

Dipl.-Ing. Tobias Bregulla
Professur für Elektrische Bahnen

Fahrdynamik für das Verkehrsingenieurwesen

VL 01: Grundlagen der Fahrdynamik

Sommersemester 2023

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

Ihr Lehrkontakt



Dipl.-Ing. Tobias Bregulla

Wissenschaftlicher Mitarbeiter
tobias.bregulla@tu-dresden.de
+49 351 463-36577

Technische Universität Dresden
Fakultät für Verkehrswissenschaften „Friedrich List“
Professur für Elektrische Bahnen
<https://www.e-bahnen.de>

Organisation

Vorlesungstermine

- | | | |
|-----------------------|-----------------|-------------------------------------|
| – (15. KW) 12.04.2023 | 2. DS / POT 51 | VL01 Grundlagen |
| – (16. KW) 18.04.2023 | 5. DS / POT 351 | VL02 Fahrwiderstandskräfte |
| – (17. KW) 26.04.2023 | 2. DS / POT 51 | VL03 Antriebskräfte |
| – (21. KW) 24.05.2023 | 2. DS / POT 51 | VL04 Fahrdynamische Charakteristika |
| – (23. KW) 07.06.2023 | 2. DS / POT 51 | VL05 Leistungsauslegung |
| – (24. KW) 13.06.2023 | 5. DS / POT 351 | VL Kraftfahrzeuge 1 |
| – (25. KW) 21.06.2023 | 2. DS / POT 51 | VL06 Energiebedarf |
| – (26. KW) 27.06.2023 | 5. DS / POT 351 | VL Kraftfahrzeuge 2 |
| – (27. KW) 05.07.2023 | 2. DS / POT 51 | Konsultation/Puffer |
| – (28. KW) 11.07.2023 | 5. DS / POT 351 | Freier Slot/Puffer |

**Übungstermine, kurzfristige Änderungen sowie Material:
OPAL Kurs Fahrdynamik/Bahnfahrzeuge (<https://tud.link/6nry>)**



Organisation

Übungstermine

Übungsgruppe 01: Di. 4. DS (gerade Woche), POT 13

~~Übungsgruppe 02: Di. 5. DS (ungerade Woche), POT 351 (Ersatztermine)~~

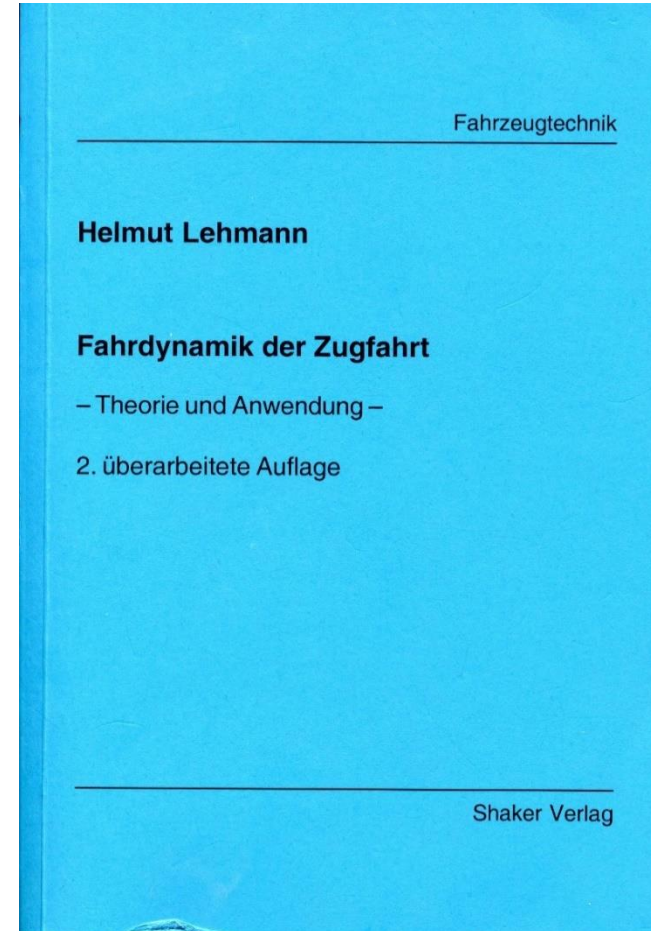
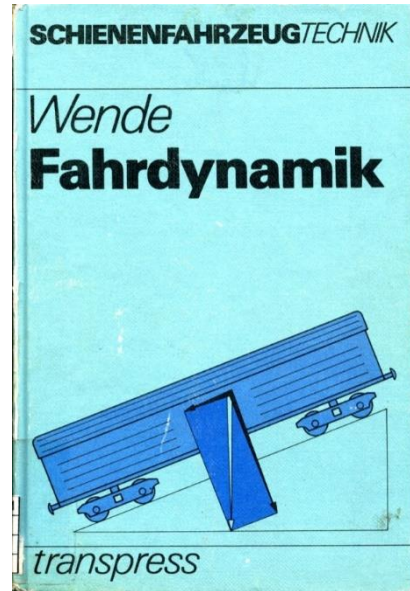
Übungsgruppe 03: Do. 3. DS (gerade Woche), POT 051

Übungsgruppe 04: Fr. 2. DS (ungerade Woche), POT 106

**Übungstermine, kurzfristige Änderungen sowie Material:
OPAL Kurs Fahrdynamik/Bahnfahrzeuge (<https://tud.link/6nry>)**



Literaturempfehlungen



Die Fahrzeugbewegung

X: Längsdynamik

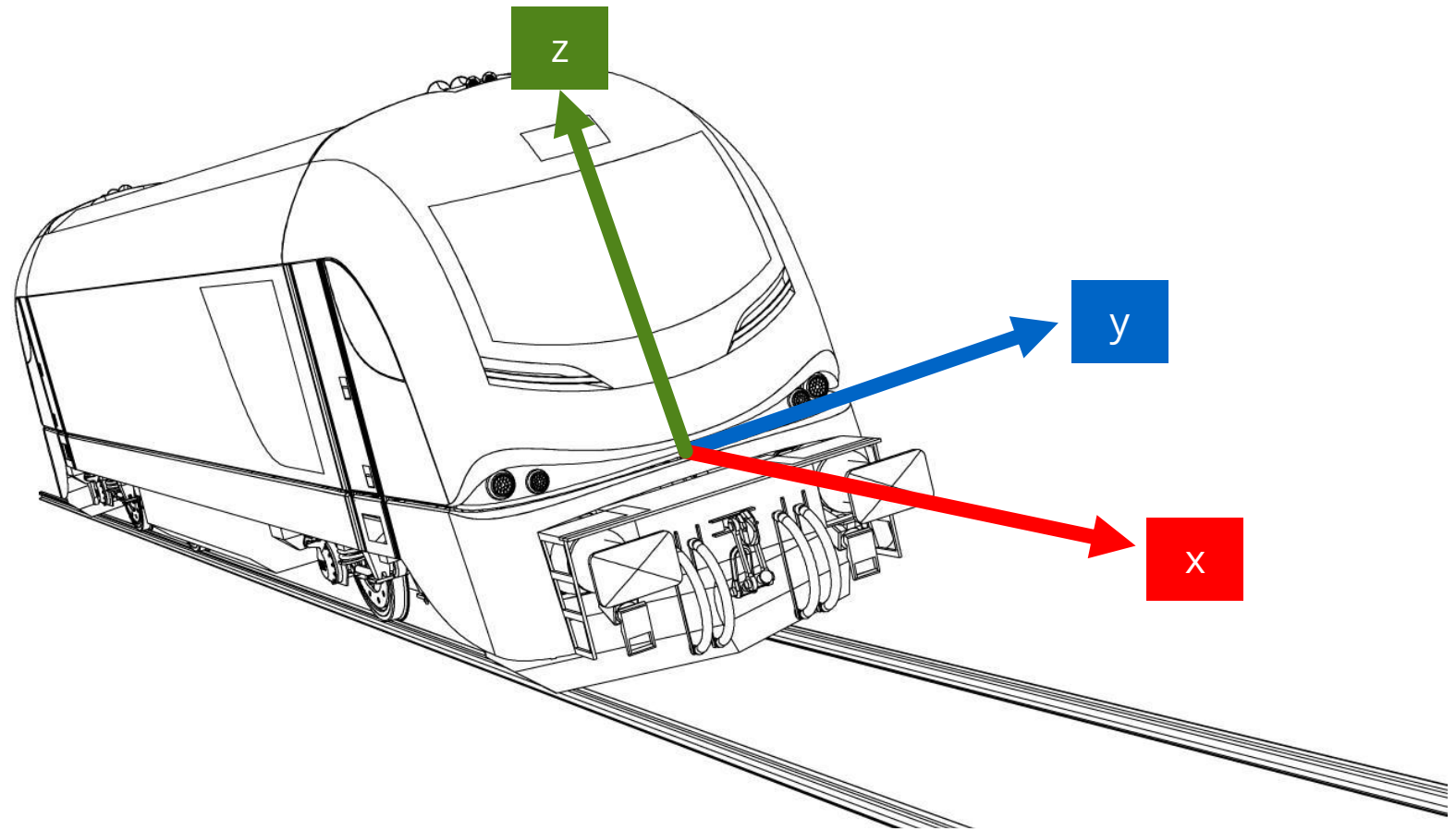
- Fahrbewegung
- Antreiben
- Bremsen

Y: Querdynamik

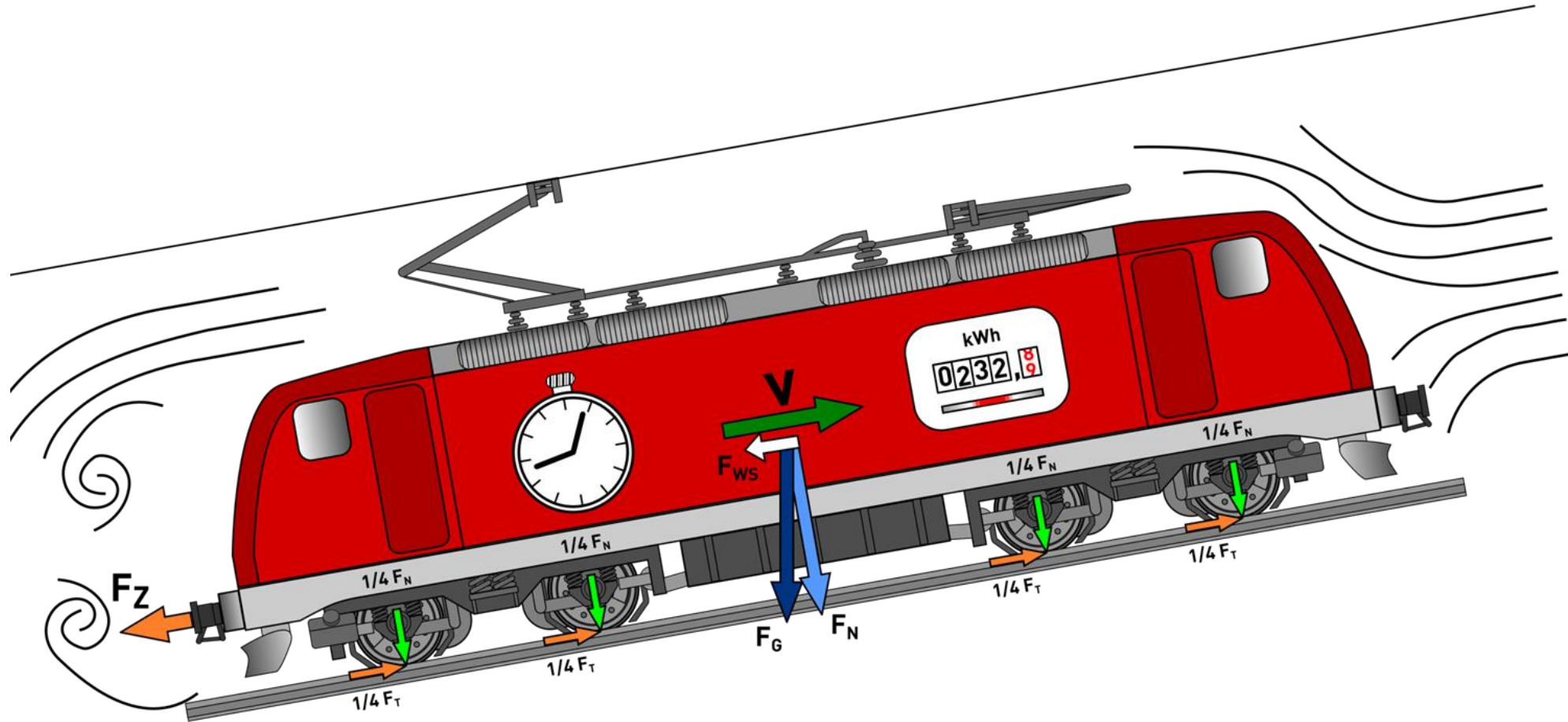
- Spurführung
- Entgleisungssicherheit
- Fahrkomfort im Bogen

Z: Vertikaldynamik

- Fahrkomfort
- Entgleisungssicherheit
- Interaktion Infrastruktur



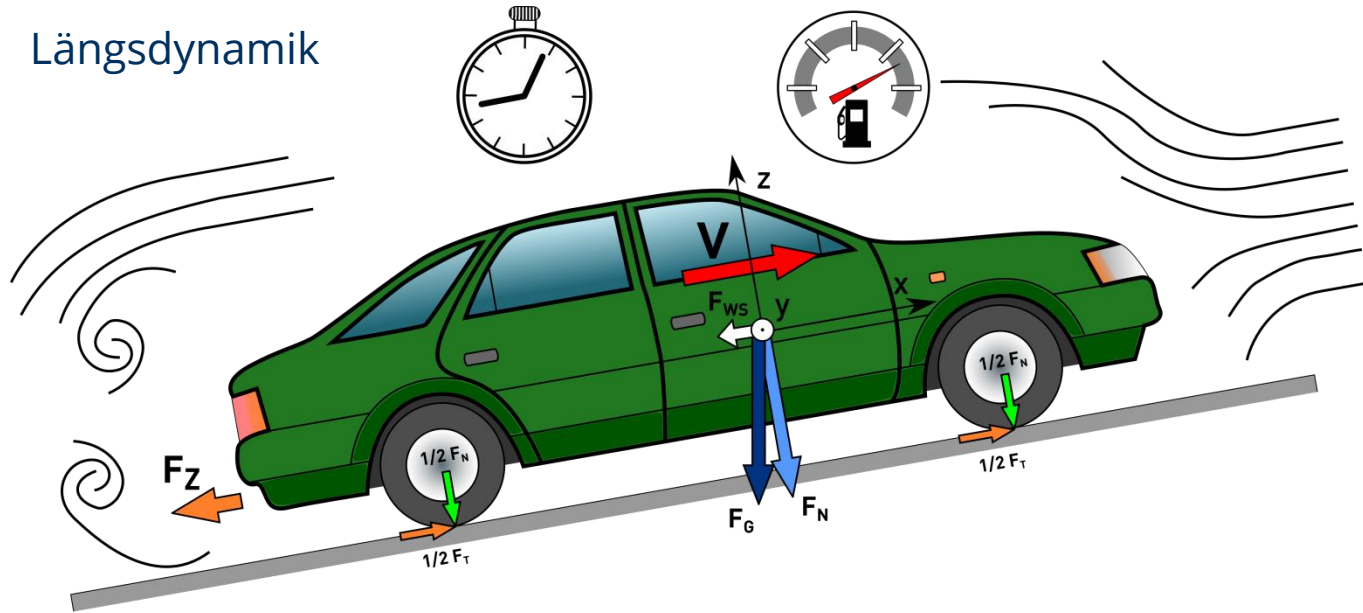
Die Fahrzeugbewegung



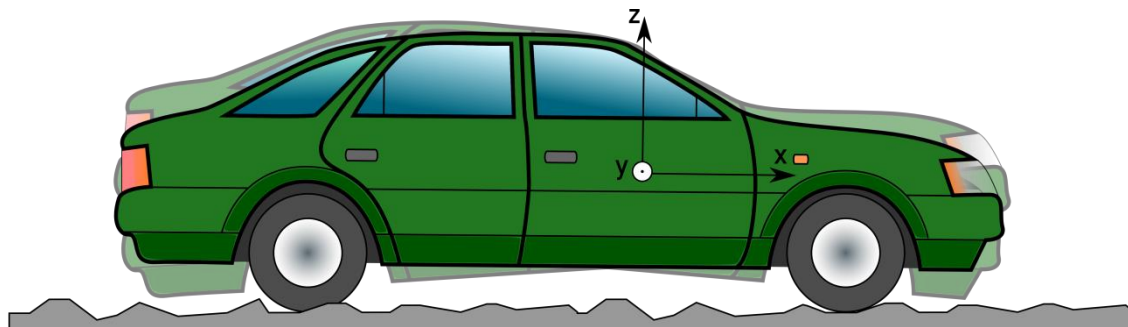
© Karim Benabdellah, Martin Kache

Die Fahrzeugbewegung

Längsdynamik



Vertikaldynamik



Querdynamik

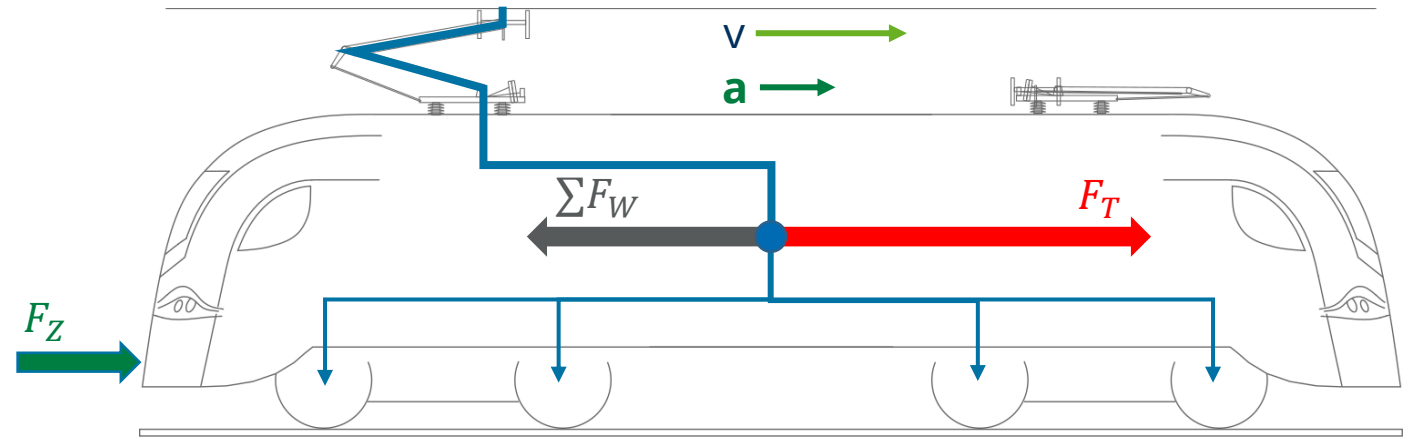


Vorlesungsinhalte - Grundfragen der Fahrdynamik



Vorlesungsinhalte (Schwerpunkt: Schienenverkehr)

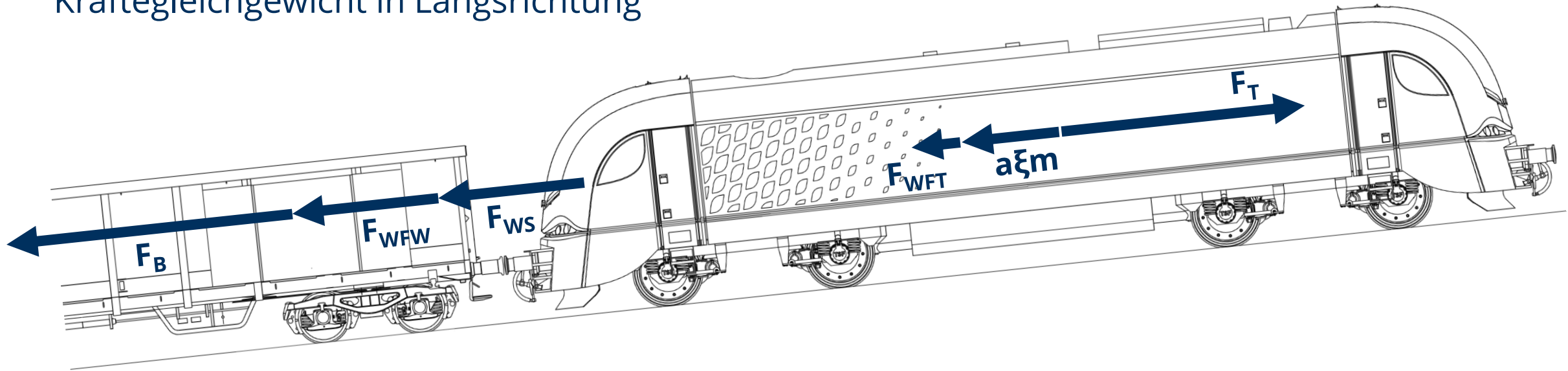
- Einführung
- **Grundlagen**
- Fahrwiderstandskräfte
- Antriebskräfte
- Traktionsvermögen
- Leistungs- und Energiebedarf
- Grundlagen der Fahrzeitberechnung



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

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

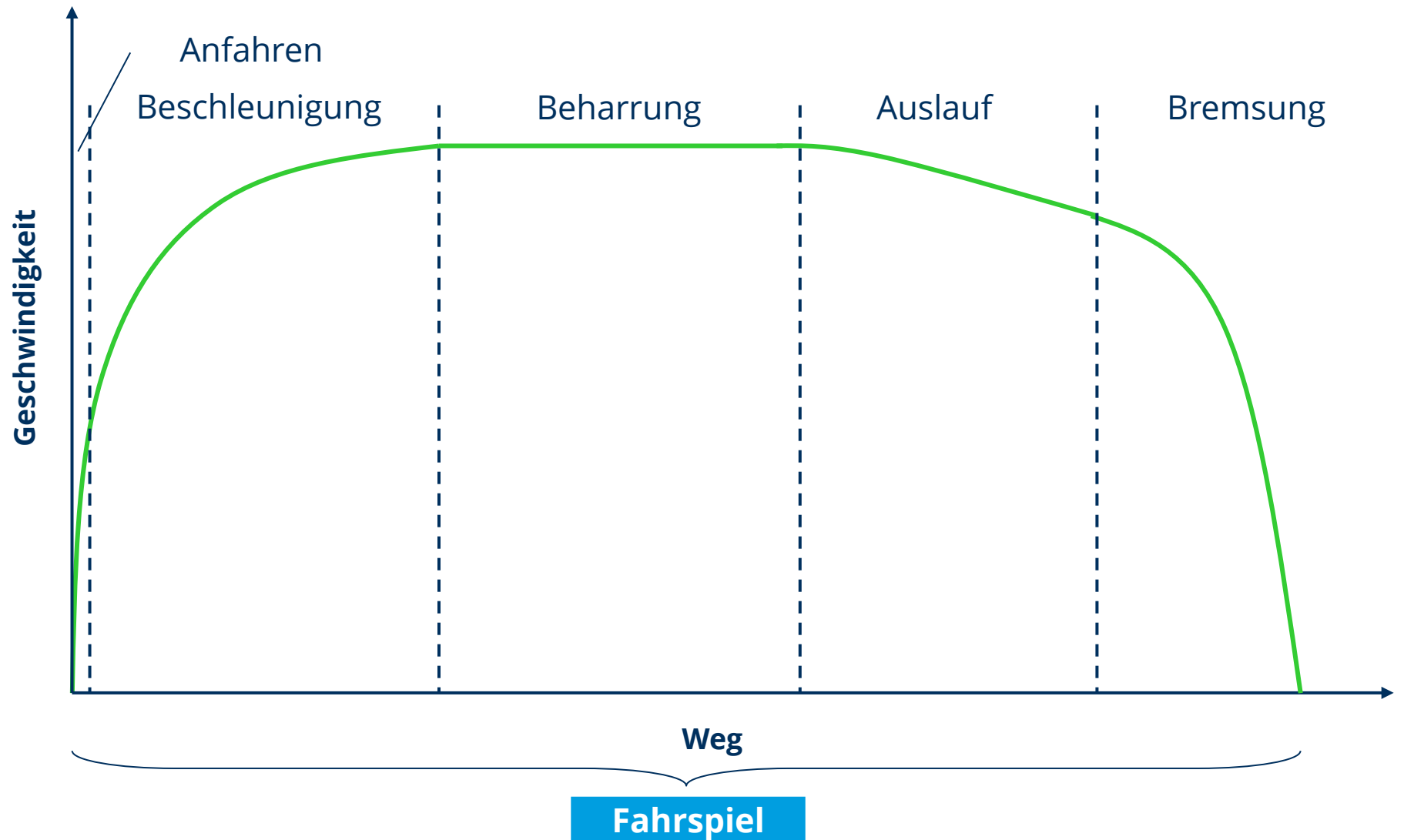
Kräftebilanz = Fahrdynamische Grundgleichung:

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

Fahrdynamische Grundgleichung

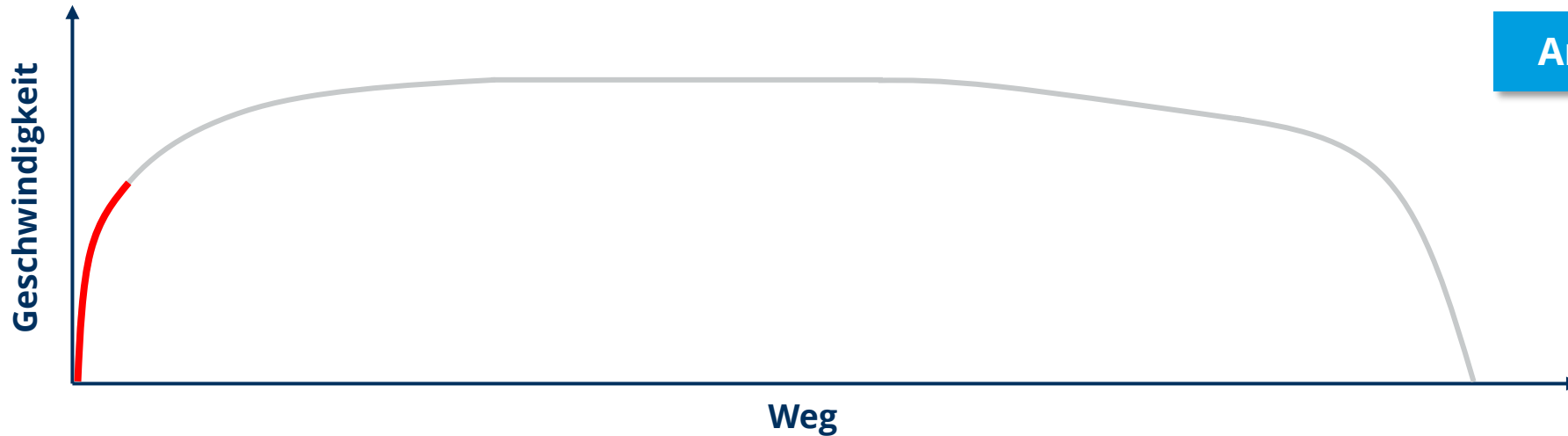
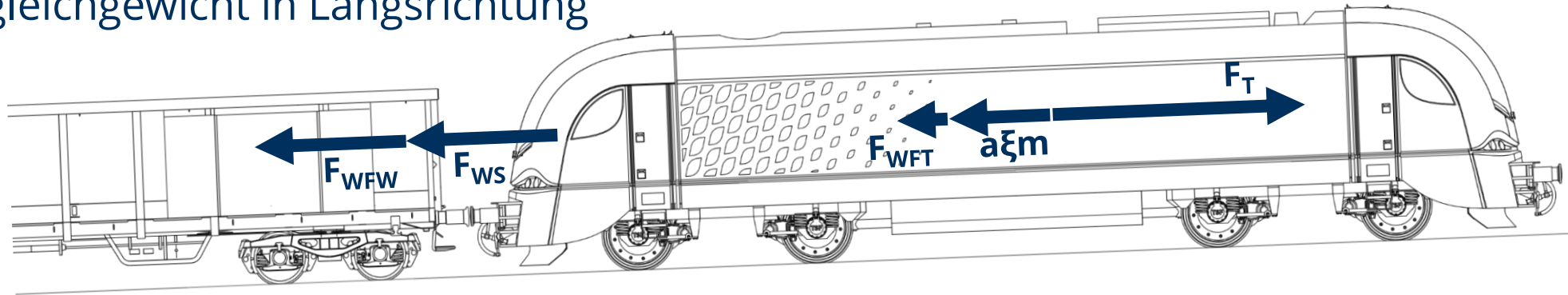
Fahrschaubild

Die 5 Phasen der Zugfahrt



Fahrdynamische Grundgleichung

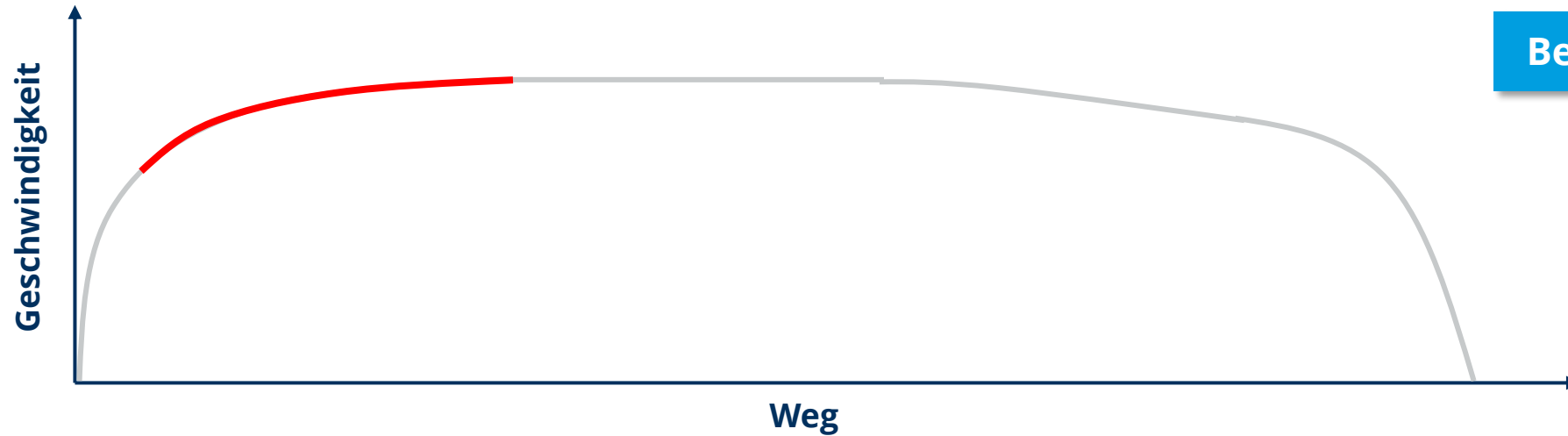
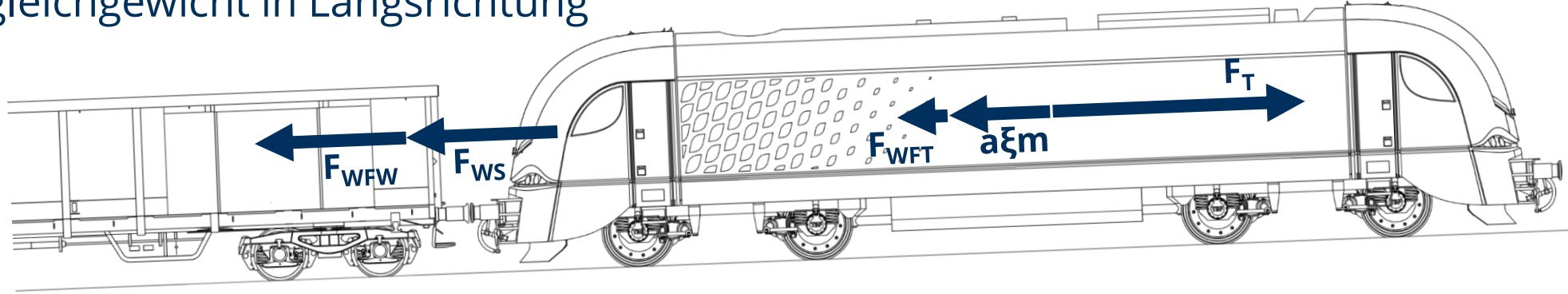
Kräftegleichgewicht in Längsrichtung



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

Fahrdynamische Grundgleichung

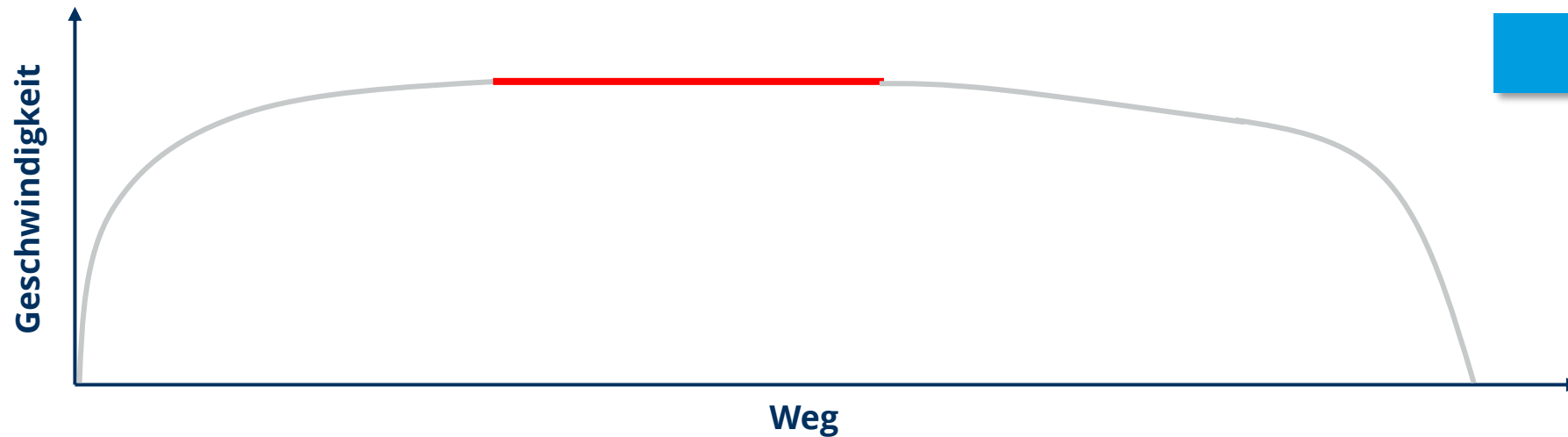
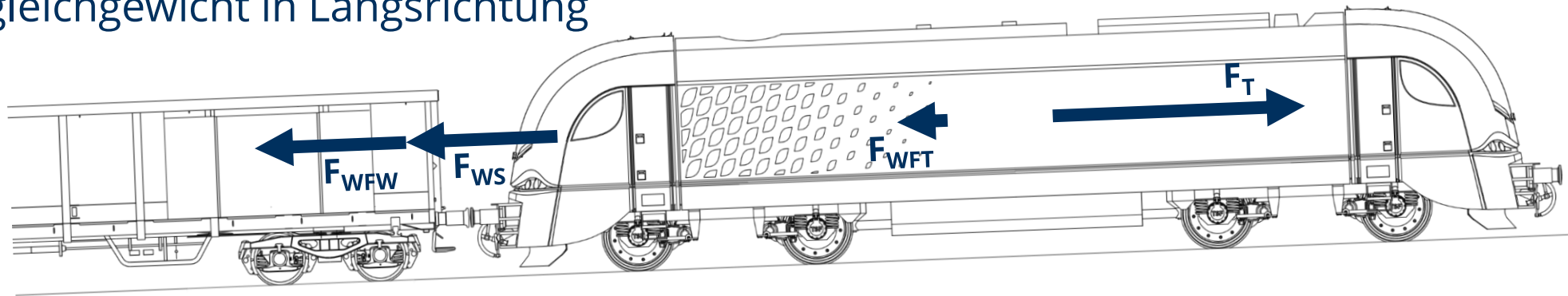
Kräftegleichgewicht in Längsrichtung



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

Fahrdynamische Grundgleichung

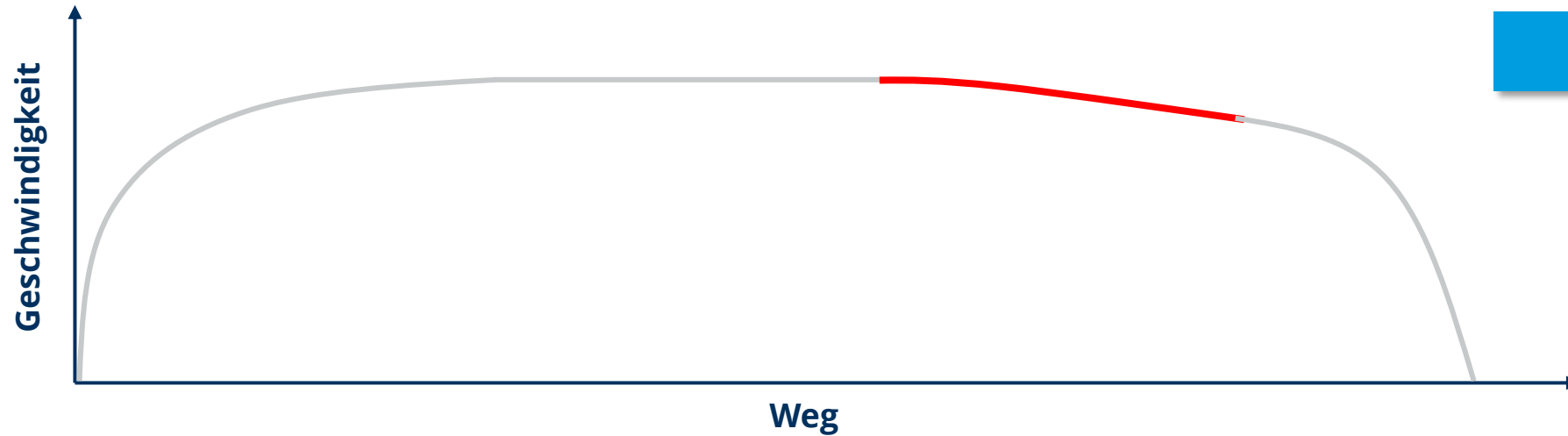
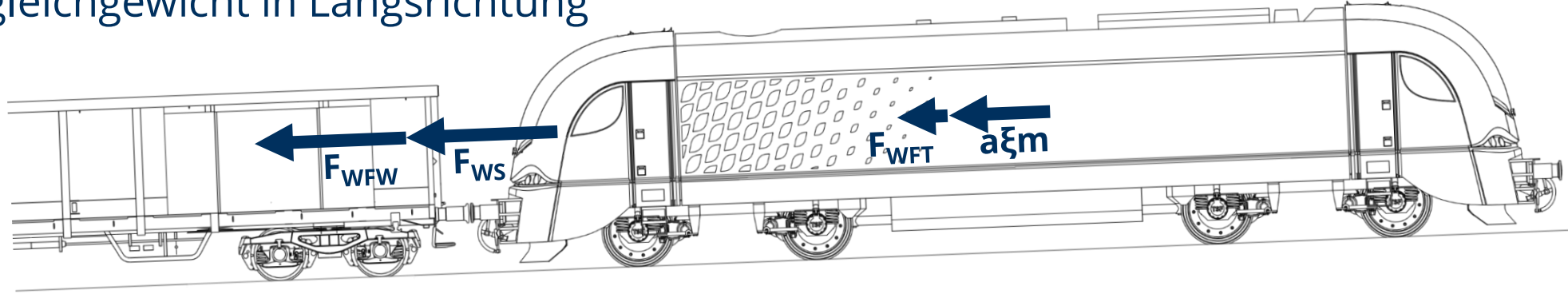
Kräftegleichgewicht in Längsrichtung



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

Fahrdynamische Grundgleichung

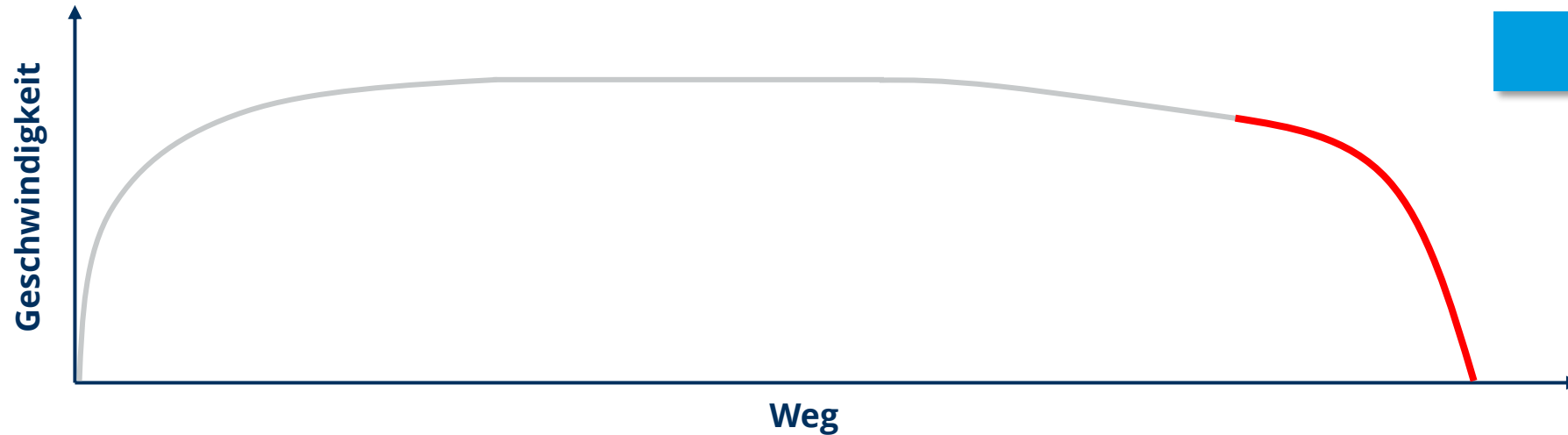
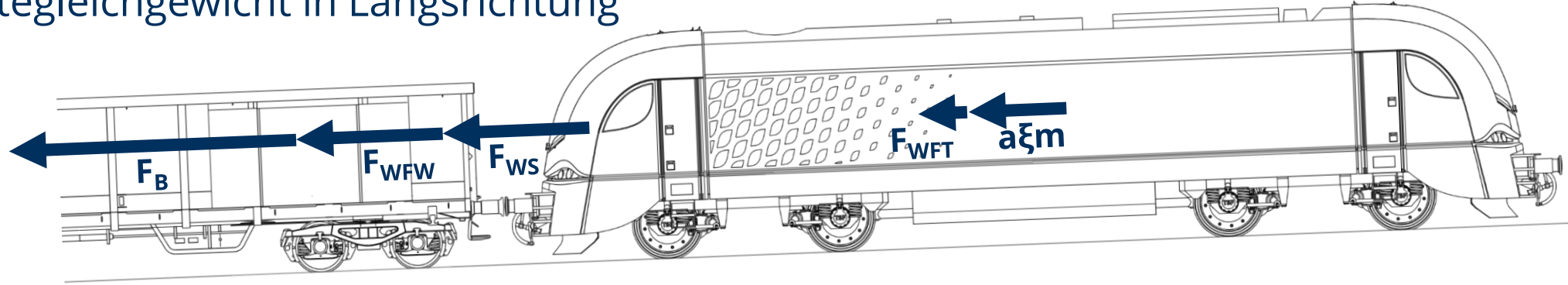
Kräftegleichgewicht in Längsrichtung



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

Fahrdynamische Grundgleichung

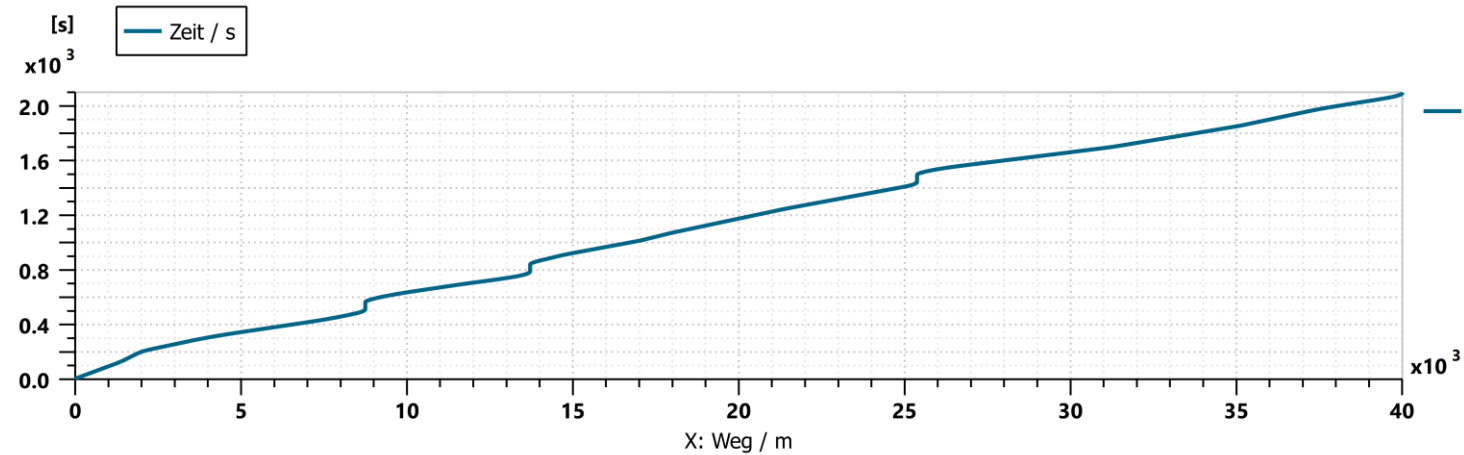
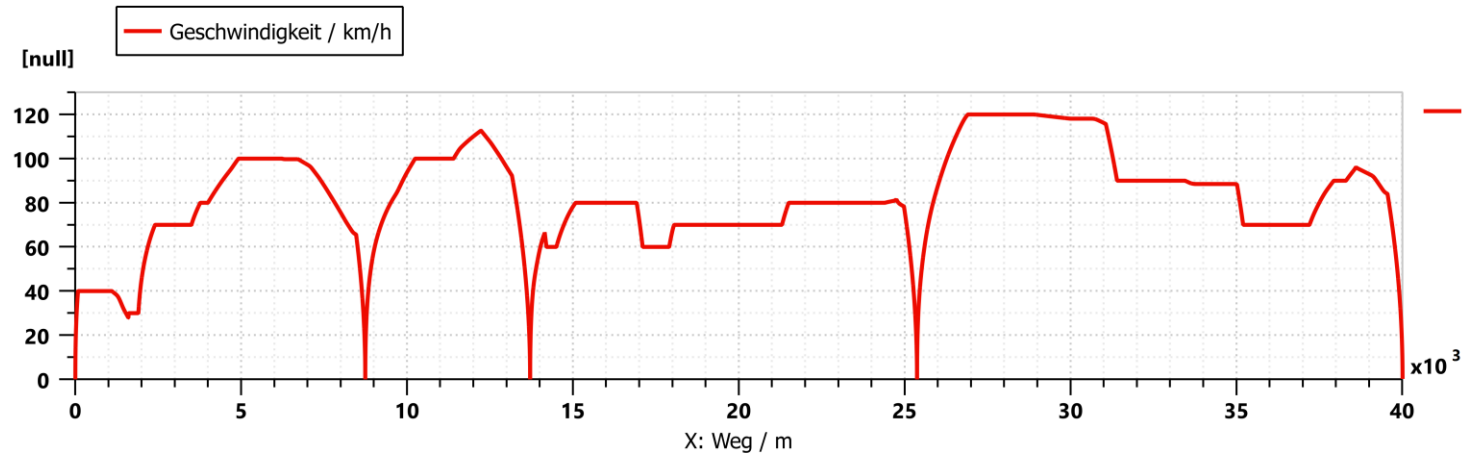
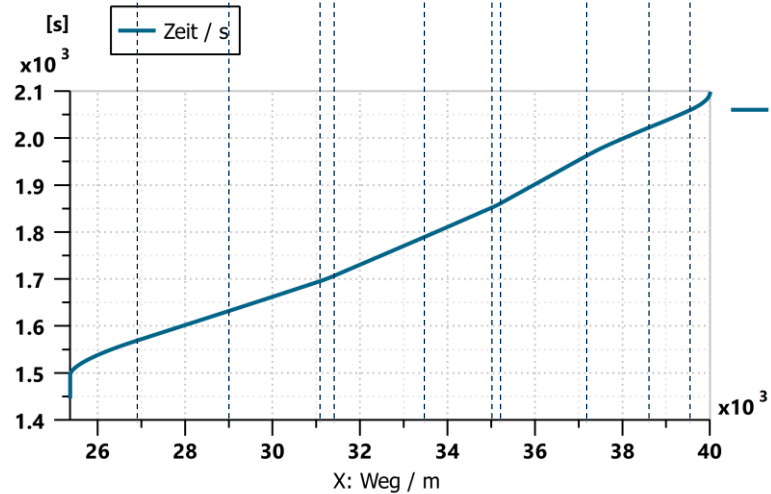
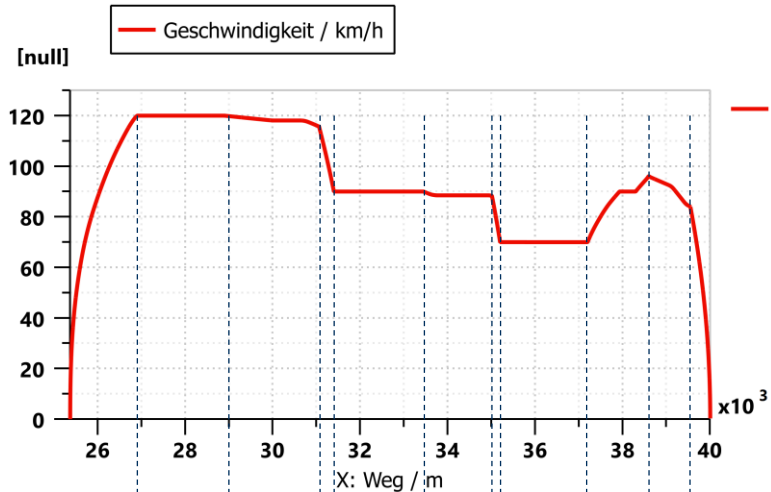
Kräftegleichgewicht in Längsrichtung



$$0 = -a_{xm} - F_{WFT} - F_{WFW} - F_{WS} - F_B$$

Alternative Darstellung: Weg/Zeit-Diagramm

Anwendung: Bildfahrplan



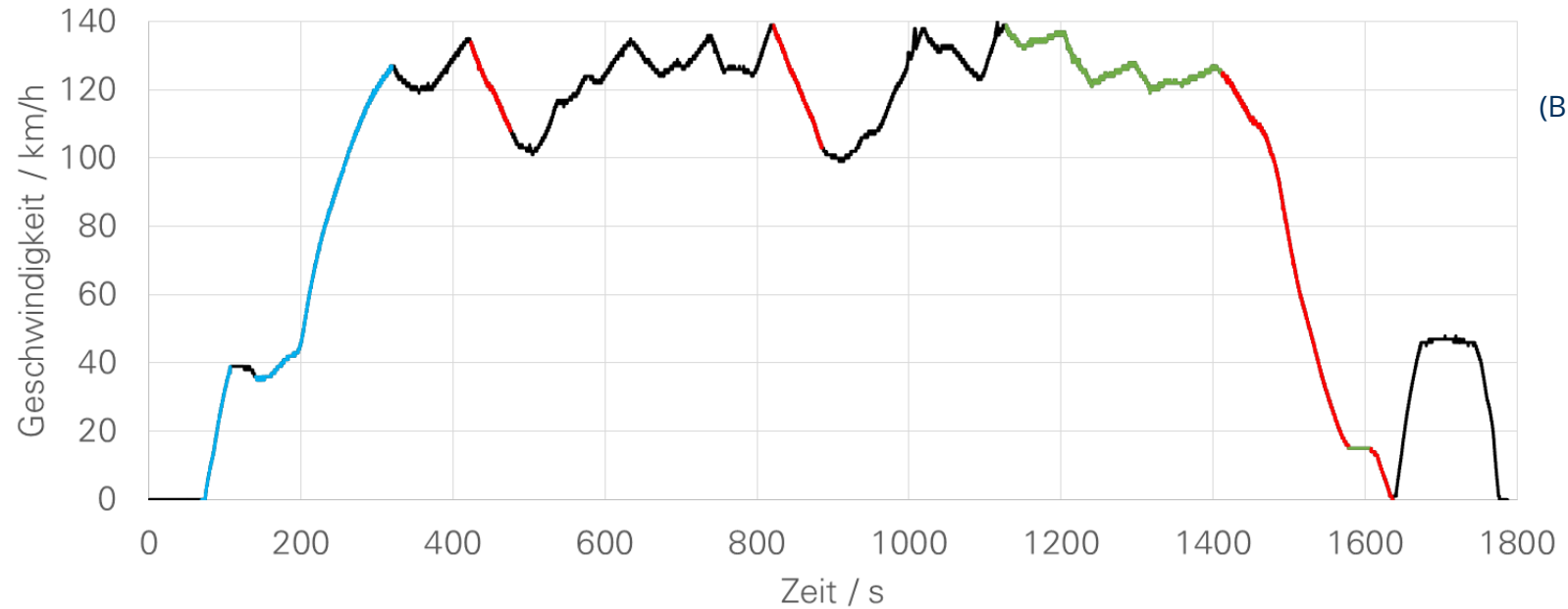
Fahrdynamische Grundgleichung

Reales Fahrspiel

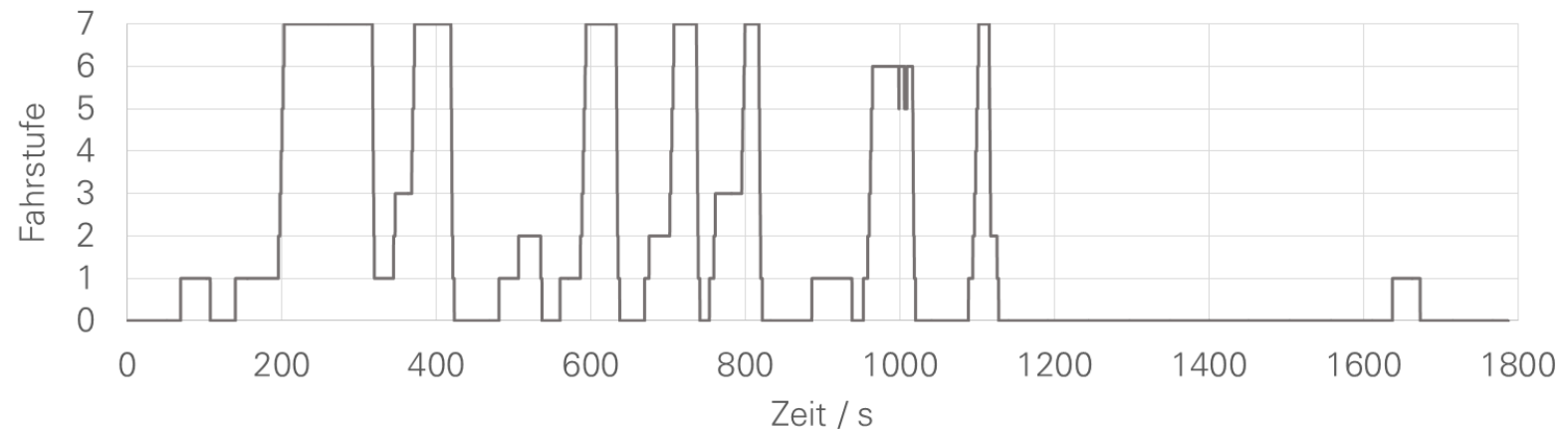


Foto: M. Kache

BR 612

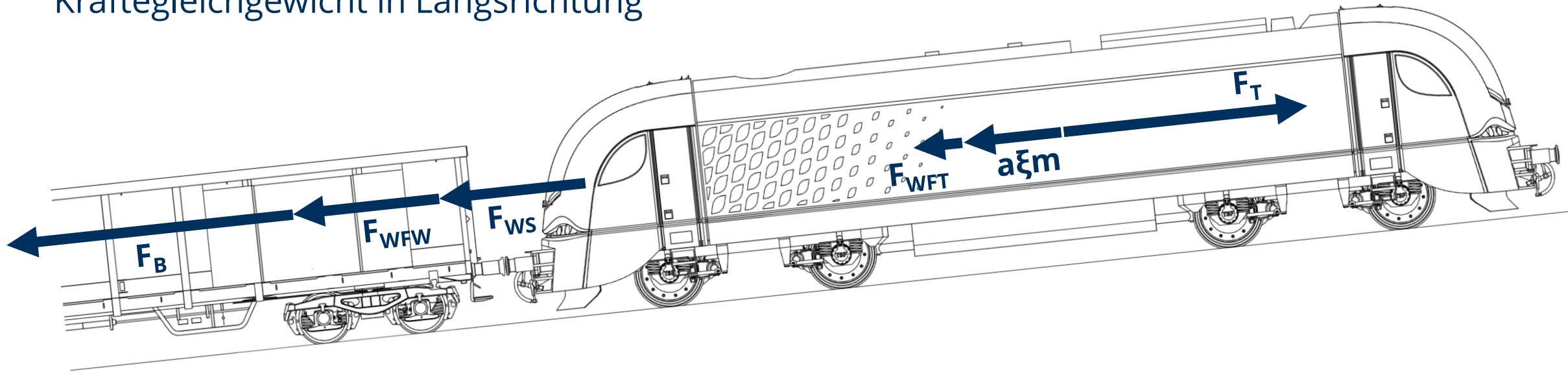


aufgezeichnetes
reales Fahrspiel
(BR 612, Plauen-Hof)



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

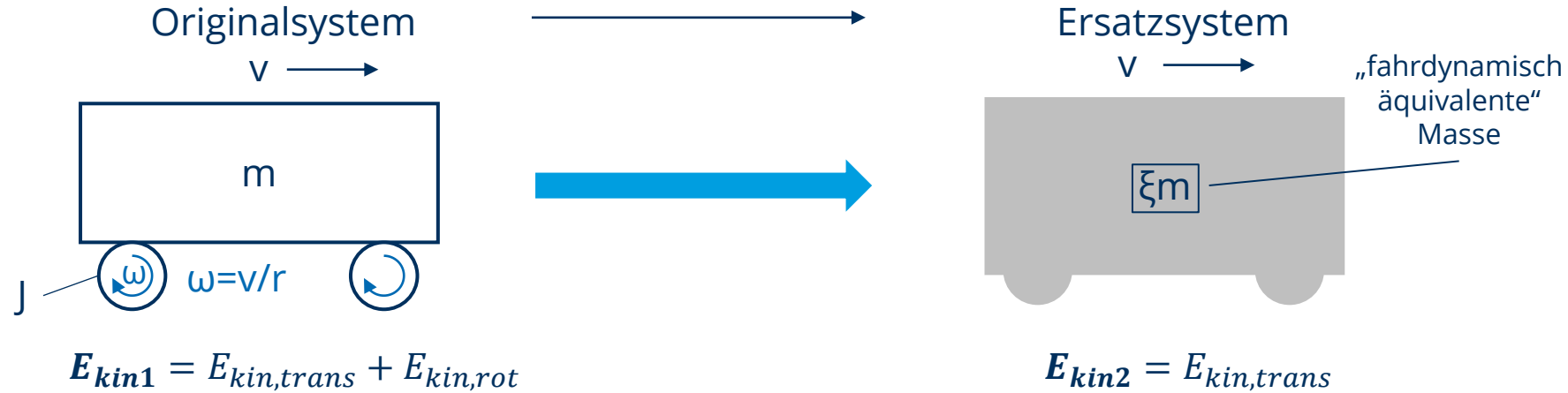
Kräftebilanz = Fahrdynamische Grundgleichung:

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

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

Zusammenfassung

- Dient der Berücksichtigung der Trägheit rotierender Massen (z.B. Radsätze) bei fahrdynamischen Berechnungen (Beschleunigungen/Verzögerungen, Energien).
- Widerspiegelt das Verhältnis der kinetischen Energie der Rotation zur kinetischen Energie der Translation.
- Massenfaktor stellt eine virtuelle Vergrößerung der translatorischen Trägheit dar
- Lässt sich rechnerisch oder experimentell bestimmen
- Falls nicht bestimmbar (zu viele Parameter unbekannt) – Rückgriff auf Literatur (Abhängigkeit von Fahrzeugtyp beachten)

$$\xi = 1 + \frac{E_{kin,rot}}{E_{kin,trans}} = 1 + \frac{0,5J_{ges}\omega^2}{0,5mv^2} = 1 + \frac{J_{ges}}{mr_R^2}$$

$$J_{ges} = \sum J_R + \sum i^2 J_{AE}$$

Fahrdynamischer Massenfaktor

Anwendung auf Fahrzeugverbände

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

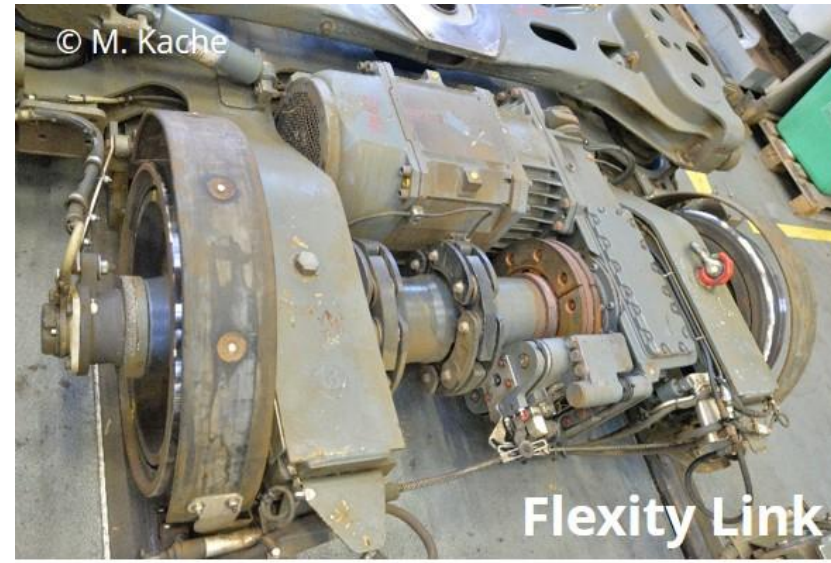


$$\xi_z = \frac{\sum(\xi_T m_T) + \sum(\xi_W m_W)}{\sum(m_T + m_W)}$$

Laufradsätze



Treibradsätze

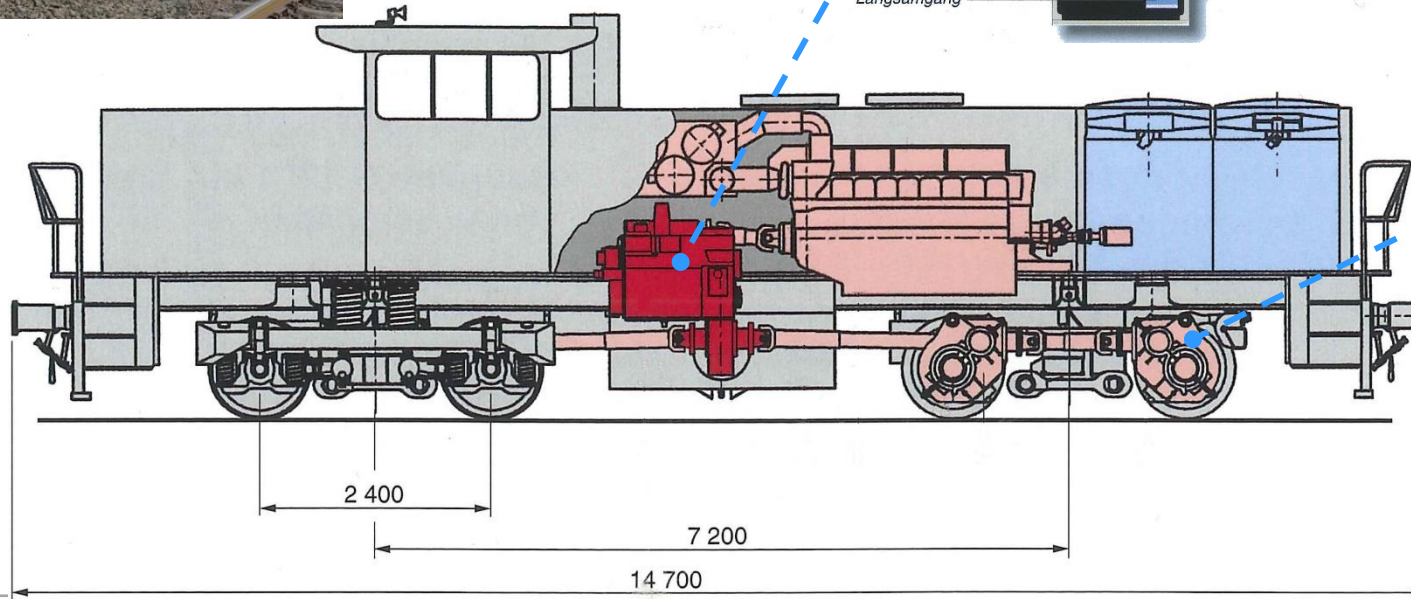
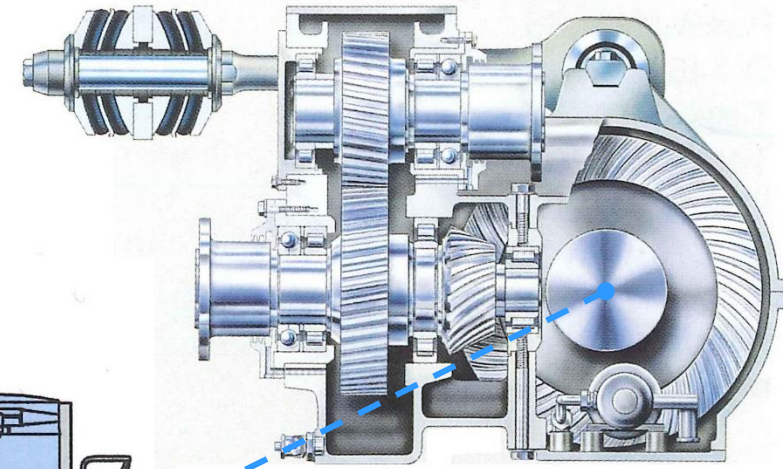
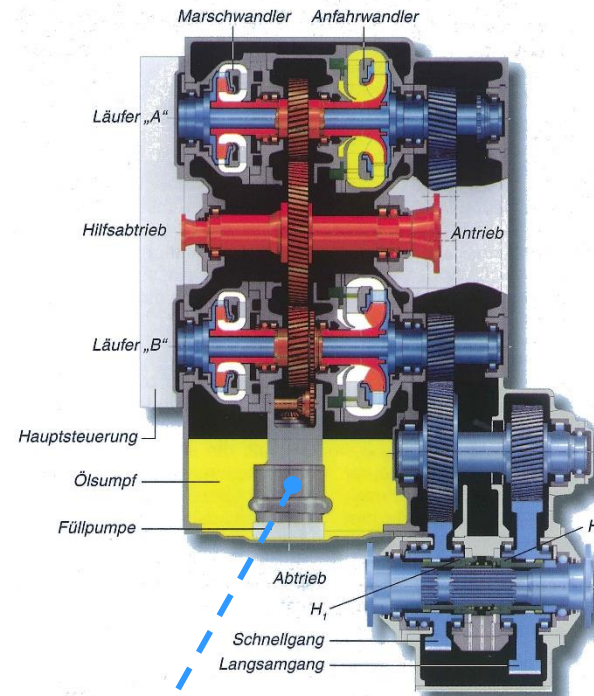


Hydraulischer Antrieb

Schema



Vossloh G 1206



Zeichnungen: Voith Turbo GmbH

Elektrischer Antrieb

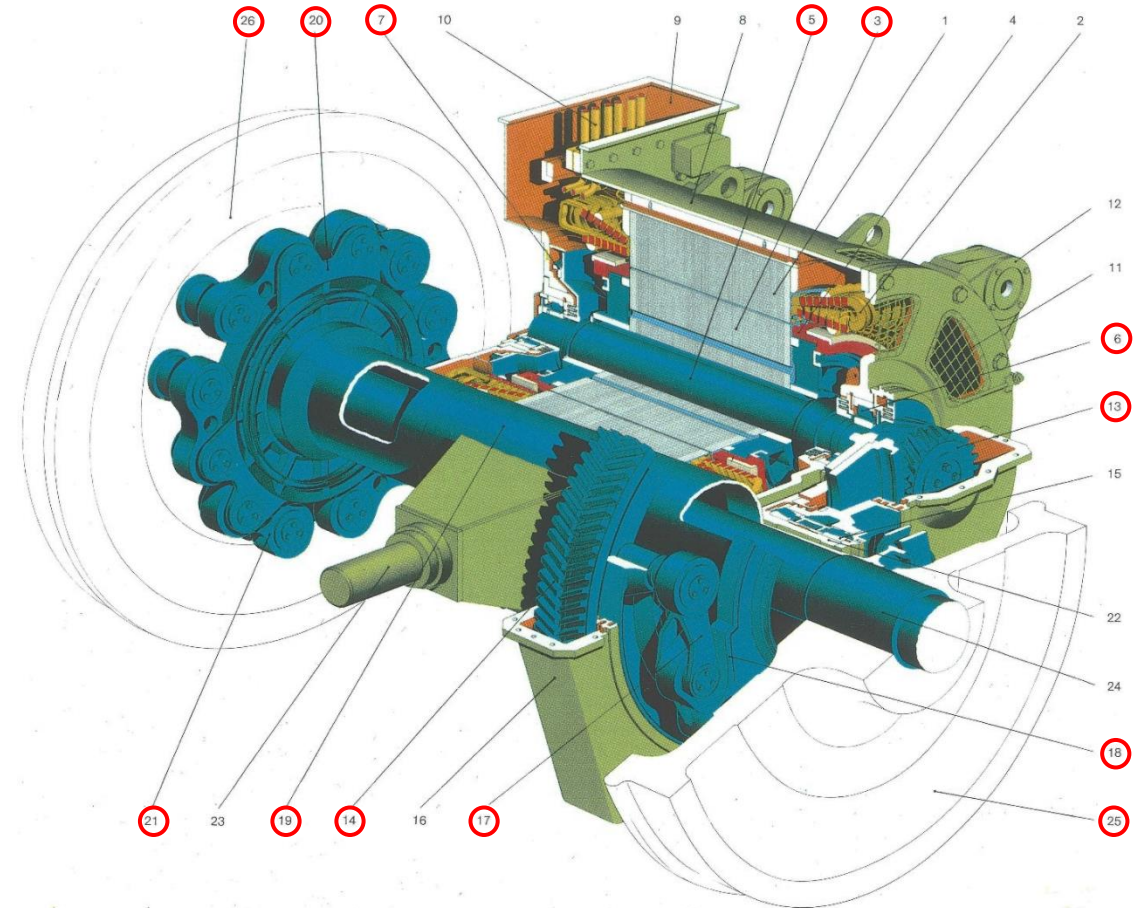
Beispiel BR 120

○ Rotierende Komponenten

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



BR 120 der DB AG



Fahrmotor

- 1 Ständerblechpaket
- 2 Ständerwicklung
- 3 Läuferblechpaket
- 4 Kurzschlußwicklung
- 5 Welle
- 6 Zylinderrollenlager

- 7 Impulzahnscheibe
- 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

Berechnung des Massenfaktors

Beispiel Reisezugwagen

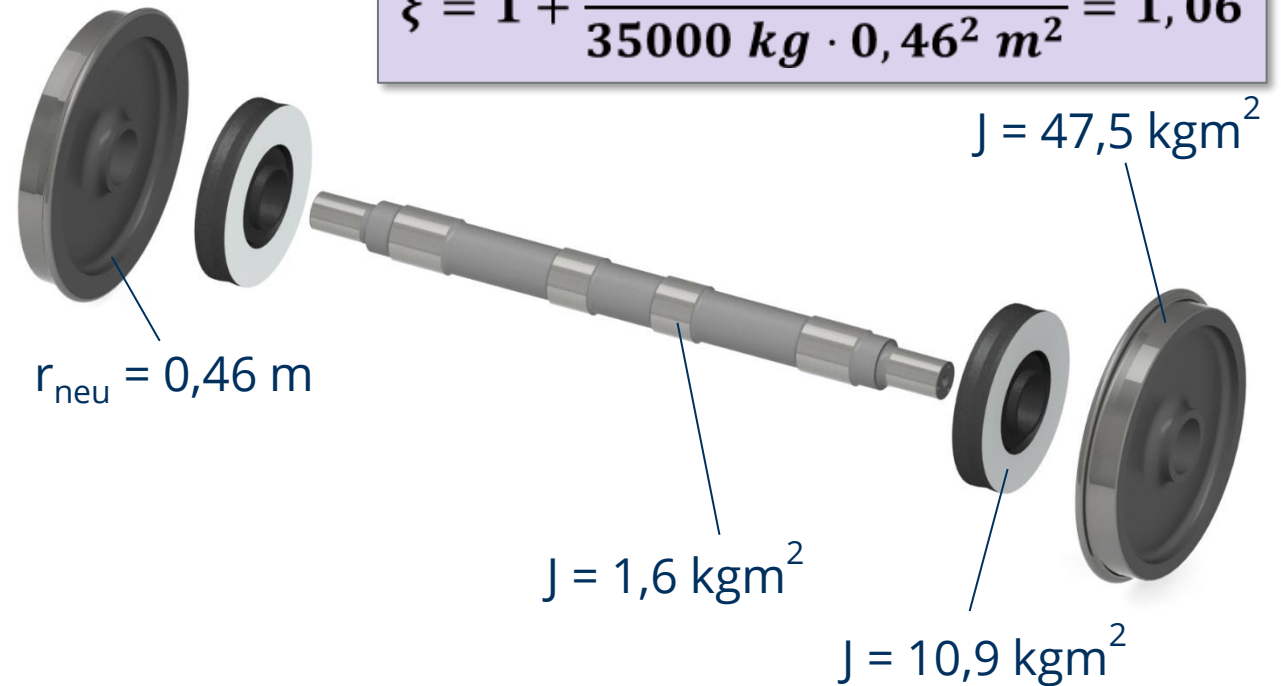
$$\xi = 1 + \frac{E_{kin,rot}}{E_{kin,trans}} = 1 + \frac{0,5J_{ges}\omega^2}{0,5mv^2} = 1 + \frac{J_{ges}}{mr_R^2}$$

$$\omega = v/r$$

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

4 Radsätze mit je 2 Wellenbremsscheiben

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



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

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:

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

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:

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

Einfluss Massenträgheiten



2 x BR 612

Dresden - Freiberg

Streckenlänge:
40 km

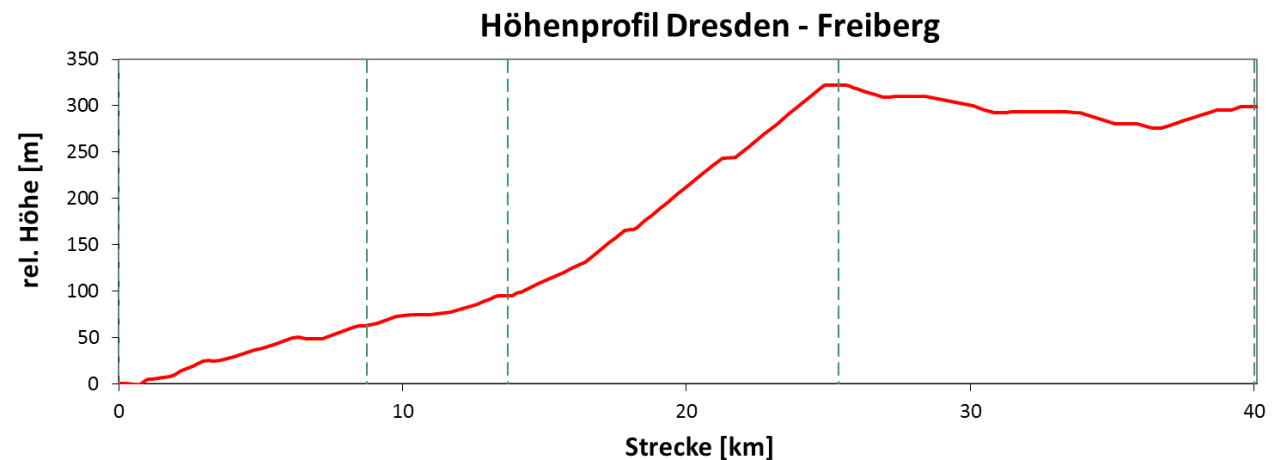
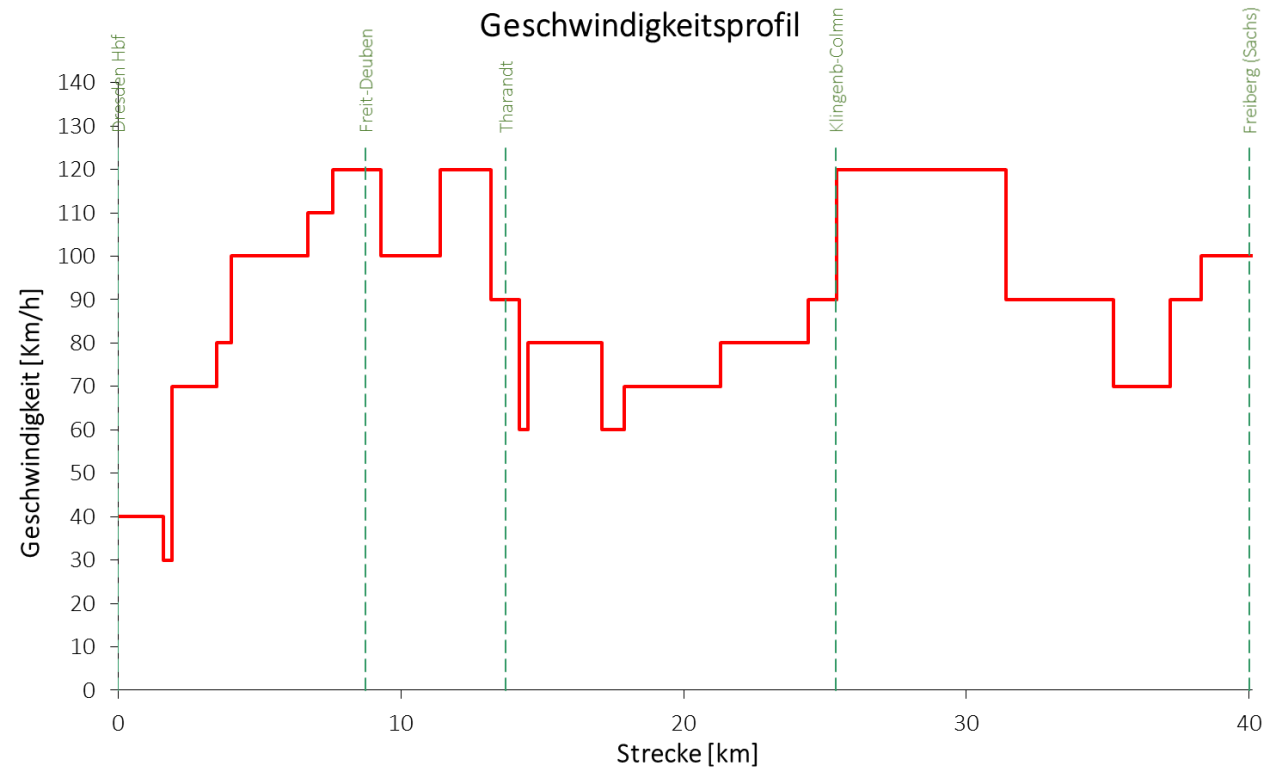
Größte Steigung:
26,5 ‰

Größtes Gefälle:
-20,0 ‰

Größte Geschwindigkeit:
120 km/h

Referenzfahrzeit (BR 612):
2011 s (33 min, 31 s)

Referenz-Treibradarbeit:
409,2 kWh



Einfluss Massenträgheiten



2 x BR 612

Dresden - Freiberg

Streckenlänge:
40 km

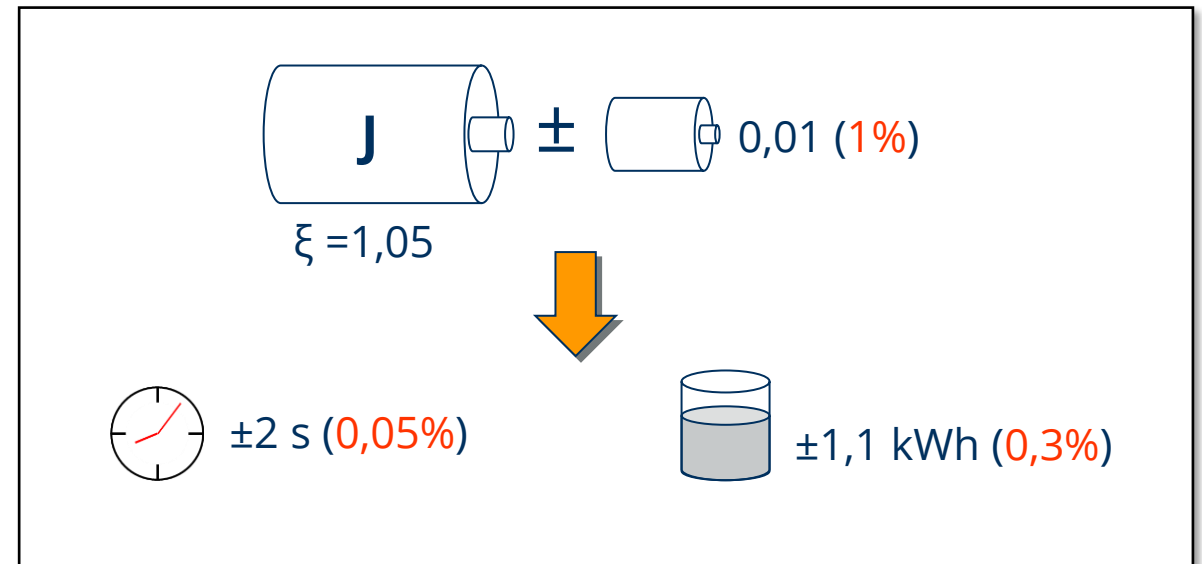
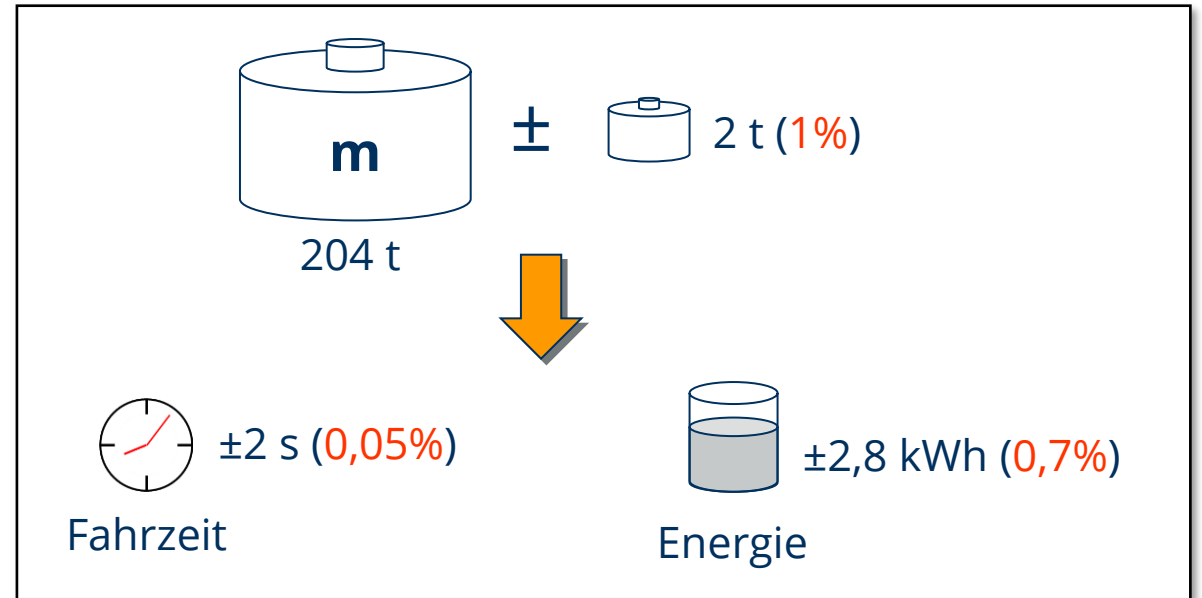
Größte Steigung:
26,5 ‰

Größtes Gefälle:
-20,0 ‰

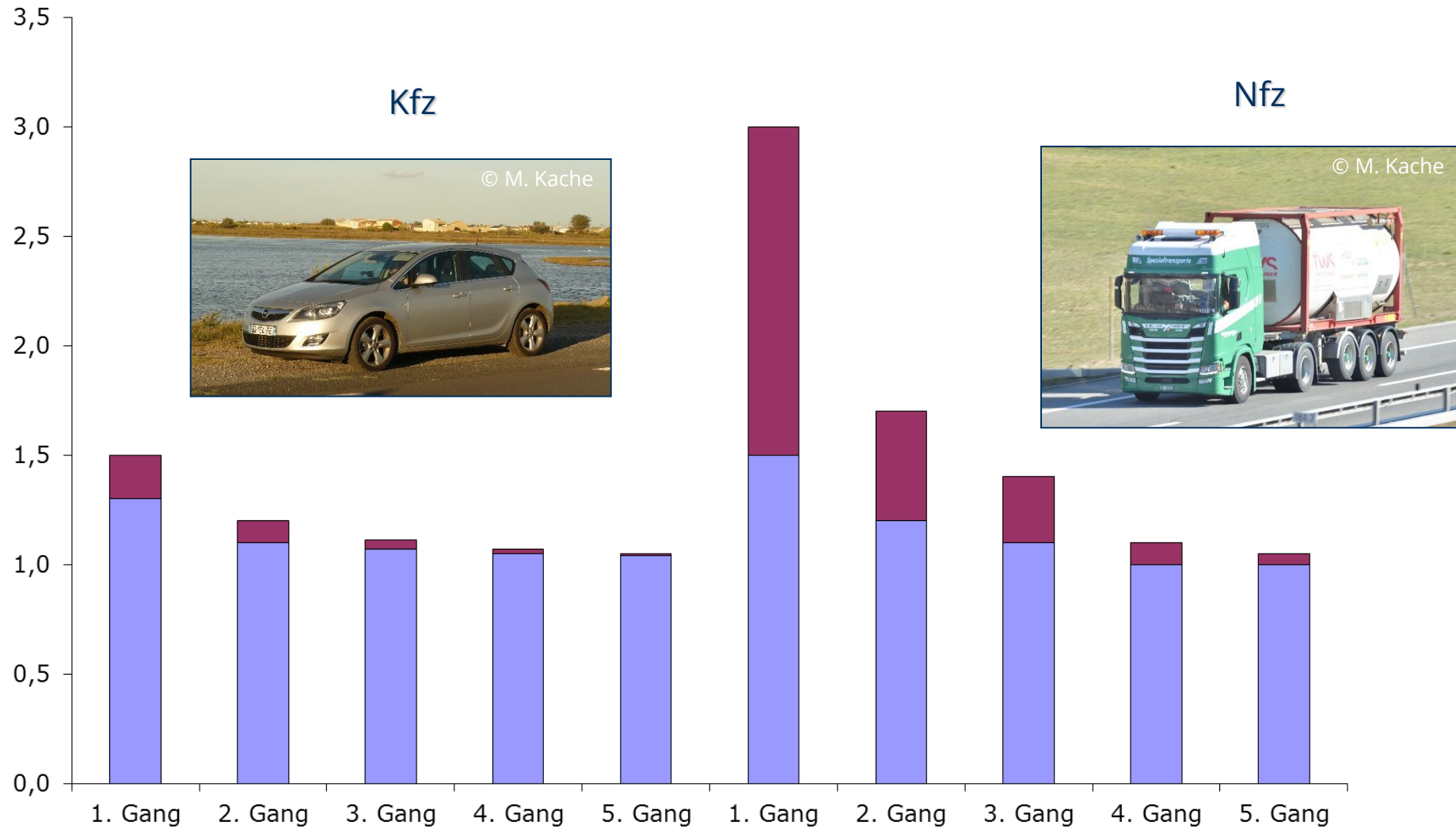
Größte Geschwindigkeit:
120 km/h

Referenzfahrzeit (BR 612):
2011 s (33 min, 31 s)

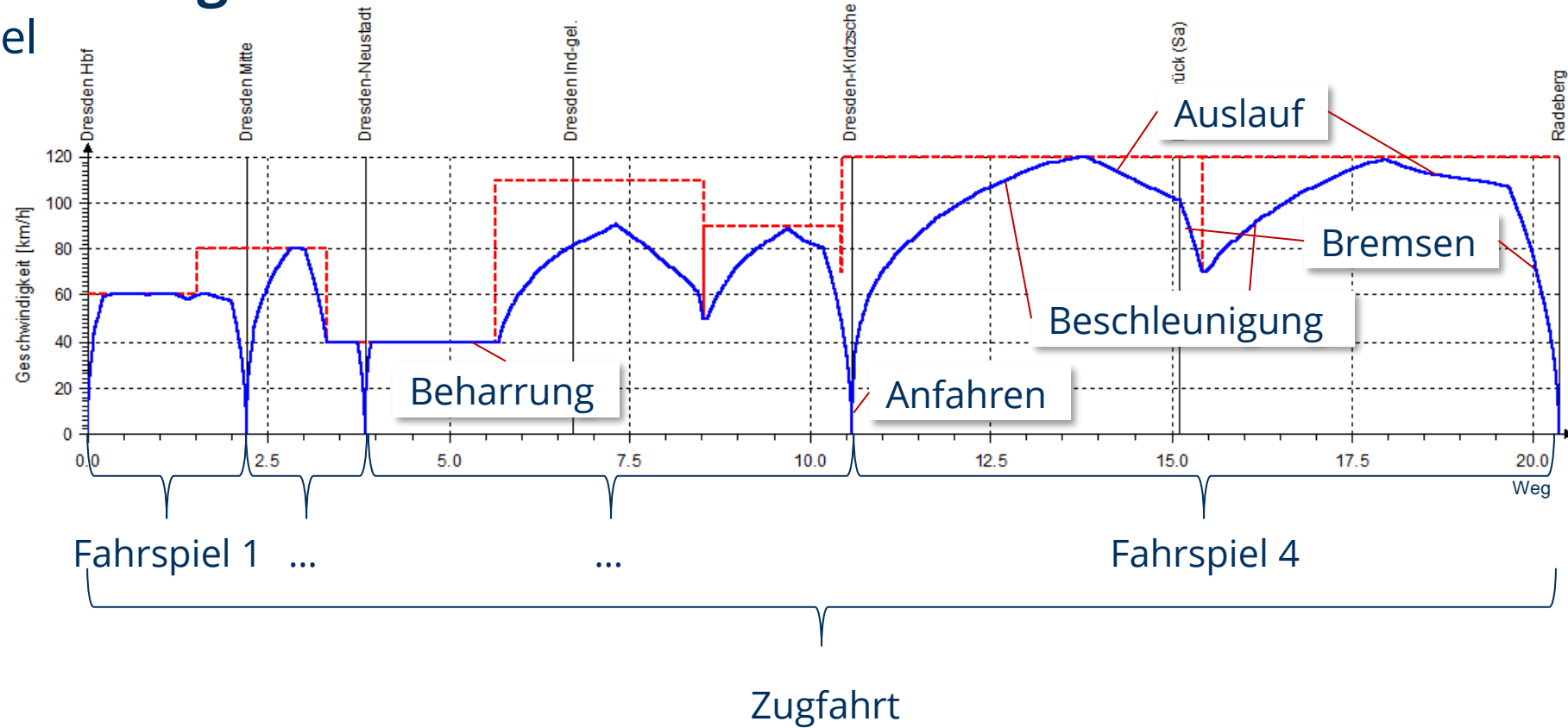
Referenz-Treibradarbeit:
409,2 kWh



Massenfaktoren von Straßenfahrzeugen

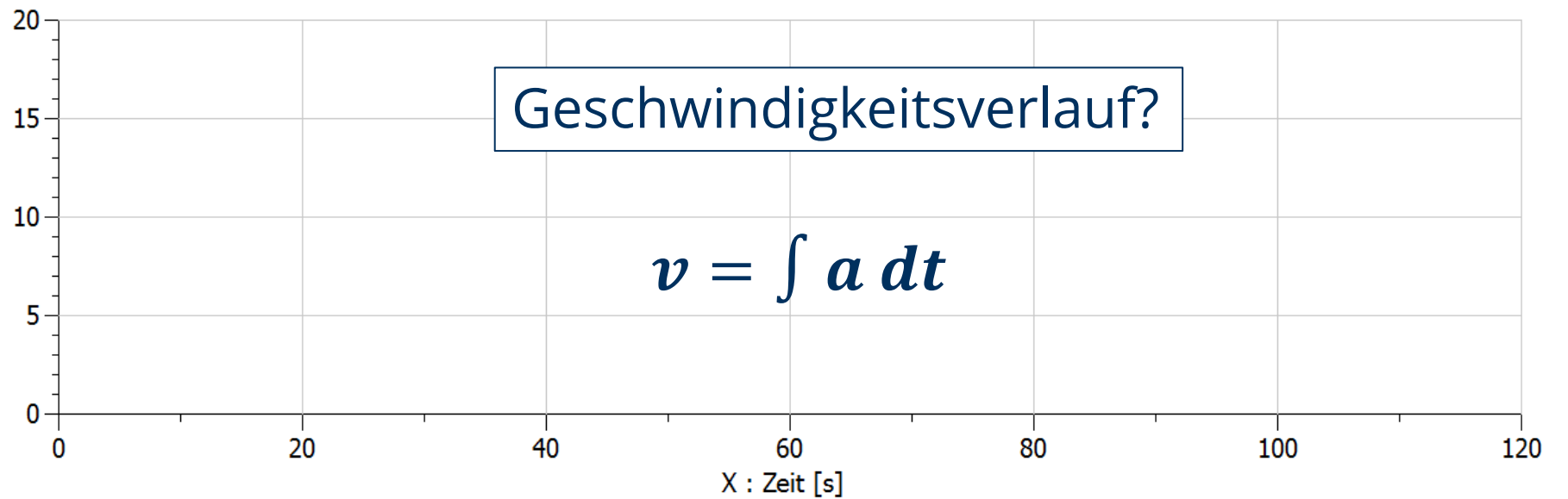
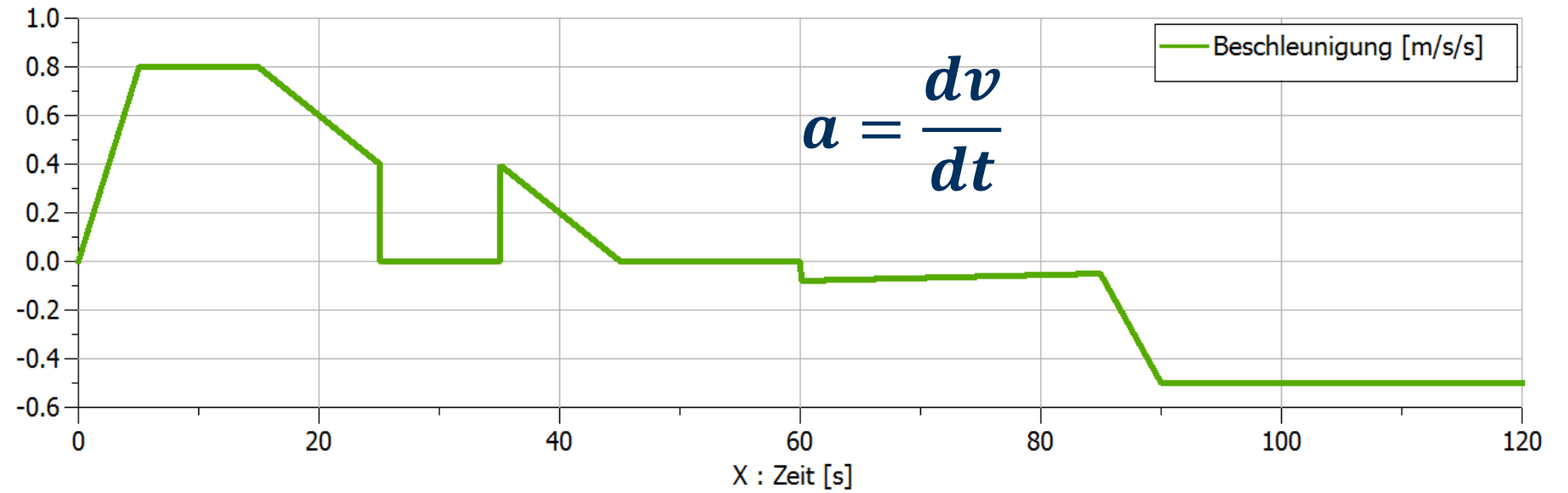


Wiederholung Fahrspiel

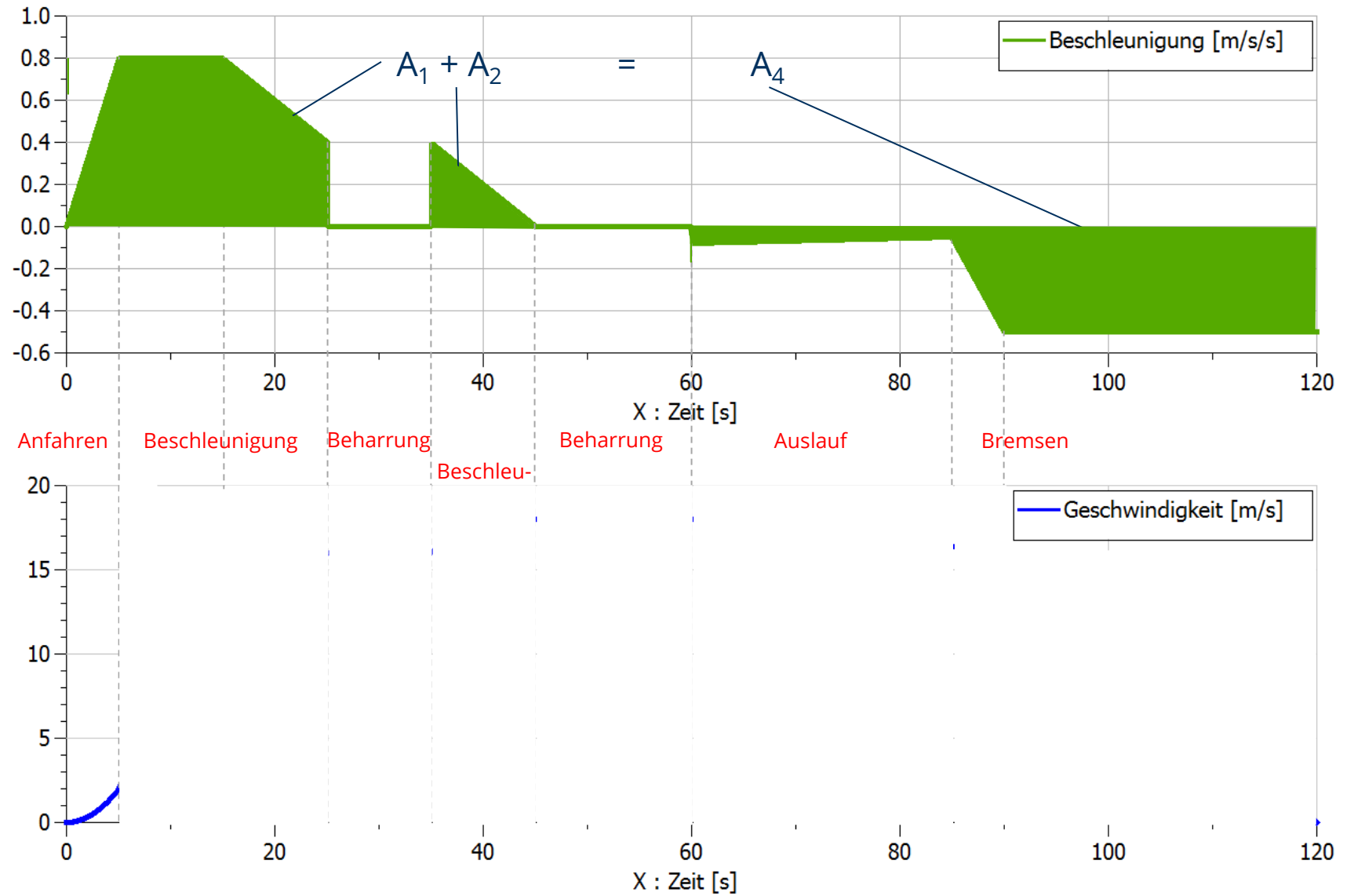


$$v = \int \ddot{x} dt + v_0 \quad \ddot{x} = \frac{F_T - F_{WFT} - F_{WS} - F_B}{\xi m}$$

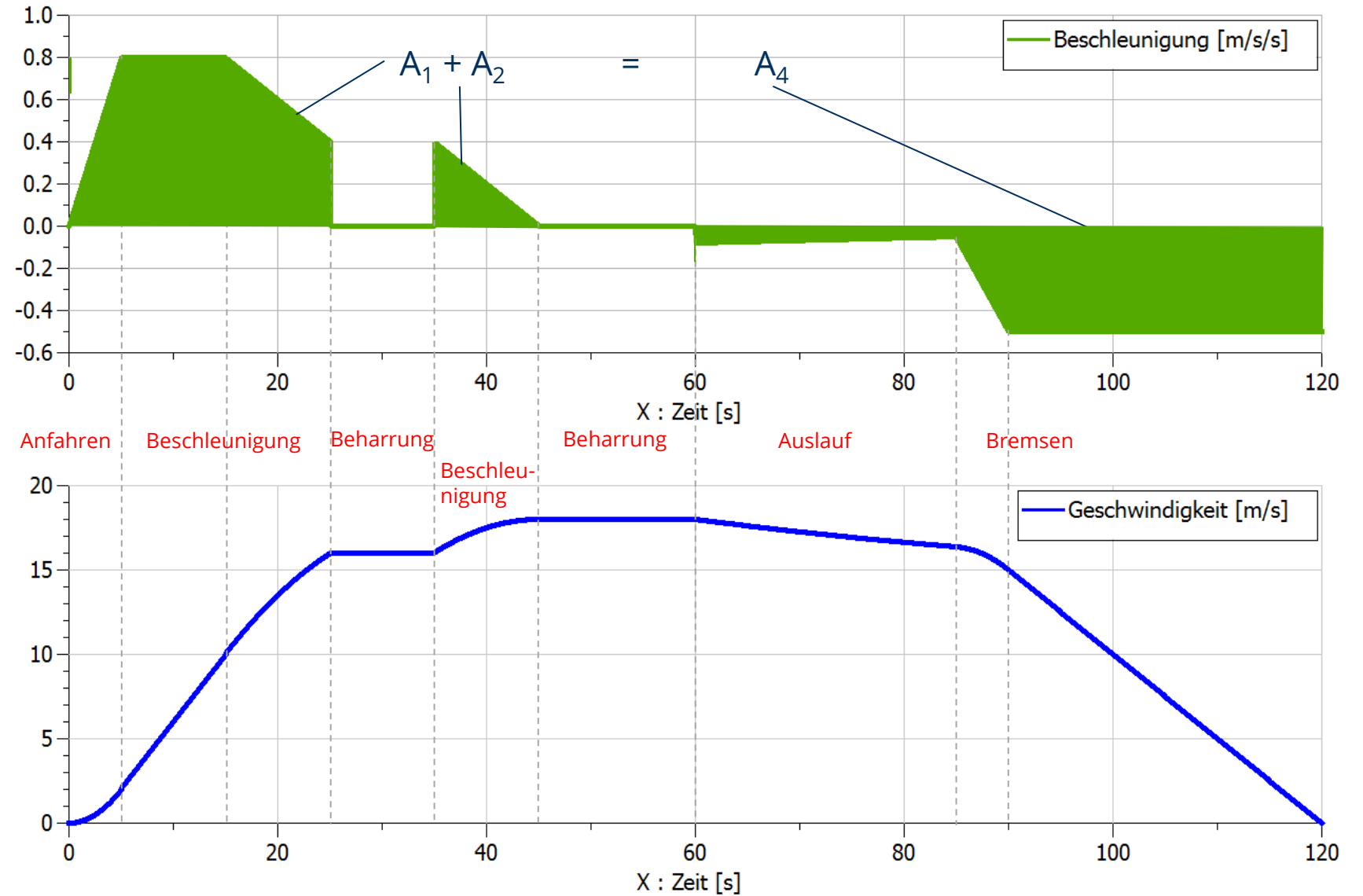
Wiederholung Fahrspiel



Wiederholung Fahrspiel

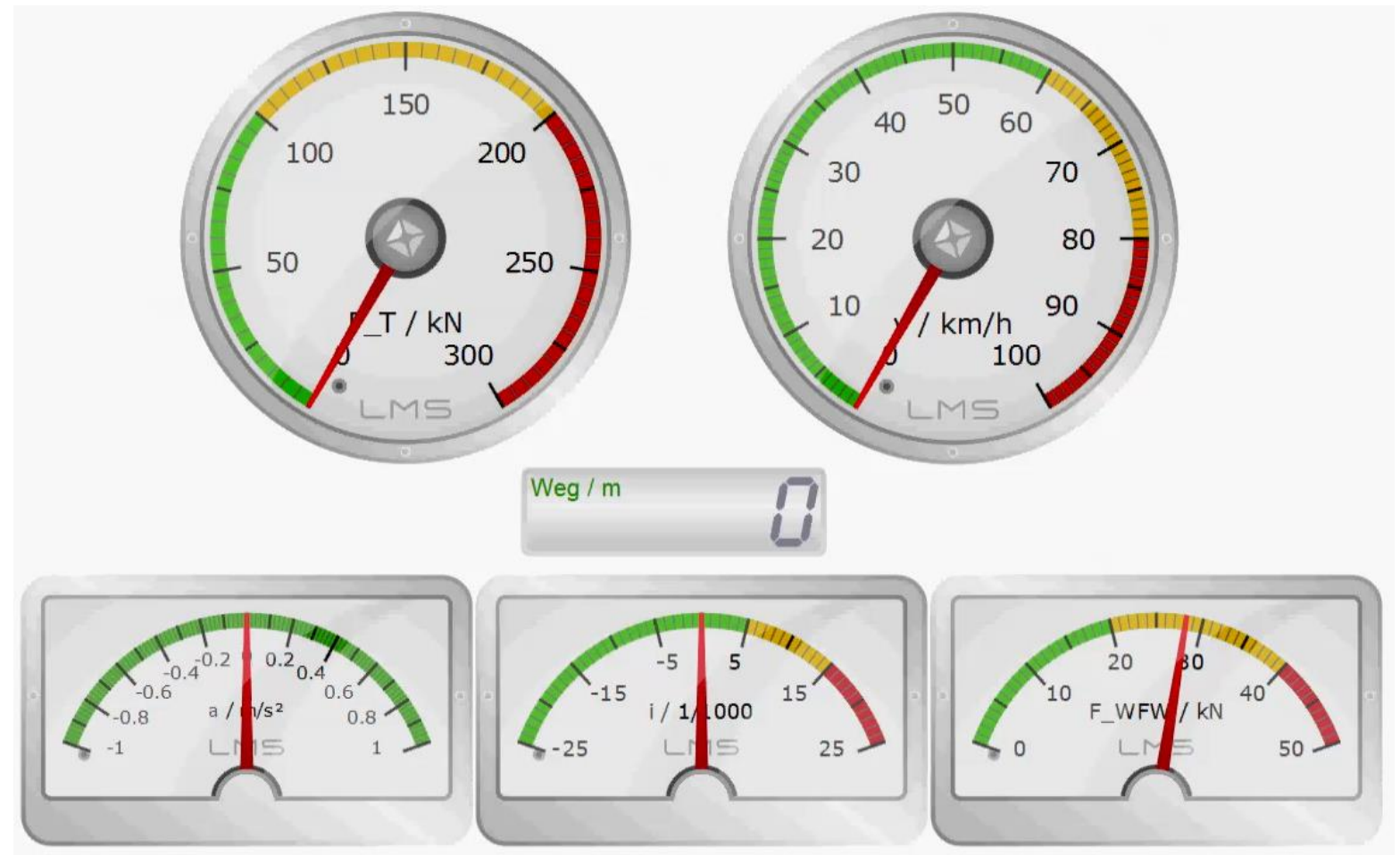


Wiederholung Fahrspiel

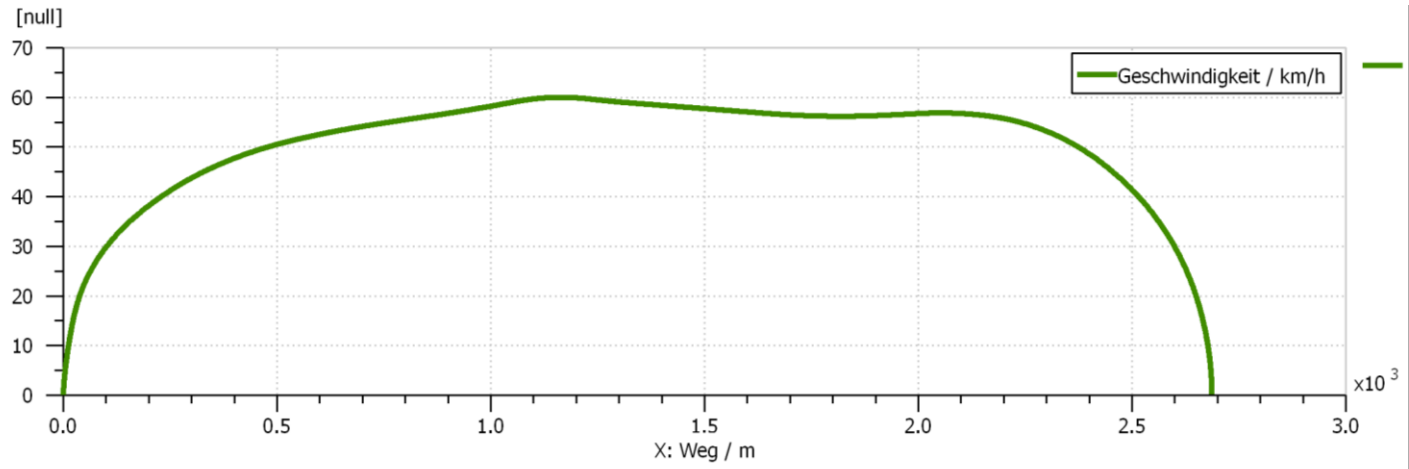


Wiederholung

Güterzugfahrt



Wiederholung Güterzugfahrt

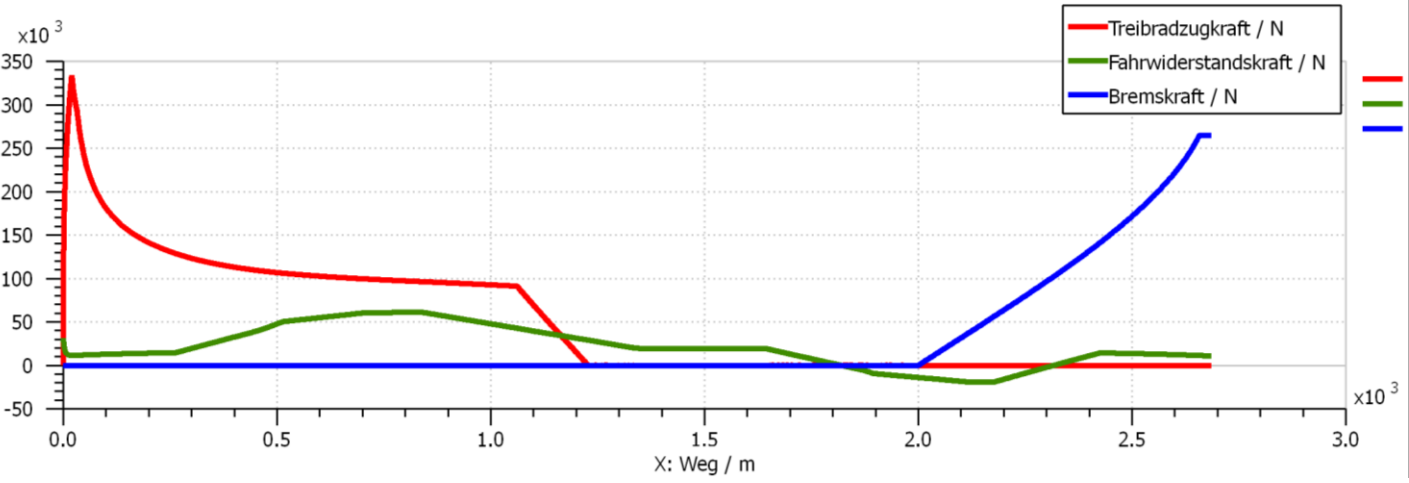


Anfahren:

0...20 m

Beschleunigen:

20...1228 m



Auslauf:

1228...2000 m

Bremsen:

2000...2687 m