

Dipl.-Ing. Tobias Bregulla
Professur für Elektrische Bahnen

Fahrdynamik für das Verkehrsingenieurwesen

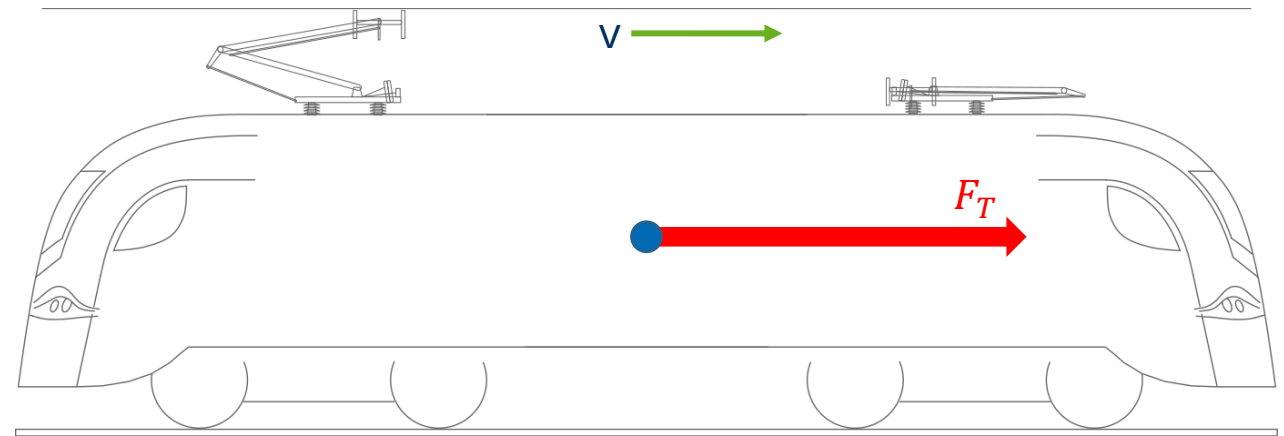
VL 03: Antriebskräfte

Sommersemester 2023

Vorlesungsinhalte

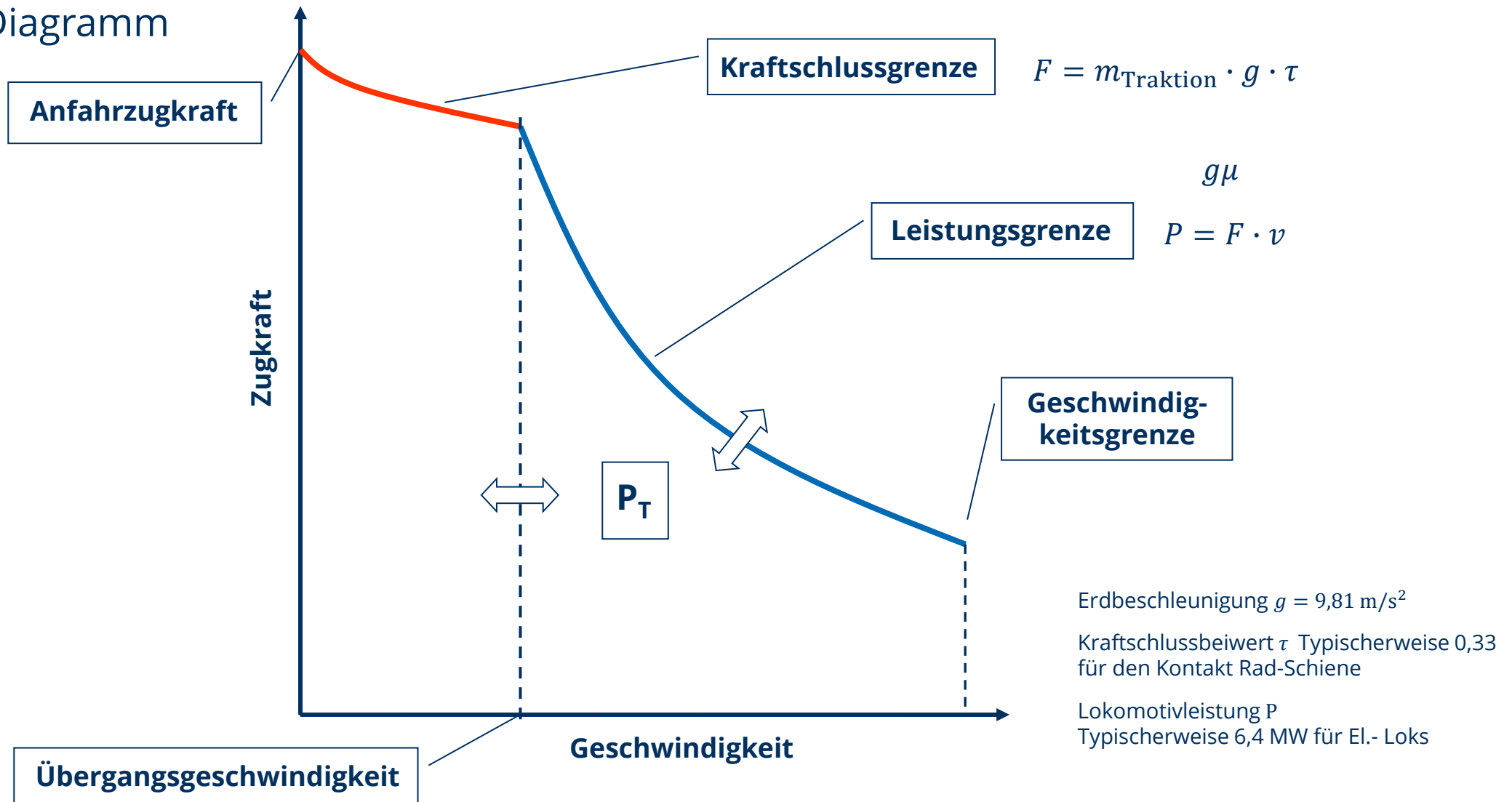
Schwerpunkt Schienenverkehr

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



Antriebskräfte

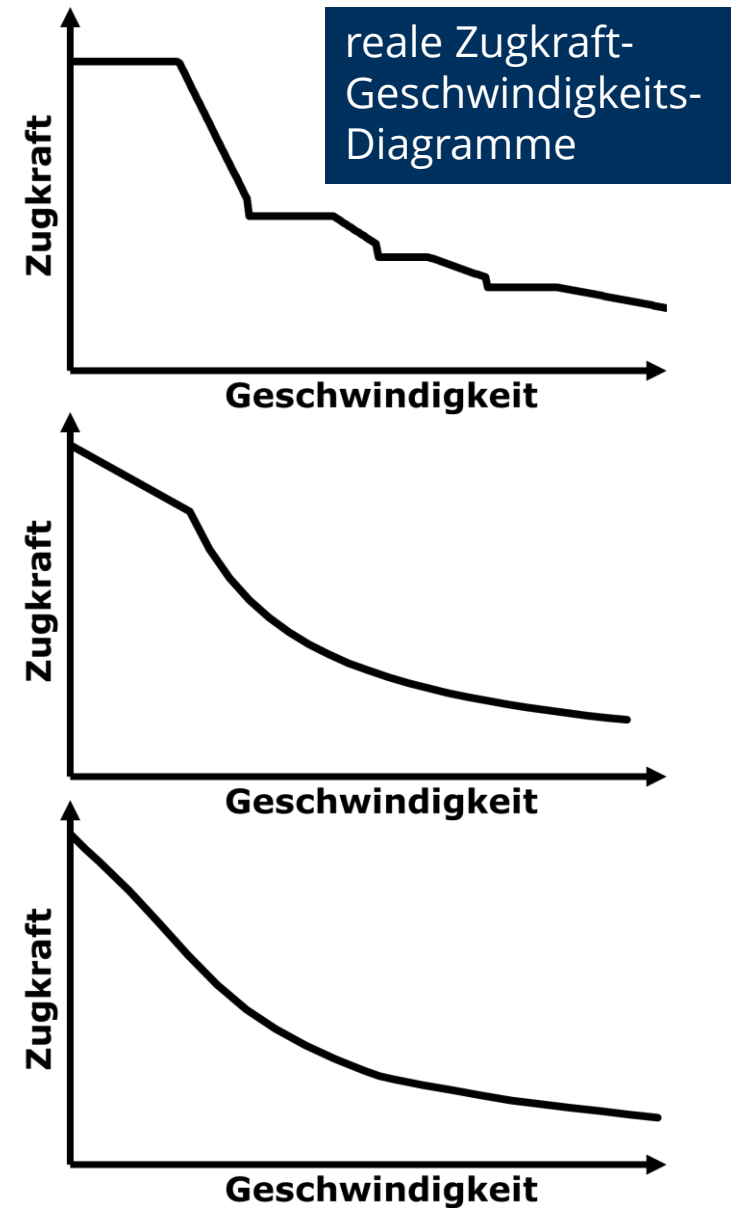
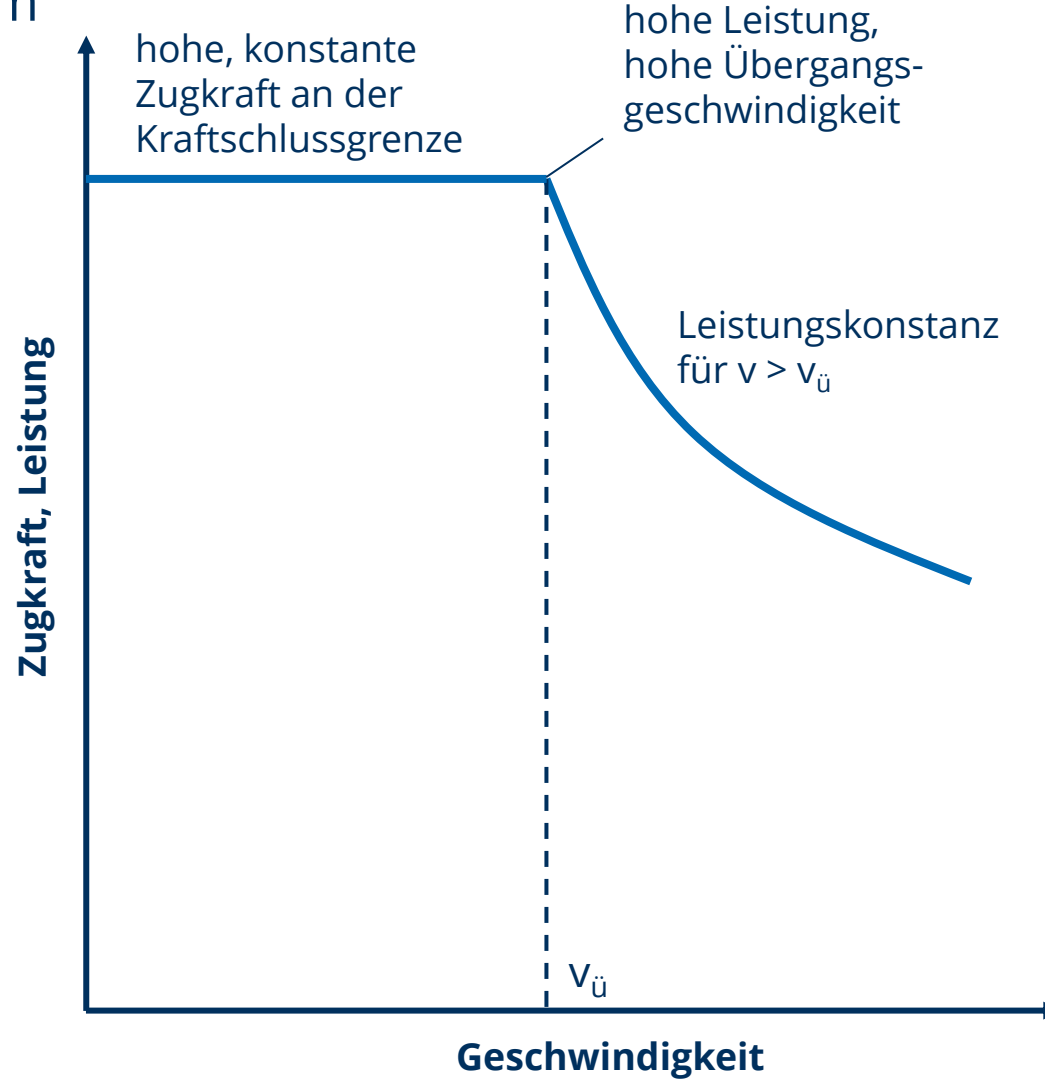
Zugkraft-Diagramm



Antriebskräfte

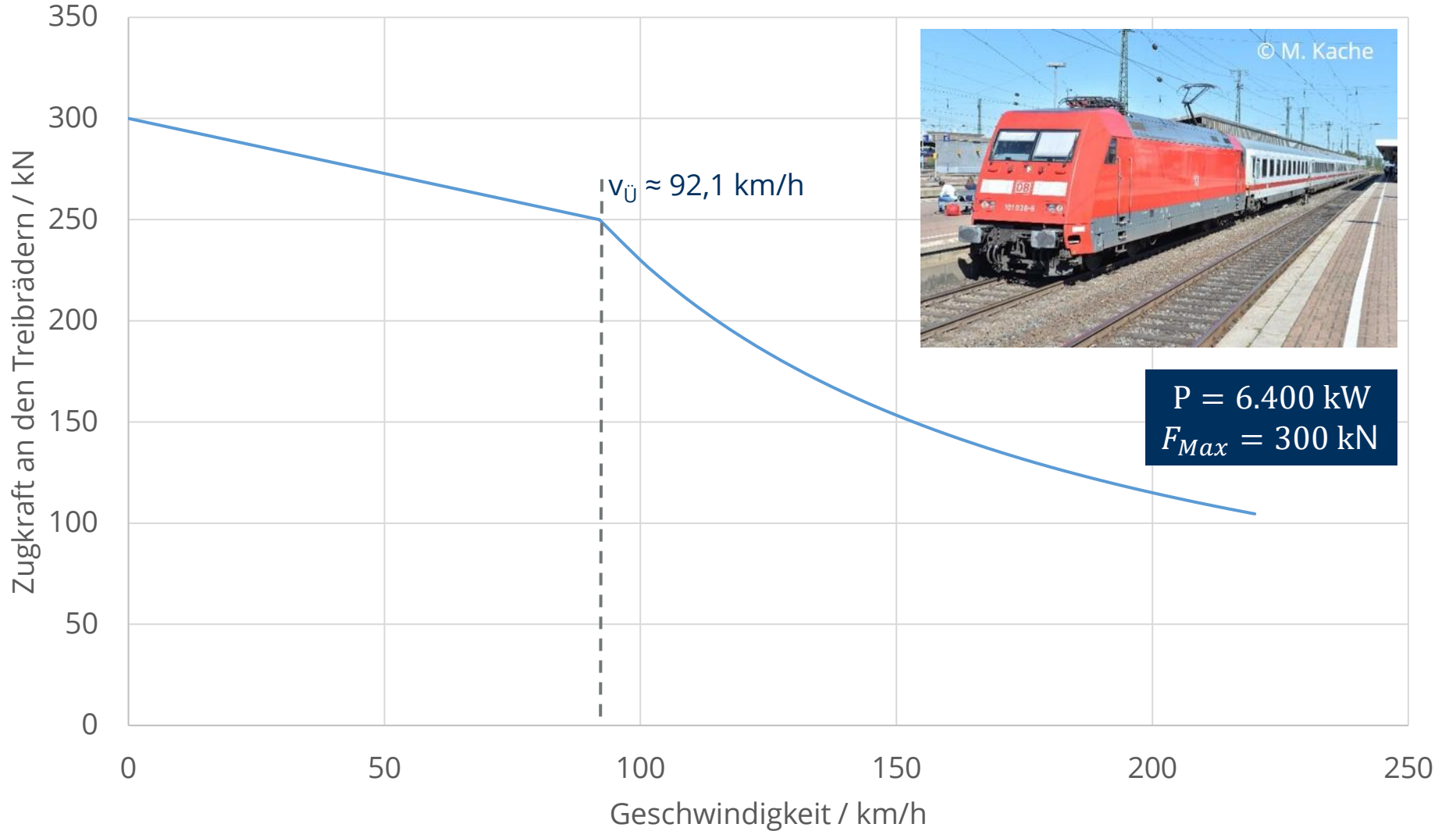
Zugkraft-Diagramm

ideales Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramm



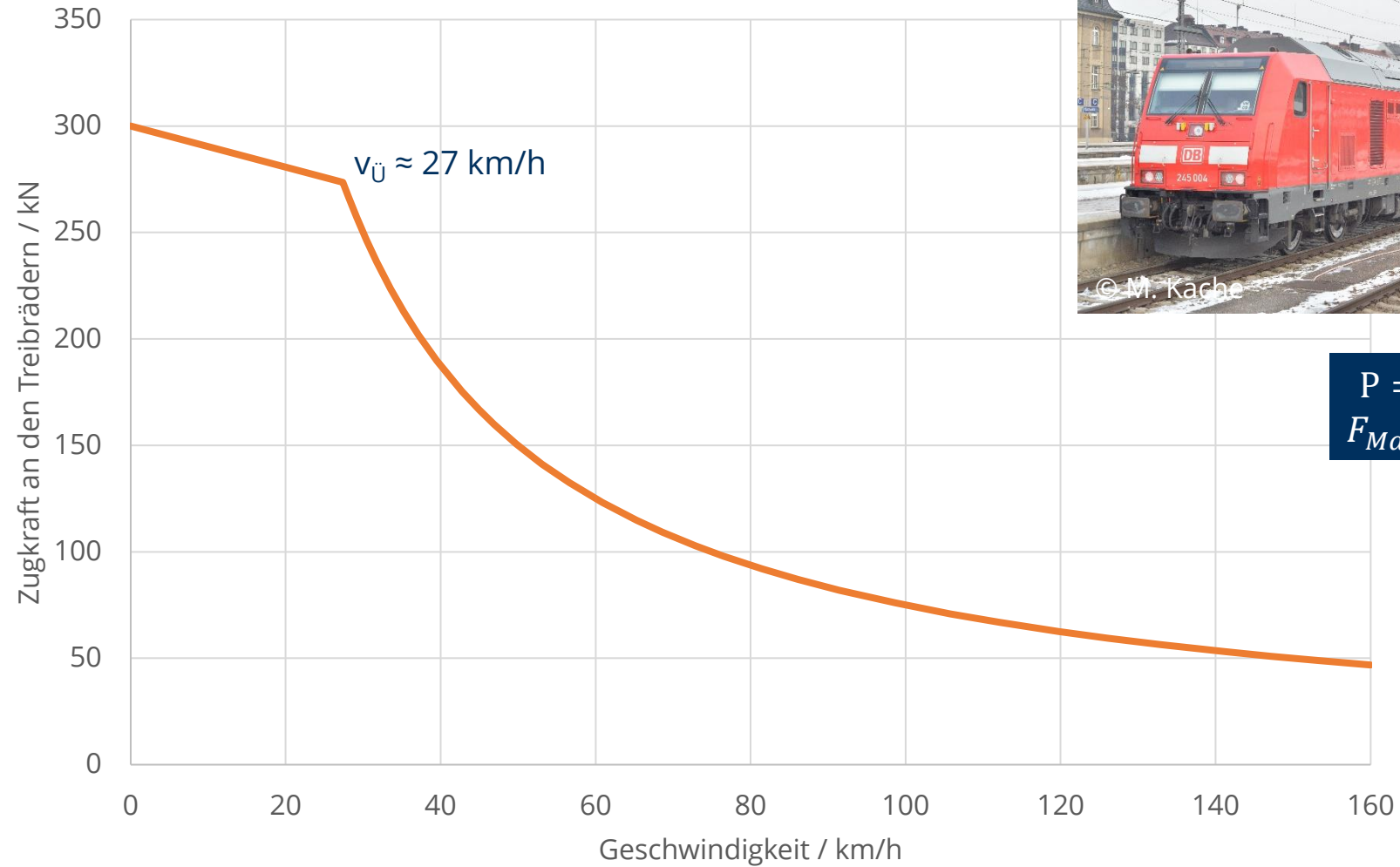
Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramm

Beispiel: BR 101



Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramm

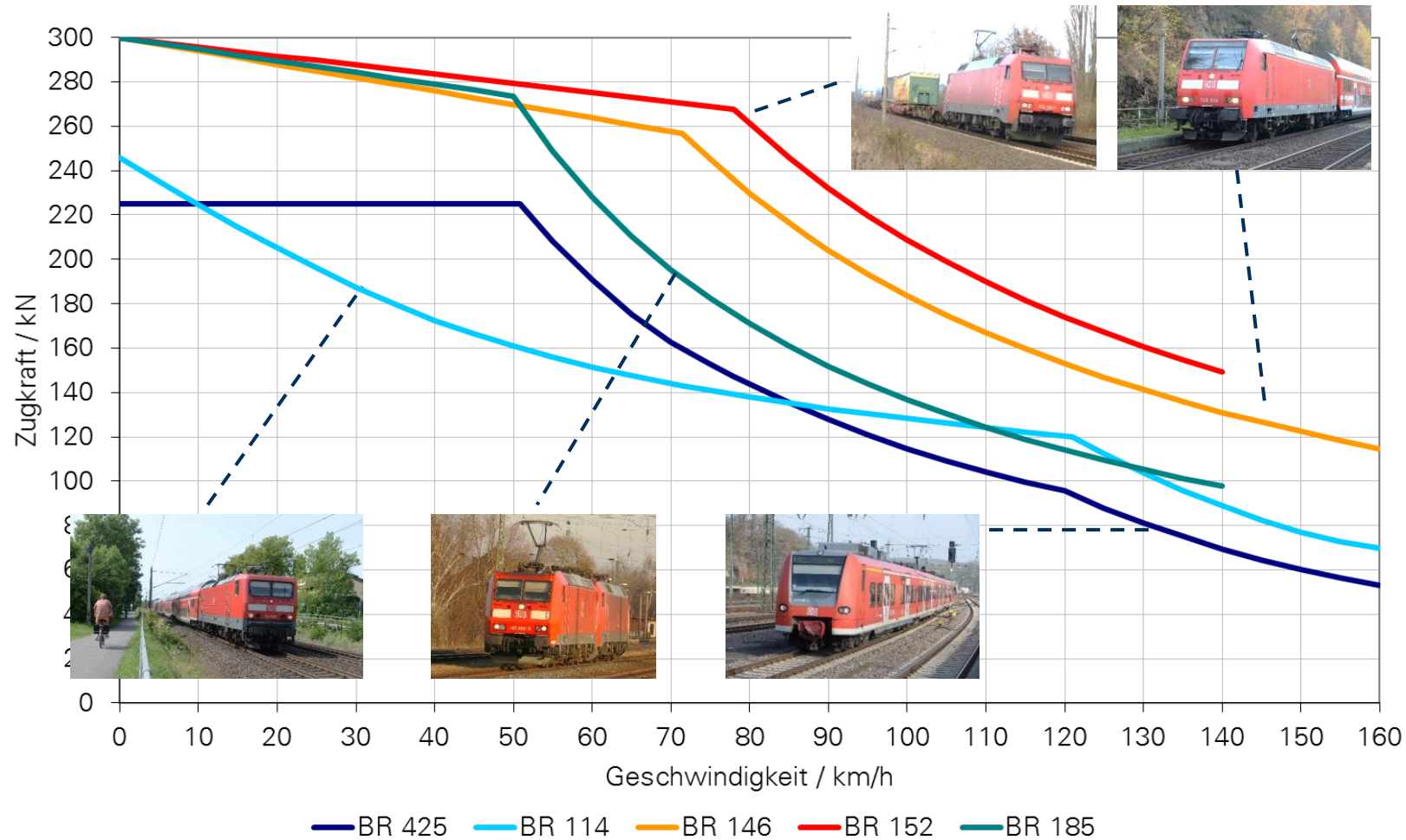
Beispiel: BR 245



$P = 2.252 \text{ kW}$
 $F_{Max} = 300 \text{ kN}$

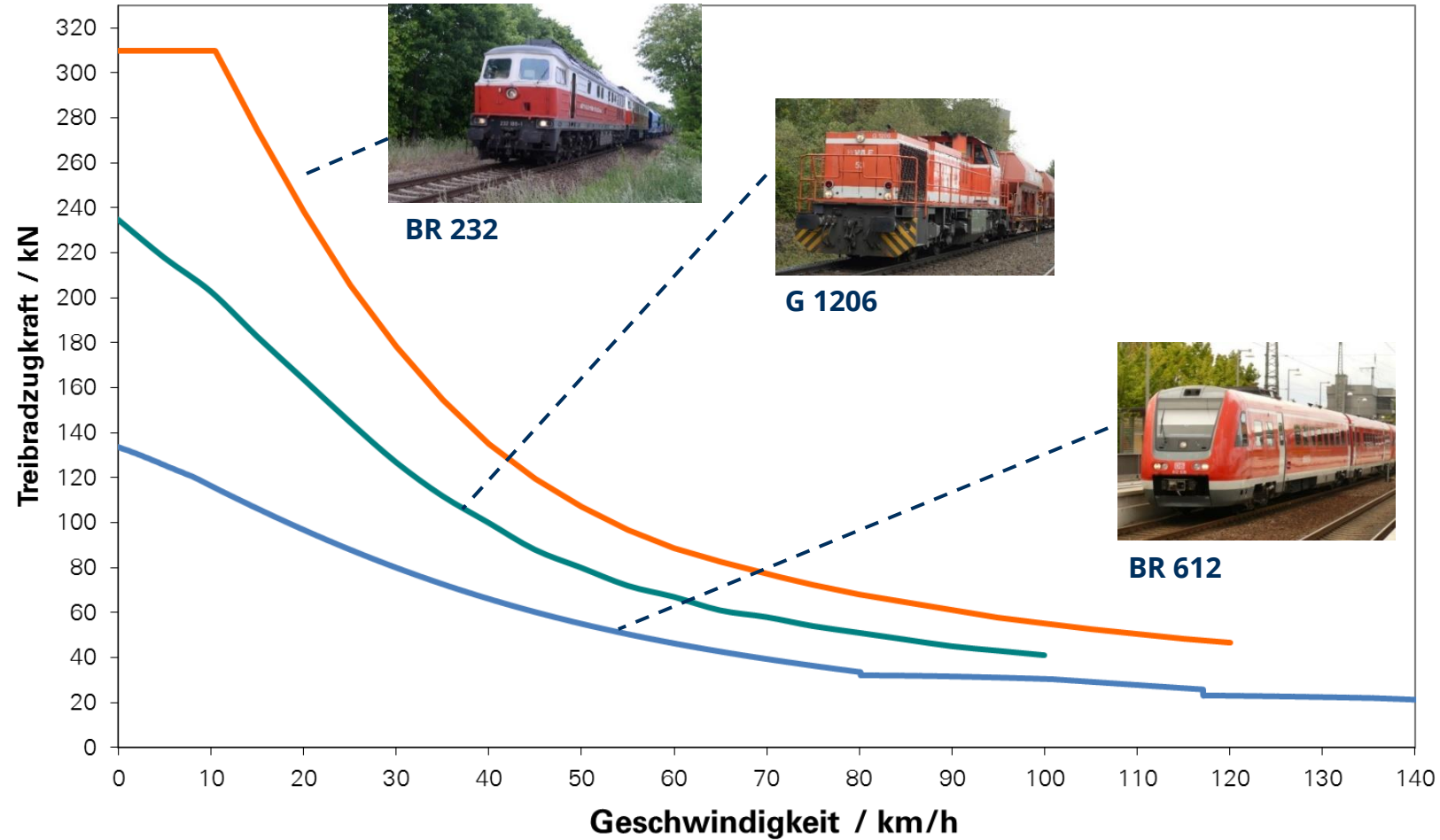
Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramme

Elektrische Antriebe



Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramme

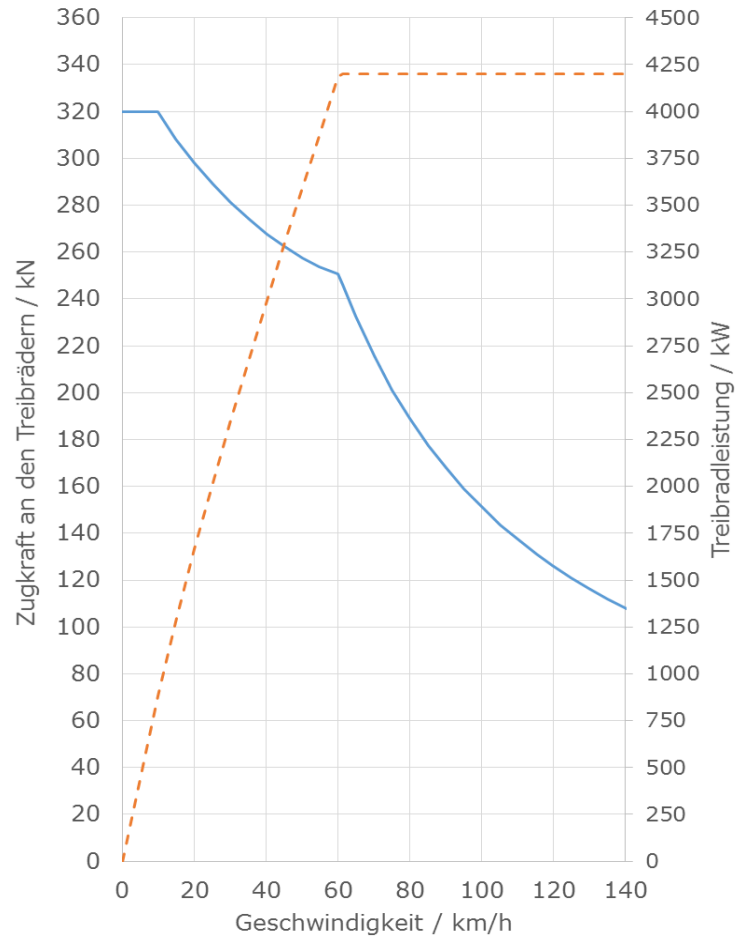
Dieselantriebe



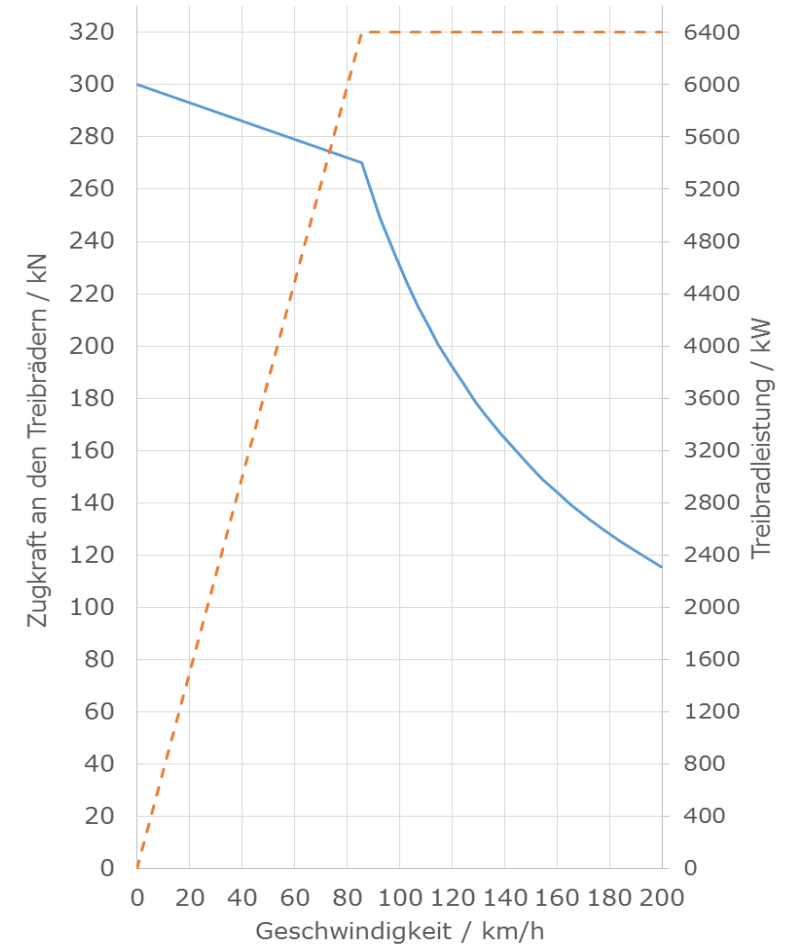
Zugkraftdiagramme

E-Traktion

BB 37000 (SNCF)

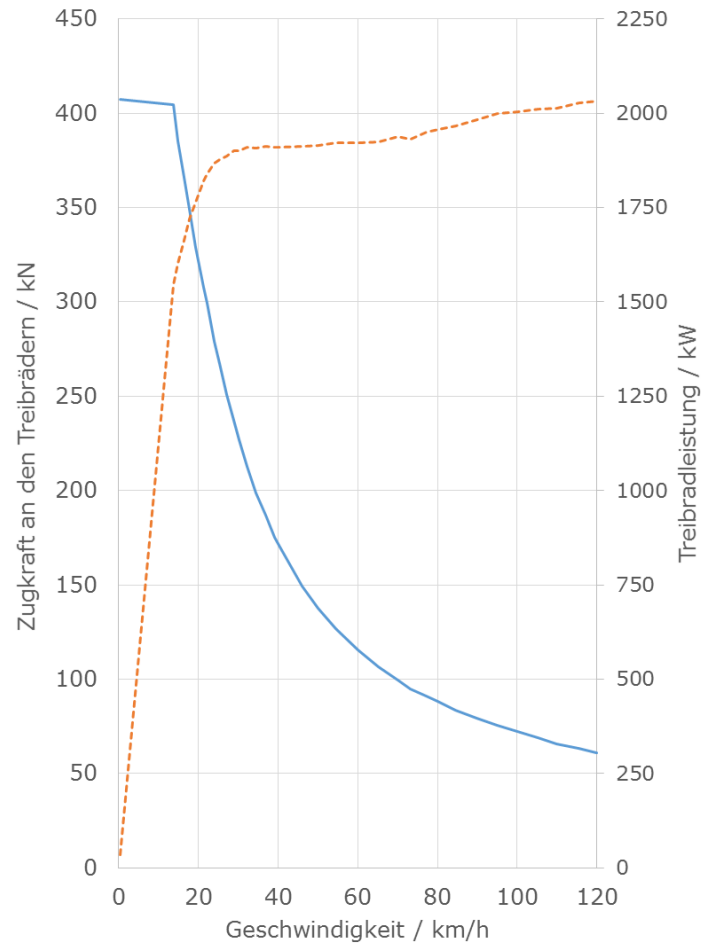


BR 193 (Siemens Vectron)



Zugkraftdiagramme

Dieseltraktion

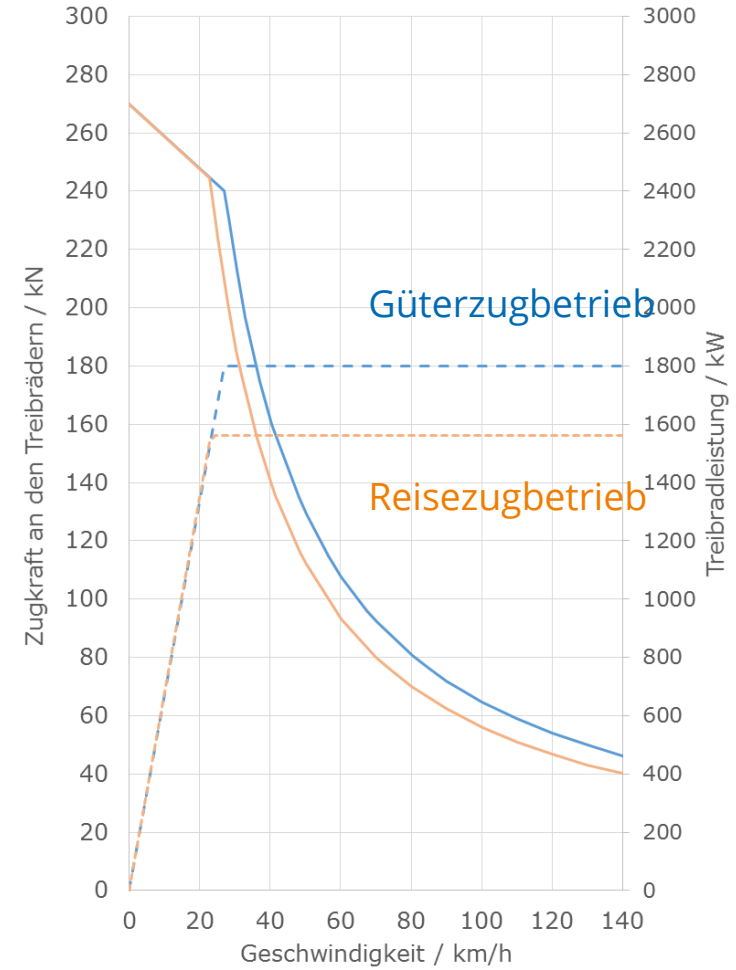


BR 247 (class 66)

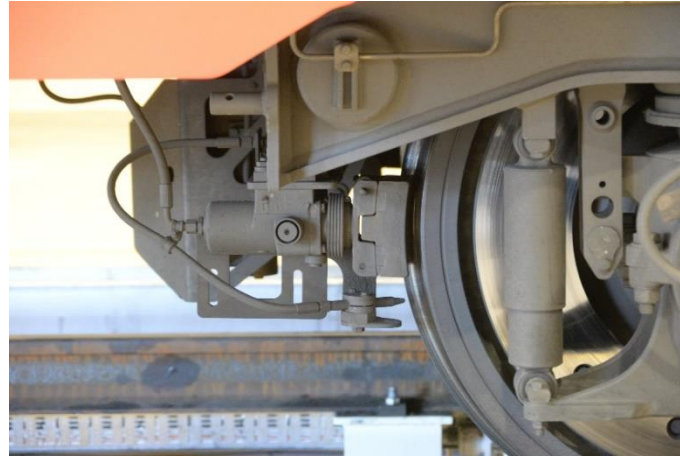


— Treibradzugkraft
 - - - Treibradleistung

**Traxx F140 DE
 / P160 DE**



Kraftschluss Rad – Schiene



Kraftschlussmechanismus

**Definition
Längsschlupf:**

$$s_x = \frac{\omega r - v}{v}$$

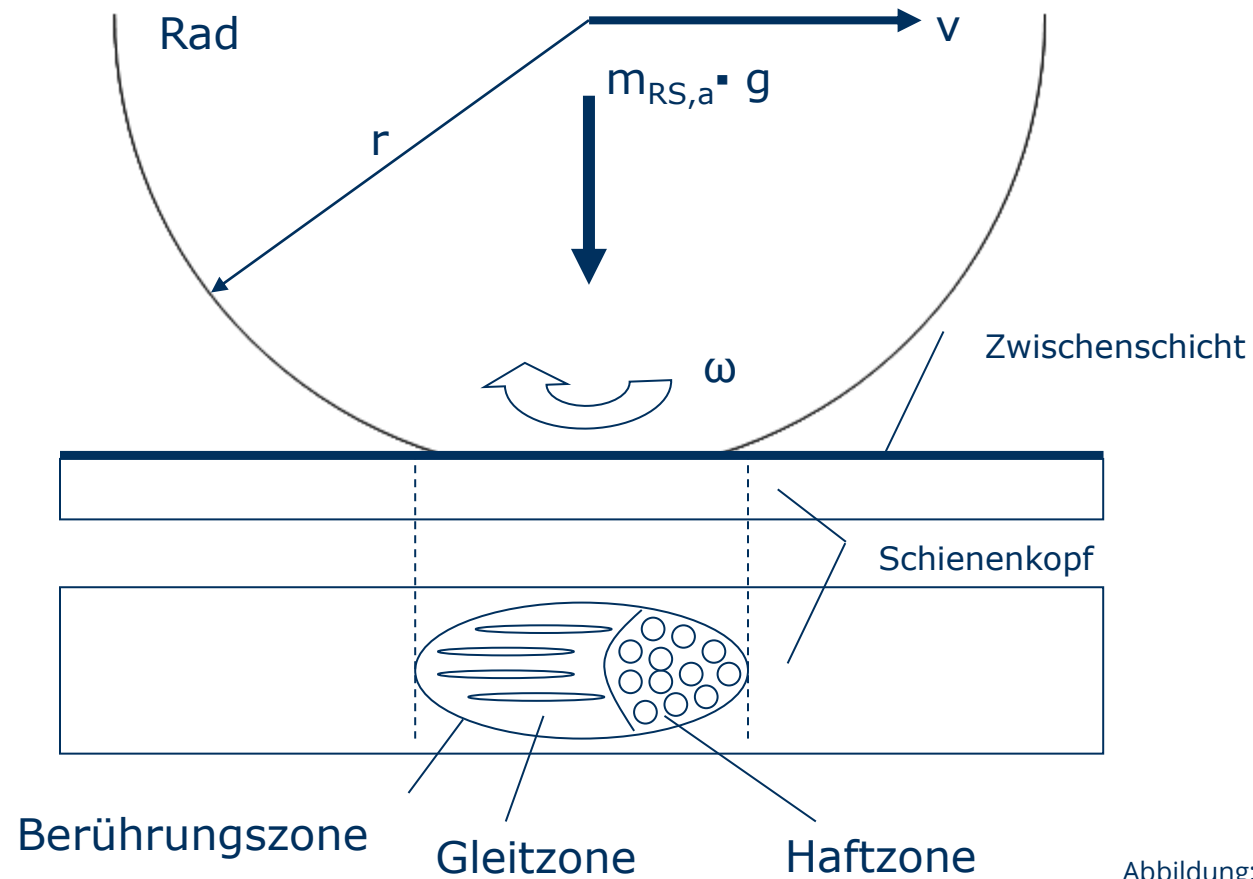
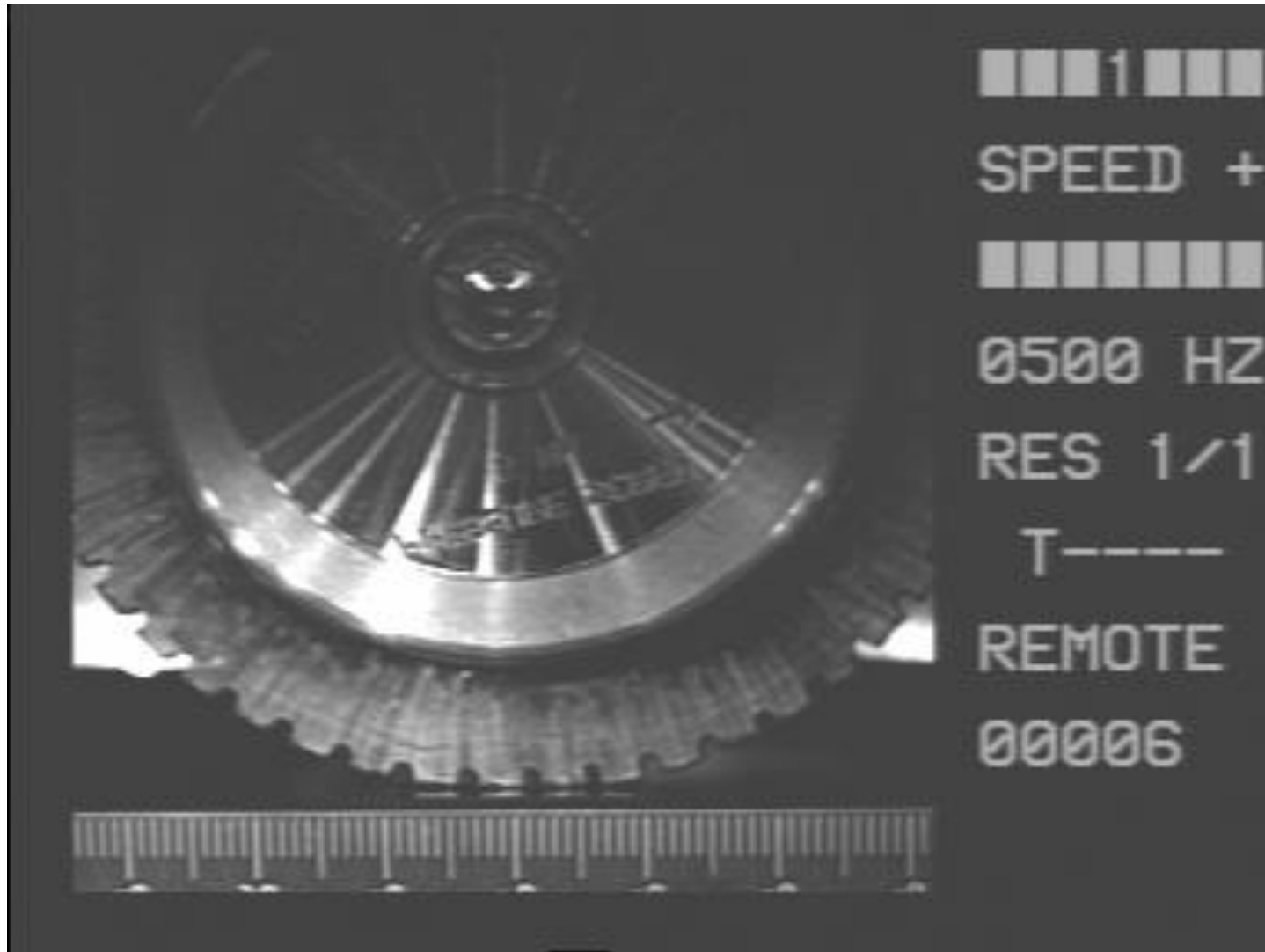


Abbildung: M. Kache

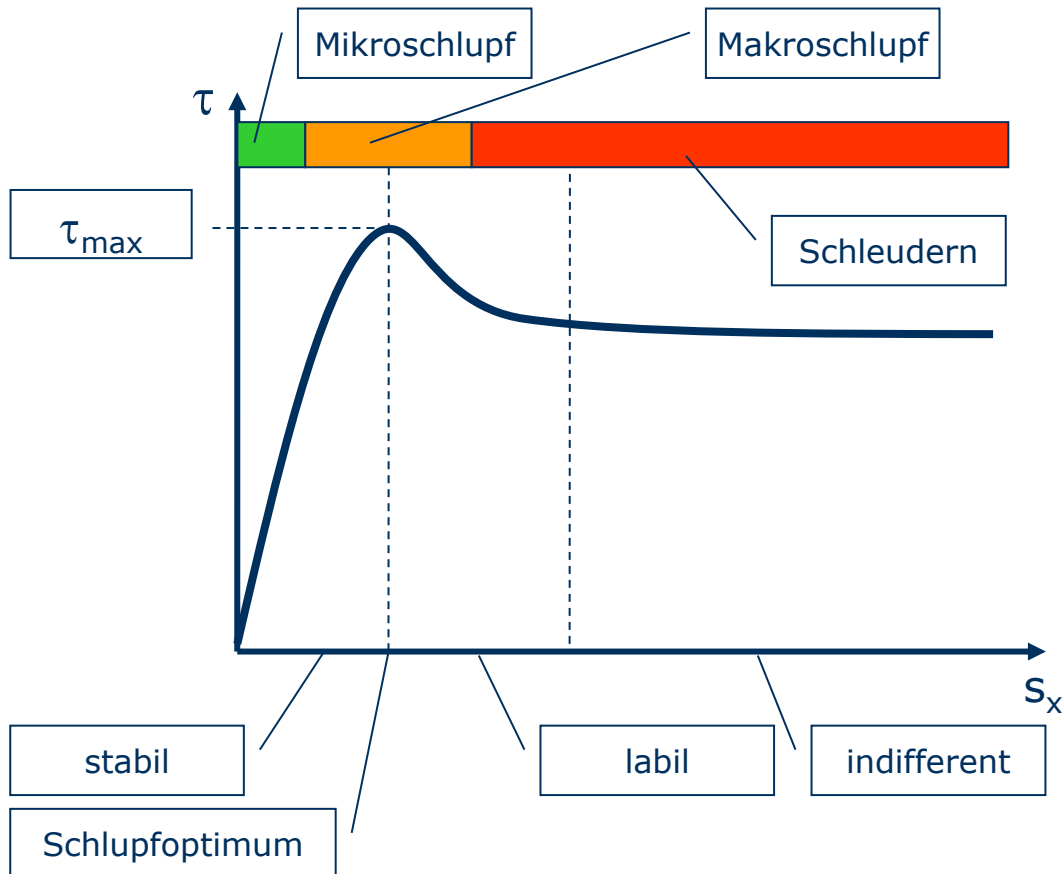
Kraftschlussmechanismus



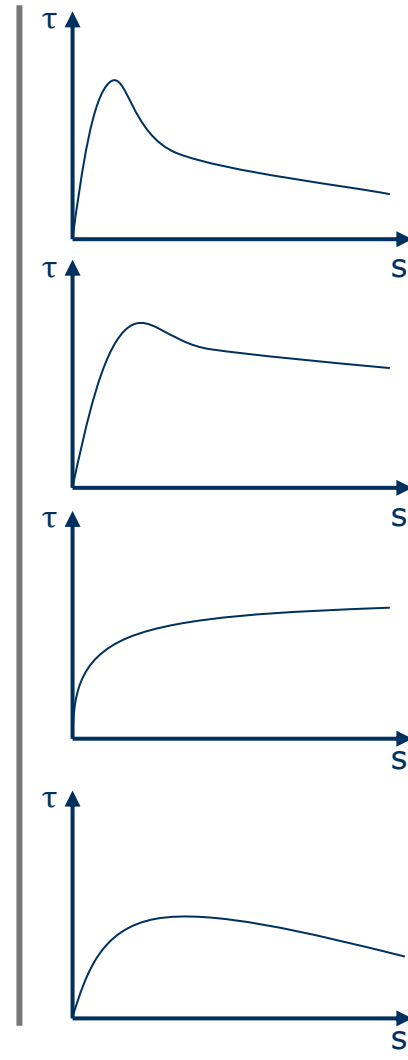
Quelle:
Continental

Kraftschluss-Schlupf-Funktion

Rad-Schiene-Kontakt



mögliche Verläufe (u.a.):



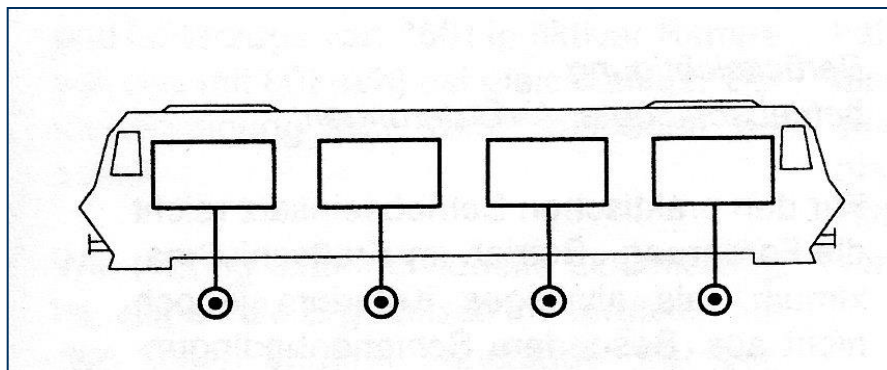
Faktoren, die die **Höhe**, **Lage** und **Ausprägung** des Kraftschlussmaximums beeinflussen:

- Witterung - Nässe, Eis
- Zwischenschicht - Laub, Öl, Staub, Sand
- Querschlupfbeanspruchung (Bogenfahrt, Spurführung)
- Längsschlupfvorbeanspruchung (Kopplung der Radsätze)

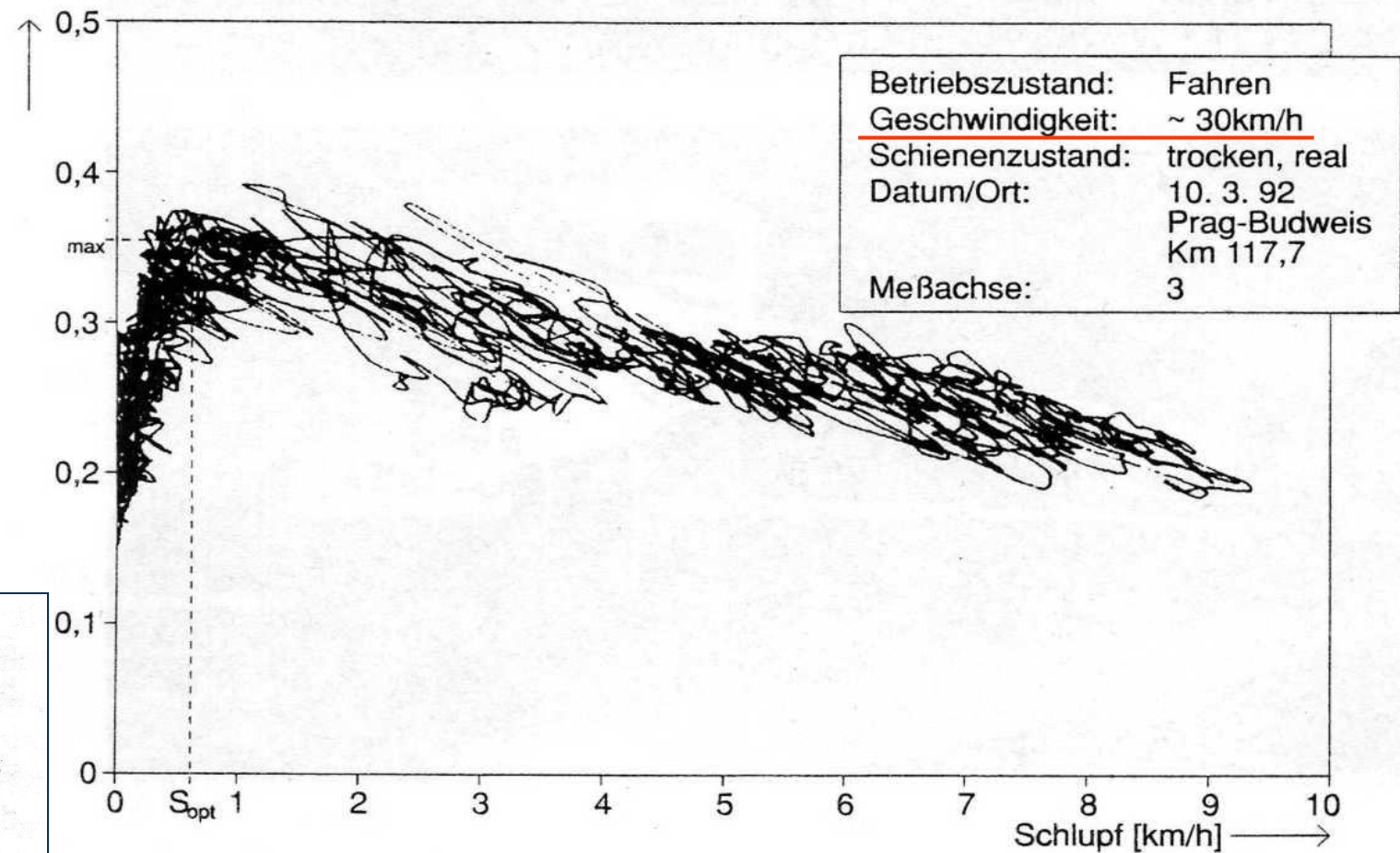
Messungen zur Kraftschlussausnutzung



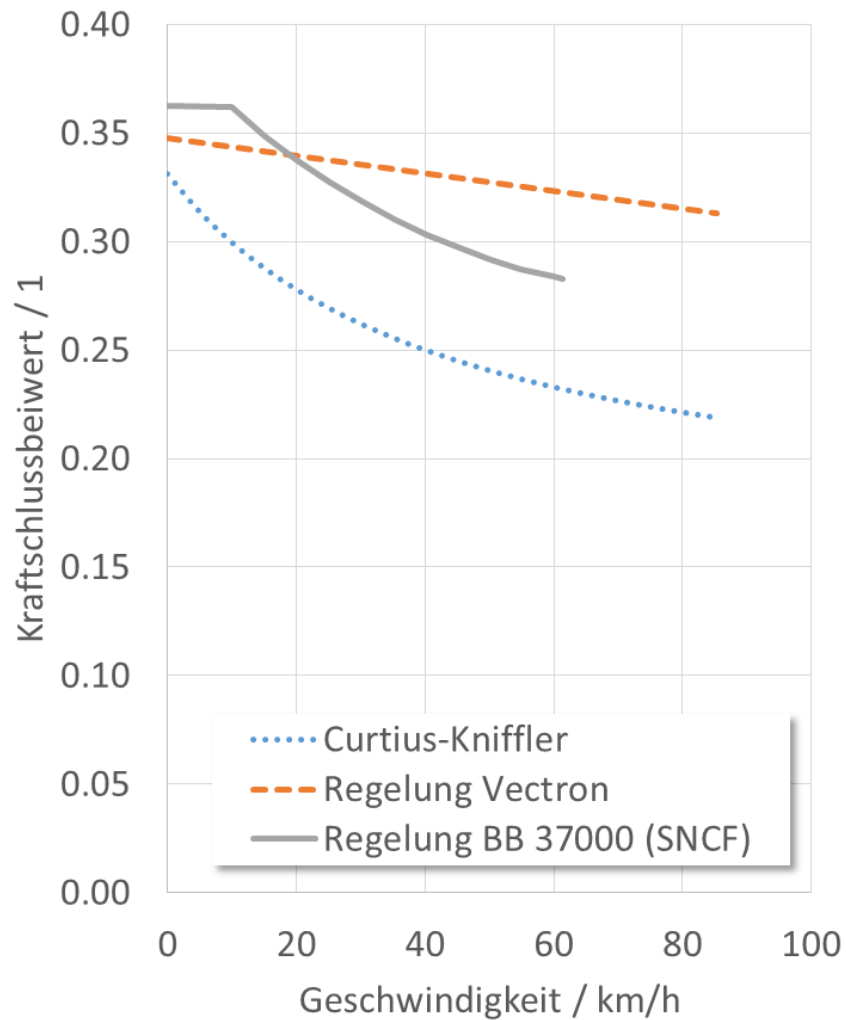
Beispiel: Siemens EuroSprinter



ein Umrichter je Fahrmotor: radsatzselektive Schlupfregelung



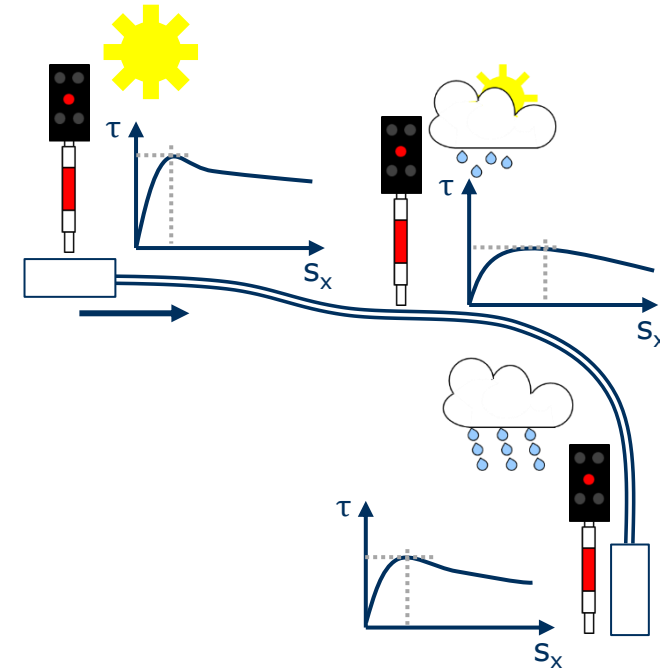
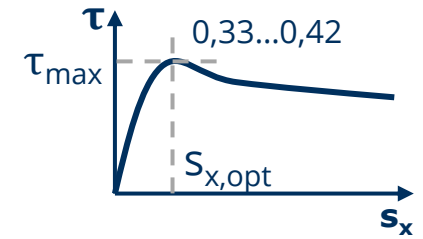
Ausnutzbarer Kraftschluss



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

Radsatzlast

Kraftschlussbeiwert

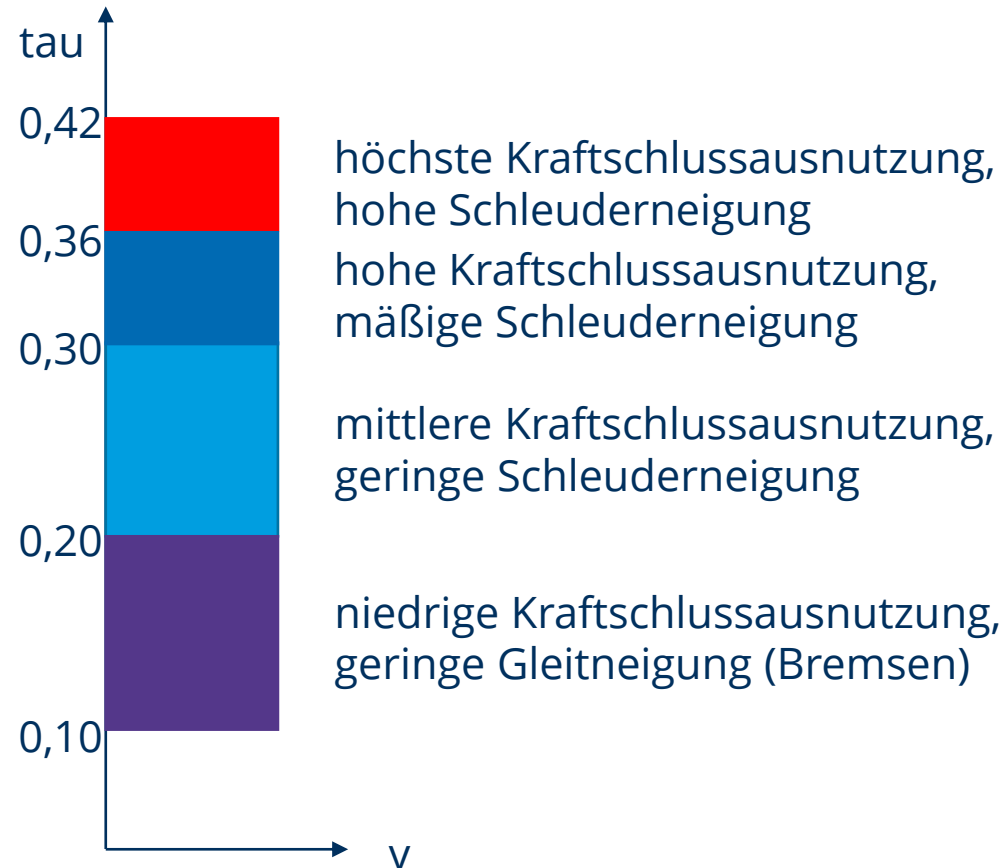


Kompensationseinrichtungen

- Sandungseinrichtung
- Radsatzschlupfregelung

Kraftschlussausnutzung

Fahrzeugauslegung und Kraftschluss-Niveau (Schienenverkehr)



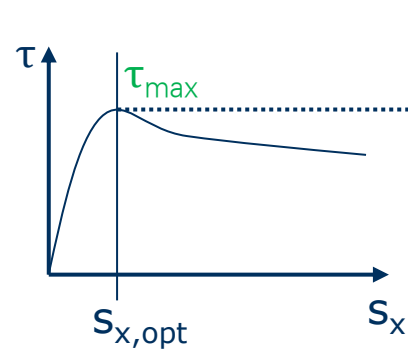
ausnutzbarer Kraftschluss:
von Umweltbedingungen Abhängig
(physikalische Obergrenze)

ausgenutzter Kraftschluss:
von Fahrzeug-/Antriebskonfig. abhängig
(technische Obergrenze)

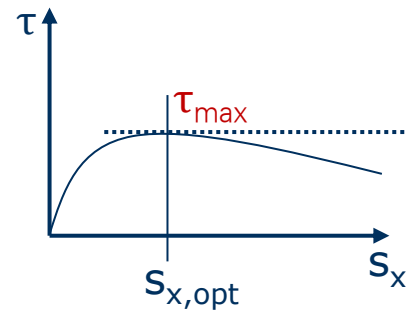
typische Kraftschlusswerte für Traktion bei Schienenfahrzeugen: **0,33...0,36** – wahrscheinliche Bedingungen.
Kraftschlusswerte für Bremsauslegung von Schienenfahrzeugen: **0,12...0,15** – „sichere“ Bedingungen.

Ausnutzbarer Kraftschluss

saubere Schienen
(trocken oder nass)



schmierige Schienen



Sanden,
Putzklötze

Kraftschlussvorbeanspruchung
durch Spurführungskräfte



Putzklötz



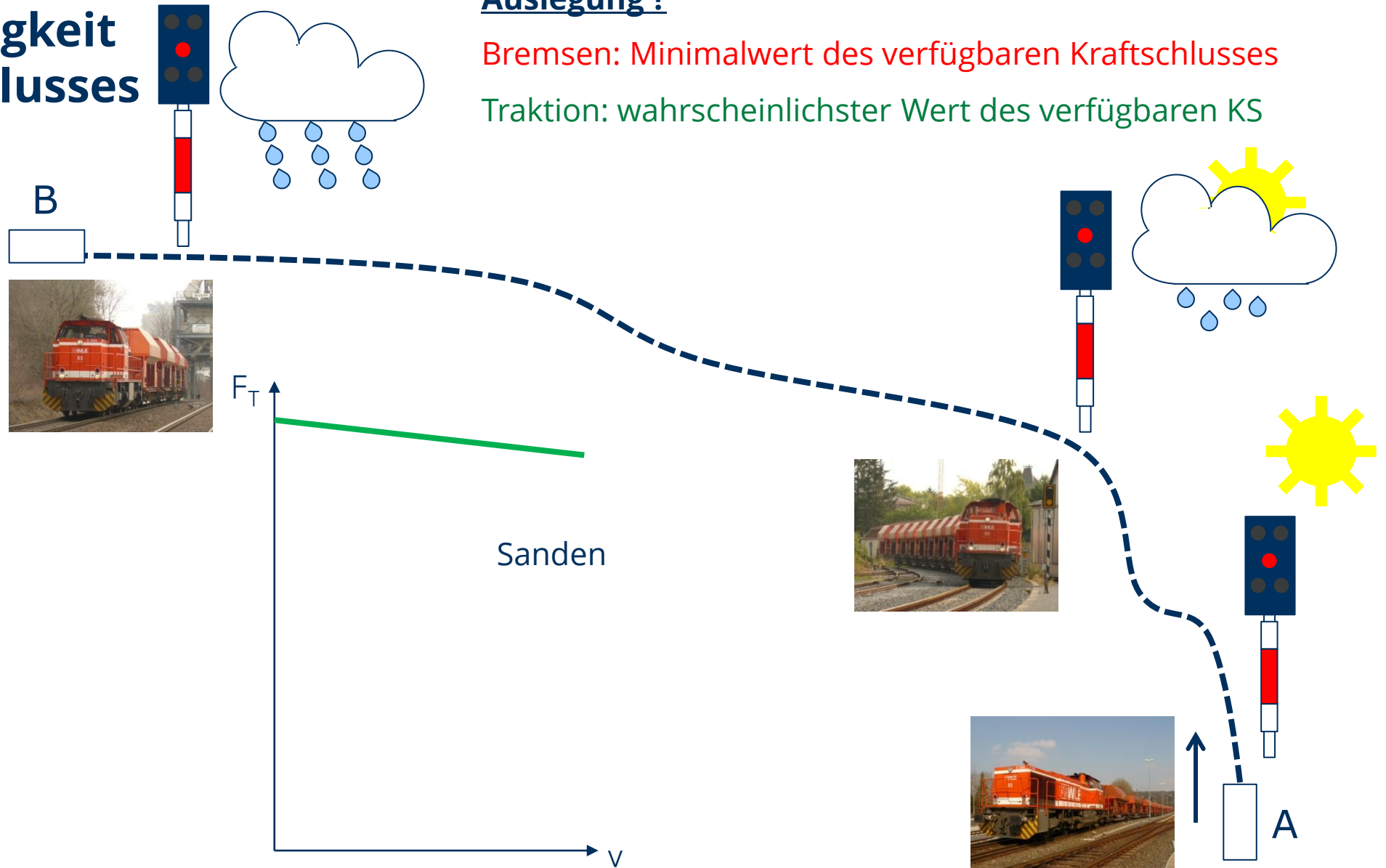
Sandungsanlage

Ortsabhängigkeit des Kraftschlusses

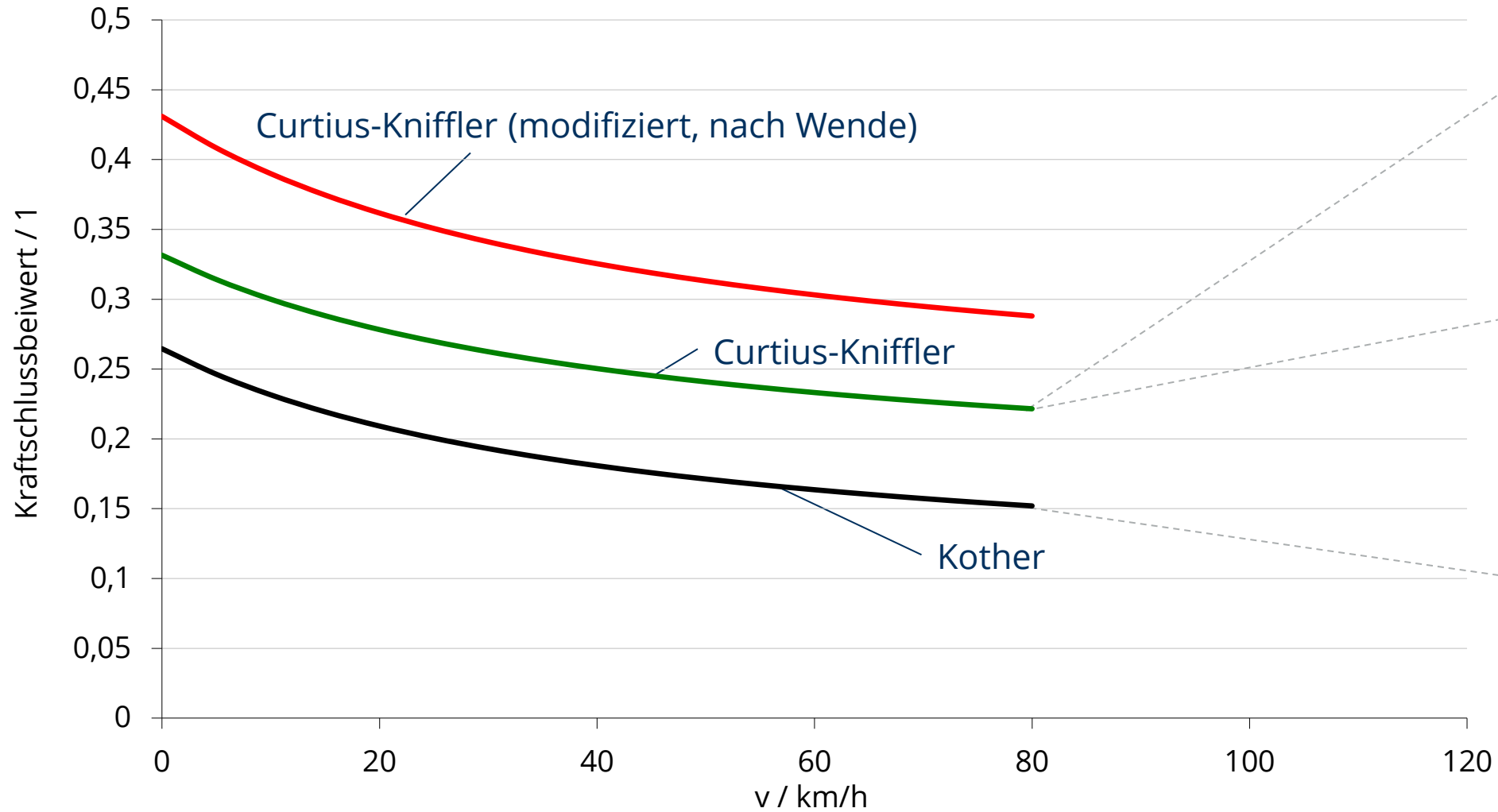
Auslegung?

Bremsen: Minimalwert des verfügbaren Kraftschlusses

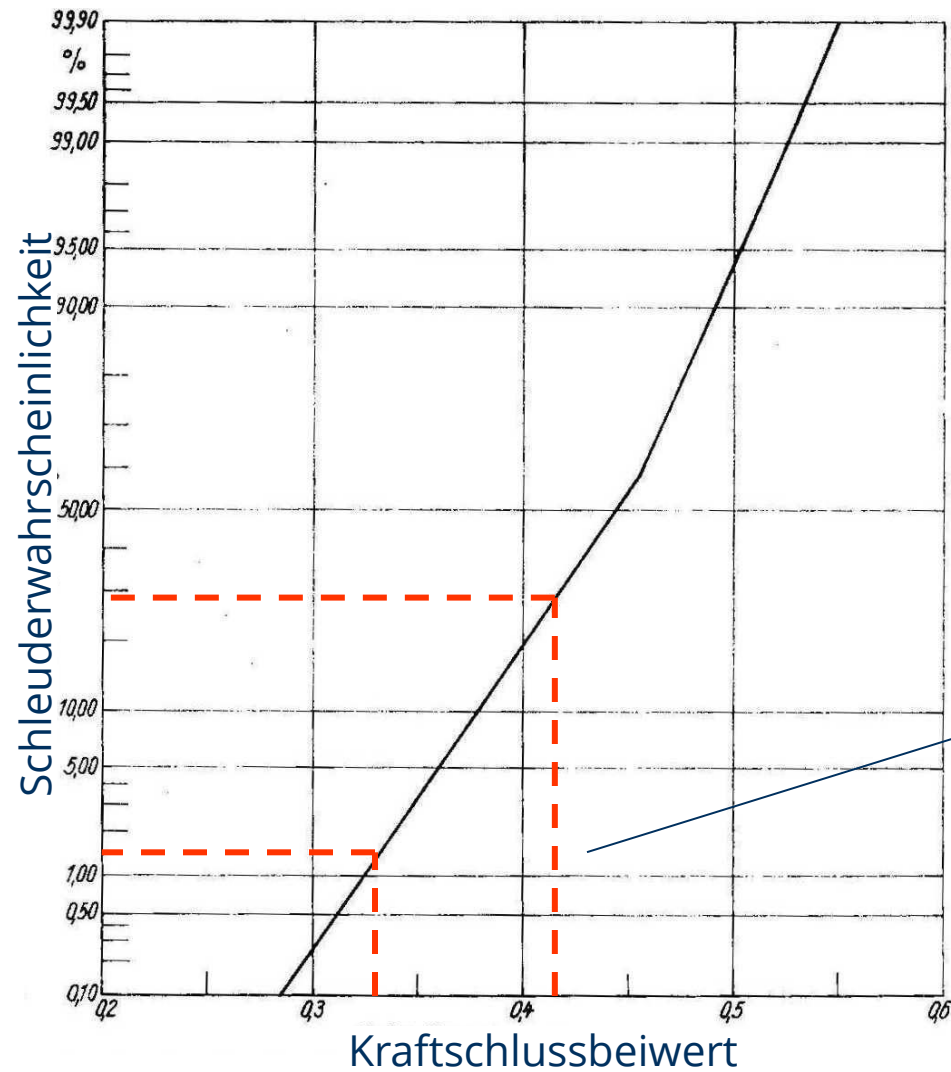
Traktion: wahrscheinlichster Wert des verfügbaren KS



Empirische Kraftschlusskurven



Kraftschluss als stochastische Größe



Gültig für trockene und nasse,
saubere Schienen

Curtius-Kniffler

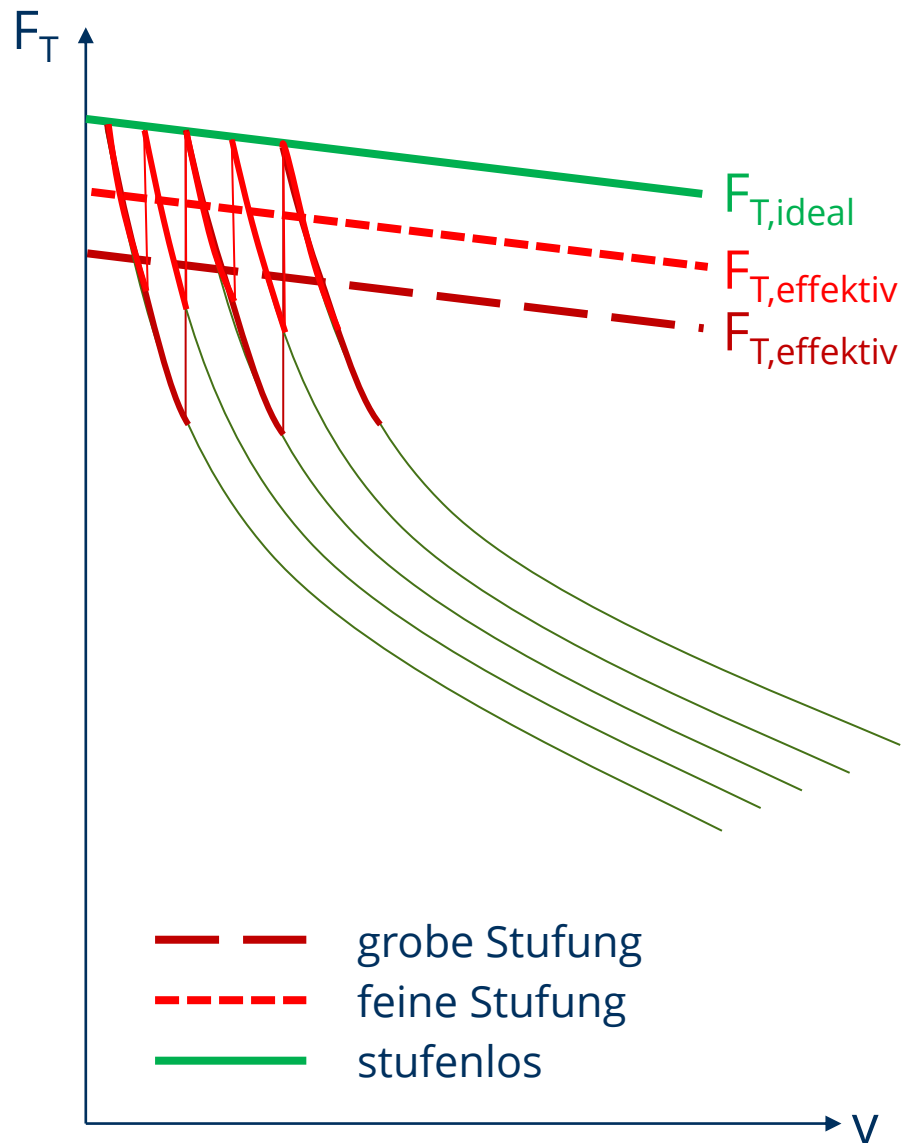
Kraftschlussausnutzung

Einflussfaktor 1:

Stufung der Zugkraft

ausgenutzter Kraftschluss:

$$\tau_{eff} = \frac{F_{T,effektiv}}{mg}$$



32 Fahrstufen



32 Fahrstufen



stufenlos

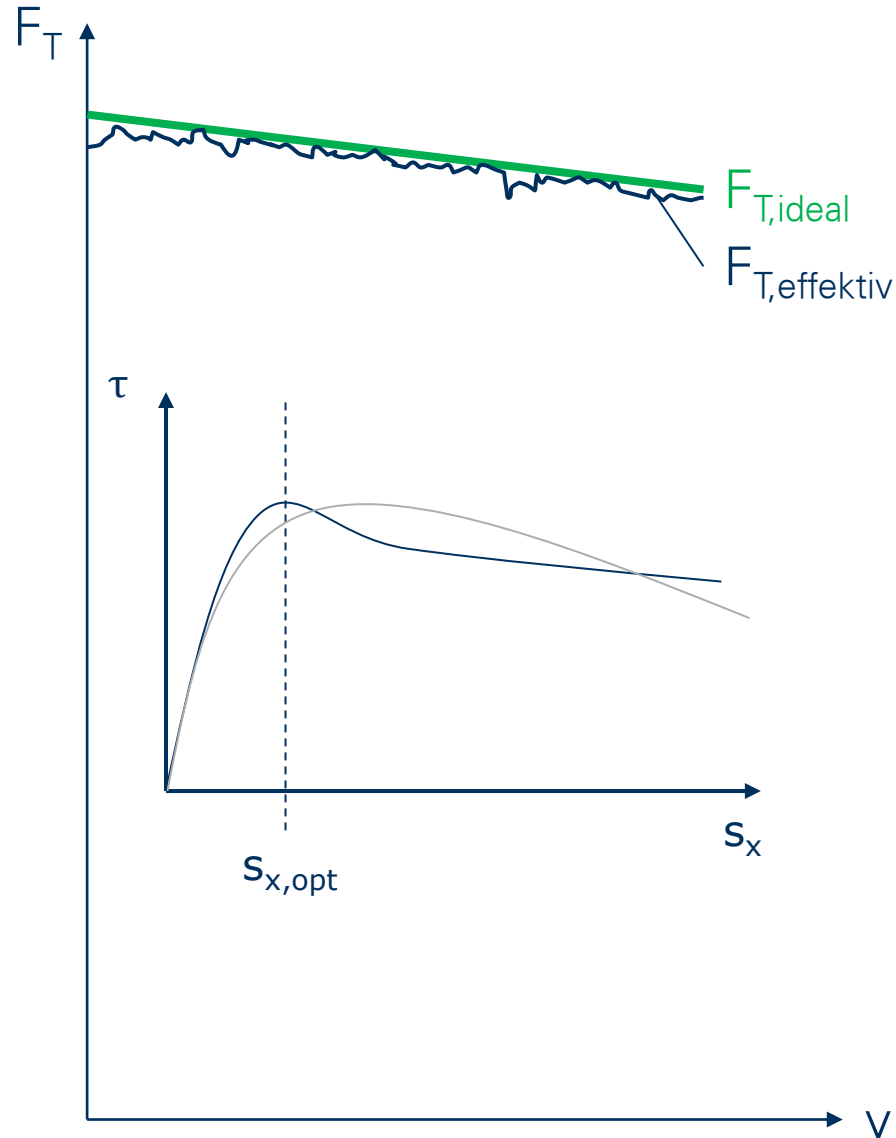
Kraftschlussausnutzung

Stufenlose Zugkraftregelung ✓

Einflussfaktor 2:

Radsatzschlupfregelung

- nicht selektiv
- drehgestellselektiv
- radsatzselektiv



Anfahrzugkraft und Fahrzeugtyp, Teil 1

Vossloh G 1206



- installierte DM-Leistung: 1500 kW
- Tzf-Masse: 88 t
- Anfahrzugkraft: 293 kN (Rangiergang)
- Kraftschlussausnutzung: 0,34

BR 152 (DB AG)



- installierte Leistung: 6400 kW
- Tzf-Masse: 87 t
- Anfahrzugkraft: 300 kN
- Kraftschlussausnutzung: 0,35

Anfahrzugkraft und Fahrzeugtyp, Teil 2



300 kN
84 t
 $\tau = 0,36$



235 kN
80 t
 $\tau = 0,30$



534 kN
129 t
 $\tau = 0,42$



360 kN
122 t
 $\tau = 0,30$



118 kN
49 t
 $\tau = 0,25$



1400 kN
360 t
 $\tau = 0,40$



300 kN
210* t
 $\tau = 0,15$



192 kN
86* t
 $\tau = 0,23$



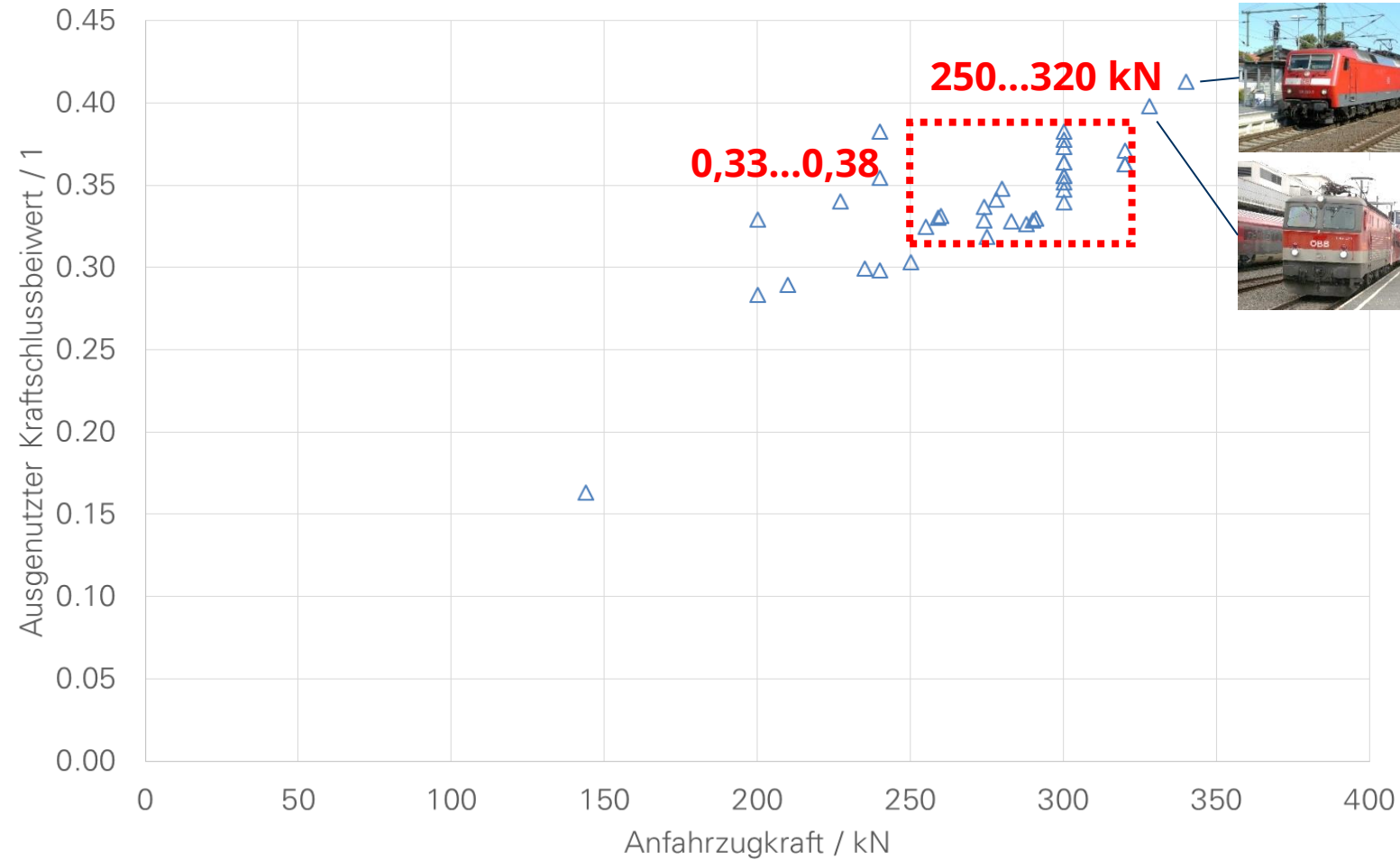
272 kN
80t
 $\tau = 0,35$

* Masse auf angetriebenen Radsätzen

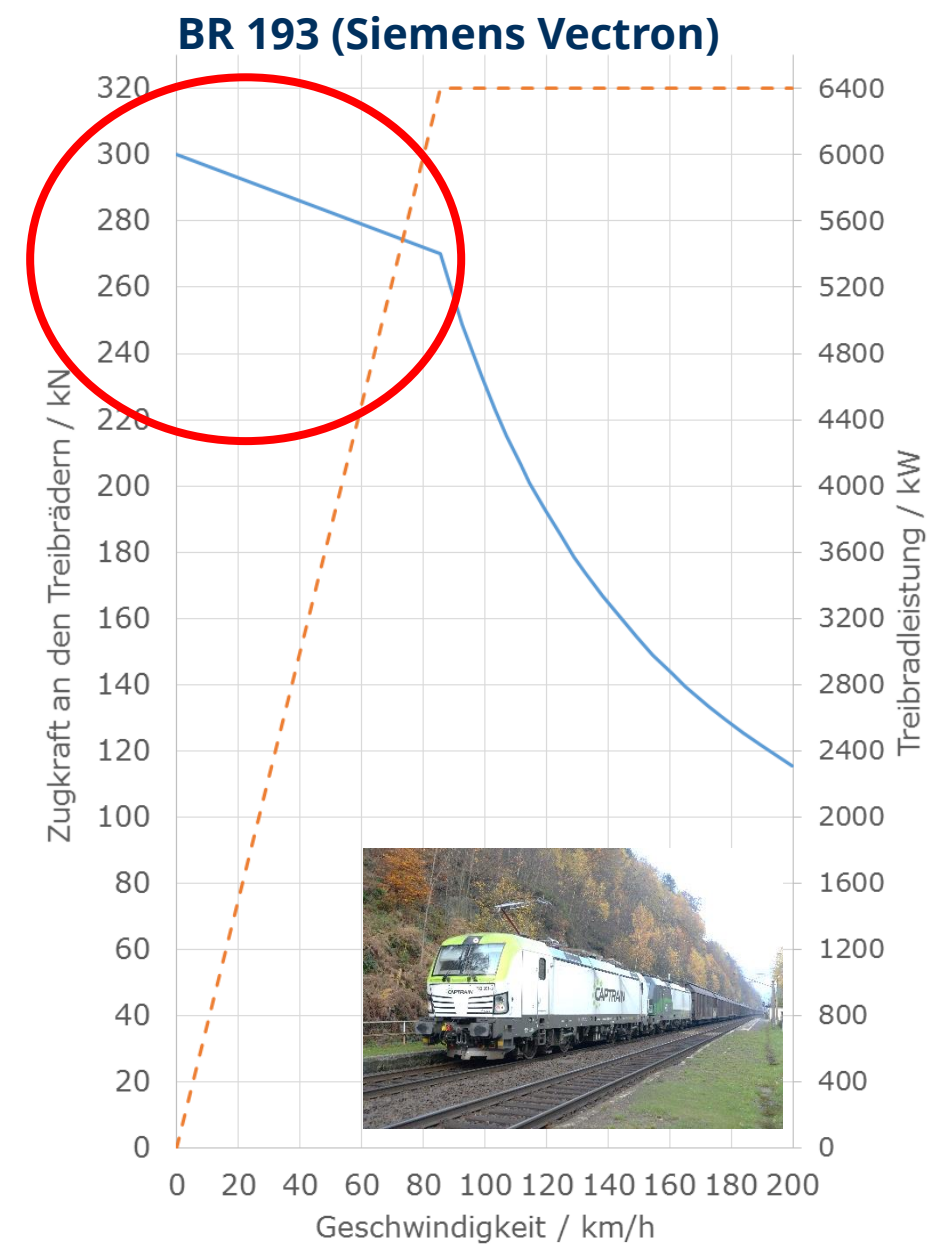
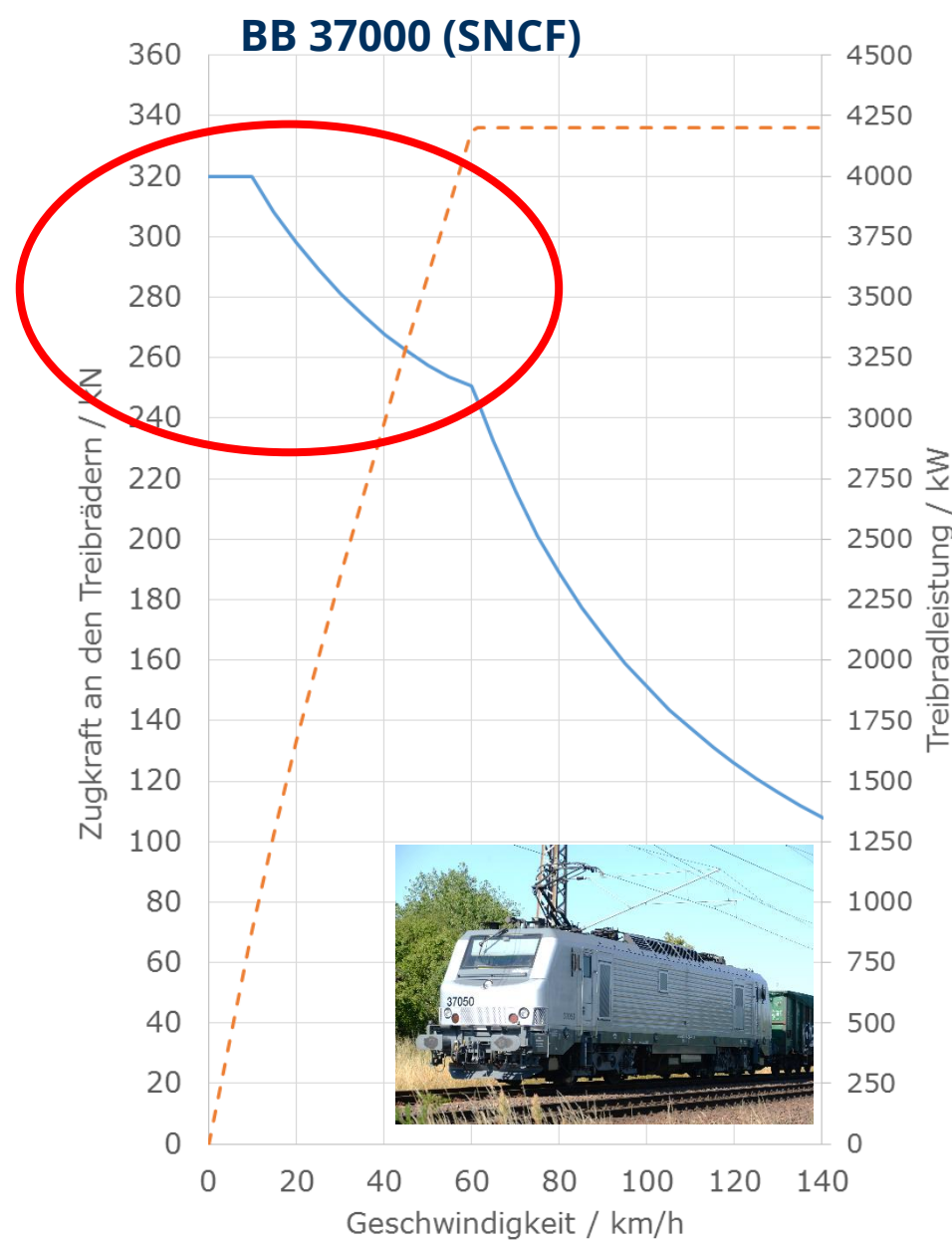
* Masse auf angetriebenen Radsätzen

Kraftschlussausnutzung

Elektrische Traktion

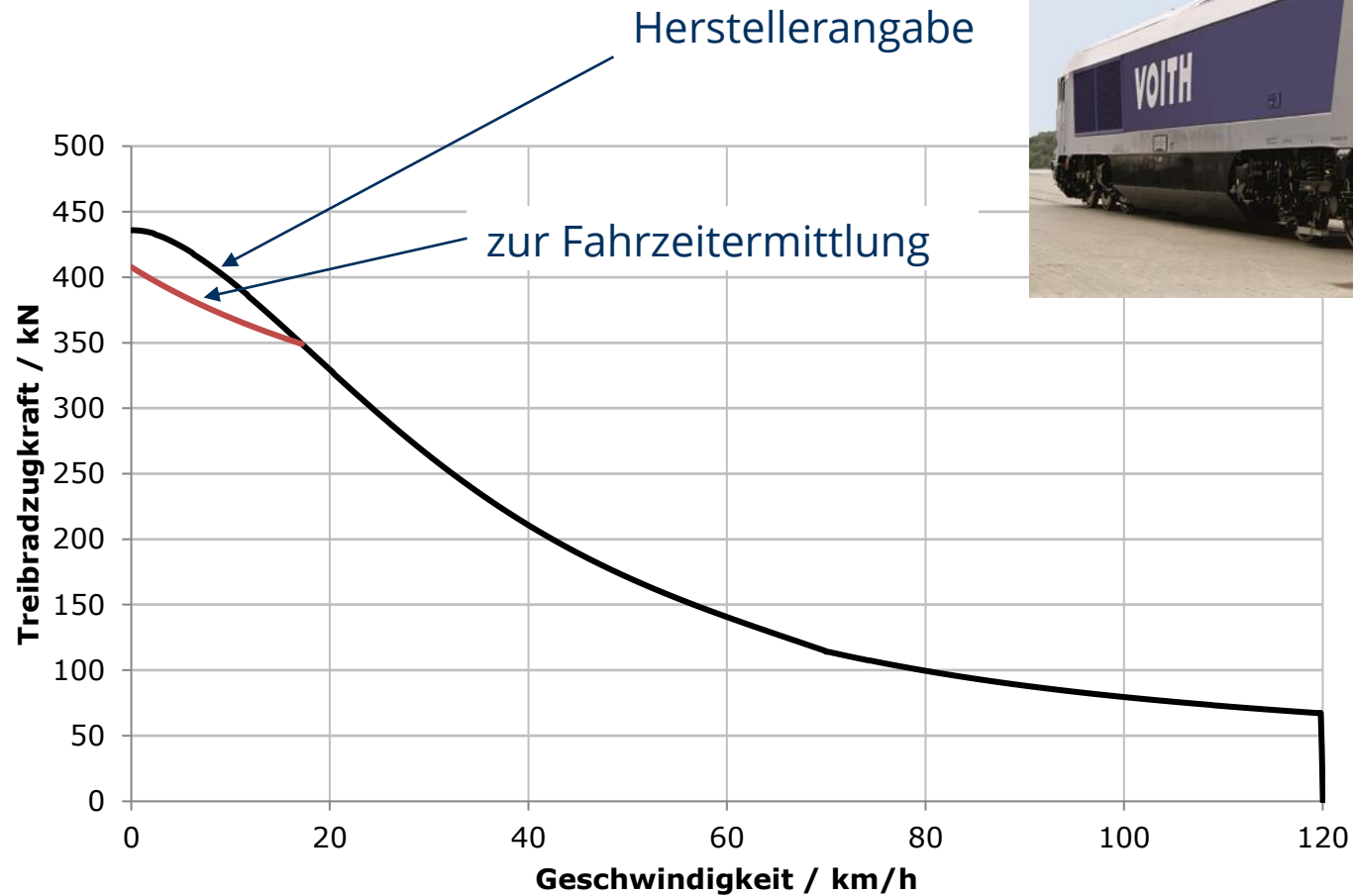


Kraftschluss- ausnutzung Drehstromantriebe



Fahrzeitermittlungslinien (FEL)

Foto: Voith Turbo Lokomotivtechnik

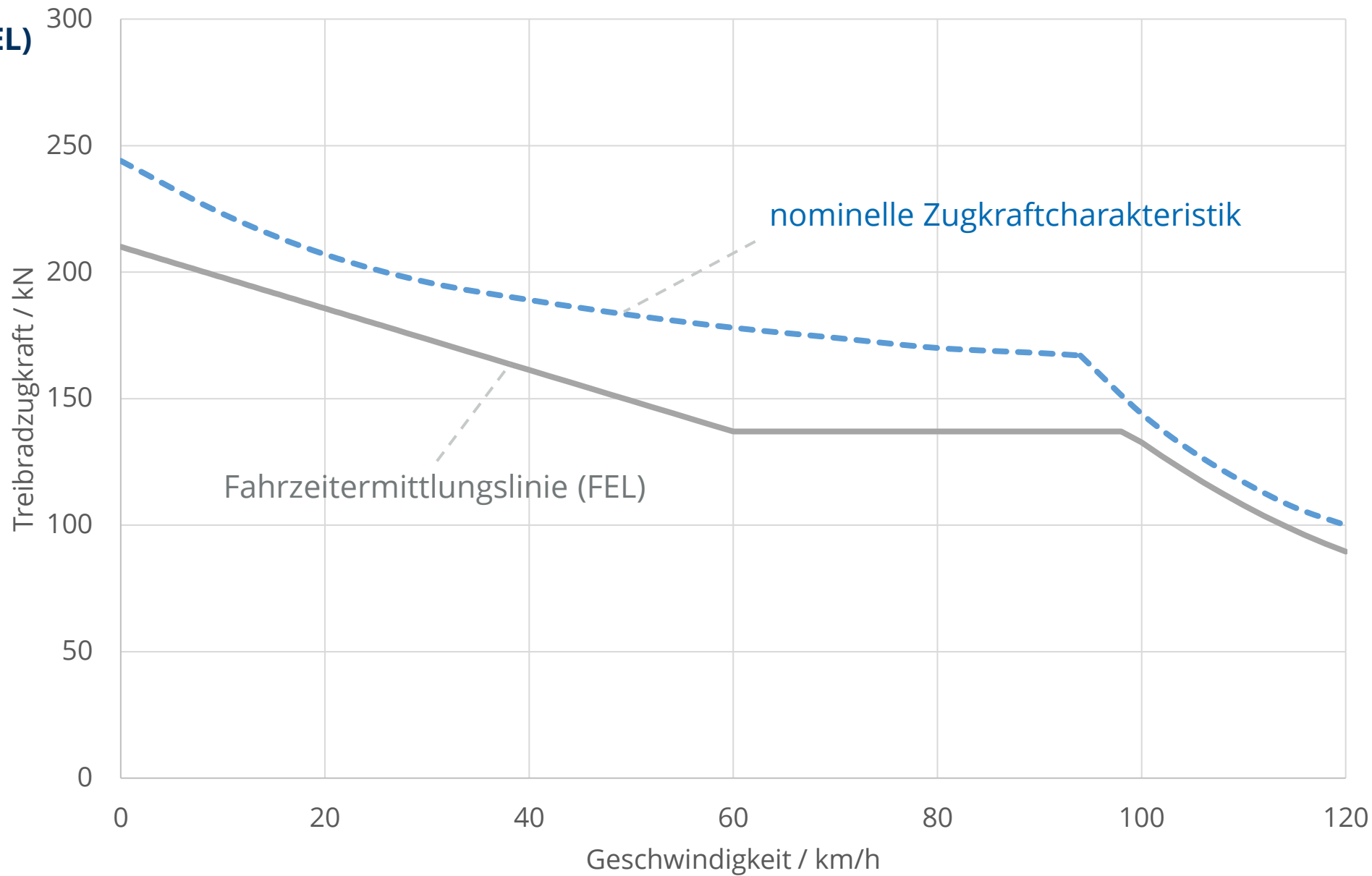


Fahrzeitermittlungslinie (FEL)

Beispiel: BR 143



BR 143





Quelle: Voith Turbo Lokomotivtechnik



Quelle: YouTube, © Jan Strack

https://www.youtube.com/watch?v=o4fqaUqhIPc&list=PLaoFmwbrA8BYUhfSZn6T8Lmsl3ks_GgQ5&index=1

https://www.youtube.com/watch?v=Czj_Fo2V7u4&list=PLaoFmwbrA8BYUhfSZn6T8Lmsl3ks_GgQ5&index=2

Kraftschlussausnutzung

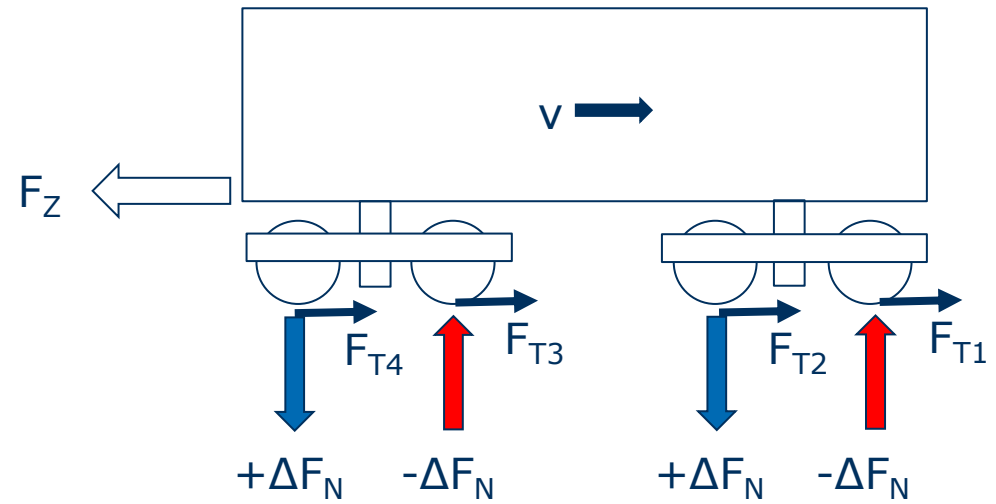
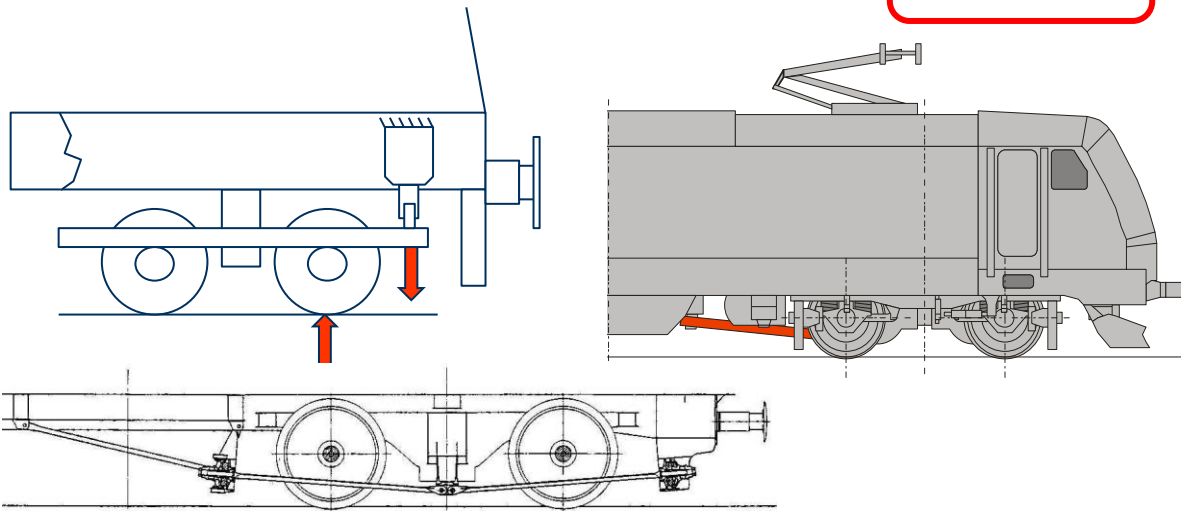
Stufenlose Zugkraftregelung ✓

Radsatzschlupfregelung ✓

Einflussfaktor 3:

Radsatzentlastung

⇒ Ziel: $\Delta F_{Ni} \rightarrow 0$



$$\text{ideal: } F_T = 4 \cdot F_{Ti} \stackrel{!}{=} \sum (F_{Ni} \pm \Delta F_{Ni}) \cdot \tau$$

UND

$$\tau = f(s_x)$$

Radsatzschlupfregelung

nicht selektiv:

$$F_{T,\max} = 4 \cdot \text{Min}(F_{Ti})$$

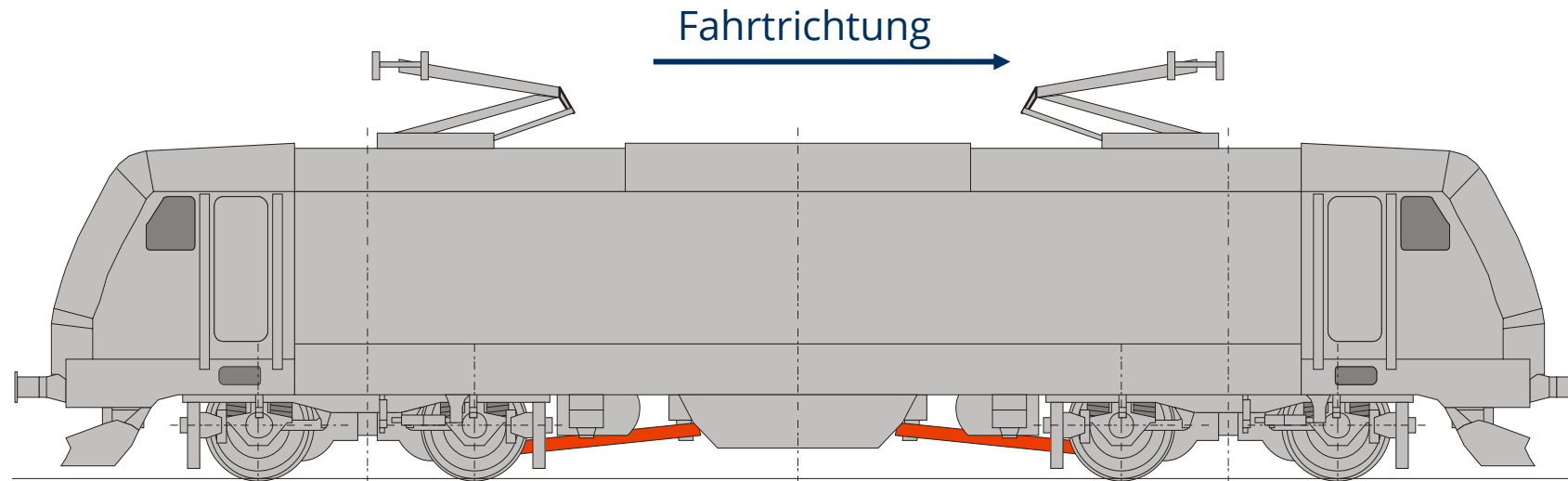
drehgestellselektiv:

$$F_{T,\max} = 2 \cdot \text{Min}(F_{T1}, F_{T2}) + 2 \cdot \text{Min}(F_{T3}, F_{T4})$$

radsatzselektiv:

$$F_{T,\max} = F_{T1,\max} + F_{T2,\max} + F_{T3,\max} + F_{T4,\max}$$

Drehgestellanlenkung mit Zug-/Druckstangen





Zugkraftherzeugung an der Leistungsgrenze





© M. Kache



© M. Kache



© M. Kache

Zugkraftherzeugung bei Dieseltriebfahrzeugen



© M. Kache



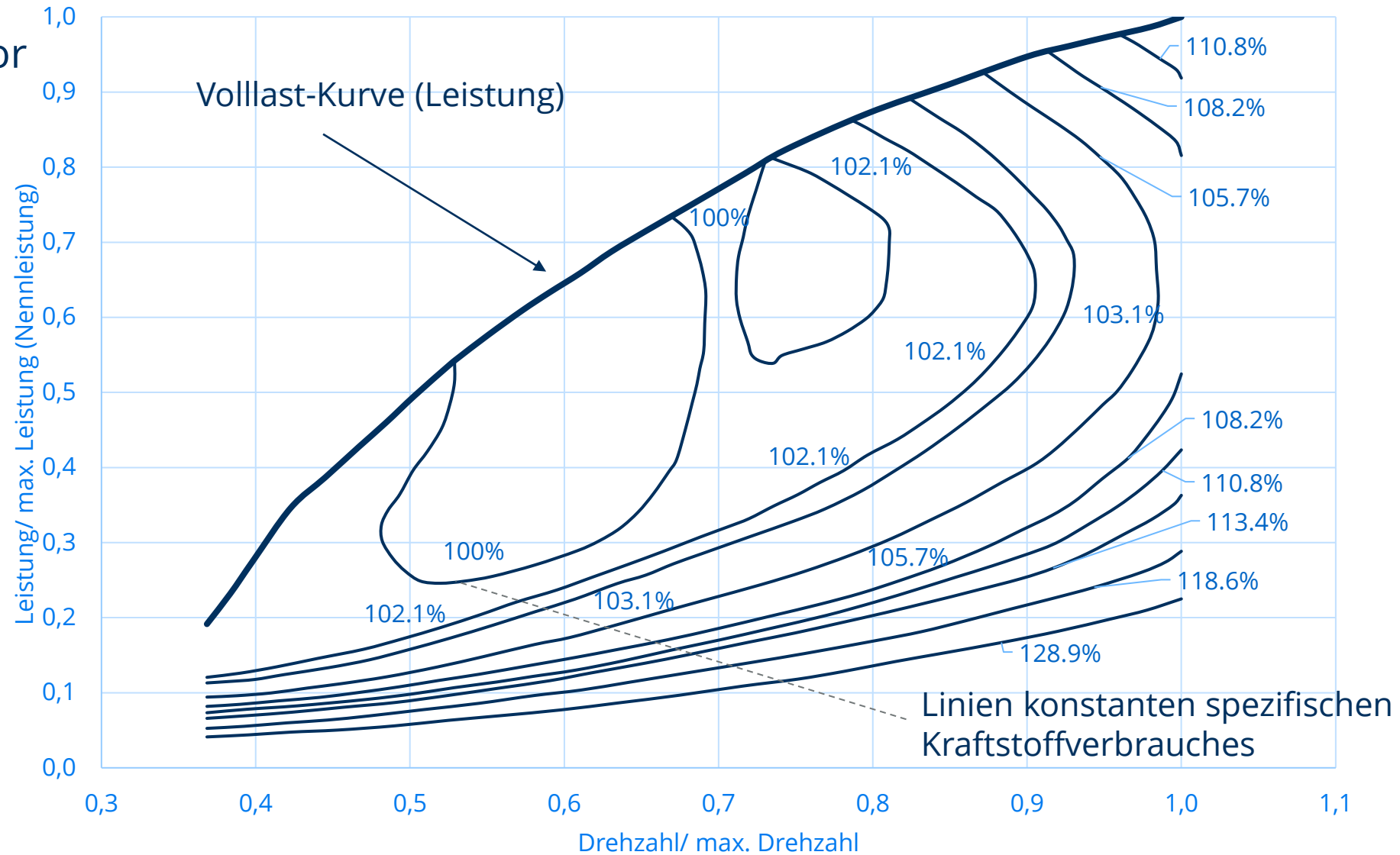
© M. Kache



© M. Kache

Dieselmotor

Bsp. Triebwagenmotor



Dieselmotor

Bsp. Lokomotivmotor

