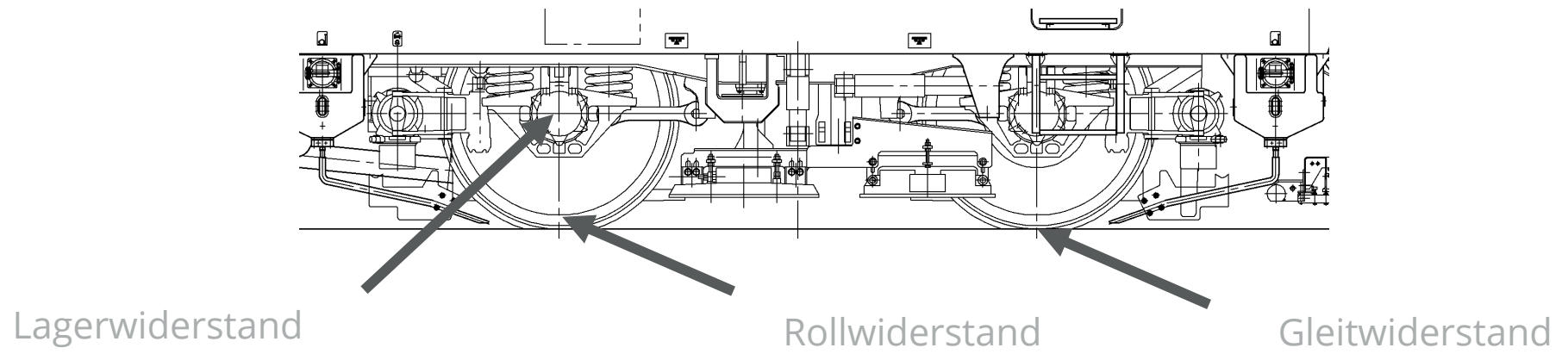


Fahrzeugwiderstand - Entstehung

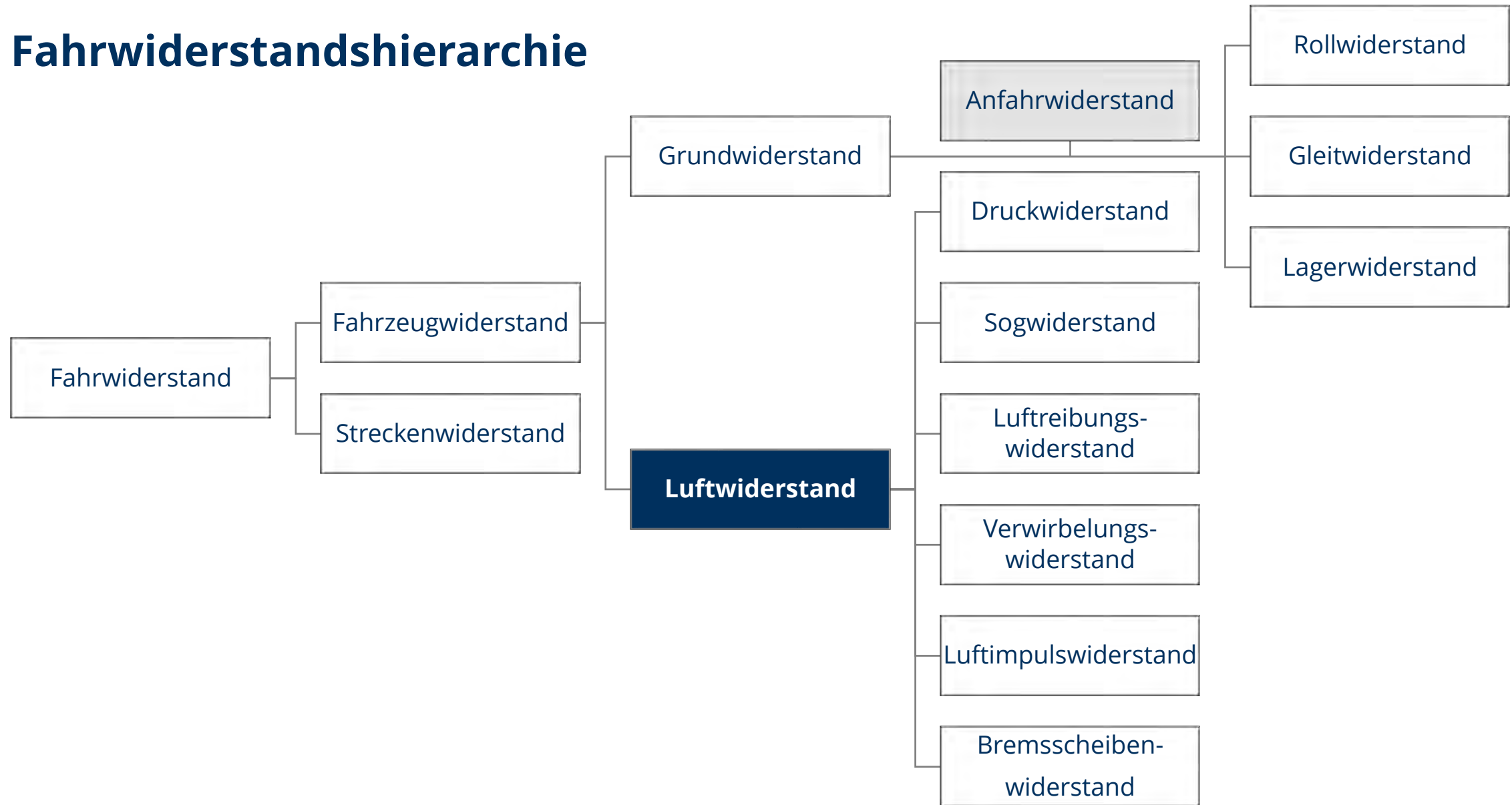
Luftwiderstand



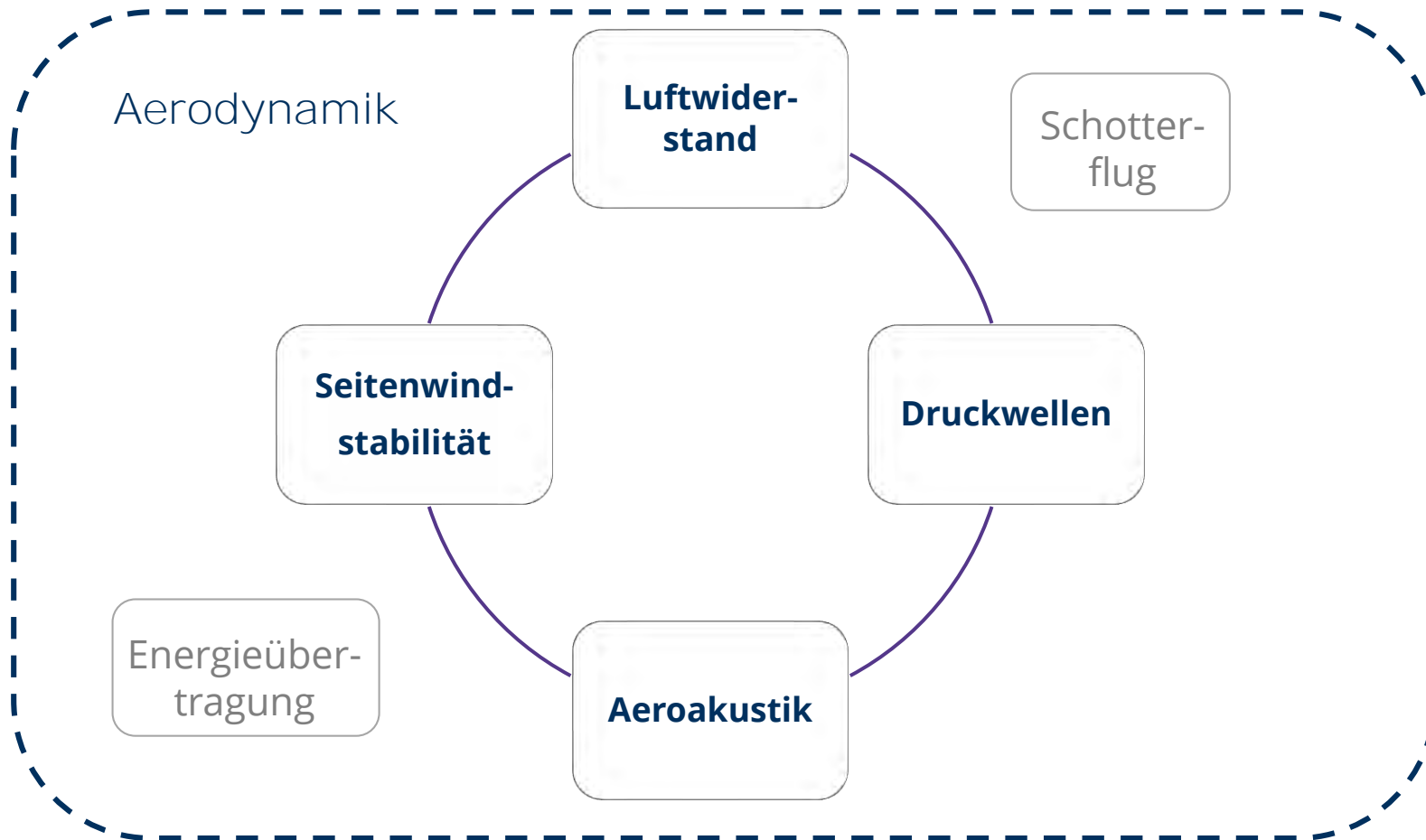
Grundwiderstand



Fahrwiderstandshierarchie



Aerodynamik im Schienenverkehr



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 $c_W A$**
- A ist bei Eisenbahnfahrzeugen durch das Lichtraumprofil definiert und für Aerodynamik als $A_{norm} = 10 \text{ m}^2$ definiert
- c_W - Wert ist abhängig von der Formgestaltung (global und im Detail)

c_w -Werte ausgewählter Schienenfahrzeuge



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



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



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



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



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



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



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



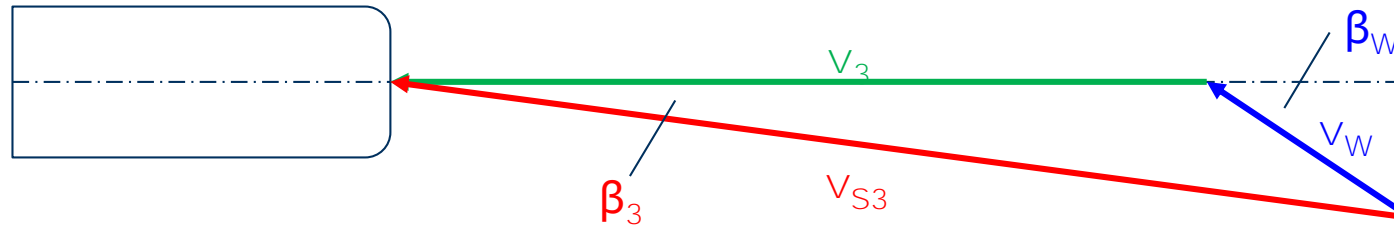
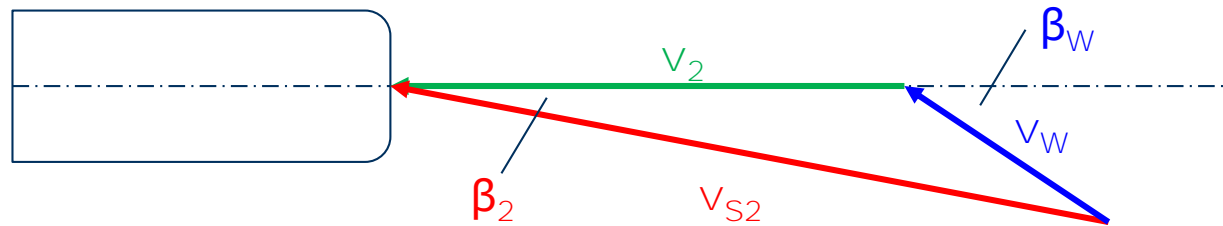
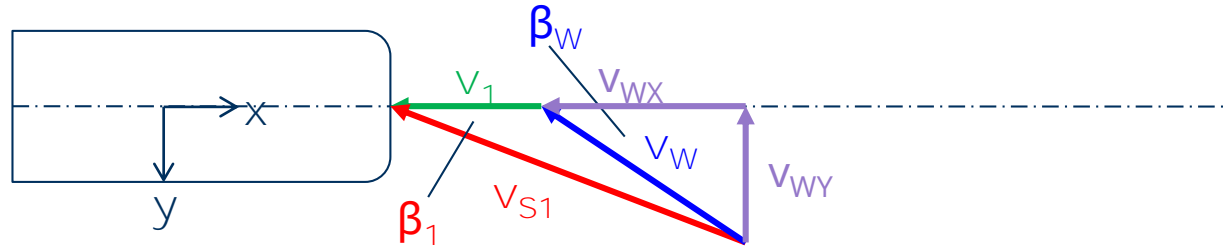
26,4m-Wagen: $c_w = 0,23$ (Zugende)



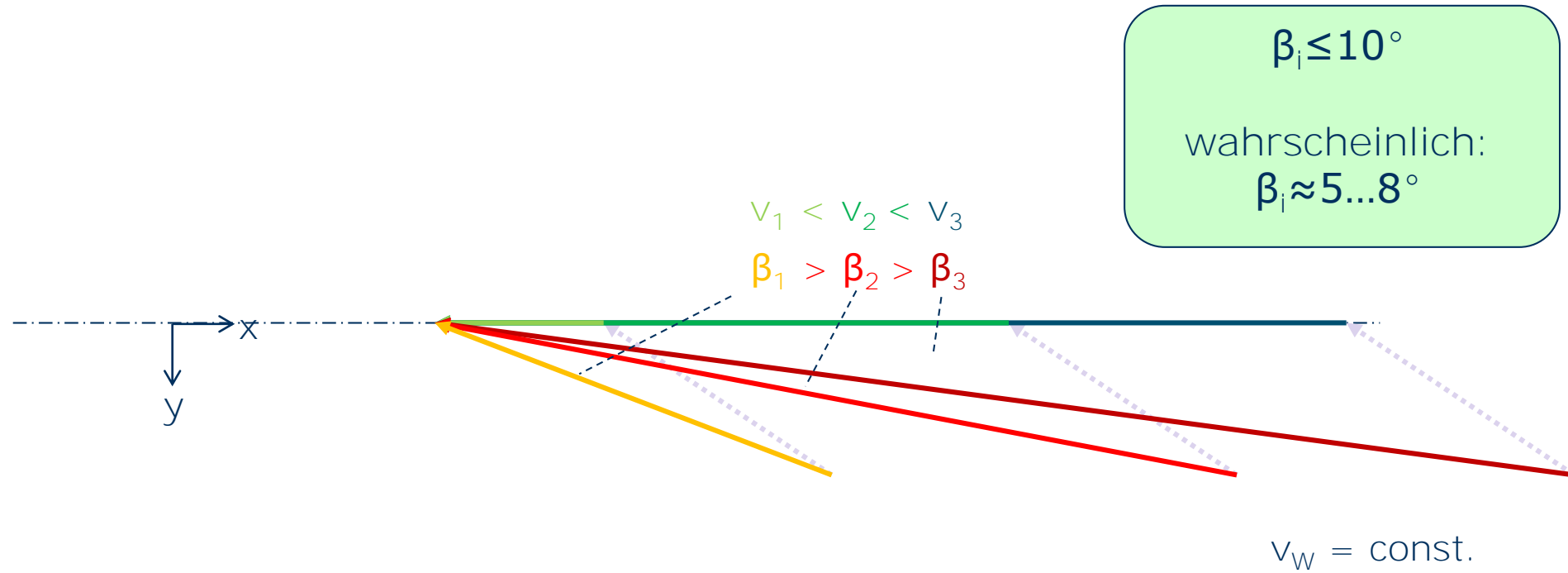
Schinkansen Reihe 0: $c_w = 0,97$

Einfluss der Anströmung?

β_w = Windangriffswinkel
 β_i = Anströmwinkel
 v_i = Fahrgeschwindigkeit
 v_w = Windgeschwindigkeit
 v_{si} = Anströmgeschwindigkeit



Resultierender Anströmwinkel



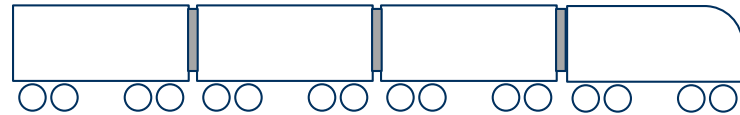
Einflussfaktoren Luftwiderstand von Zügen



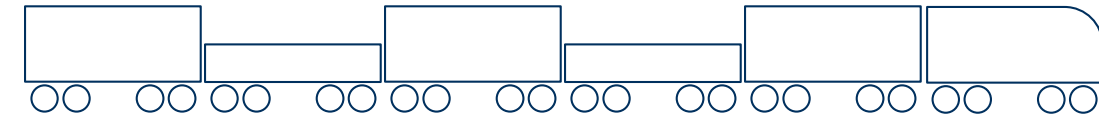
Formgebung Bug/Heck



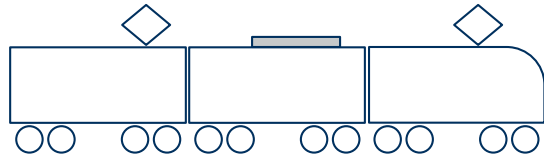
Zuglänge



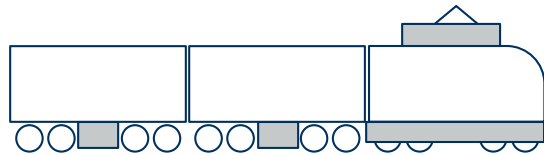
Wagenübergänge



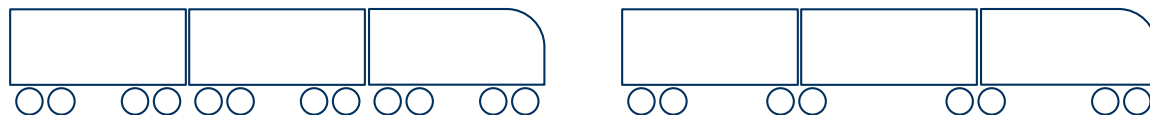
Querschnittswechsel



Dachausrüstung

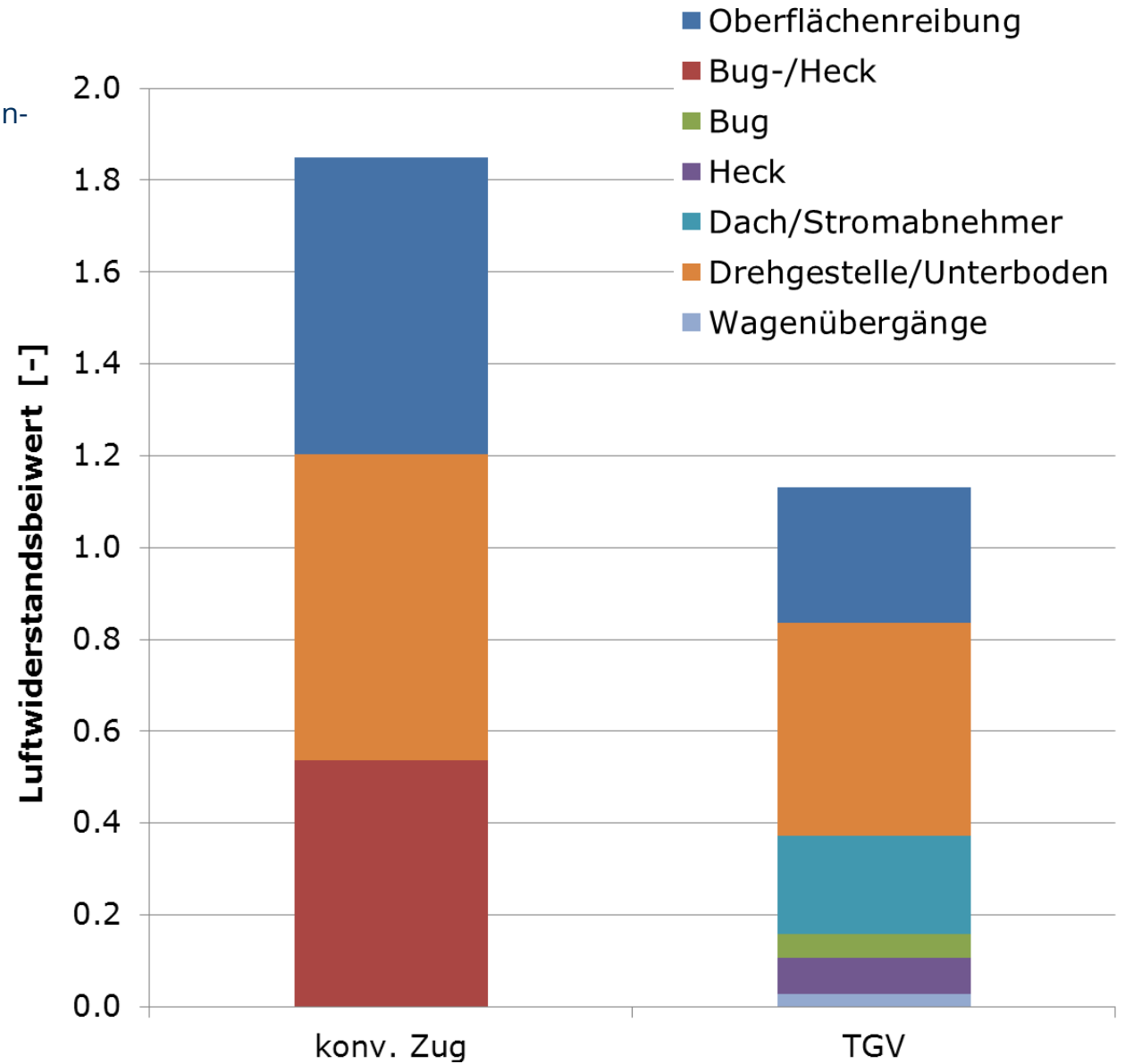
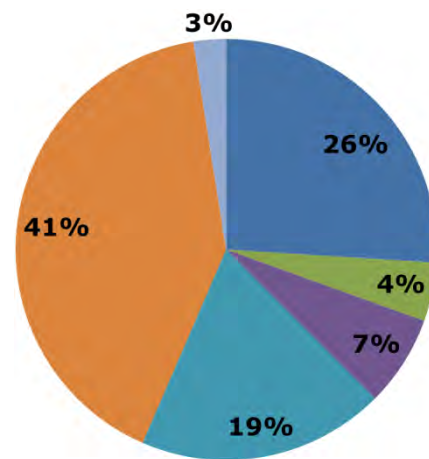
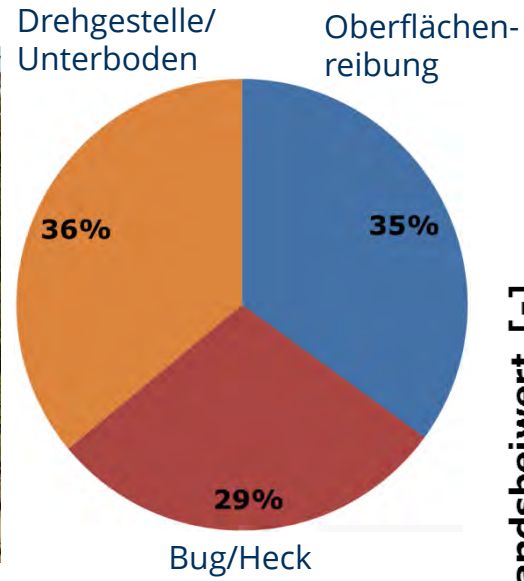


Verkleidungen



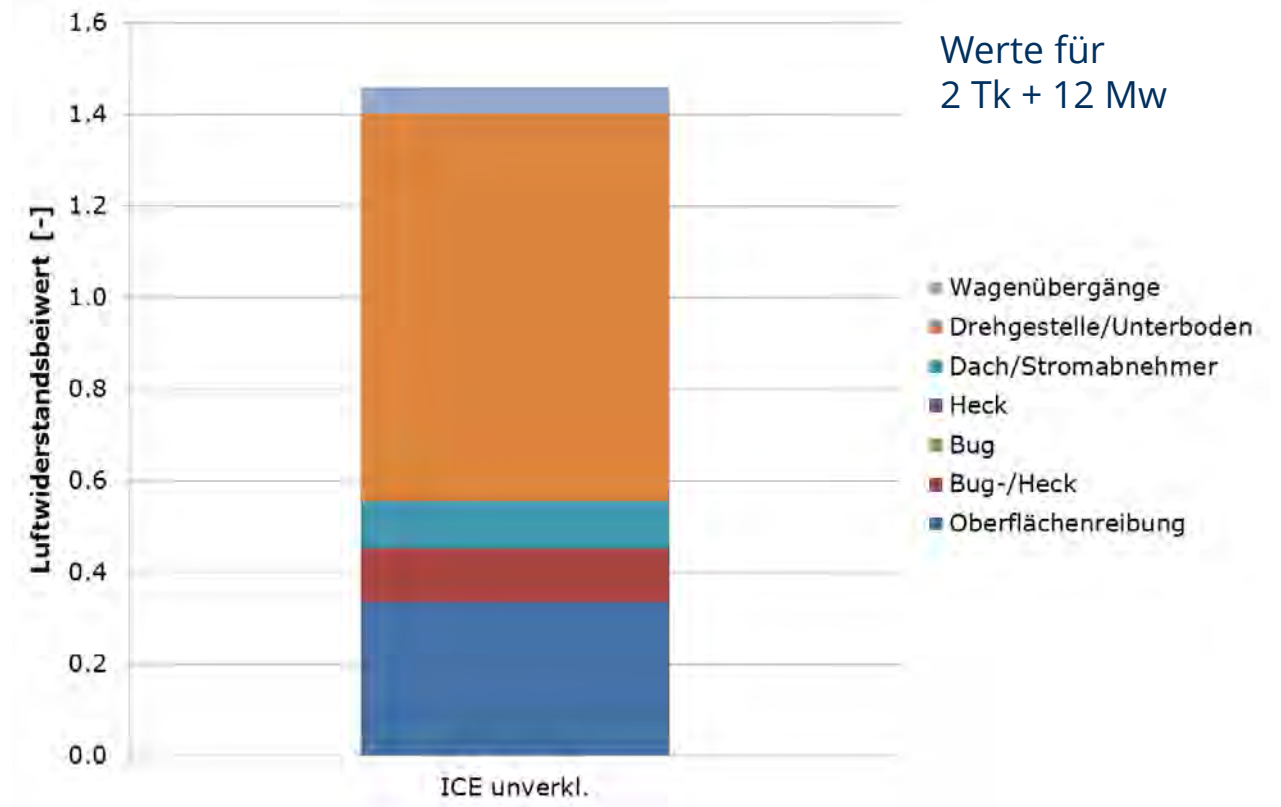
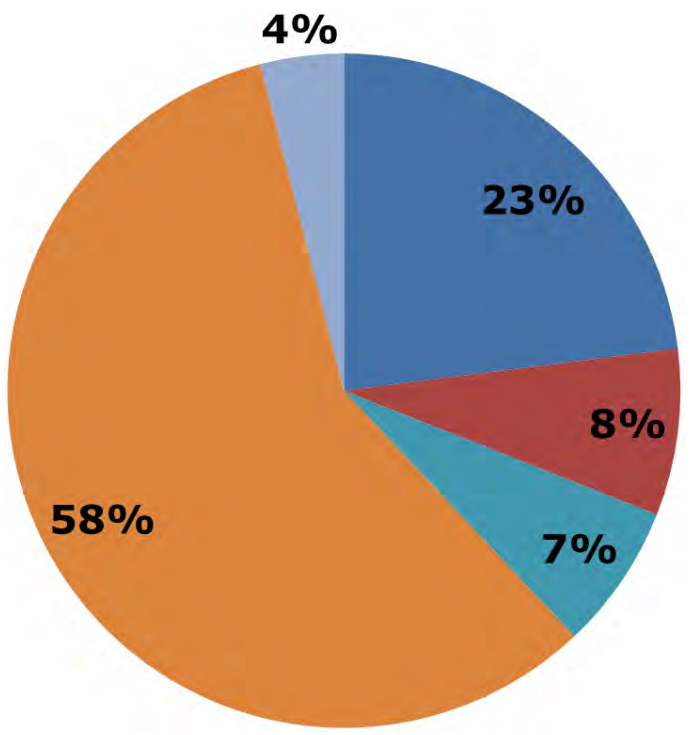
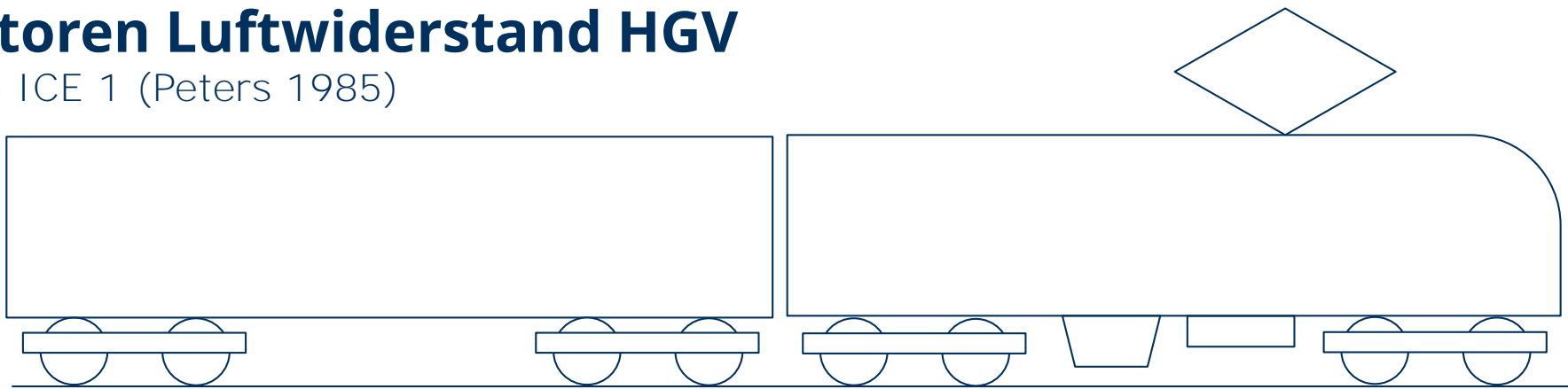
Fahrwerksart

Luftwiderstandskomponenten bei Zügen



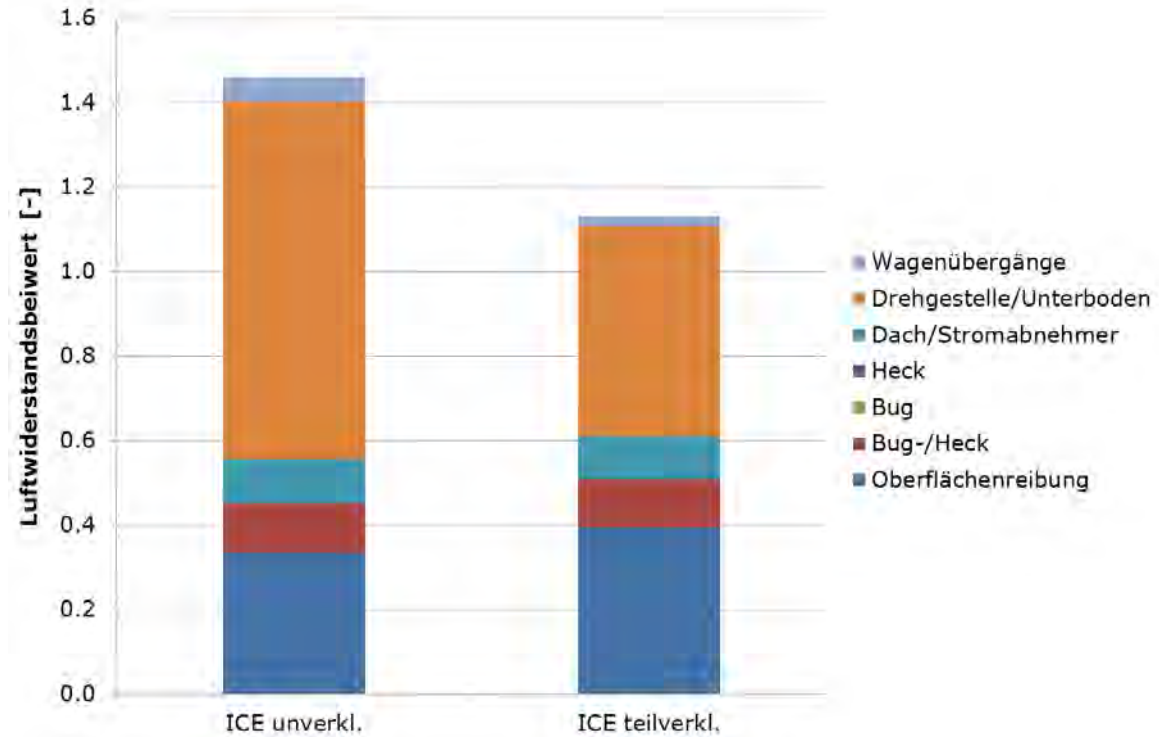
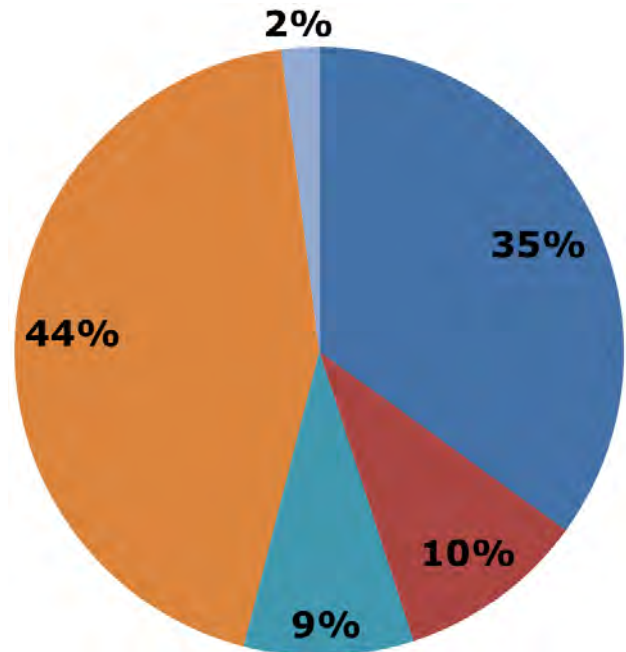
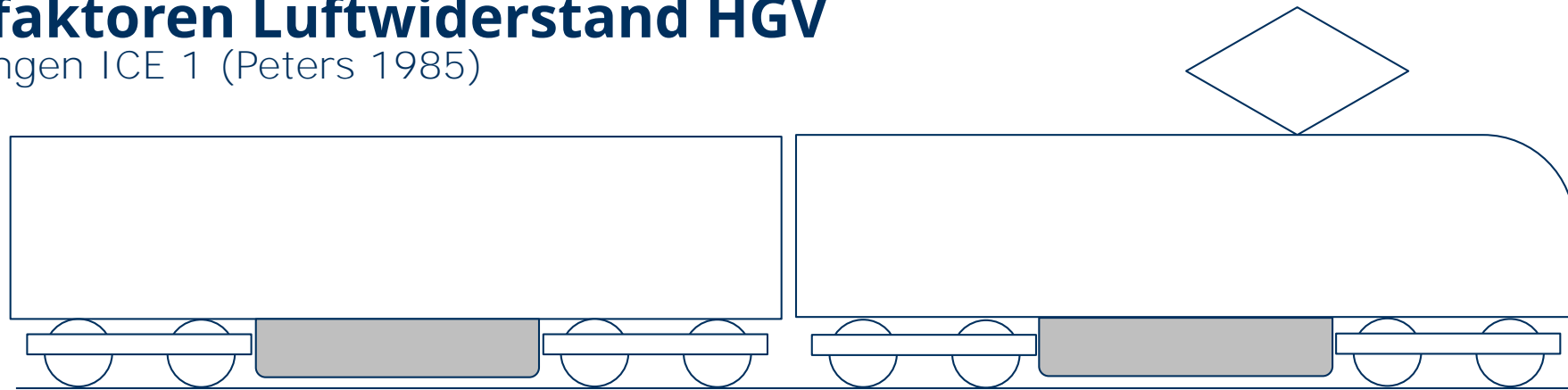
Einflussfaktoren Luftwiderstand HGV

Untersuchungen ICE 1 (Peters 1985)



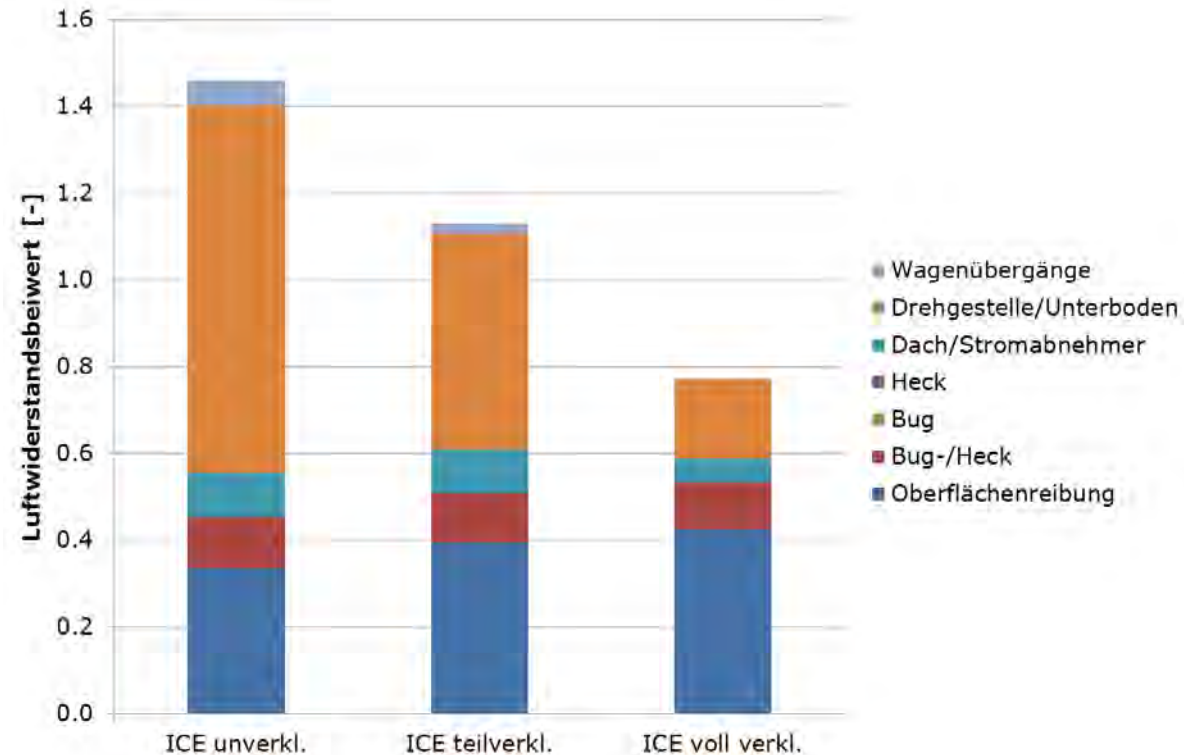
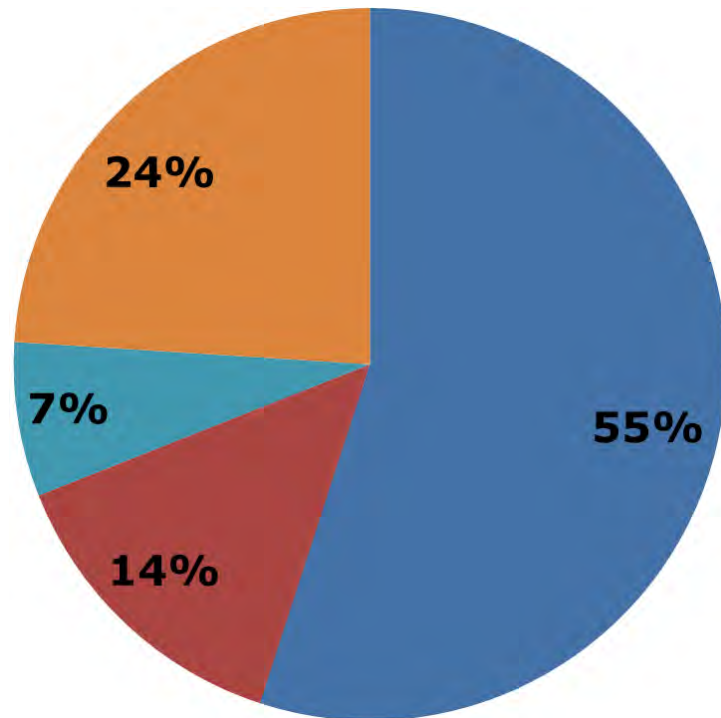
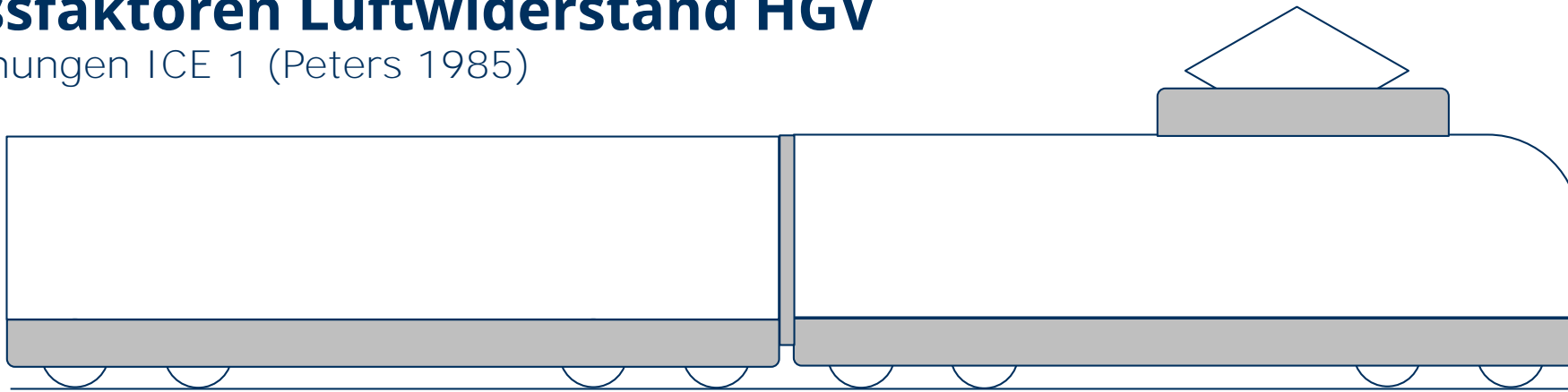
Einflussfaktoren Luftwiderstand HGV

Untersuchungen ICE 1 (Peters 1985)

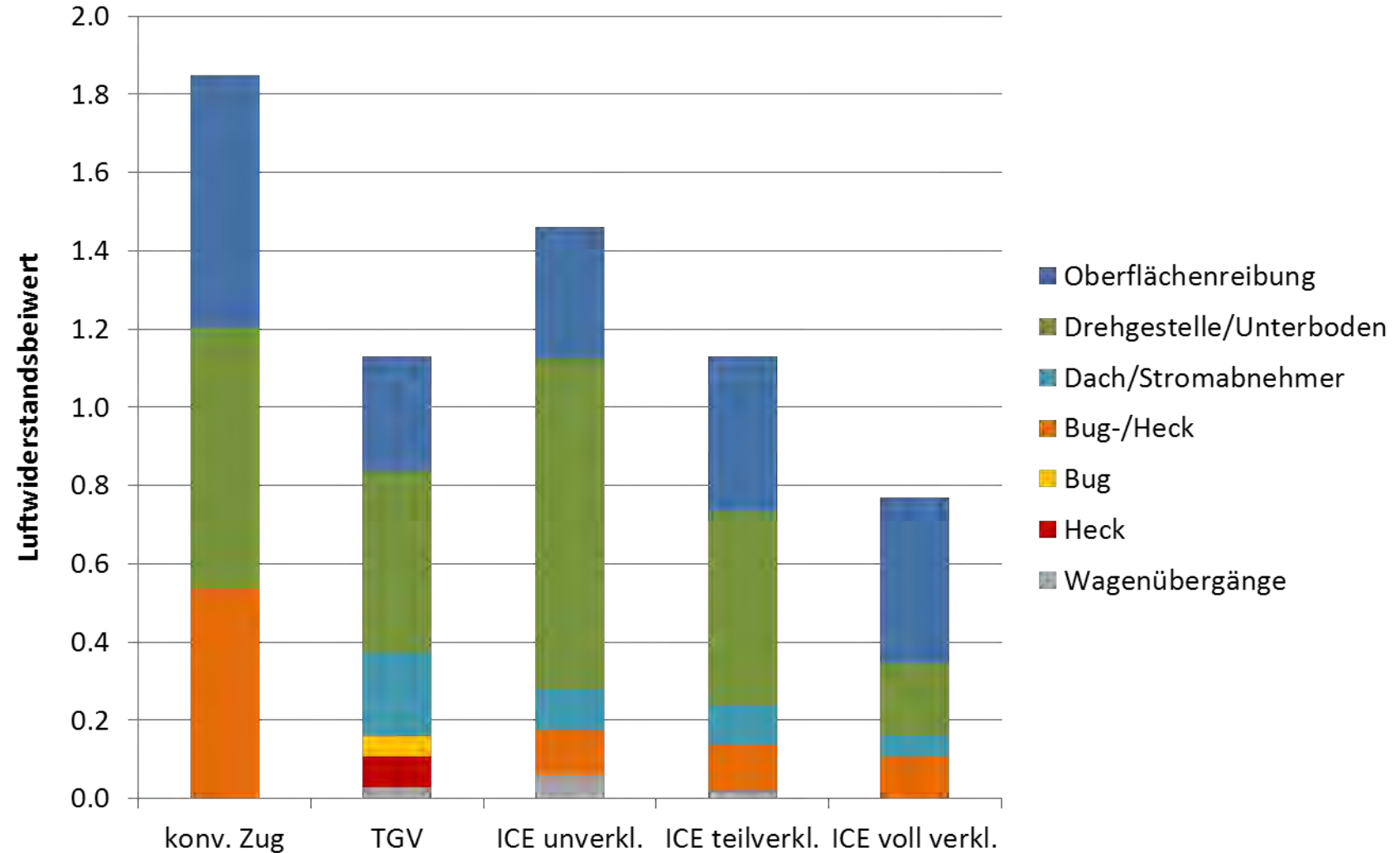


Einflussfaktoren Luftwiderstand HGV

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



Vergleich:
IC/EC-Wagen

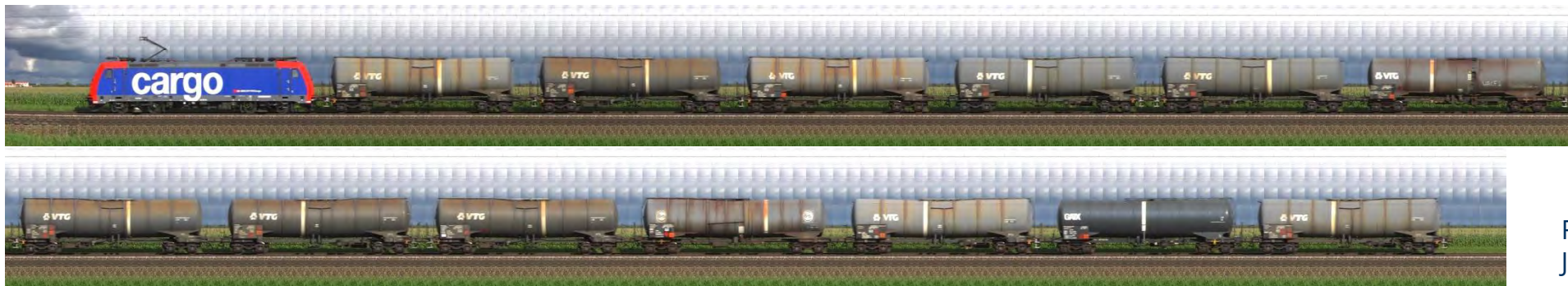


Luftwiderstand und (Güter-)Zugart

Bsp. 1: Containerzug mit unvollkommener Beladung

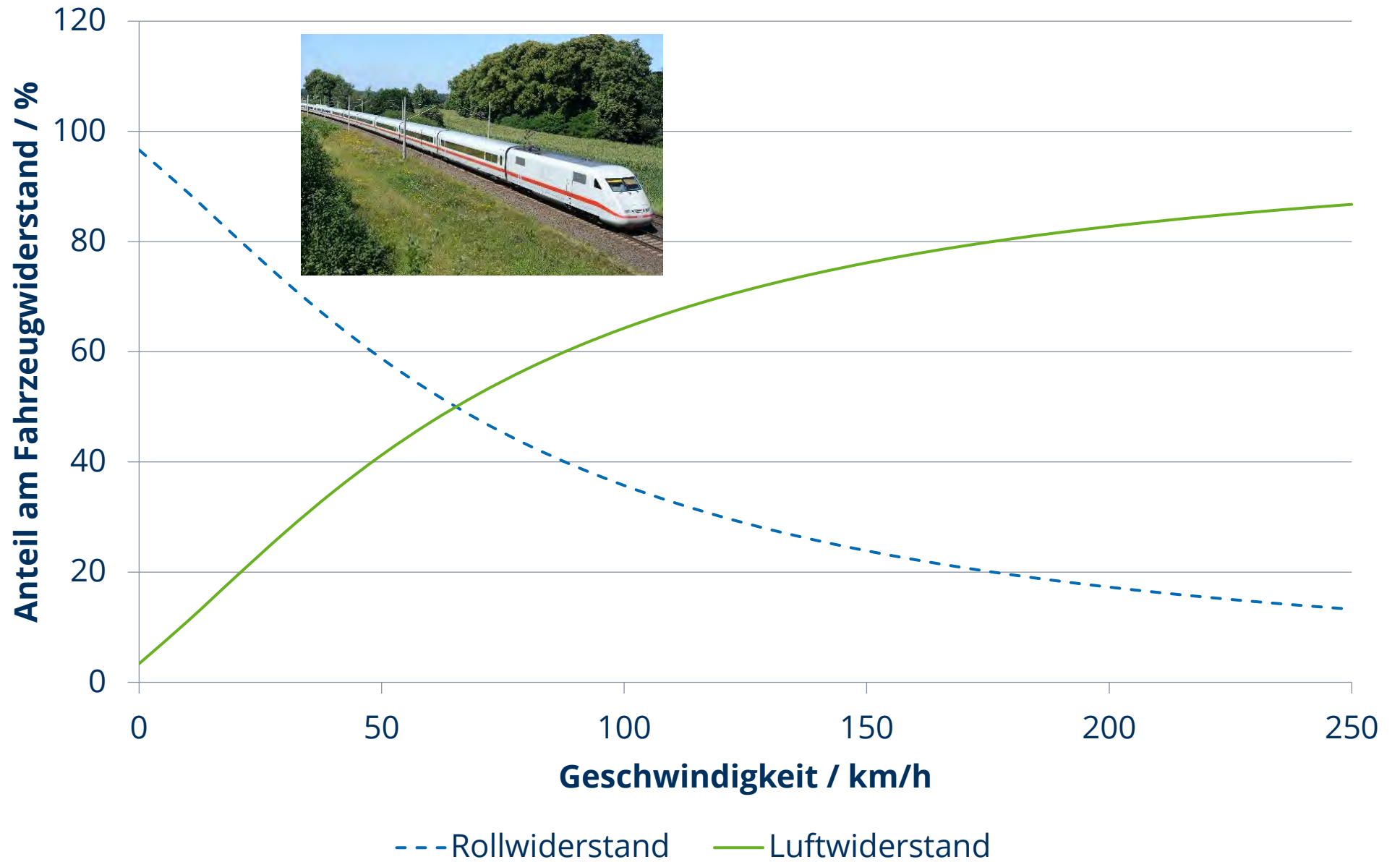


Bsp. 2: Güterganzzug mit Kesselwagen



Fotos:
Johannes Stier

Anteil Luftwiderstand (HGV)



Anteil Luftwiderstand (HGV)



ICE 1



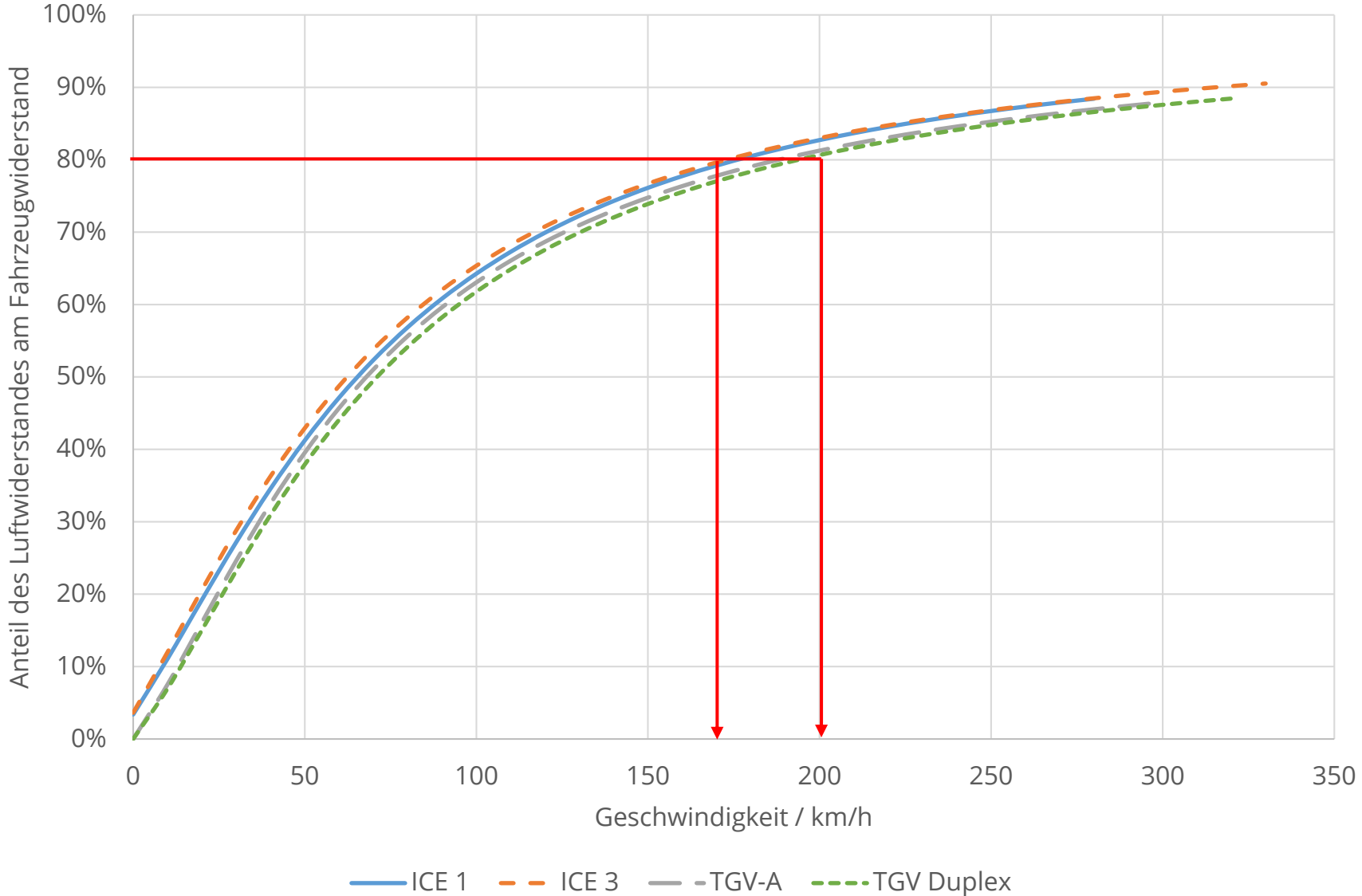
ICE 3



TGV-A



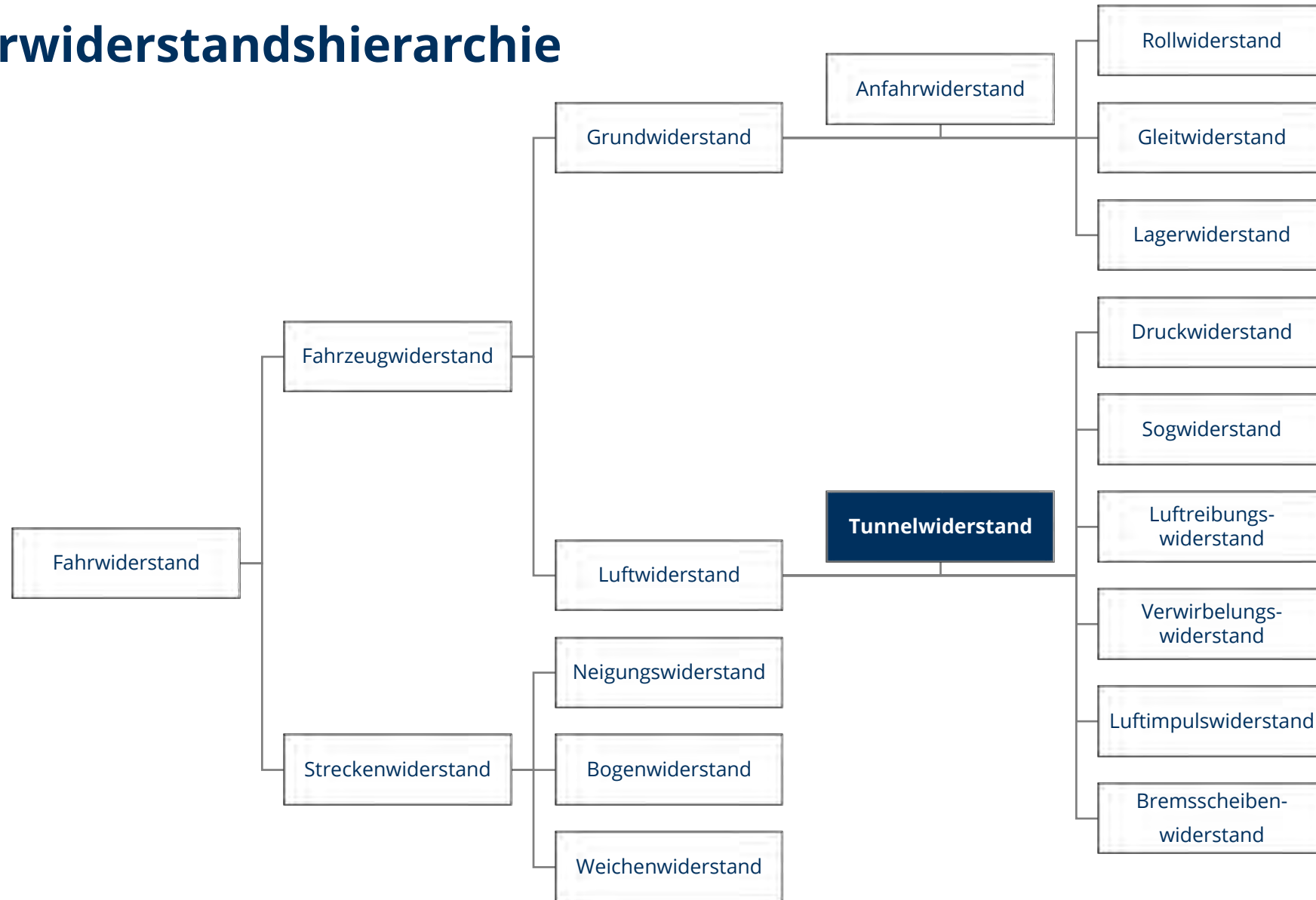
TGV Duplex



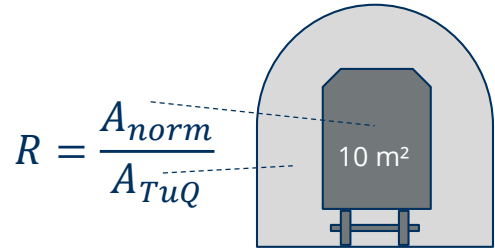
Tunnelwiderstand



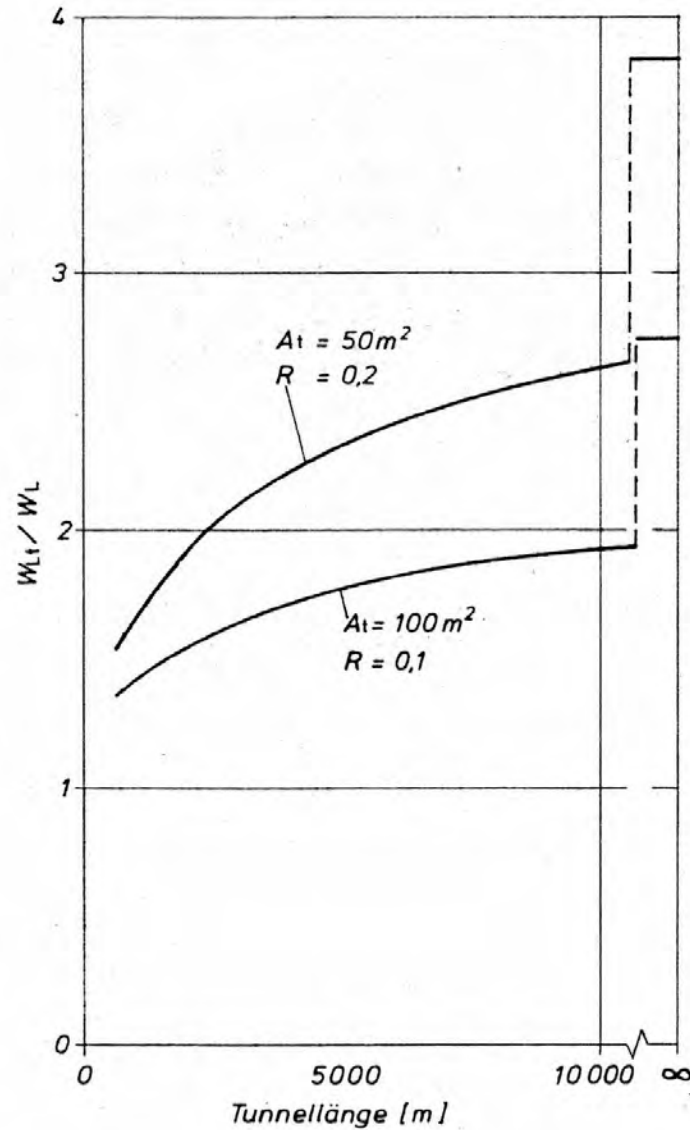
Fahrwiderstandshierarchie



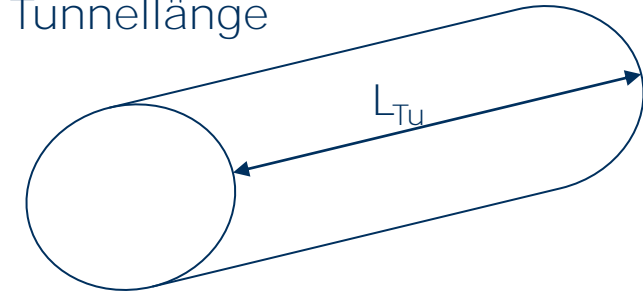
Luftwiderstand im Tunnel - Einflussfaktoren



Anmerkung: R - Versperrungskoeffizient

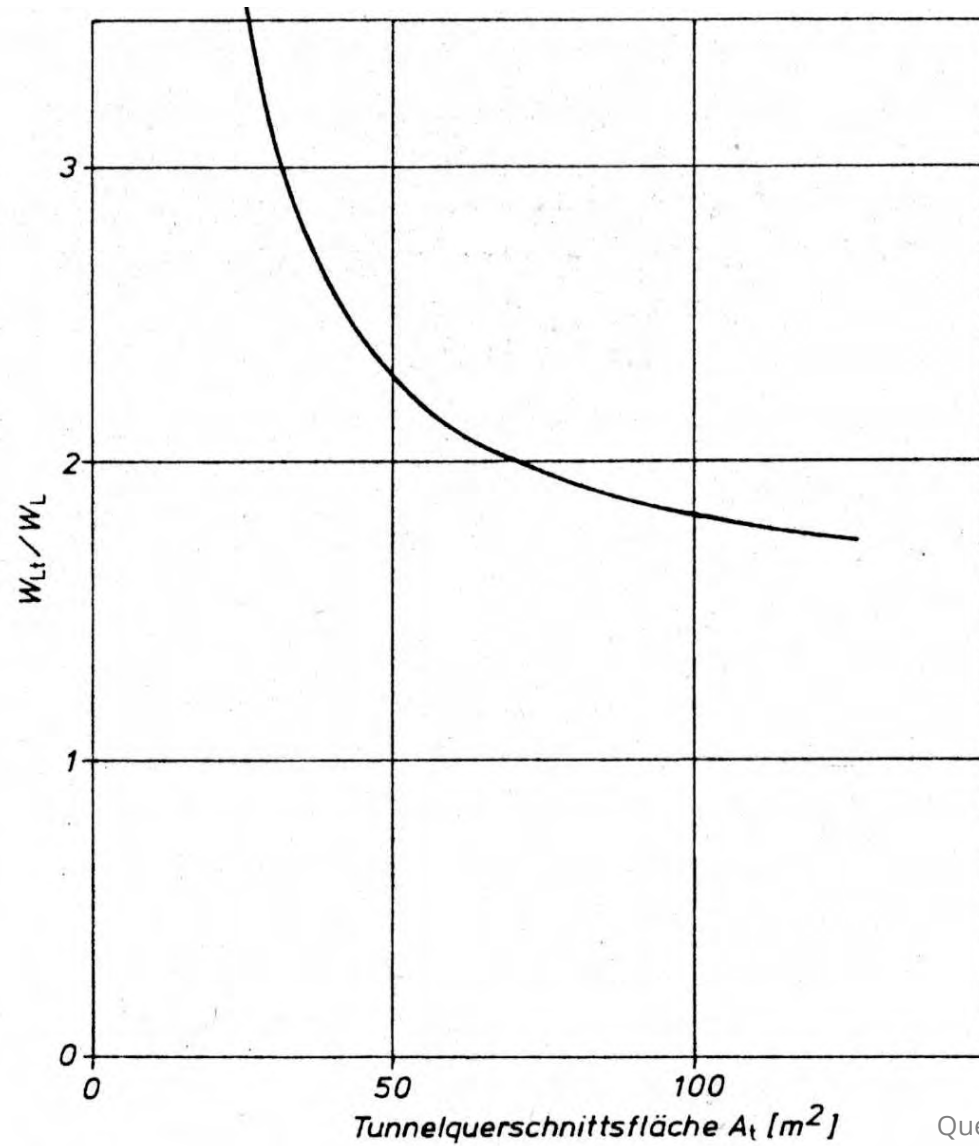


Tunnellänge

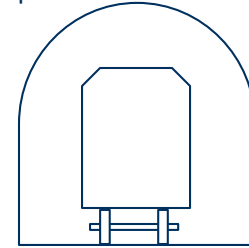


Quelle: Gackenholtz „Der Luftwiderstand der Züge im Tunnel“
ZEV-Glas. Ann. 98 (1974) Nr.3 März

Luftwiderstand im Tunnel – Einflussfaktoren



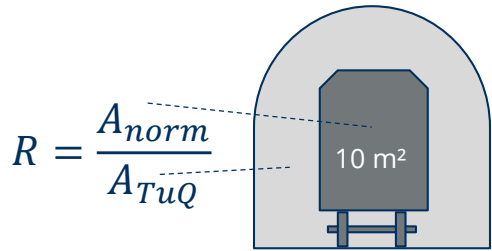
Tunnelquerschnitt



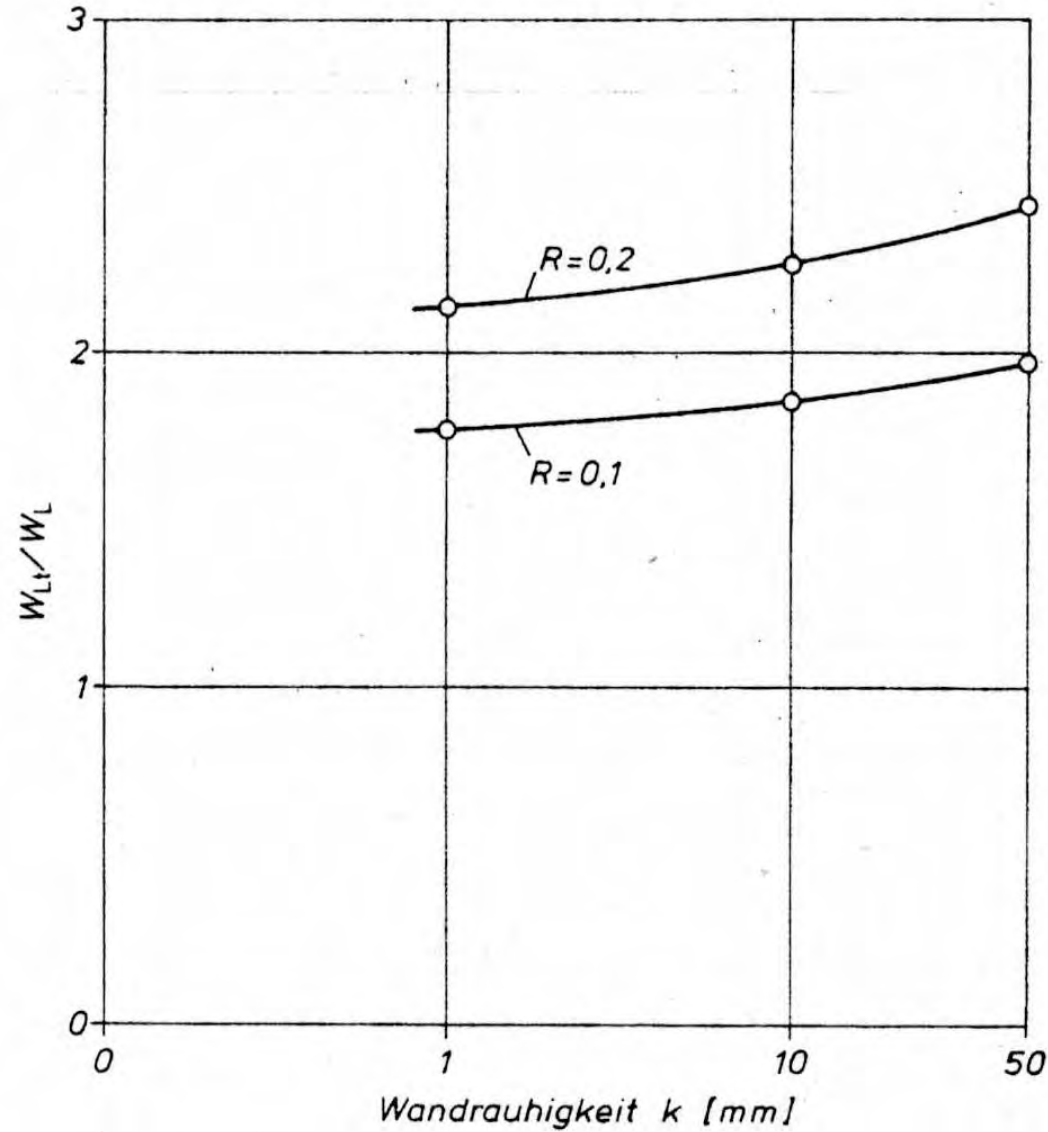
Quelle: Gackenholtz „Der Luftwiderstand der Züge im Tunnel“
ZEV-Glas. Ann. 98 (1974) Nr.3 März

Luftwiderstand im Tunnel - Einflussfaktoren

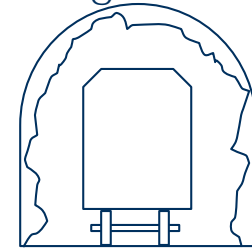
Anmerkung: R - Versperrungskoeffizient



$$R = \frac{A_{norm}}{A_{TuQ}}$$

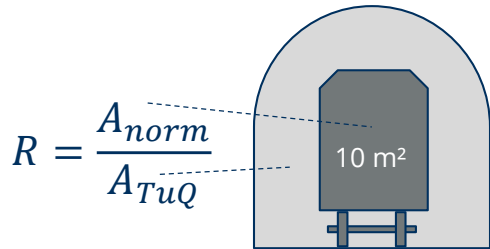


Wandrauhigkeit

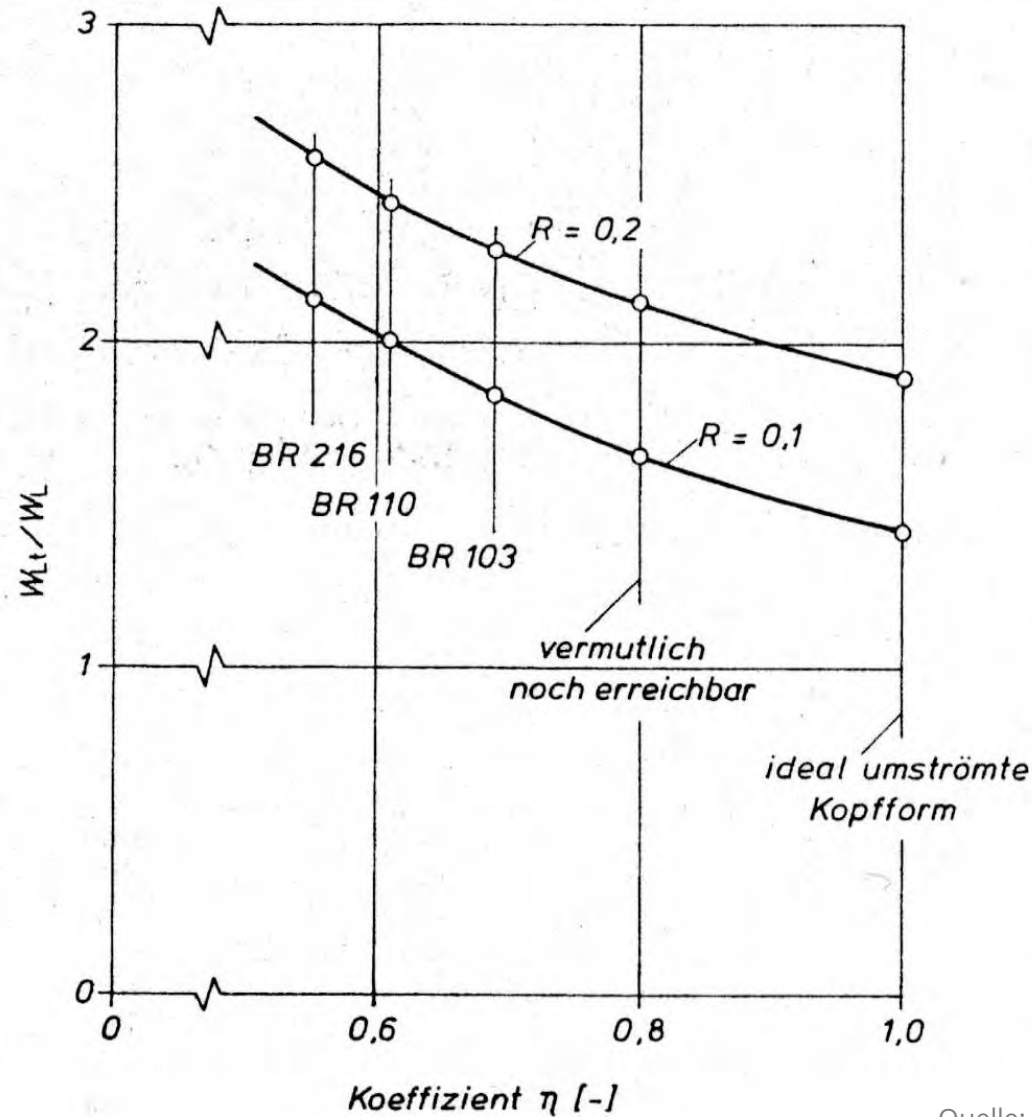


Quelle: Gackenholtz „Der Luftwiderstand der Züge im Tunnel“
ZEV-Glas. Ann. 98 (1974) Nr.3 März

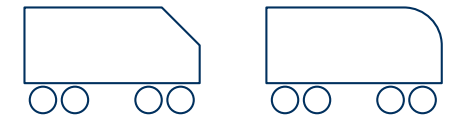
Luftwiderstand im Tunnel - Einflussfaktoren



Anmerkung: R - Versperrungskoeffizient



Kopfform



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

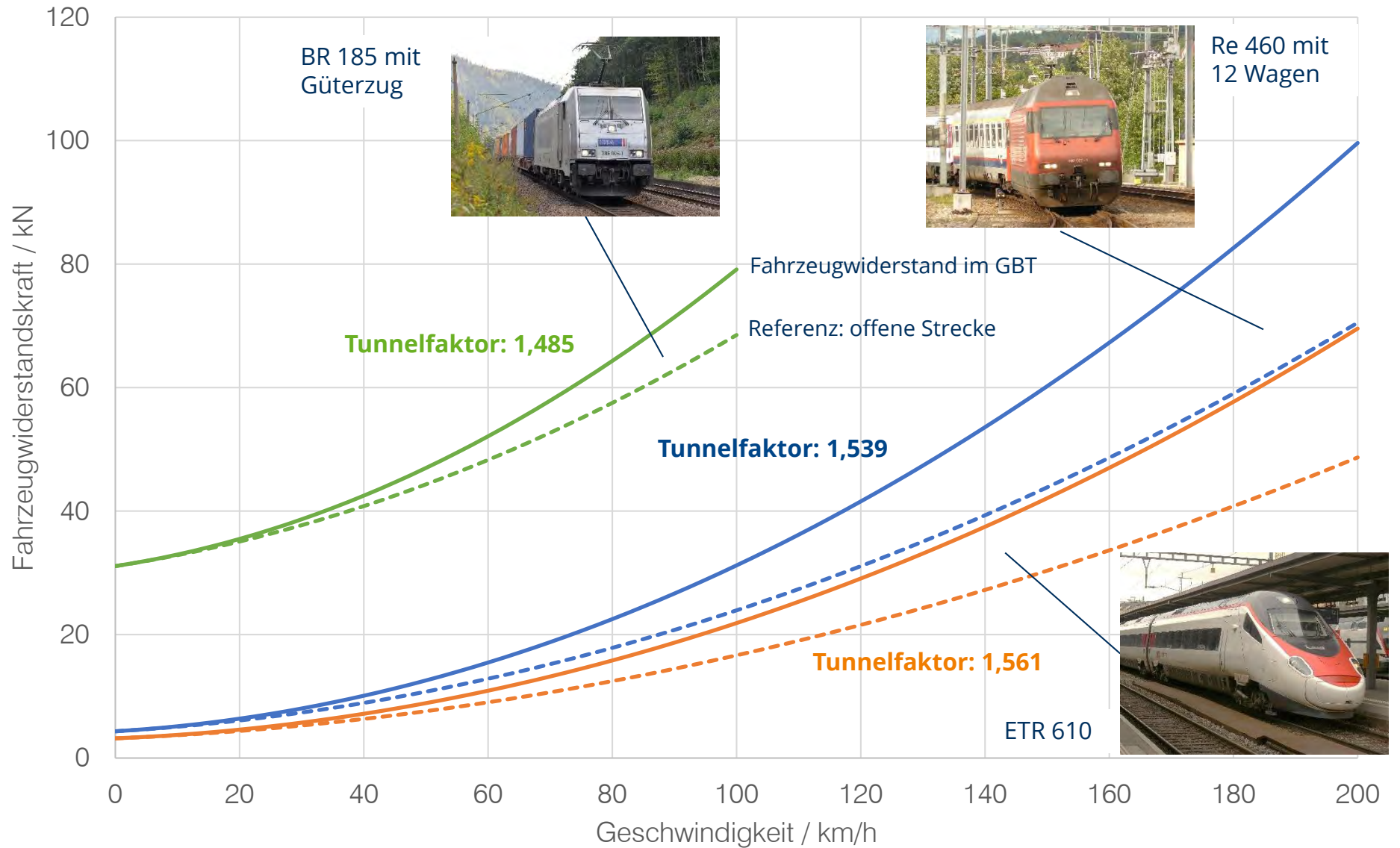
Luftwiderstand im Gotthard-Basistunnel (GBT)



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.

Luftwiderstand im Lötschberg-Basistunnel



Rollende Landstraße



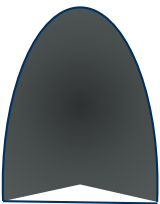
Containerzug



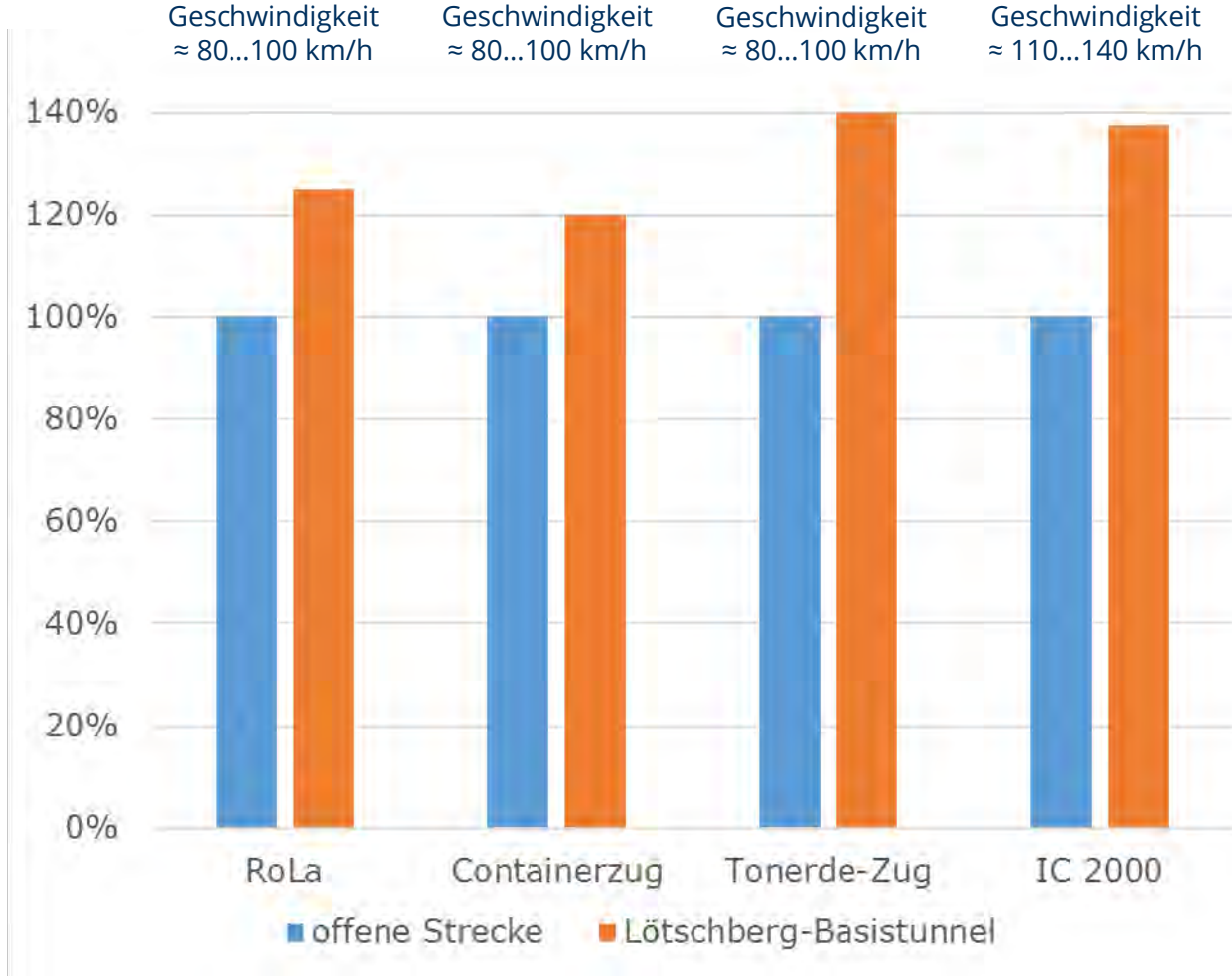
IC 2000



Karte: wikipedia (User: Tschubby)



Lötschberg-Basistunnel
 Bj. 1999-2007
 $A = 45,0 \text{ m}^2$
 $k_v = 0,22$
 $l_{Tu} = 34,6 \text{ km}$



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

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