

Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan
Professur für Elektrische Bahnen

Fahrdynamik für Verkehrsingenieure

VL 01: Grundlagen der Fahrdynamik

Sommersemester 2022

Die Professur für Elektrische Bahnen

Forschung und Lehre seit 1954



- Energieerzeugung/ -übertragung
- Energieverteilung/ -zuführung
- Elektrisches Fahrzeug
- Rückstromführung, Beeinflussung
- Fahrzeug- und Anlagenbetrieb

**Nicht mit dem Strom schwimmen –
Mit dem Strom fahren!**



Foto: Alstom



Foto: Stephan



Foto: Scania

Organisation

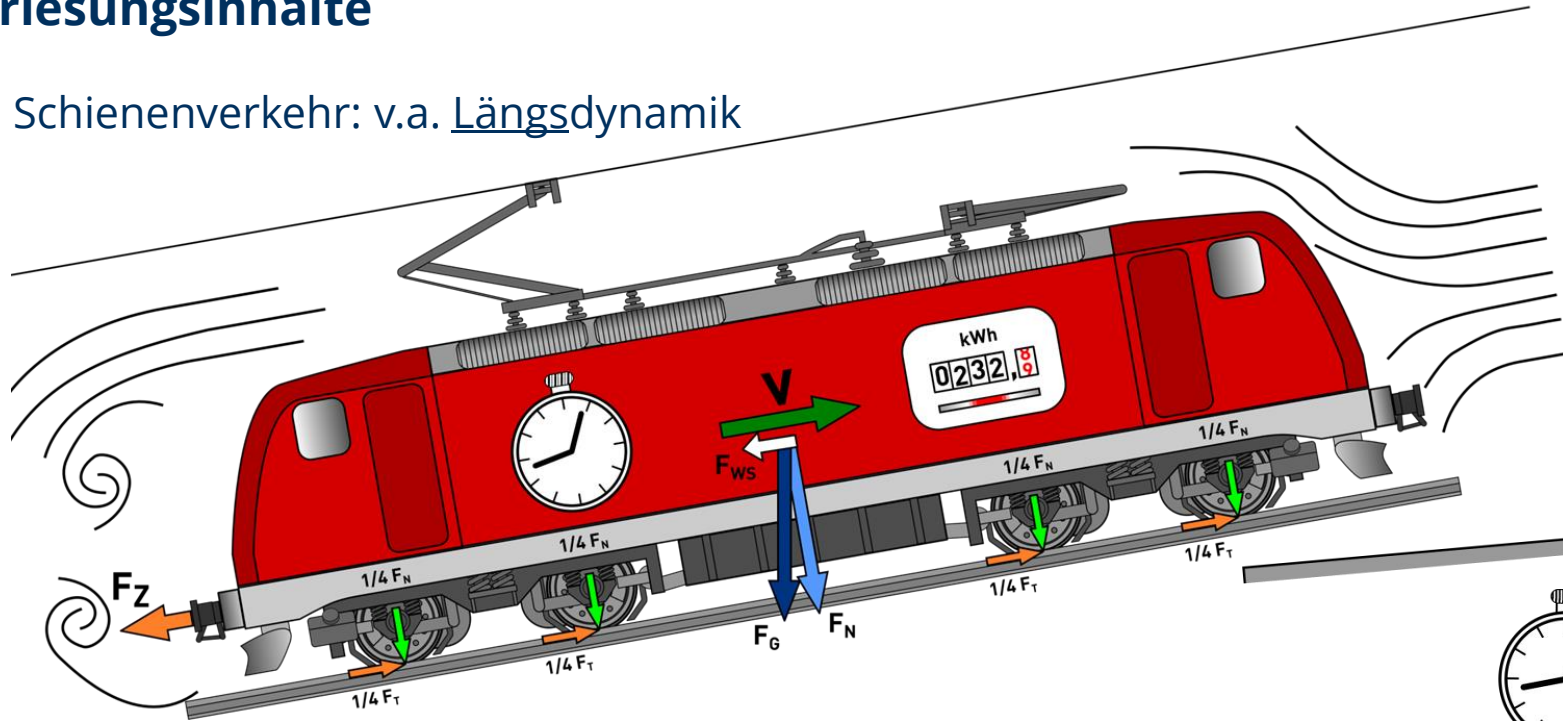
Vorlesungstermine

- KW 15: 1. VO am 13. April **Grundlagen der Fahrdynamik** (Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan)
- KW 17: 2. VO am 27. April **Fahrwiderstandskräfte** (Dipl.-Ing. Tobias Bregulla)
- KW 19: 3. VO am 11. Mai **Antriebskräfte** (Dipl.-Ing. Tobias Bregulla)
- KW 21: 4. VO am 25. Mai **Fahrdynamische Charakteristiken** (Dipl.-Ing. Tobias Bregulla)
- **KW 23: Pfingsten: Keine Vorlesung**
- **KW 24:** 5. VO am 15. Juni **Kraftfahrzeugtechnik I** (Dr.-Ing. Thomas Tüschen)
- KW 25: 6. VO am 22. Juni **Kraftfahrzeugtechnik II** (Dr.-Ing. Thomas Tüschen)
- KW 27: 7. VO am 06. Juli **Leistungsauslegung** (Dipl.-Ing. Tobias Bregulla)
- **KW 28:** 8. VO am 13. Juli **Energiebedarf** (Dipl.-Ing. Tobias Bregulla)

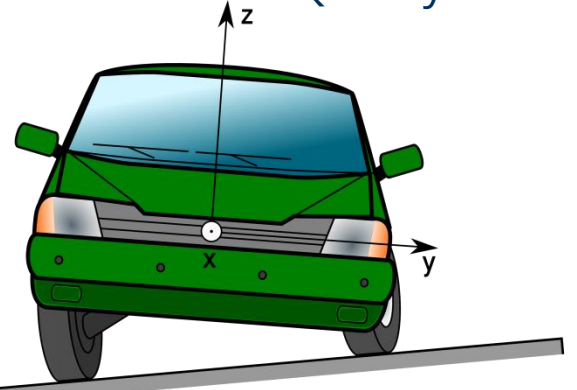
Übungstermine, kurzfristige Änderungen sowie Material:
OPAL Kurs Fahrdynamik für Verkehrsingenieure (<https://tud.link/svbh>)

Vorlesungsinhalte

Schienenverkehr: v.a. Längsdynamik

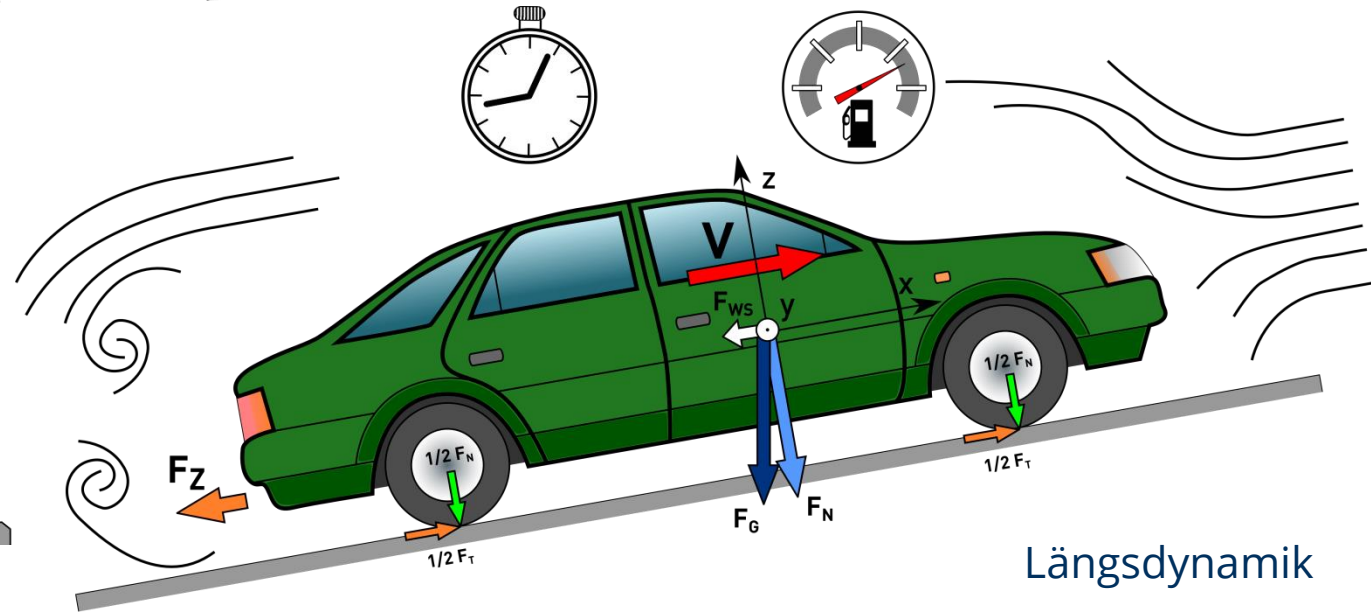
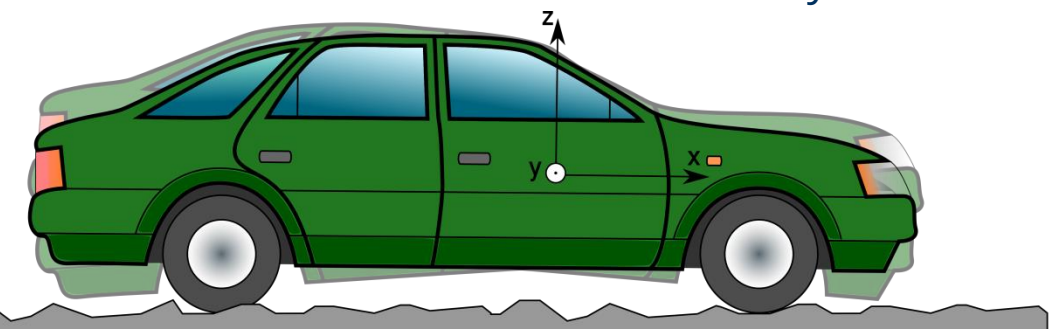


Querdynamik



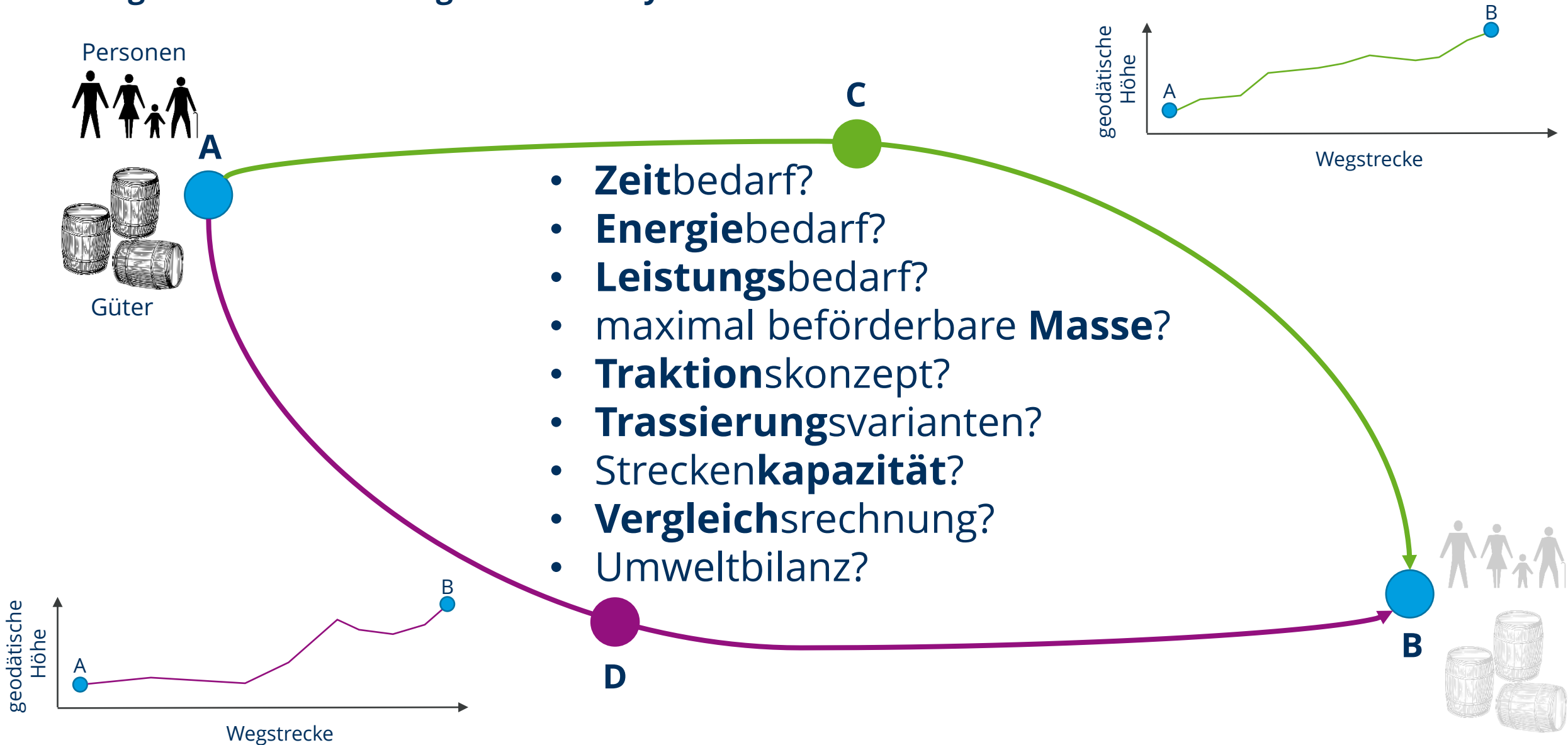
© Karim Benabdellah, Martin Kache

Vertikaldynamik



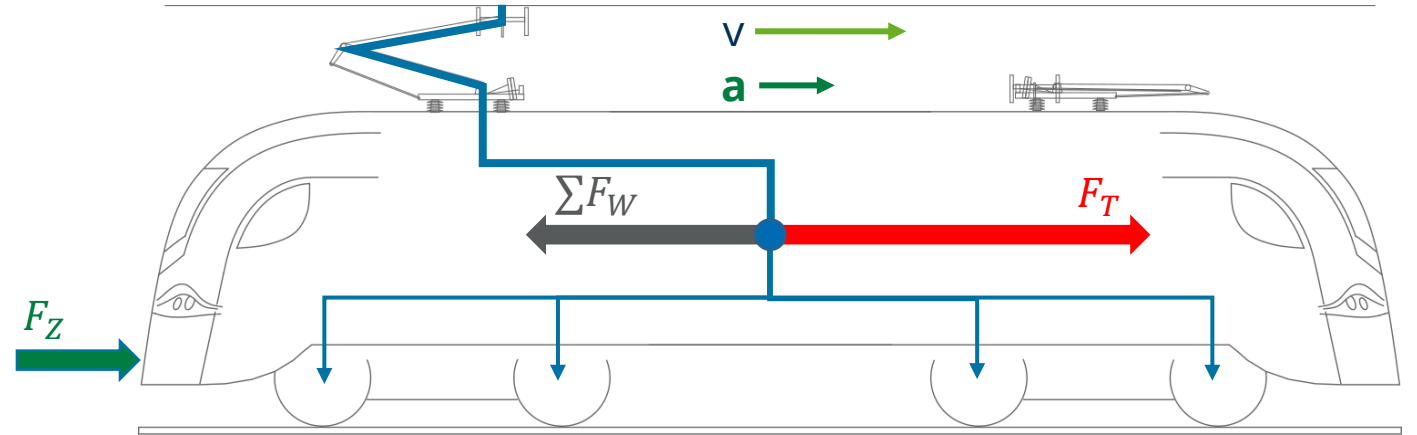
Längsdynamik

Vorlesungsinhalte – Grundfragen der Fahrdynamik



Vorlesungsinhalte (Schwerpunkt: Schienenverkehr)

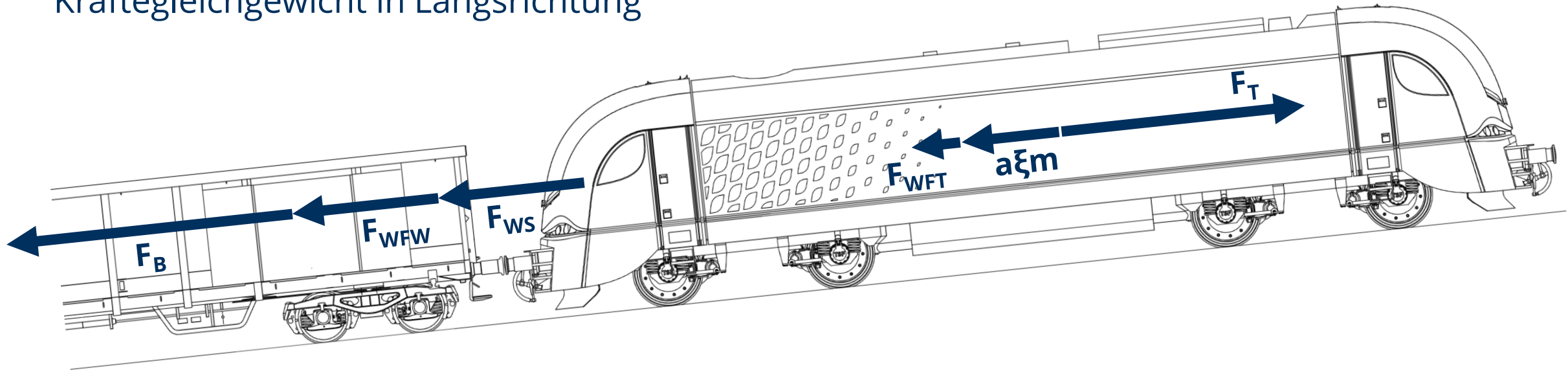
- Einführung
- **Grundlagen**
- Fahrwiderstandskräfte
- Antriebskräfte
- Traktionsvermögen
- Leistungs- und Energiebedarf
- Grundlagen der Fahrzeitberechnung



$$t = \int_{v_1}^{v_2} \frac{v}{a(v)} dv + \frac{s_3 - s_2}{v_2} + \dots$$

Fahrdynamische Grundgleichung

Kräftegleichgewicht in Längsrichtung



F_T Zugkraft (Traktionskraft)

$a\xi m$ Trägheitsterm

F_{WFT} Triebfahrzeugwiderstandskraft

F_{WFW} Wagenzugwiderstandskraft

F_{WS} Streckenwiderstandskraft

F_B Bremskraft

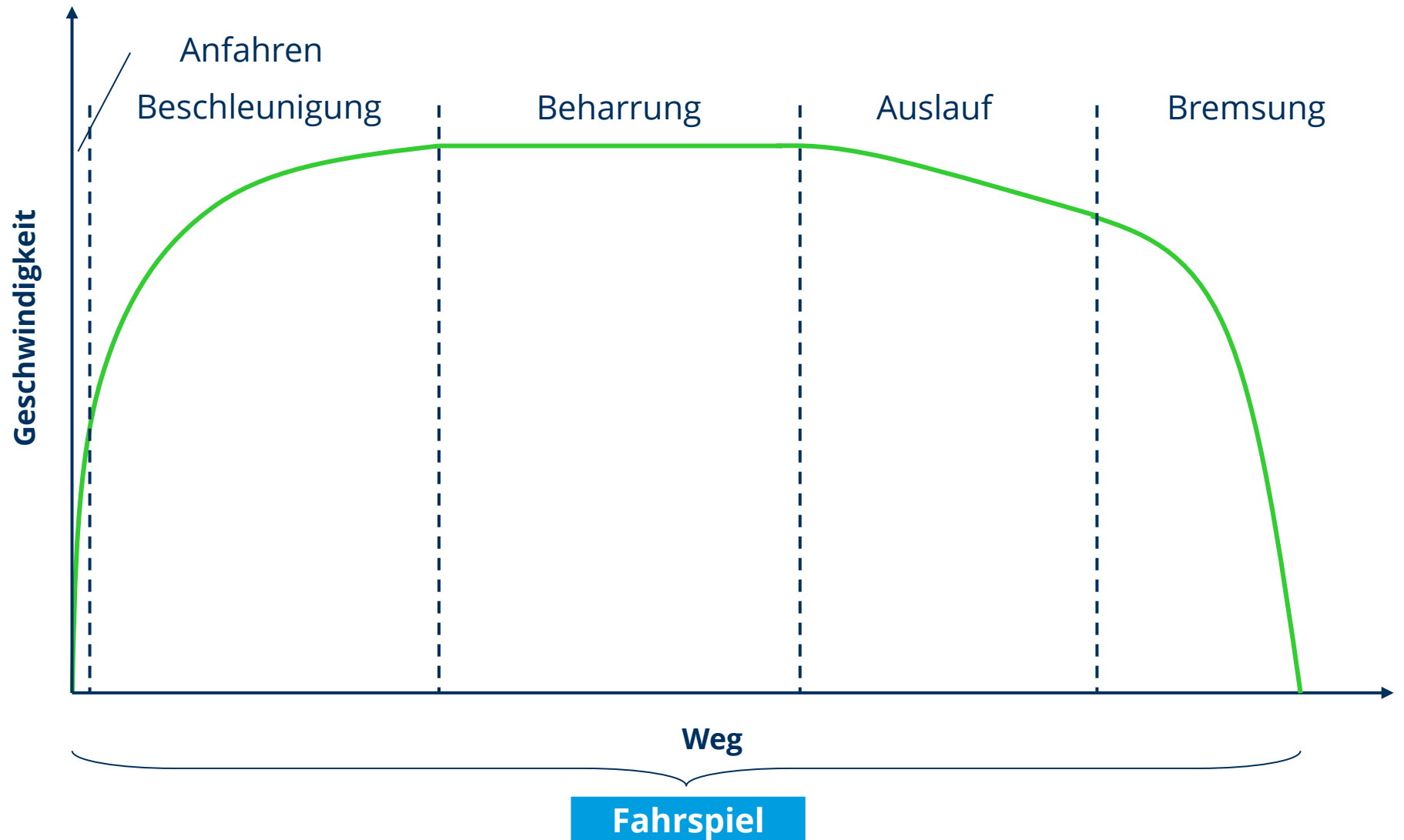
Kräftebilanz = Fahrdynamische Grundgleichung:

$$0 = F_T - a\xi m - F_{WFT} - F_{WFW} - F_{WS} - F_B$$

Fahrdynamische Grundgleichung

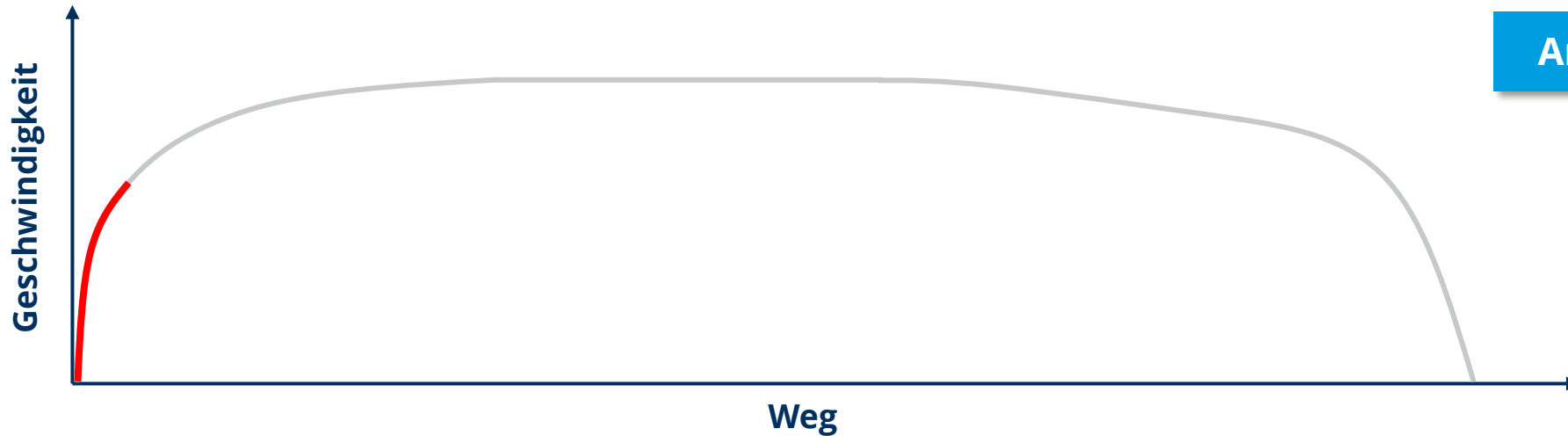
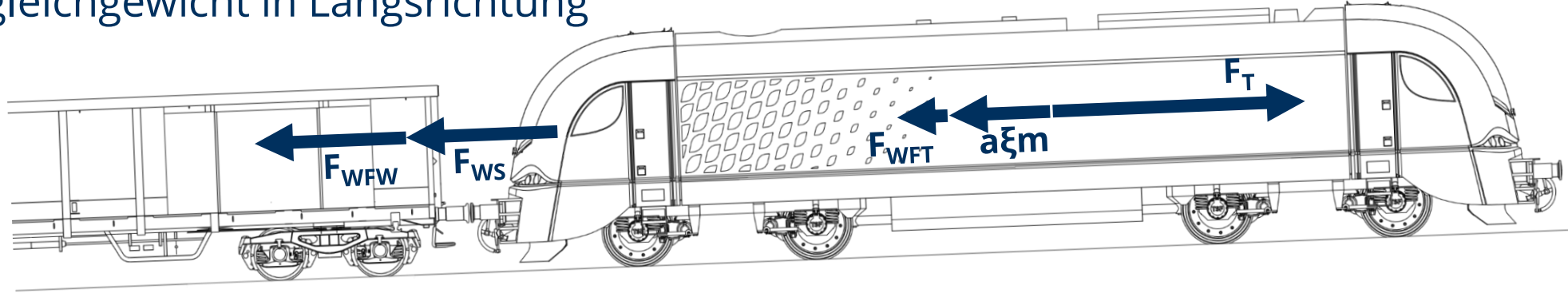
Fahrschaubild

Die 5 Phasen der Zugfahrt



Fahrdynamische Grundgleichung

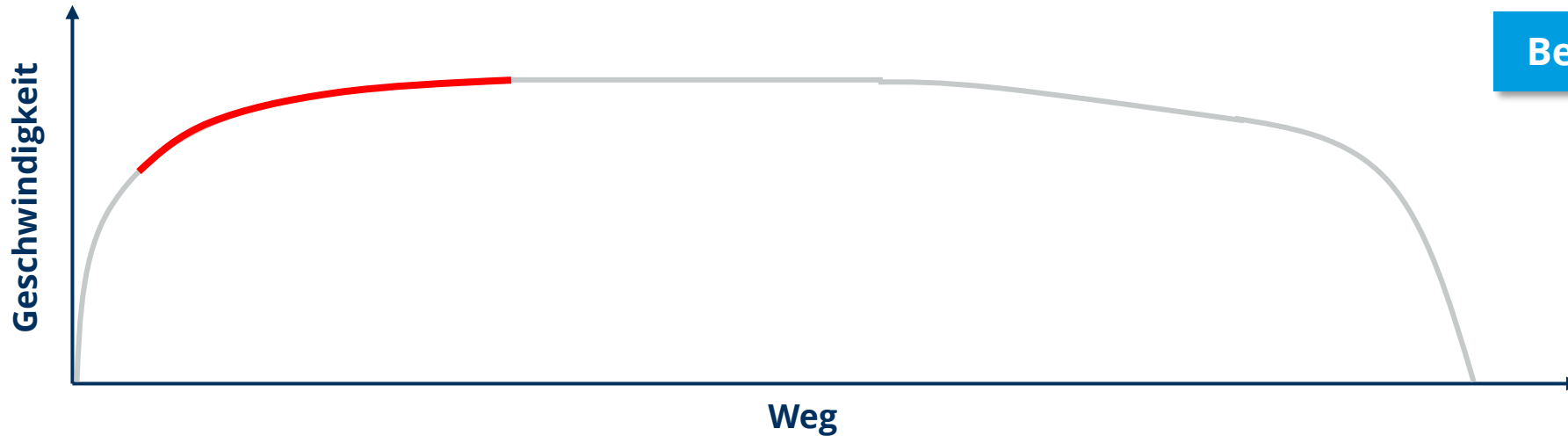
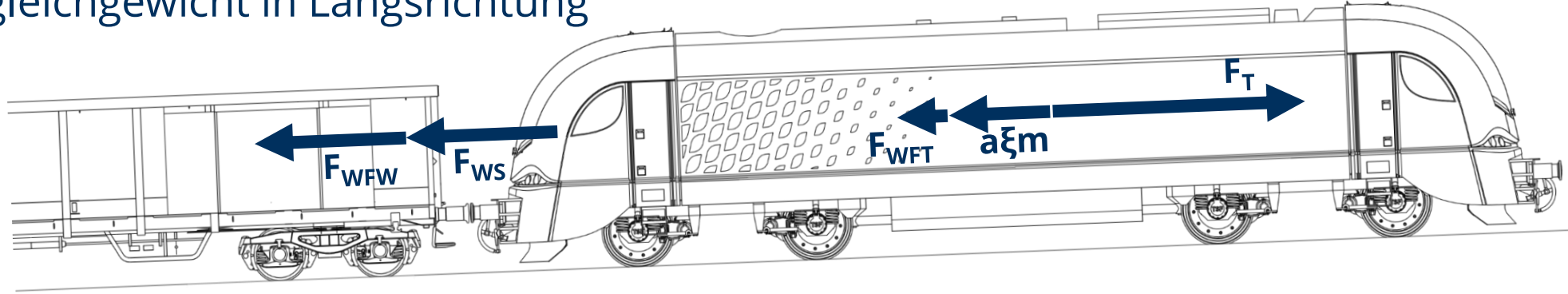
Kräftegleichgewicht in Längsrichtung



$$0 = F_T(t) - a\xi m - F_{WFT}(s) - F_{WFW}(s) - F_{WS}$$

Fahrdynamische Grundgleichung

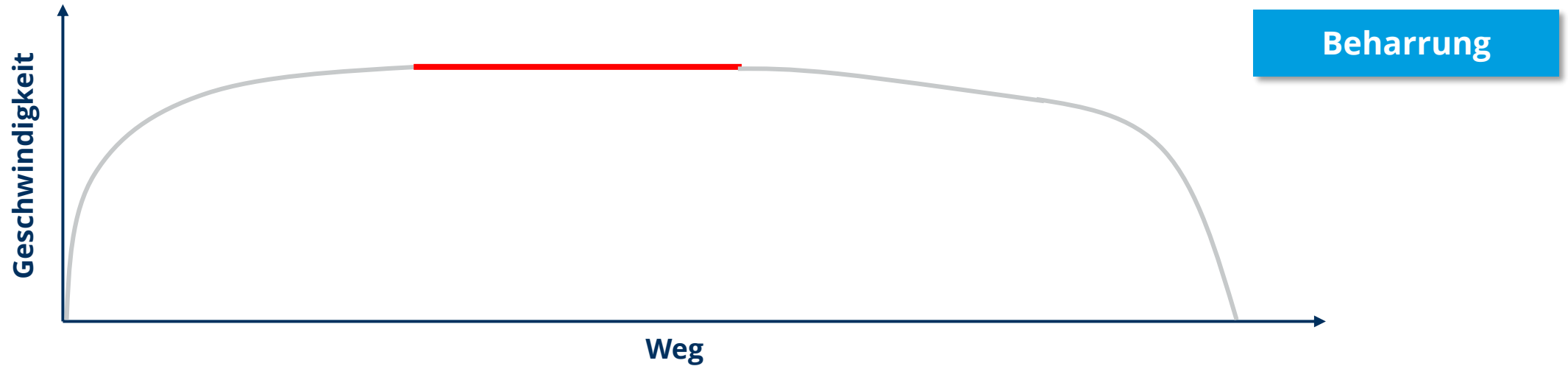
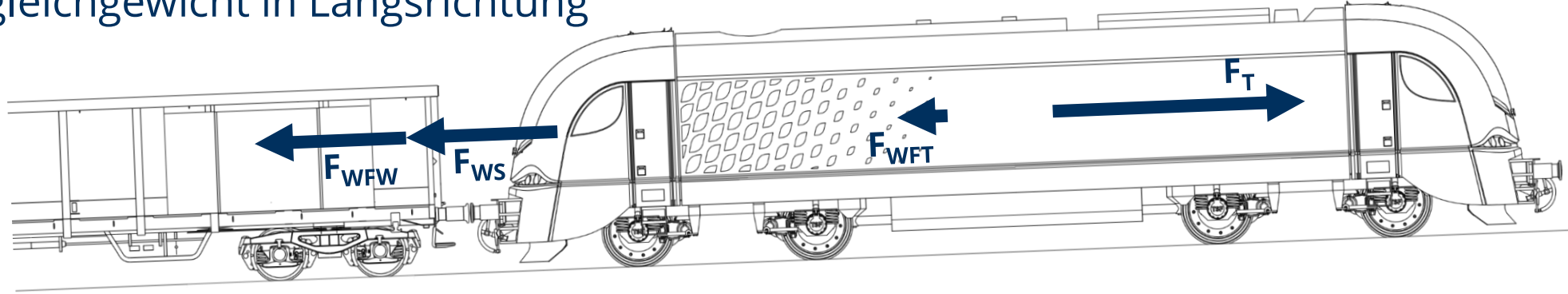
Kräftegleichgewicht in Längsrichtung



$$0 = F_T(v) - a_{xm} - F_{WFT}(v) - F_{WFW}(v) - F_{WS}$$

Fahrdynamische Grundgleichung

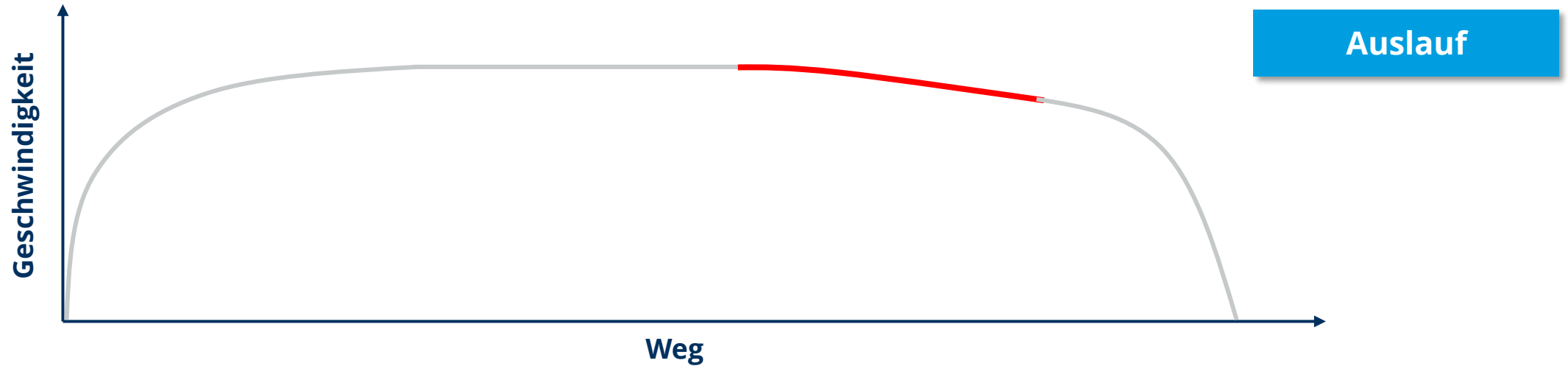
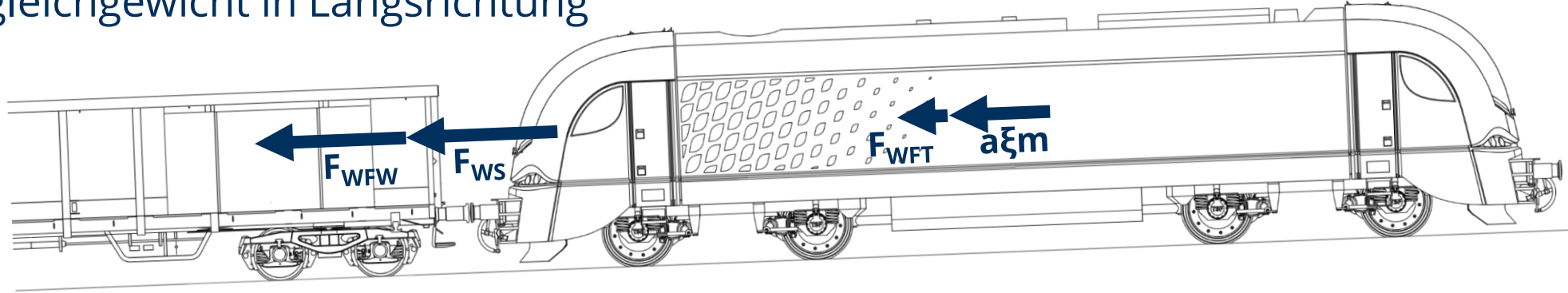
Kräftegleichgewicht in Längsrichtung



$$0 = F_T - F_{WFT} - F_{WFW} - F_{WS}$$

Fahrdynamische Grundgleichung

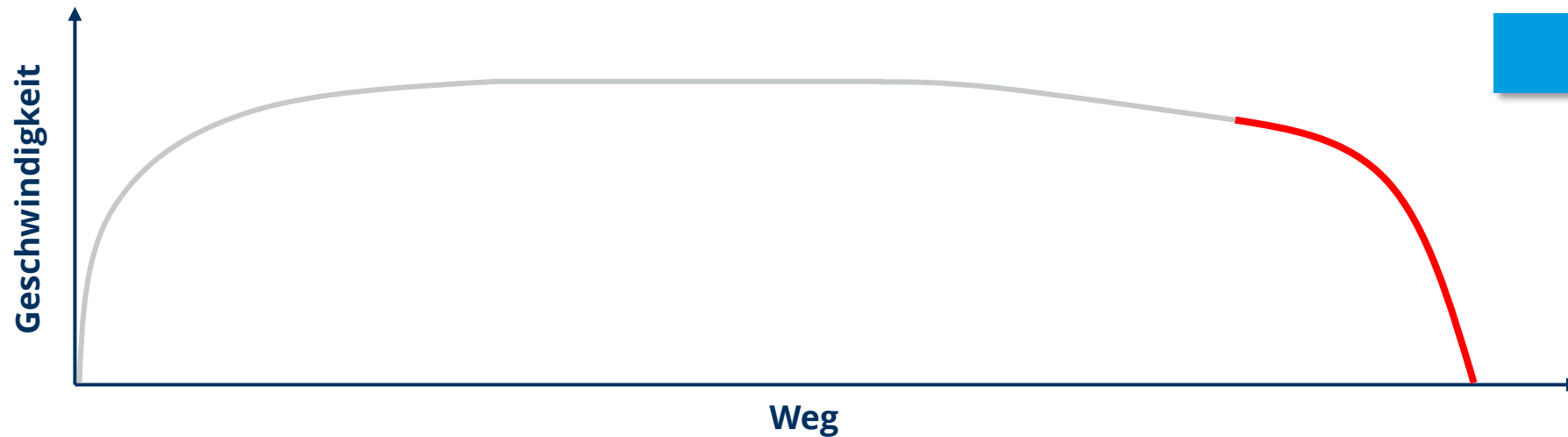
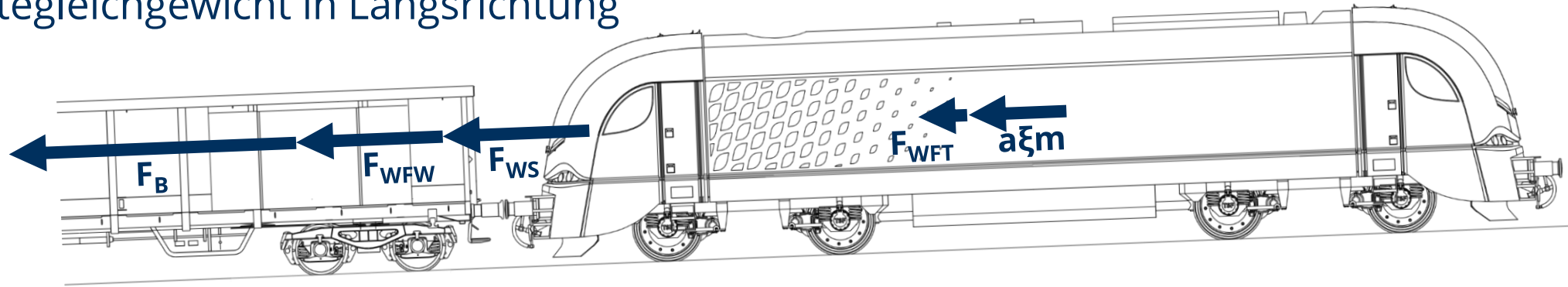
Kräftegleichgewicht in Längsrichtung



$$0 = -a_{\xi m} - F_{WFT} - F_{WFW} - F_{WS}$$

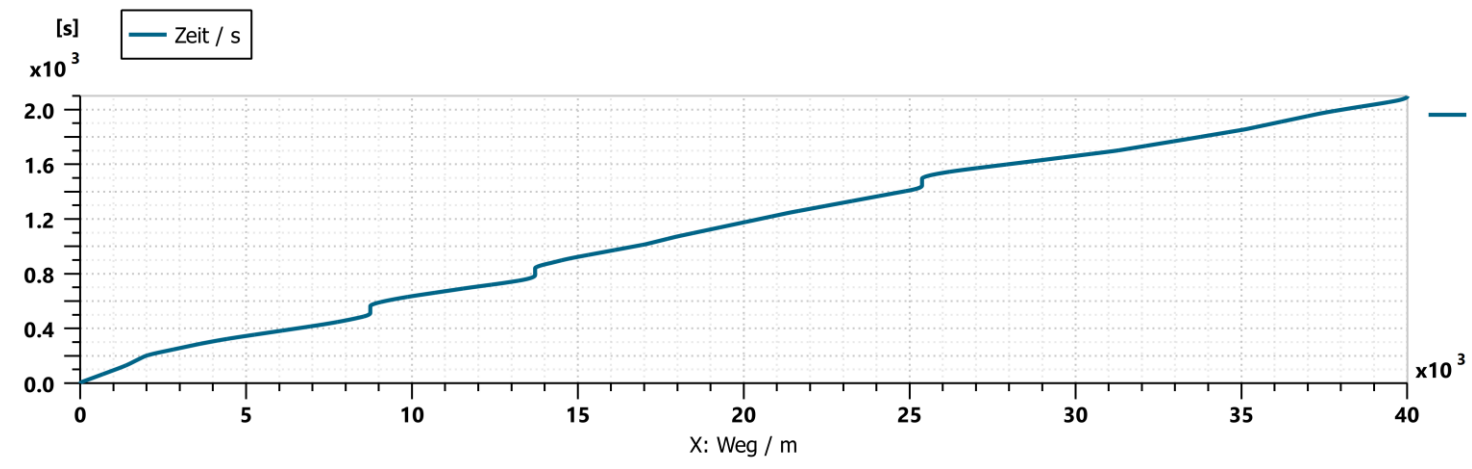
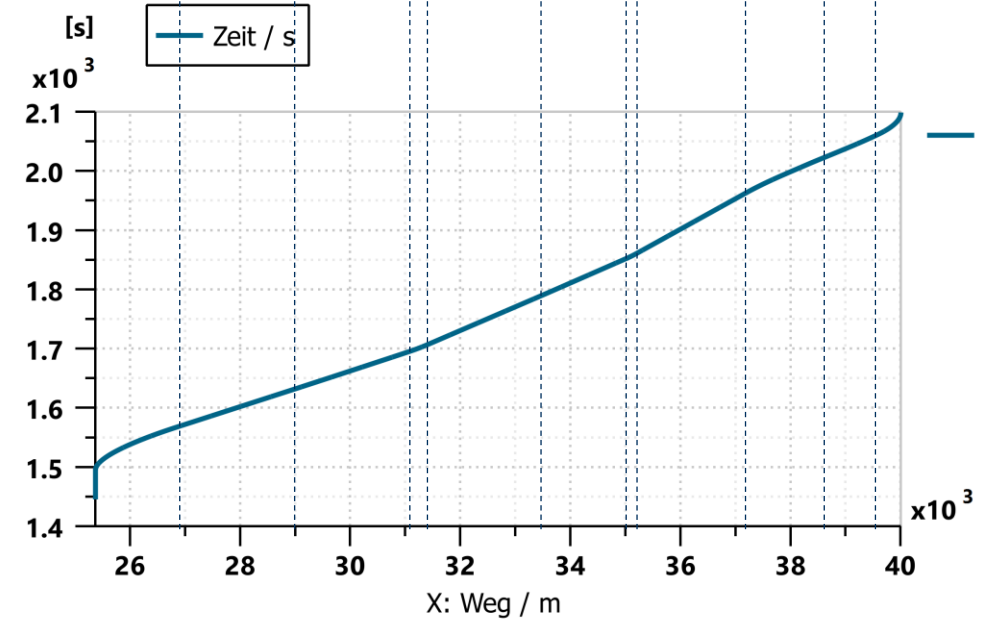
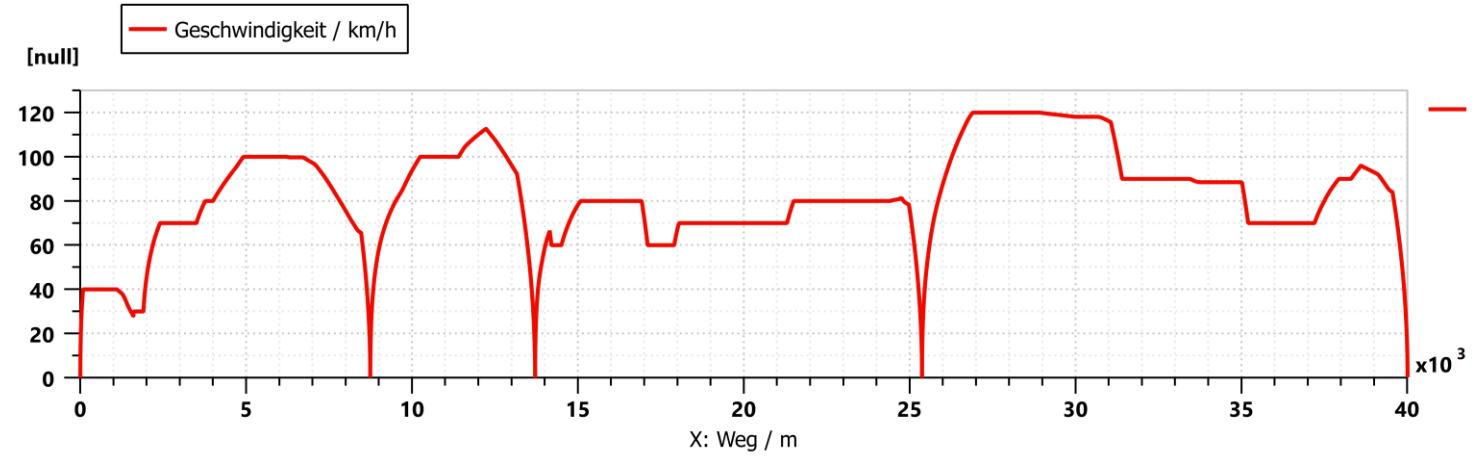
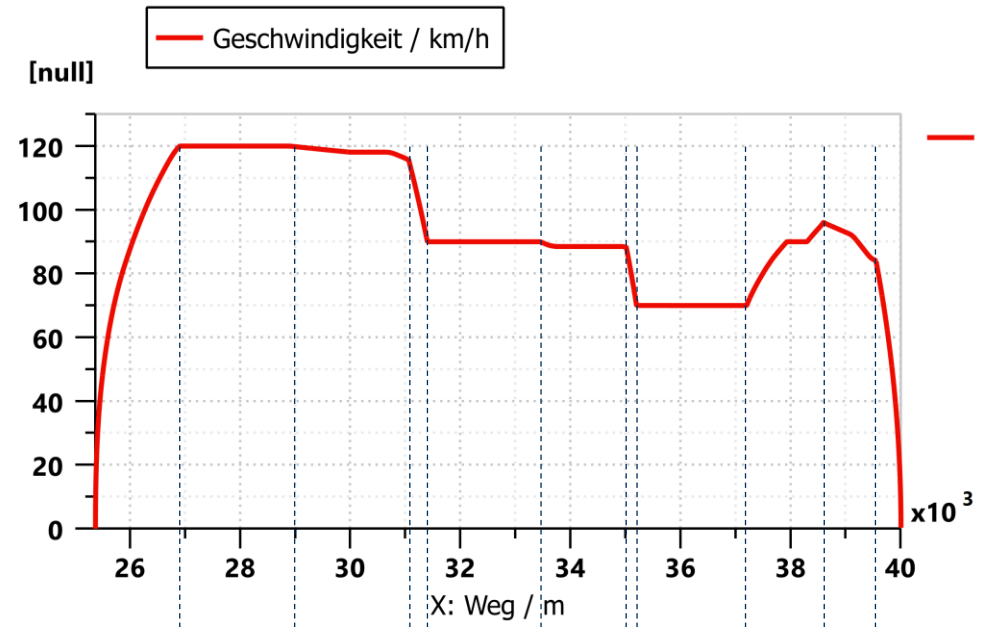
Fahrdynamische Grundgleichung

Kräftegleichgewicht in Längsrichtung



$$0 = -a_{\xi m} - F_{WFT} - F_{WFW} - F_{WS} - F_B$$

Alternative Darstellung: Weg/Zeit-Diagramm (Anwendung: Bildfahrplan)



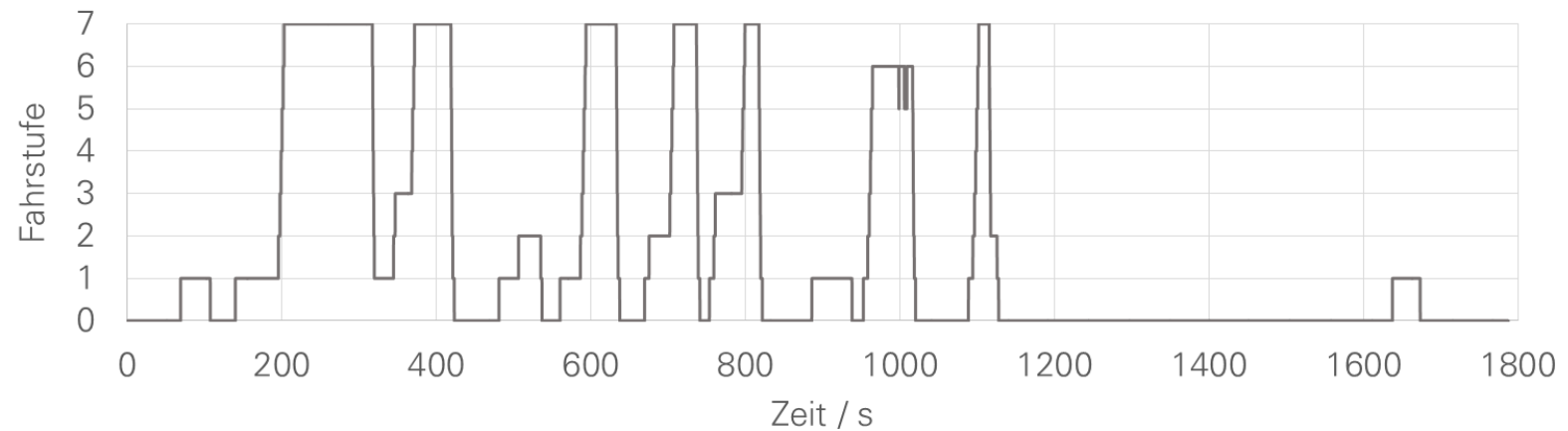
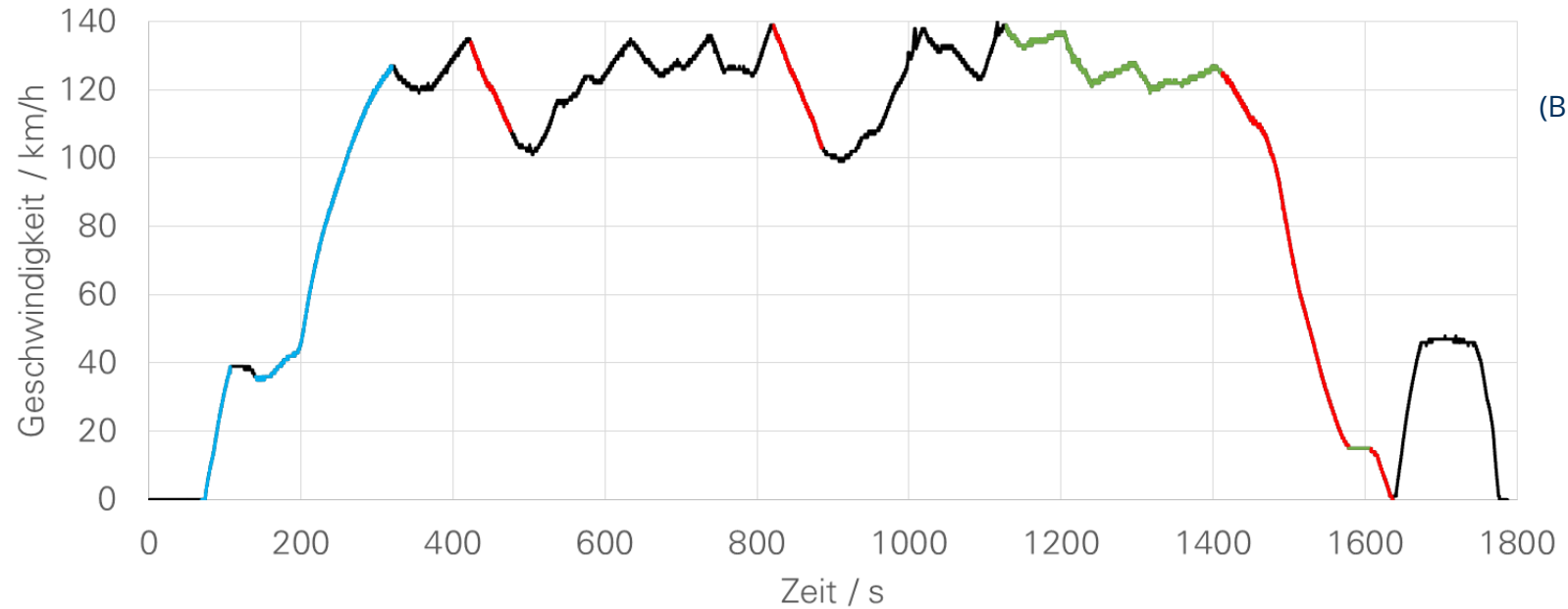
Fahrdynamische Grundgleichung

Reales Fahrspiel

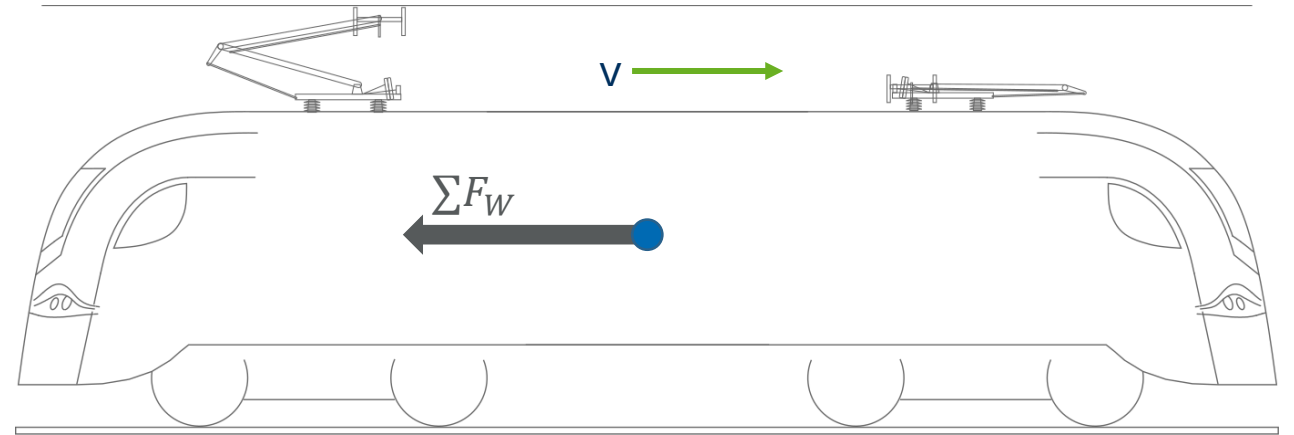


Foto: M. Kache

BR 612

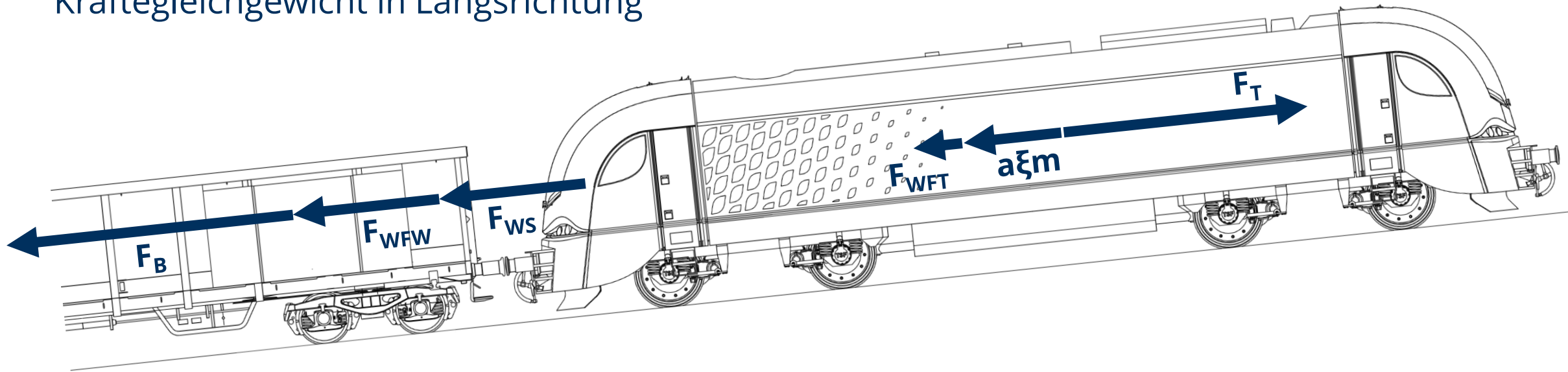


- Einführung
- **Grundlagen**
- Fahrwiderstandskräfte
- Antriebskräfte
- Traktionsvermögen
- Leistungs- und Energiebedarf
- Grundlagen der Fahrzeitberechnung



Fahrdynamische Grundgleichung

Kräftegleichgewicht in Längsrichtung



F_T Zugkraft (Traktionskraft)

$a\xi m$ Trägheitsterm

F_{WFT} Triebfahrzeugwiderstandskraft

F_{WFW} Wagenzugwiderstandskraft

F_{WS} Streckenwiderstandskraft

F_B Bremskraft

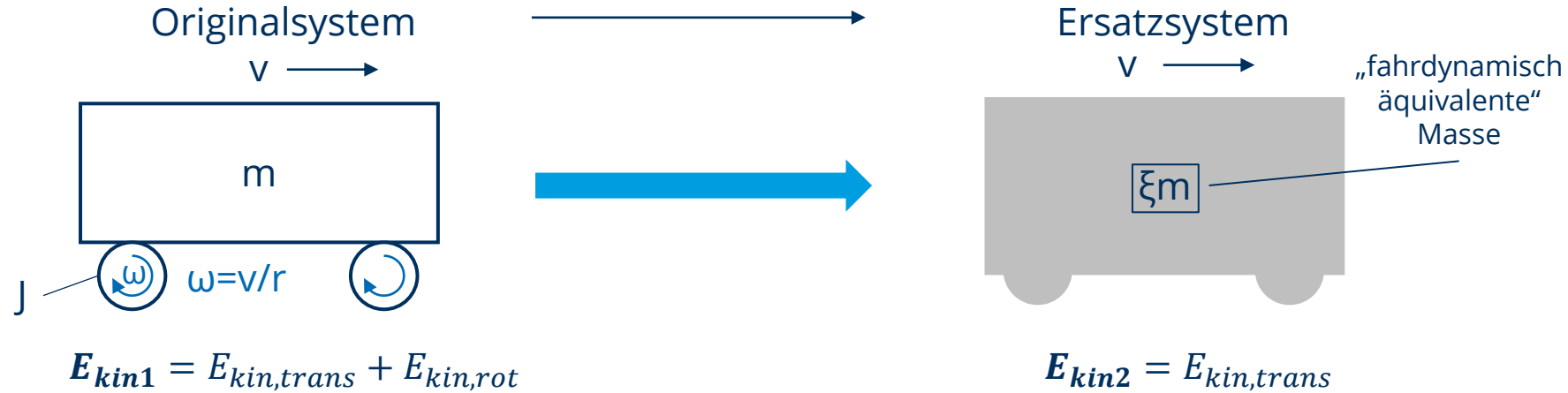
Kräftebilanz = Fahrdynamische Grundgleichung:

$$0 = F_T - a\xi m - F_{WFT} - F_{WFW} - F_{WS} - F_B$$

Fahrdynamischer Massenfaktor

Definition

Ziel: Reduktion auf translatorische Bewegung bei gleichzeitiger Berücksichtigung rotatorischer Trägheiten



Energieansatz:

$$E_{kin1} = E_{kin2}$$

$$\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}J_{ges}\omega^2 = \frac{1}{2}\xi mv^2$$

$$\xi = 1 + \frac{\frac{1}{2}J_{ges}\omega^2}{\frac{1}{2}mv^2} = 1 + \frac{E_{kin,rot}}{E_{kin,trans}}$$

Der fahrdynamische Massenfaktor stellt eine virtuelle Erhöhung der Fahrzeugmasse dar.

Er ist abhängig von:

- der Fahrzeugbauart,
- dem Beladungszustand und
- dem Radverschleiß.

Fahrdynamischer Massenfaktor

Anwendung auf Fahrzeugverbände

Für Fahrzeugverbände wird das gewichtete Mittel der einzelnen fahrdynamischen Massenfaktoren verwendet:

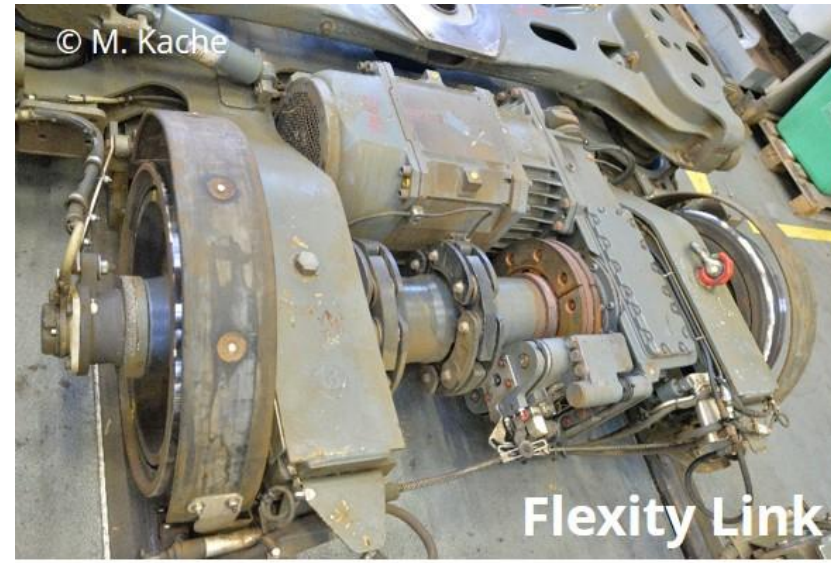


$$\xi_z = \frac{\sum(\xi_T m_T) + \sum(\xi_W m_W)}{\sum(m_T + m_W)}$$

Laufradsätze



Treibradsätze

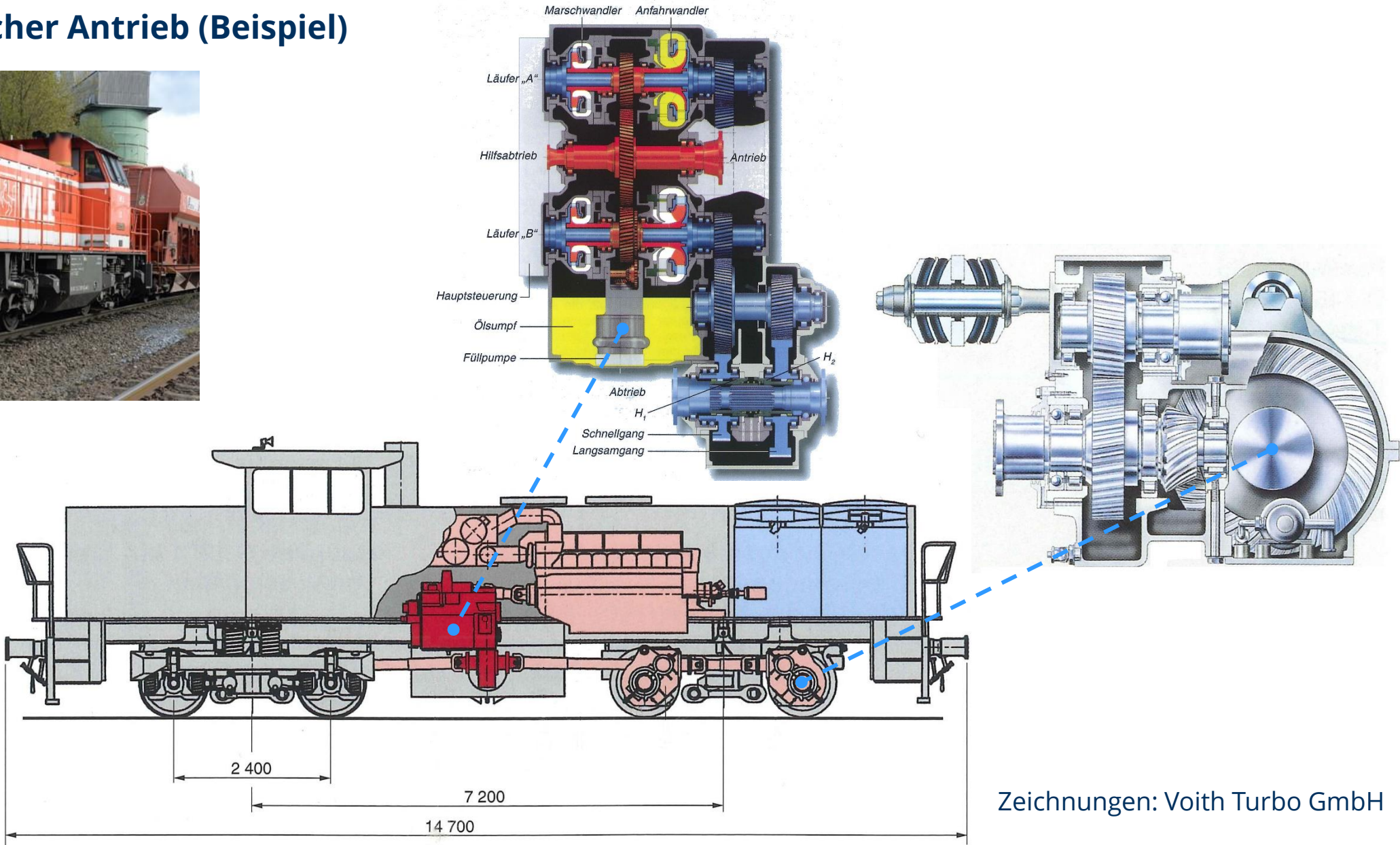


Schema hydraulischer Antrieb (Beispiel)



Foto: M. Kache

Vossloh G 1206



Zeichnungen: Voith Turbo GmbH

Elektrischer Antrieb - Beispiel BR 120

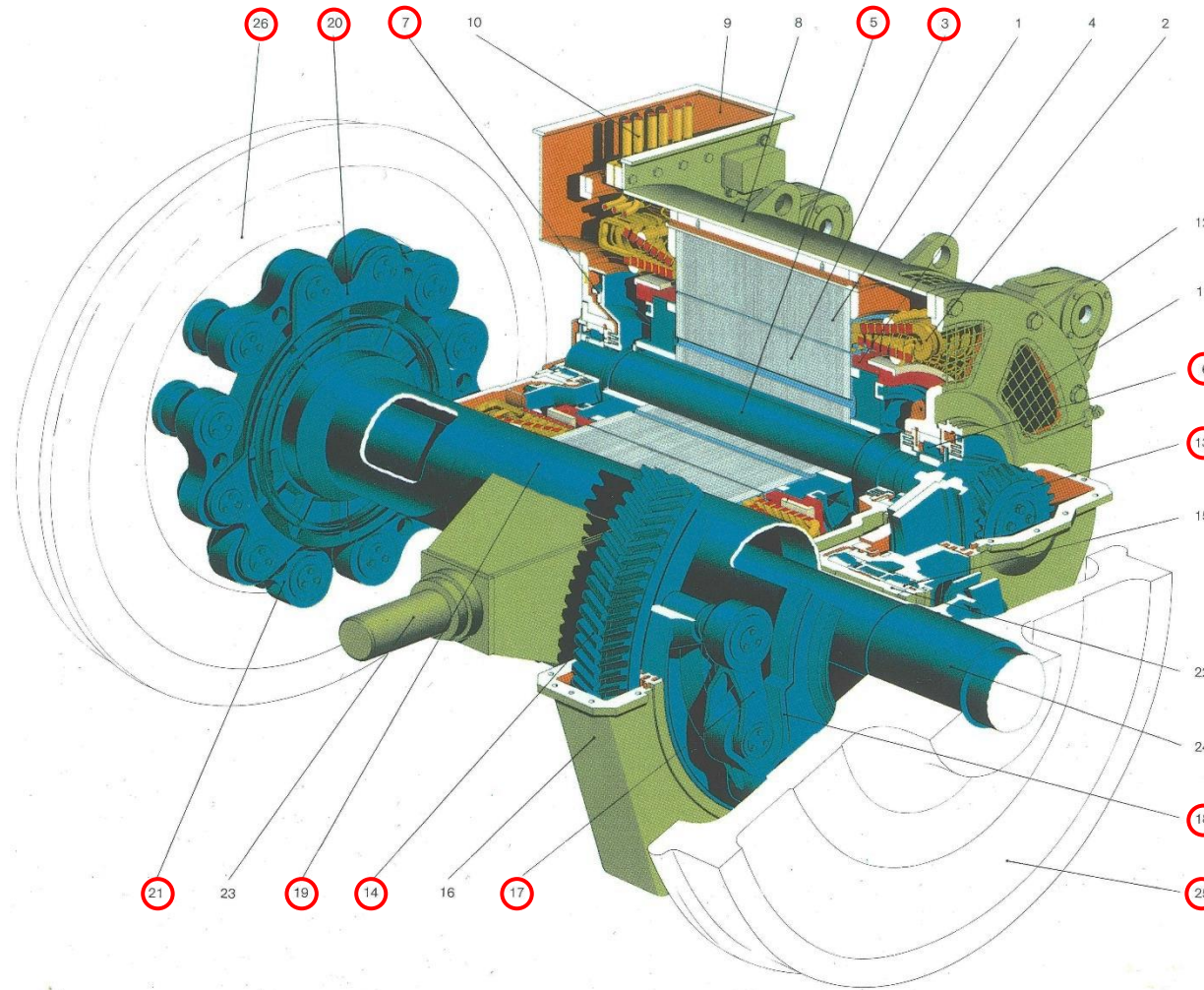


Foto: M. Kache

BR 120 der DB AG

Fahrmotor

- 1 Ständerblechpaket
- 2 Ständerwicklung
- 3 Läuferblechpaket
- 4 Kurzschlußwicklung
- 5 Welle
- 6 Zylinderrollenlager
- 7 Impulzzahnscheibe
- 8 Gehäuse
- 9 Lufteintrittsöffnung
- 10 Anschlußkabel
- 11 Luftaustrittsöffnungen
- 12 Befestigungsaugen

Getriebe

- 13 Ritzel
- 14 Großrad
- 15 Großradlager
- 16 Radschutzkasten

Gummigelenk-Kardantrieb

- 17 Gelenkhebelkupplung
- 18 Hohlwellenstern
- 19 Hohlwelle
- 20 Gabelstern
- 21 Gelenkhebelkupplung
- 22 Hohlwellengehäuse
- 23 Tragarm

Radsatz

- 24 Radsatzwelle
- 25 Scheibenrad
- 26 Scheibenrad mit Antriebsbolzen

○ Rotierende Komponenten

Quelle: Brown Boverie & Cie
(aus: Mehlretter „Elektrische Triebfahrzeuge“,
Motorbuchverlag, 1986)

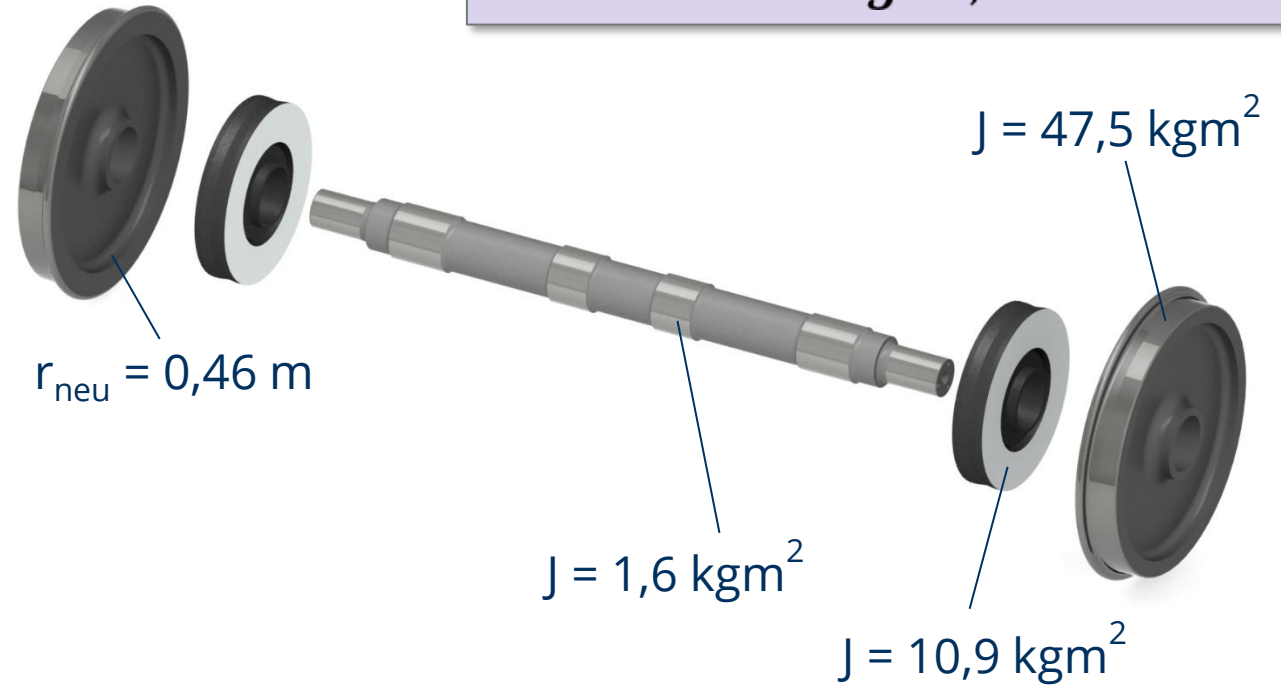
Beispiel Reisezugwagen



$$m = 35 \text{ t} = 35.000 \text{ kg}$$

4 Radsätze mit je 2 Wellenbremsscheiben

$$\xi = 1 + \frac{4 \cdot 118,4 \text{ kgm}^2}{35000 \text{ kg} \cdot 0,46^2 \text{ m}^2} = 1,06$$



$$J_{\text{ges}} = 1,6 \text{ kgm}^2 + 10,9 \text{ kgm}^2 \cdot 2 + 47,5 \text{ kgm}^2 \cdot 2 = \mathbf{118,4 \text{ kgm}^2}$$

Fahrdynamischer Massenfaktor – Beispiele



E-Lok
(Drehstrom)

$\xi = 1,10 \dots 1,12$



Dieselektrische
Lokomotiven:

$\xi = 1,15 \dots 1,20$



Straßenbahn:

$\xi = 1,09 \dots 1,12$



E-Lok:
(Altbau)

$\xi = 1,15 \dots 1,20$



Dieselhydraulische
Lok:

$\xi = 1,04 \dots 1,07$



S-Bahn:

$\xi = 1,06 \dots 1,08$



ICE:

$\xi = 1,04 \dots 1,20$



Dieseltriebwagen:

$\xi = 1,04 \dots 1,06$

Fahrdynamischer Massenfaktor – Beispiele



Reisezugwagen:

$$\xi = 1,06 \dots 1,09$$



Reisezug:

$$\xi = 1,07 \dots 1,1$$



Güterwagen

leer:
 $\xi = 1,08 \dots 1,10$

beladen:
 $\xi = 1,02 \dots 1,04$



Güterzug mit
leeren Wagen:

$$\xi = 1,1 \dots 1,15$$



Güterzug mit
beladenen Wagen:

$$\xi = 1,02 \dots 1,06$$

Massenfaktoren von Straßenfahrzeugen

