

Fakultät Verkehrswissenschaften „FRIEDRICH LIST“  
Professur für Technik spurgeführter Fahrzeuge

# Fahrzeuge des Schienenpersonennahverkehrs

## Fahrdynamik

Dr.-Ing. Martin Kache // Wintersemester 2020/21



**Dr.-Ing. Martin Kache,**  
martin.kache@tu-dresden.de

# FAHRDYNAMIK DER FAHRZEUGE DES SPNV

# Inhalte

## Vorlesung Fahrzeuge des SPNV (Fahrtdynamik)

1. Vorschriften und Regelungen zu Fahrdynamischen Aspekten
2. Fahrdynamische Charakterisierung von Fahrzeugen des SPNV
3. Betrachtungen zu Energie und Fahrzeit



# Inhalte

## Vorlesung Fahrzeuge des SPNV (Fahrtdynamik)

1. **Vorschriften und Regelungen zu Fahrtdynamischen Aspekten**
2. Fahrtdynamische Charakterisierung von Fahrzeugen des SPNV
3. Betrachtungen zu Energie und Fahrzeit



# Festlegungen I: BOStrab

- Auslegung von **Bogenhalbmessern** und **Längsneigungen** [§ 15, § 17(3)] „**fahrdynamisch günstig**“ (i.S.v. z.B. Geschwindigkeitsbeschränkungen)
- Gebot der Minimierung der unausgeglichene Querbeschleunigung und ihrer Änderung über der Zeit [§ 17 (4)]
- Festlegung verbindlich einzuhaltender Mindestbremsverzögerungen



## Festlegungen II: BOStrab

- Die **zulässige Längsneigung** richtet sich nach dem **Bremsvermögen** (Möglichkeit der Haltebremsung) und dem **Traktionsvermögen** (Bergungsmöglichkeit havariierter Einheiten) der eingesetzten Fahrzeuge. [§ 17 (5)]
- Die **vorgeschriebenen mittleren Mindestbremsverzögerungen** richten sich nach der zulässigen Höchstgeschwindigkeit und der Streckenführung. Sie reichen von  $1,71 \text{ m/s}^2$  -  $2,73 \text{ m/s}^2$



# Querbeschleunigungs- und Ruckgrenzwerte im SPNV

## Straßenbahn/Stadtbahn/U-Bahn

- unkompensierte Querbeschleunigung:  $1,00 \text{ m/s}^2$
- zulässiger Ruck bei Krümmungswechseln des Gleises:  $1,00 \text{ m/s}^3$

## S-Bahn/Nahverkehrszüge ohne Neigetechnik

- unkompensierte Querbeschleunigung:  $0,85 \text{ m/s}^2$
- zulässiger Ruck bei Krümmungswechseln des Gleises:  $0,85 \text{ m/s}^3$



## Festlegungen III:

### Typenempfehlung Stadtbahnfahrzeuge (VDV 150), Typenempfehlung U-Bahn-Fahrzeuge (VDV 151)



Längsruckbegrenzung:

1,3 m/s<sup>3</sup>

0,8 m/s<sup>3</sup>

konst. Beschl. bis Erreichen  $v_{\ddot{u}}$ :

1,3 m/s<sup>2</sup>

1,3 m/s<sup>2</sup>

mittlere Betriebsbremsverzögerung:

1,2 m/s<sup>2</sup>

1,2 m/s<sup>2</sup>

Haltestellenabstand f. Bemessung:

600/850 m

800 m

Richtwert Höchstgeschwindigkeit:

70 km/h

80 km/h

Fahrzeit eines Standard-Fahrspiels:

52/65 s

60 s

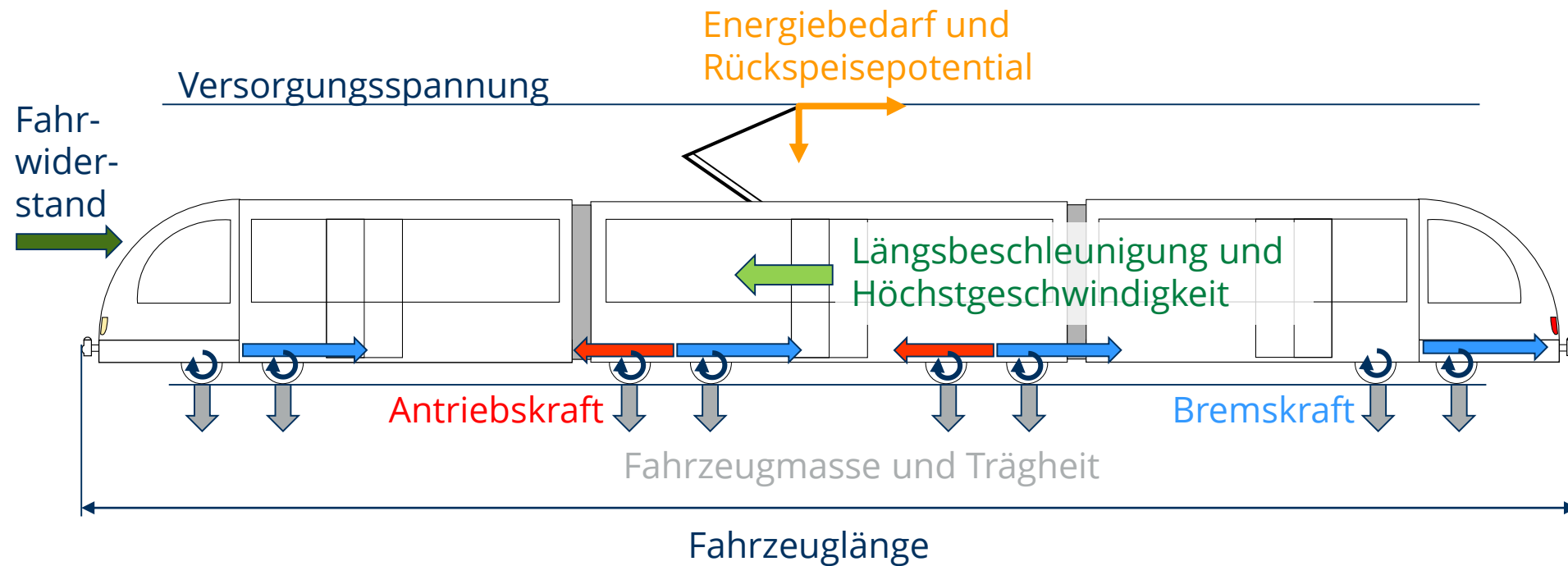
# Inhalte

## Vorlesung Fahrzeuge des SPNV (Fahrtdynamik)

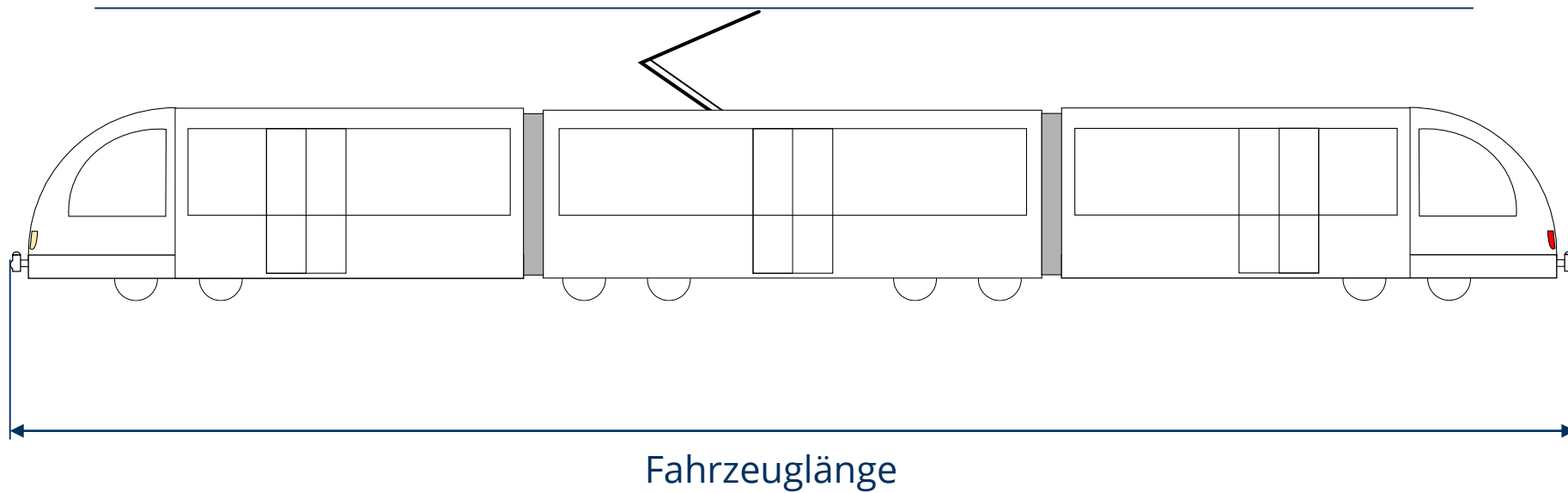
1. Vorschriften und Regelungen zu Fahrdynamischen Aspekten
- 2. Fahrdynamische Charakterisierung von Fahrzeugen des SPNV**
3. Betrachtungen zu Energie und Fahrzeit



# Fahrdynamische Charakterisierung von Fahrzeugen des SPNV



# Fahrdynamische Charakterisierung von Fahrzeugen des SPNV



# Fahrzeu glängen im Vergleich

eher Punktmasse ← → eher Massenband



Remodelado (Lisboa)



Tatra T4 (Praha)



Variobahn (Graz)



NGT D6 DD



Saarbahn



NGT D12 DD



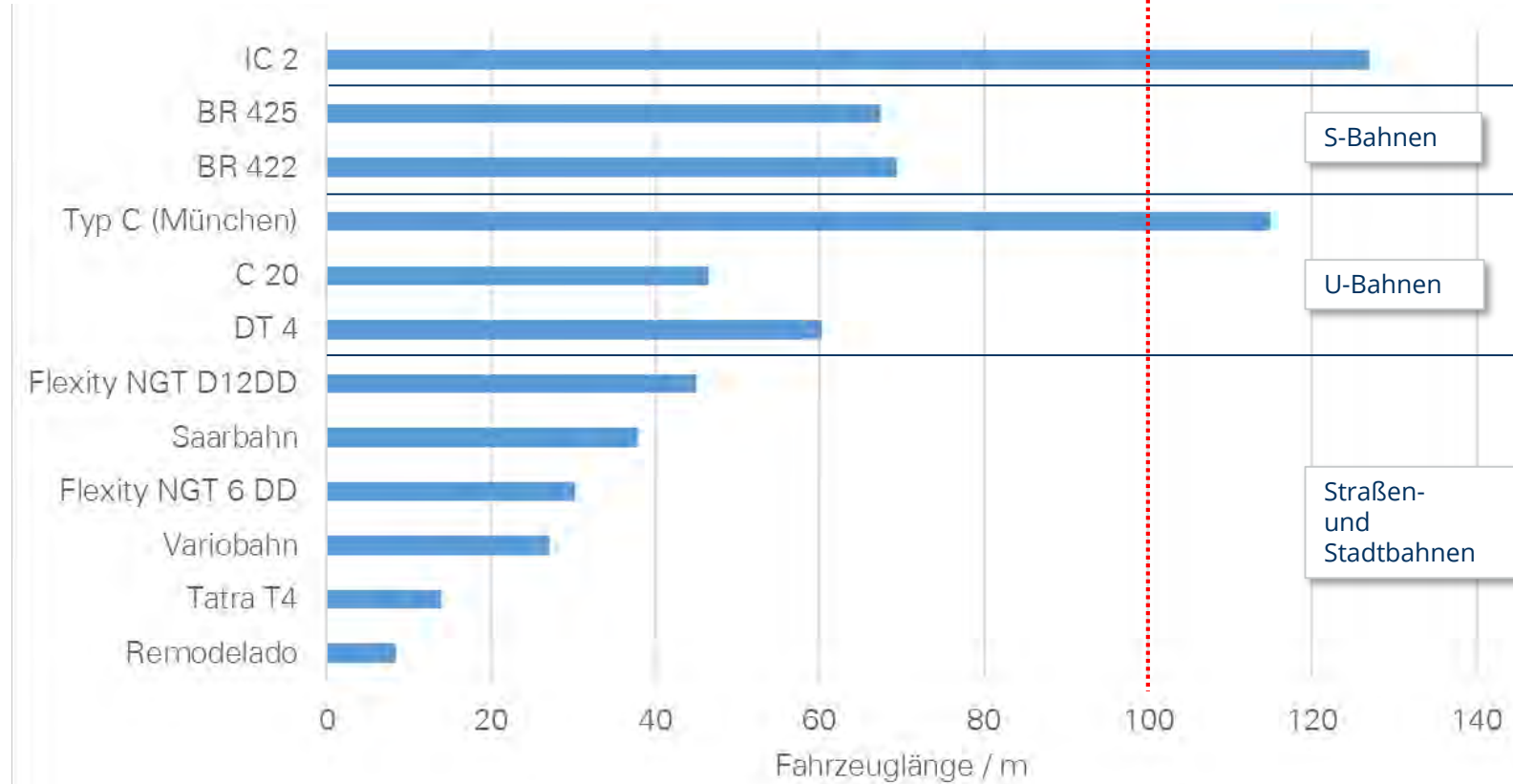
DT 4 (Hamburg)



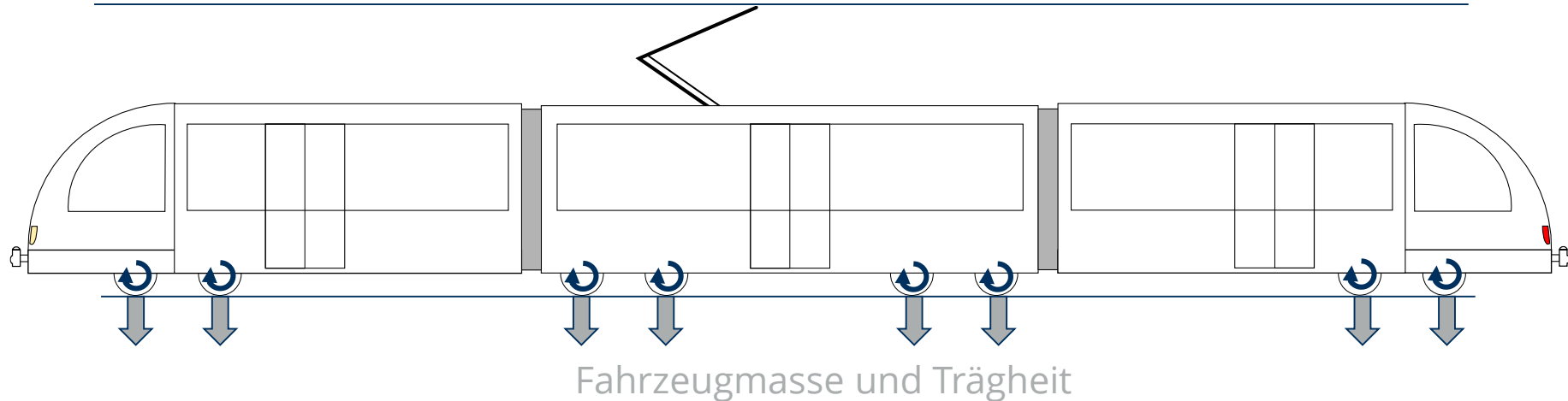
C20 (Stockholm)



Typ C (München)



# Fahrdynamische Charakterisierung von Fahrzeugen des SPNV – Masse und Trägheit



Massenfaktoren von Niederflurstraßenbahnen: ca. 1,08...1,12

Beispiel:  
Straba  
Dresden\*



NGT D8DD: 1,102



NGT D12DD: 1,099



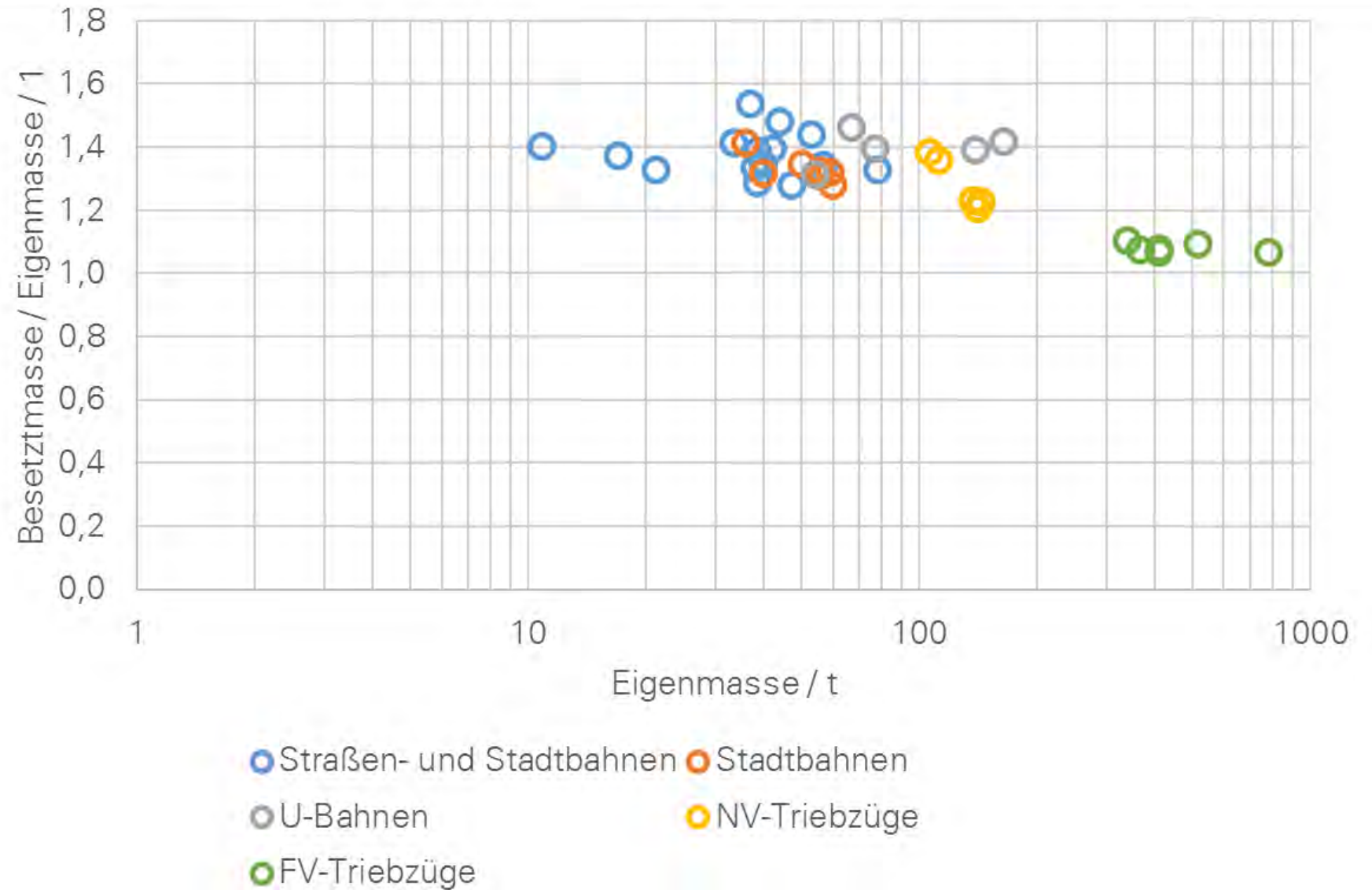
NGT 6: 1,108



NGT 8: 1,114

\*zitiert nach: Römer, Markus: „Ermittlung des Fahrwiderstandes von Straßenbahnfahrzeugen“, Großer Beleg; TU Dresden, 2013

# Fahrdynamische Charakterisierung von Fahrzeugen des SPNV – Masse + Trägheit

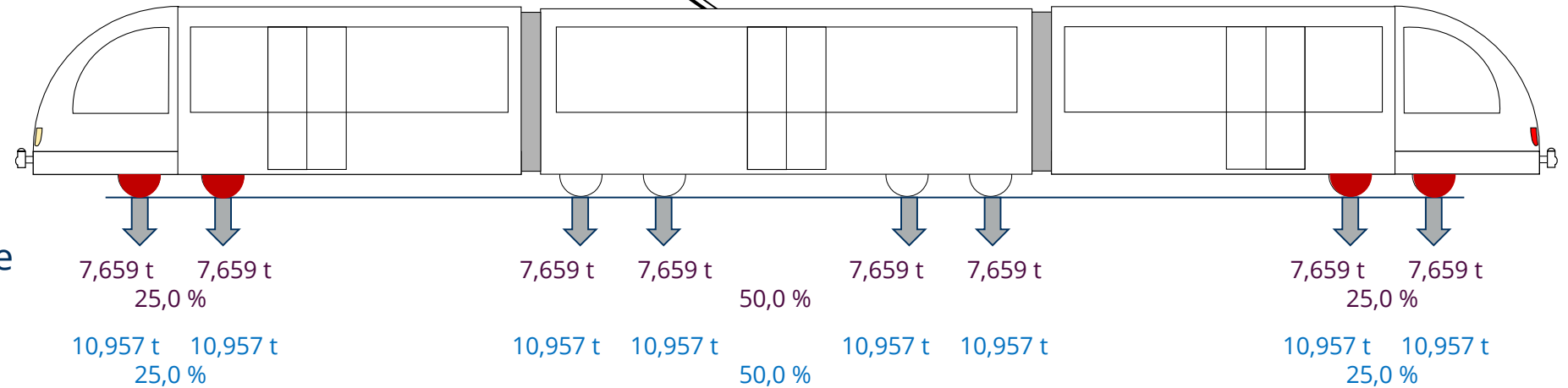


# Fallbeispiel: Massenverteilung

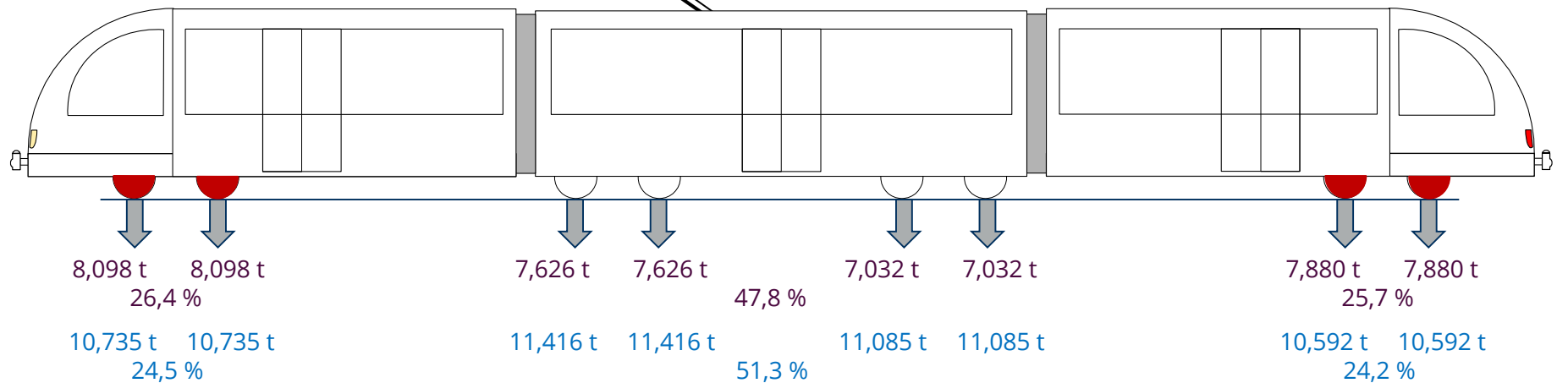
## Theorie

Leermasse: 61,273 t  
Höchstmasse: 87,658 t

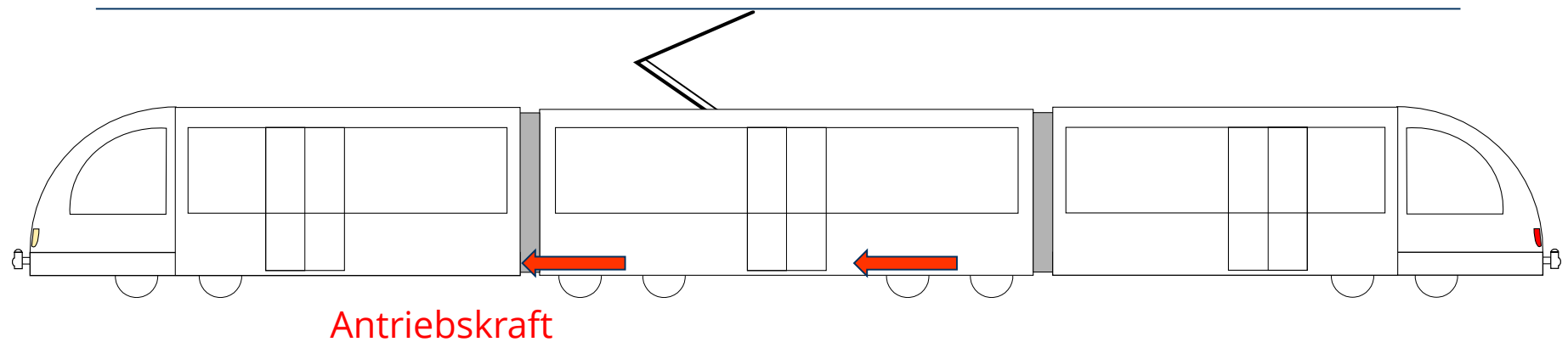
Legende:  
 angetriebene Radsätze  
 nicht angetriebene Radsätze



## Praxis

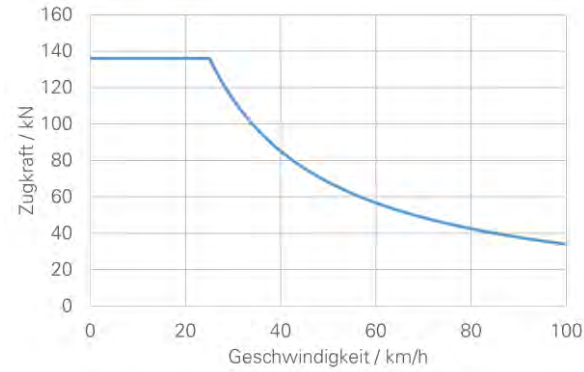


# Fahrdynamische Charakterisierung von Fahrzeugen des SPNV

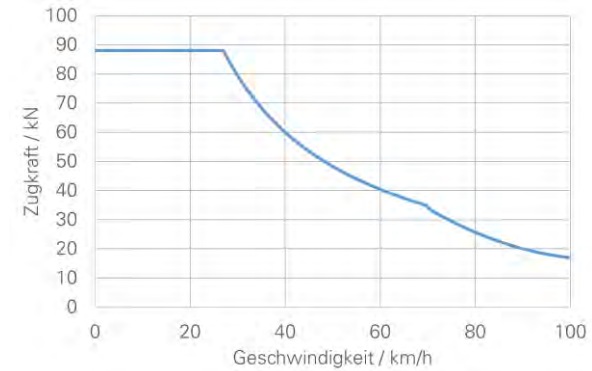


# Fahrdynamische Charakterisierung von Fahrzeugen des SPNV - Antriebskraft

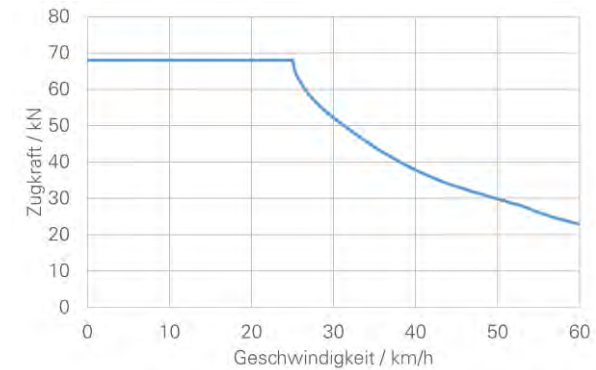
Citadis 3BM2BP (2-System)



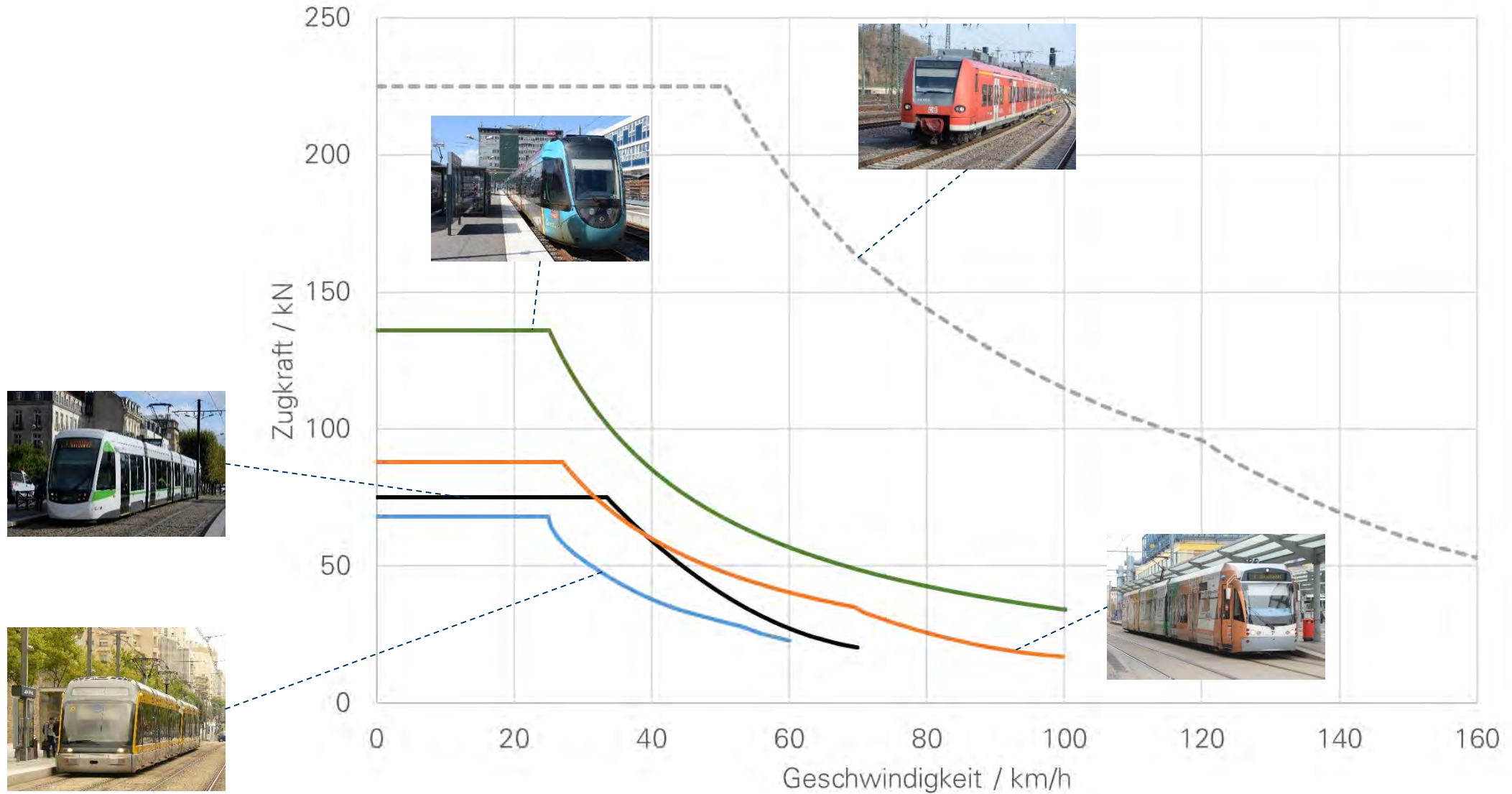
Saarbahn (2-System)



Eurotram

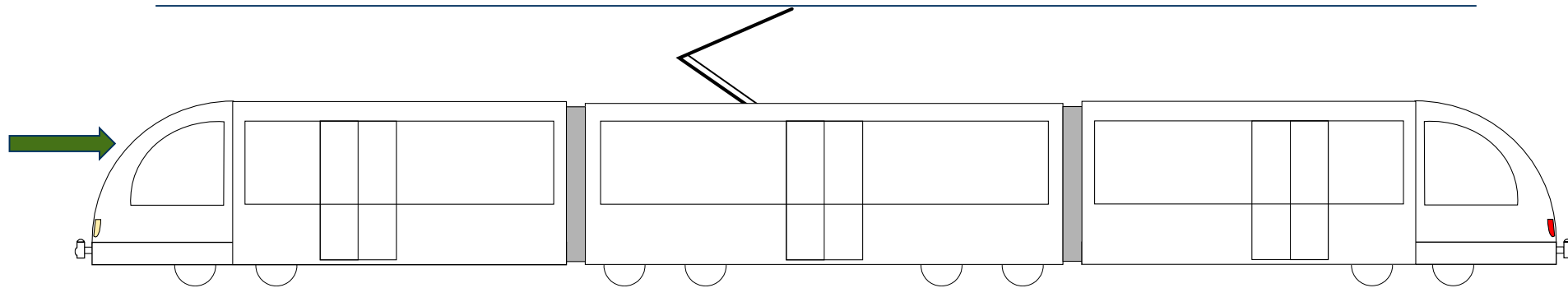


# Fahrdynamische Charakterisierung von Fahrzeugen des SPNV - Antriebskraft



# Fahrdynamische Charakterisierung von Fahrzeugen des SPNV

Fahr-  
wider-  
stand



# Fahrzeugwiderstand von Straßenbahnen

Maurich/Matthes/Stößel (1979): Anhaltswerte (Geschwindigkeitsunabhängig)

- zweiachsiger Triebwagen:  $f_{WFT} = 8 \text{ N/kN}$



- zwei- und vierachsige Beiwagen:  $f_{WFW} = 5 \text{ N/kN}$



- Gelenkwagen Bauart „Gotha“:  $f_{WFT} = 7 \text{ N/kN}$



Foto: Christian Bier

- vierachsige Triebw. + Kurzgelenkwagen:  $f_{WFT} = 10 \text{ N/kN}$



# Fahrzeugwiderstand von Straßenbahnen

Mäurich/Matthes/Stöbel (1979): Anhaltswerte (Geschwindigkeitsunabhängig)

- zweiachsiger Triebwagen: 8 N/kN
- zwei- und vierachsige Beiwagen: 5 N/kN
- Gelenkwagen Bauart „Gotha“: 7 N/kN
- vierachsige Triebwagen und Kurzgelenkwagen: 10 N/kN

Wende (1983):

- Triebwagen als 1. Wagen im Zug:  $f_{WFT} = 0,0063 + 0,00363 \frac{v}{100} + 0,000185 \left(\frac{v}{10}\right)^2$
- Triebwagen als 2. Wagen im Zug:  $f_{WFT} = 0,0063 + 0,00363 \frac{v}{100} + 0,00006 \left(\frac{v}{10}\right)^2$
- Beiwagen B4D:  $f_{WFT} = 0,0050 + 0,00363 \frac{v}{100} + 0,00006 \left(\frac{v}{10}\right)^2$

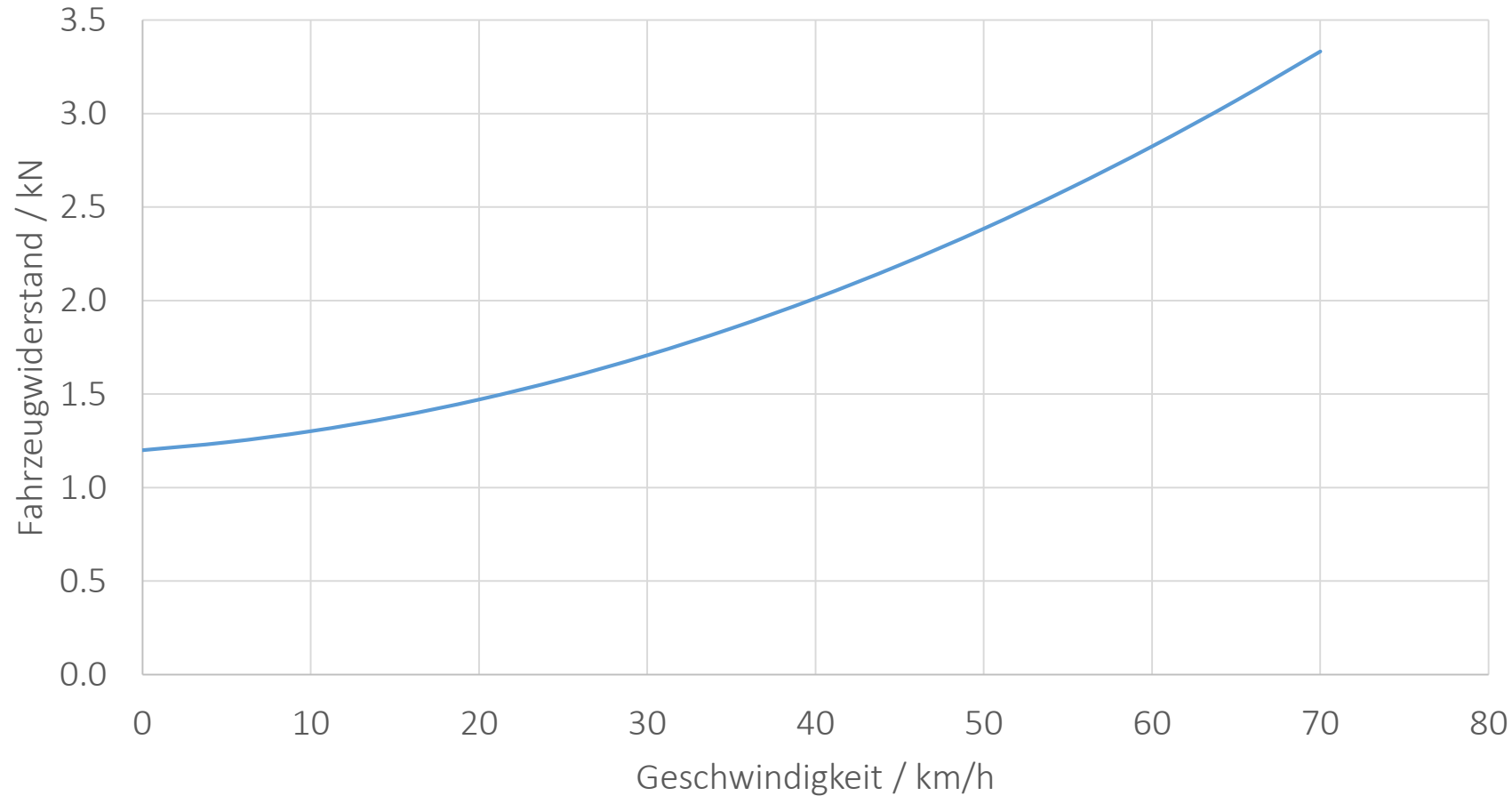
Wende (2003):

- allgemeiner Ansatz für Fahrt auf Rillenschienen:  $f_{WFZ} = \frac{0,006m_T g + 0,004m_W g}{(m_T + m_W)g} + \left(0,0015 + \frac{4,46 + 0,8n}{(m_T + m_W)g}\right) \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2$
- allgemeiner Ansatz für Fahrt auf Vignolschienen:  $f_{WFZ} = \frac{0,004m_T g + 0,0025m_W g}{(m_T + m_W)g} + \left(0,0015 + \frac{4,46 + 0,8n}{(m_T + m_W)g}\right) \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2$

$m_T$  – Masse Triebwagen,  $m_W$  – Masse Beiwagen,  $n$  – Anzahl der Fahrzeuge

# Fahrzeugwiderstand von Straßenbahnen

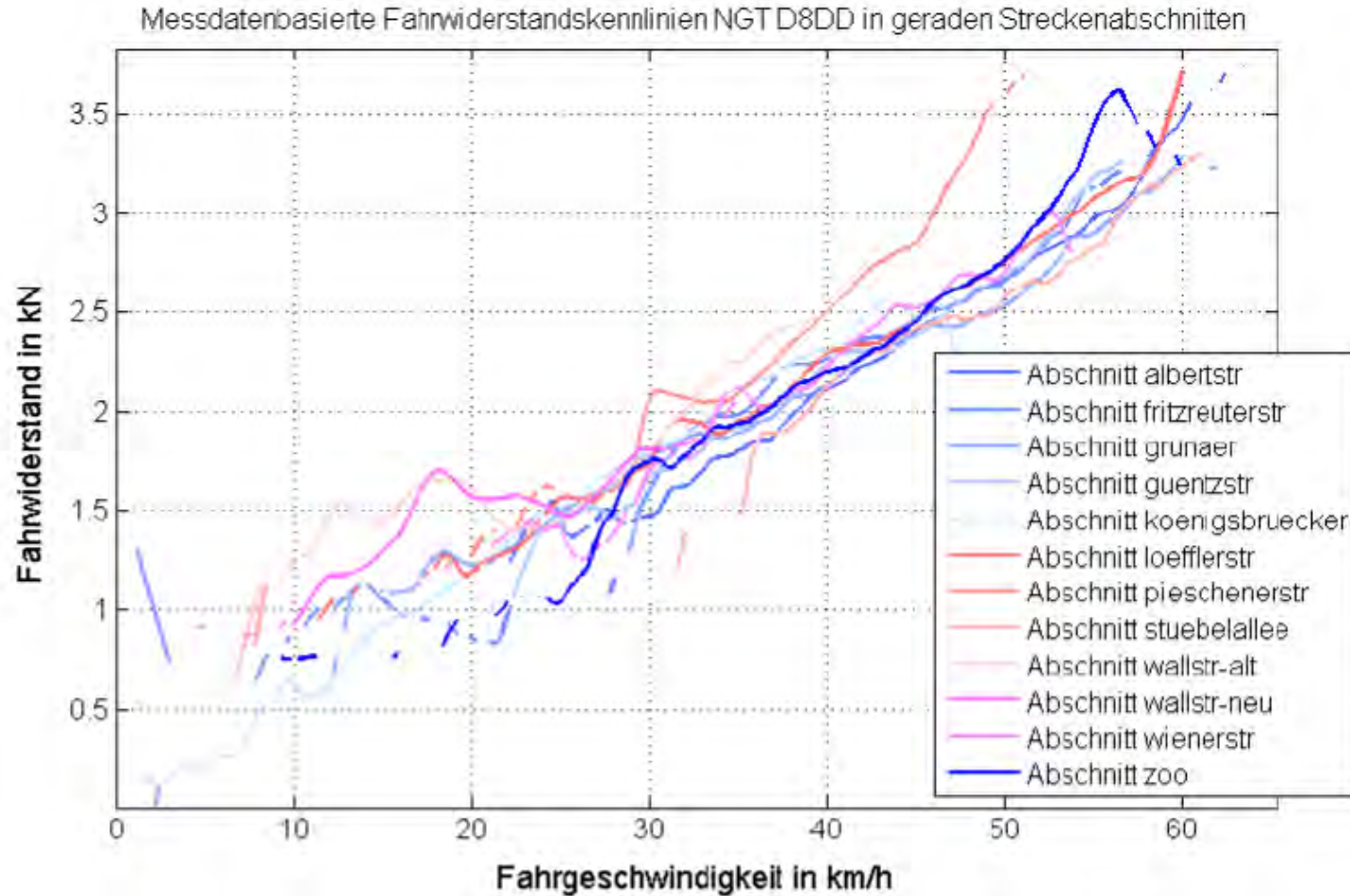
Gleichung für ALSTOM Citadis 302 (2016)\*:



\*zitiert nach: Fontanel, Éric und Christeller, Reinhard (Hrsg.): *MATÉRIEL ROULANT DANS LE SYSTÈME FERROVIAIRE TOME 3*, 1. Auflage, Verlag La Vie du Rail

# Fahrzeugwiderstand von Straßenbahnen

Untersuchungen von Dürrschmidt und Schultze\*:

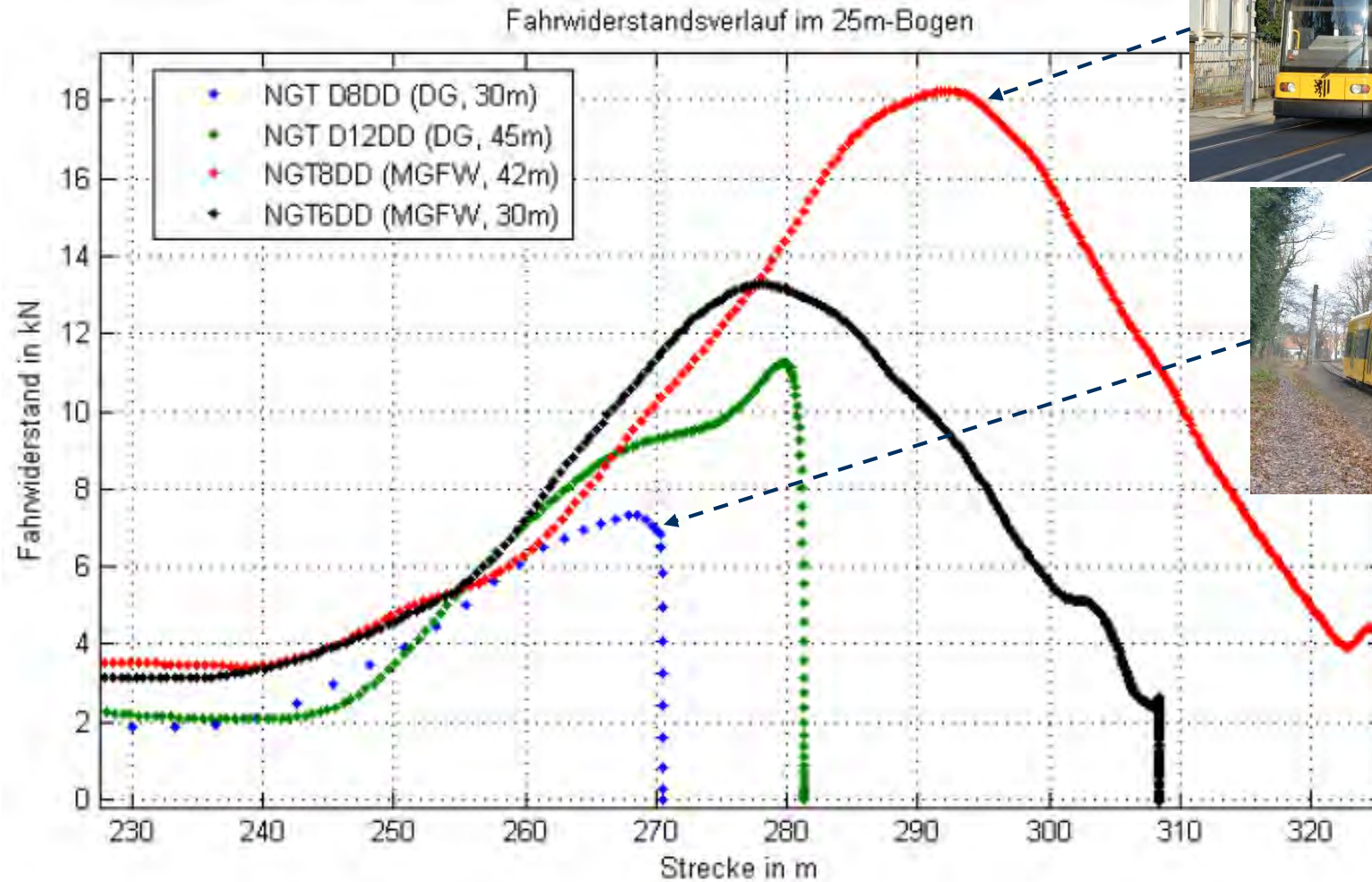


\*zitiert nach:

Dürrschmidt, G.; Schultze, S. und Beitelschmidt M.: „Neue Ansätze zur Bestimmung von Fahrwiderstandskräften bei Straßenbahnen“, 14. Internationale Schienenfahrzeugtagung Dresden, 2015

# Fahrzeugwiderstand von Straßenbahnen

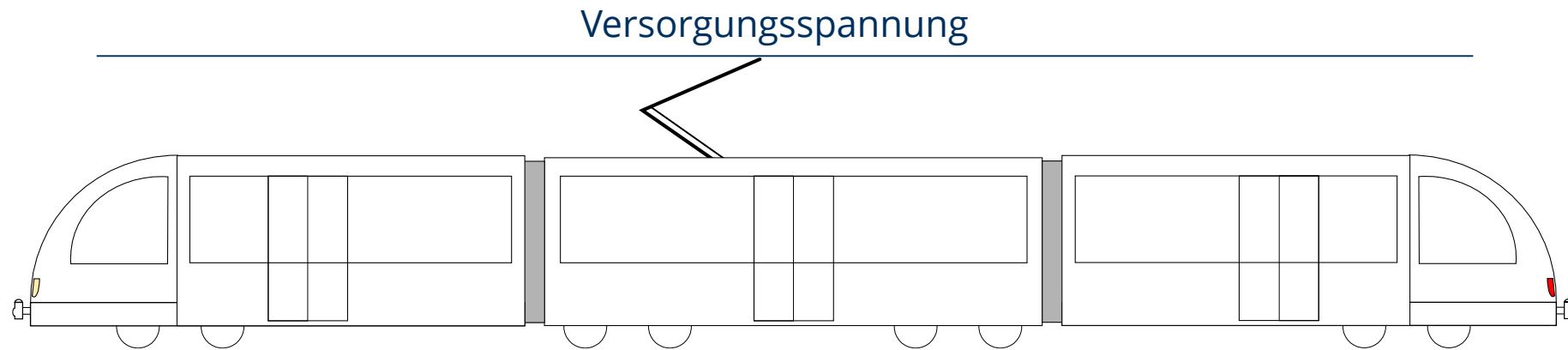
Untersuchungen von Dürrschmidt und Schultze\*:



\*zitiert nach:

Dürrschmidt, G.; Schultze, S. und Beitelschmidt M.: „Neue Ansätze zur Bestimmung von Fahrwiderstandskräften bei Straßenbahnen“, 14. Internationale Schienenfahrzeugtagung Dresden, 2015

# Fahrdynamische Charakterisierung von Fahrzeugen des SPNV



# Fahrdynamische Charakterisierung von Fahrzeugen des SPNV

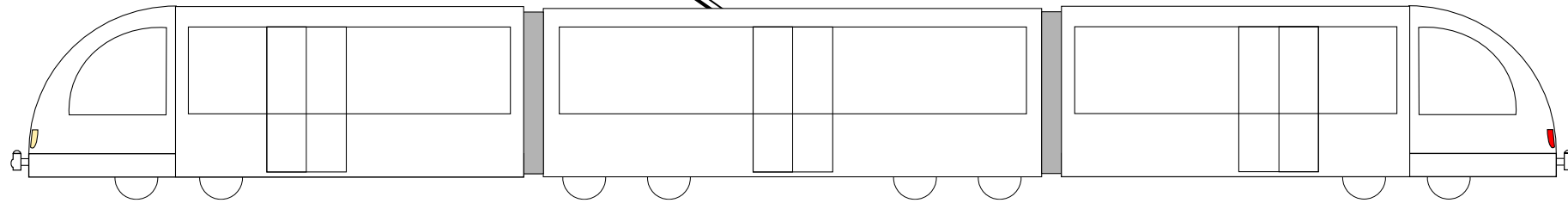


750 V DC + Batterie



750 V DC + Dieselelektrischer Modus

Versorgungsspannung



600/750 V DC



750 V DC + 15 kV 16,7 Hz



750 V DC + 25 kV 50 Hz

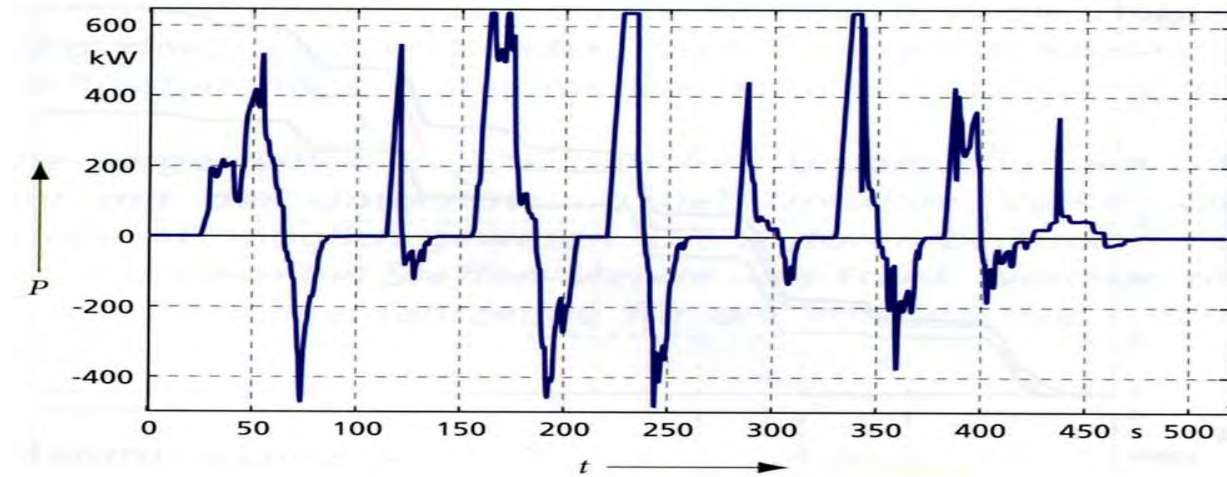
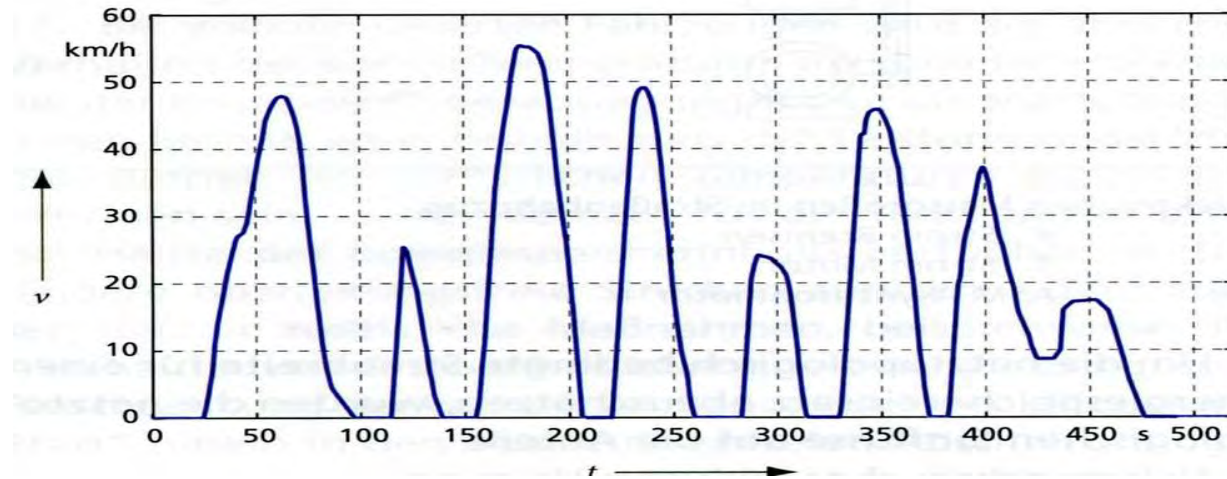
# Inhalte

## Vorlesung Fahrzeuge des SPNV (Fahrtdynamik)

1. Vorschriften und Regelungen zu Fahrdynamischen Aspekten
2. Fahrdynamische Charakterisierung von Fahrzeugen des SPNV
- 3. Betrachtungen zu Energie und Fahrzeit**



# Messung realer Fahrspiele – Beispiel: Dresden



Fahrzeug:

Bombardier  
NGT D12DD  
der DVB AG

Strecke:

Innenstadt,  
2350m,  
5 Halte

Durchführung:

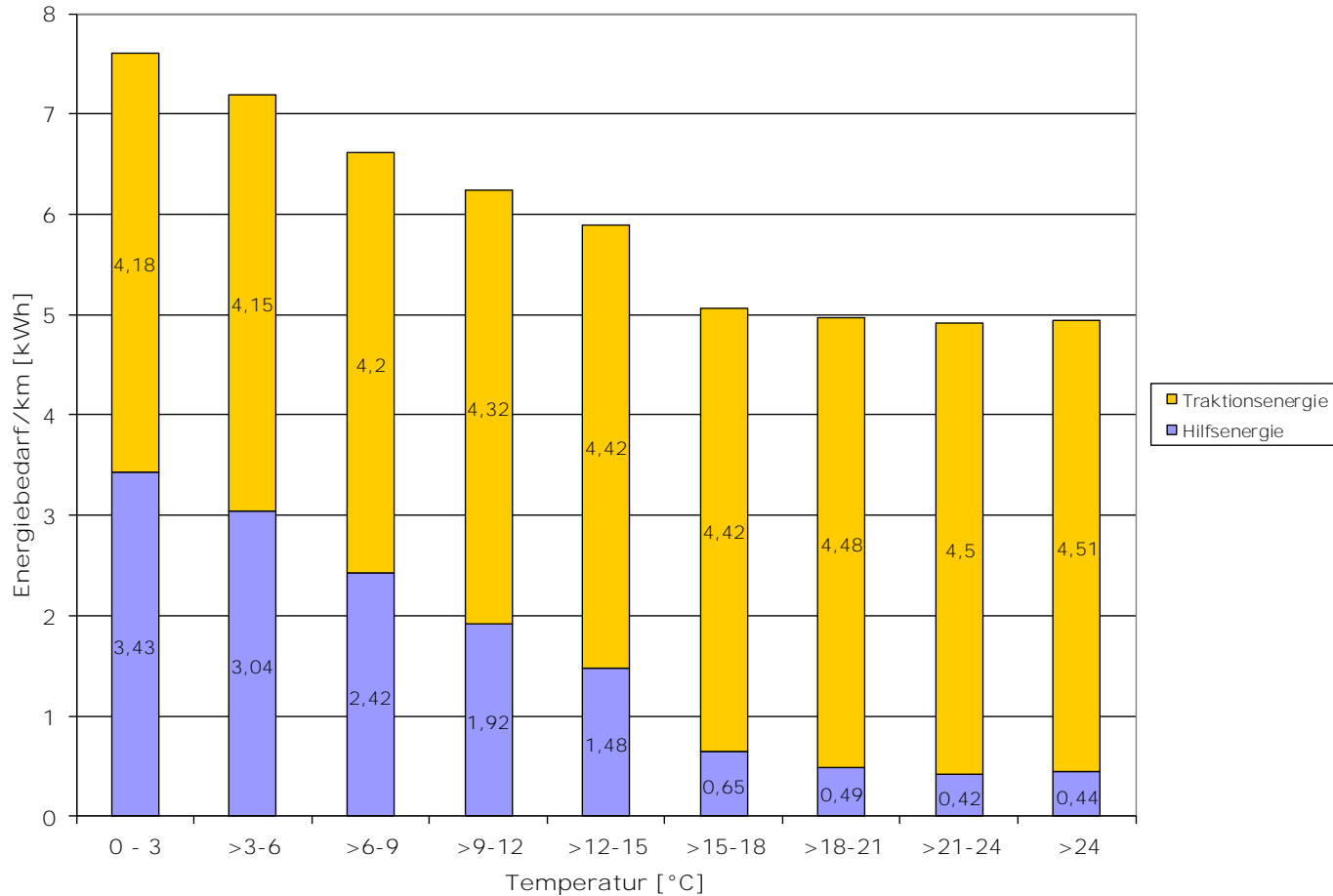
Fraunhofer Institut  
(IVI)  
DVB AG

Quelle: Klausner/Lehnert  
in eb 5/2008



# Messung realer Fahrspiele – Beispiel: Dresden

Energiebedarf eines nicht klimatisierten Straßenbahnzuges in Abhängigkeit der Außentemperatur



Fahrzeug:

Bombardier  
NGT D12DD  
der DVB AG

Strecke:

Innenstadt,  
2350m,  
5 Halte

Durchführung:

Fraunhofer Institut  
(IVI)  
DVB AG



Quelle: Klausner/Lehnert  
in eb 5/2008

# Messung realer Fahrspiele – Beispiel: Leipzig

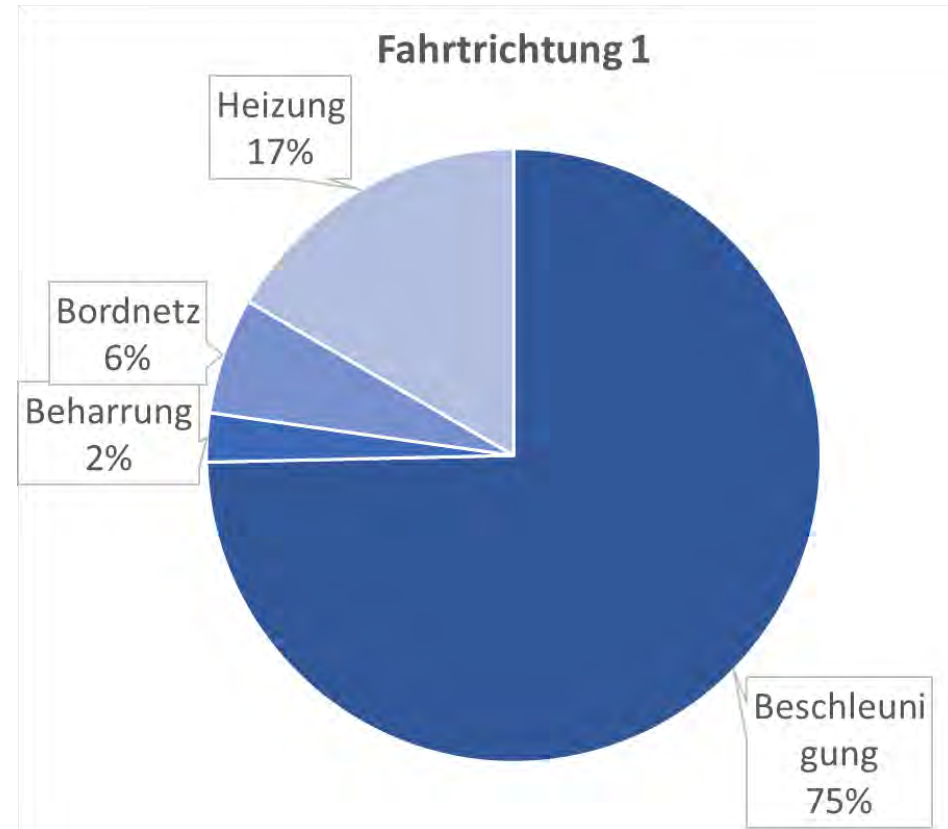
- Linie 3 der LVB mit NGT 6 Doppeltraktion
- Messzeitraum: November 2013
- „milde“ Außentemperaturen

## Fahrtrichtung 1:

- Energieaufnahme f. Beschleunigung: 3,77 kWh/km (74,6%)
- Energieaufnahme f. Beharrung: 0,13 kWh/km (2,6%)
- Energieaufnahme f. Bordnetz: 0,31 kWh/km (6,1%)
- Energieaufnahme f. Heizung: 0,84 kWh/km (16,7%)
- **Energieaufnahme gesamt: 5,05 kWh/km**
  
- Bremsarbeitsrekuperation: 1,38 kWh/km
- Energieumsatz Bremswiderstand: 0,62 kWh/km
- **Energieaufnahme Netto: 3,67 kWh/km**

Quelle: Giebel/Keucher/Schütze: „Straßenbahn-Energiemonitoring“, in: Der Nahverkehr 9/2014, S. 50 ff.

NGT 6  
(LeoLiner)  
der LVB



# Messung realer Fahrspiele – Beispiel: Leipzig

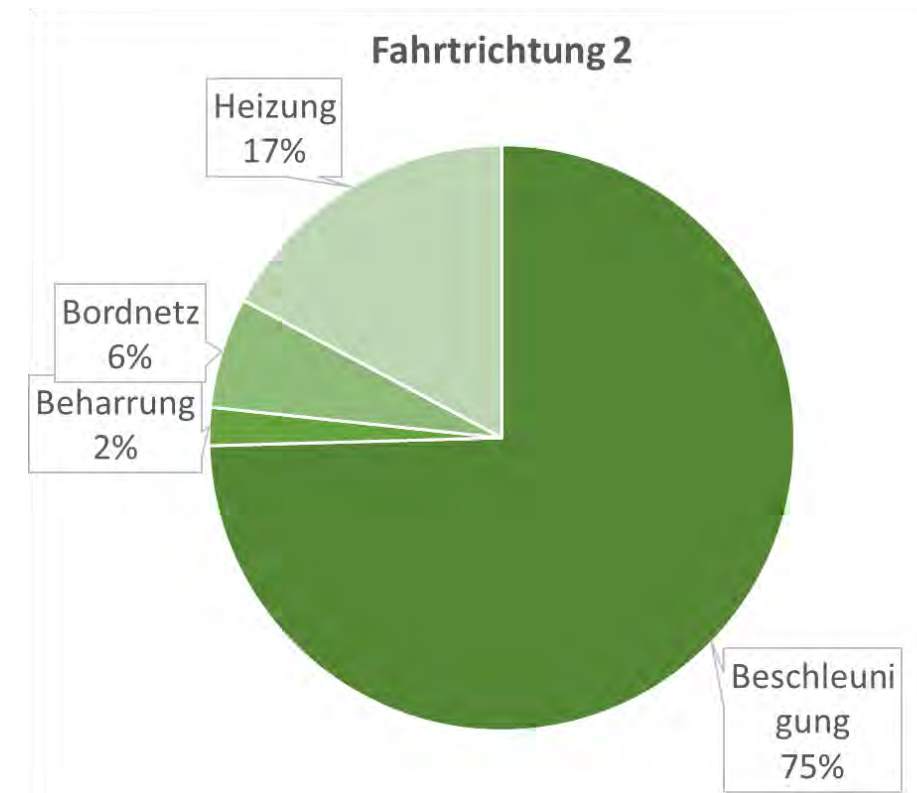
- Linie 3 der LVB mit NGT 6 Doppeltraktion
- Messzeitraum: November 2013
- „milde“ Außentemperaturen

## Fahrtrichtung 2:

- Energieaufnahme f. Beschleunigung: 3,90 kWh/km (74,6%)
- Energieaufnahme f. Beharrung: 0,11 kWh/km (2,1%)
- Energieaufnahme f. Bordnetz: 0,32 kWh/km (6,1%)
- Energieaufnahme f. Heizung: 0,90 kWh/km (17,2%)
- **Energieaufnahme gesamt: 5,23 kWh/km**
  
- Bremsarbeitsrekuperation: 1,45 kWh/km
- Energieumsatz Bremswiderstand: 0,58 kWh/km
- **Energieaufnahme Netto: 3,78 kWh/km**

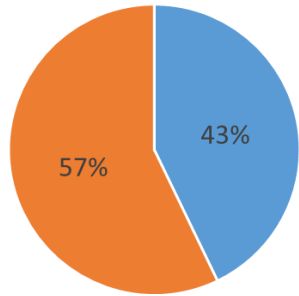
Quelle: Giebel/Keucher/Schütze: „Straßenbahn-Energiemonitoring“, in: Der Nahverkehr 9/2014, S. 50 ff.

NGT 6  
(LeoLiner)  
der LVB



# Energiebedarf einer Stadtbahn – Beispiel Dublin (Alstom Citadis)

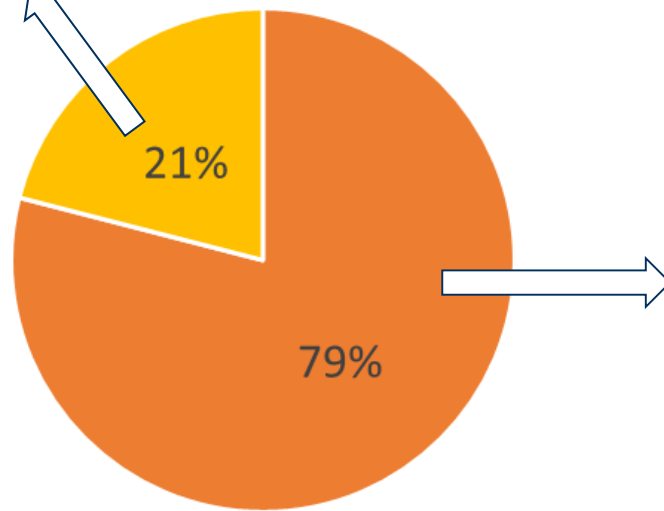
■ Antrieb ■ Hilfssysteme ■ Komfortsysteme



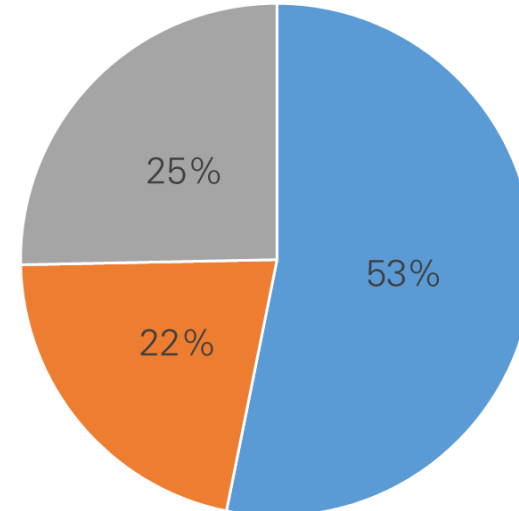
## Gesamtenergiebedarf

Messzeitraum: November 2014

ØTemperatur: 8,6°C



■ Betrieb ■ Depot



■ Antrieb ■ Hilfssysteme ■ Komfortsysteme



Alstom Citadis Dublin (Foto: Manfred Kopka)

Quelle:  
Bomke, ETR 5/2015, S. 62-66

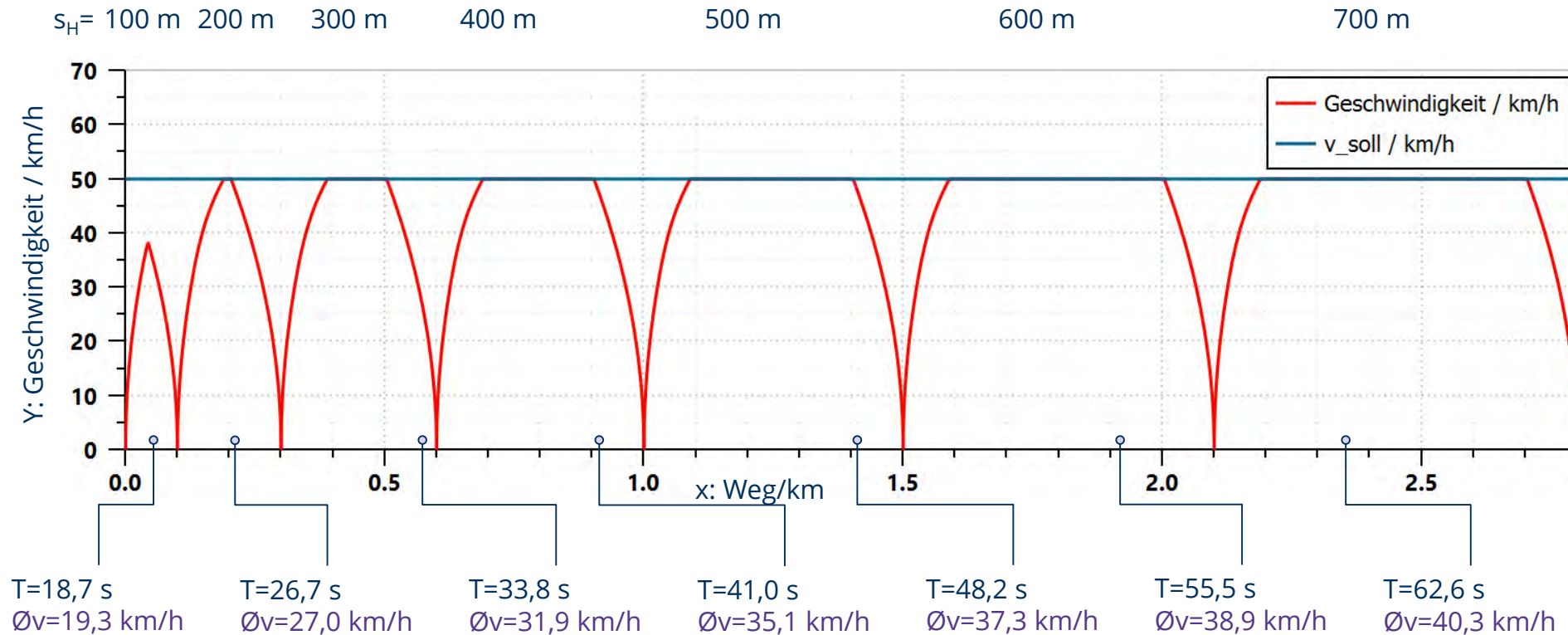


## Fahrdynamische Modellrechnungen für eine Straßen-/Stadtbahn



# Fahrspiel(e) Straßenbahn

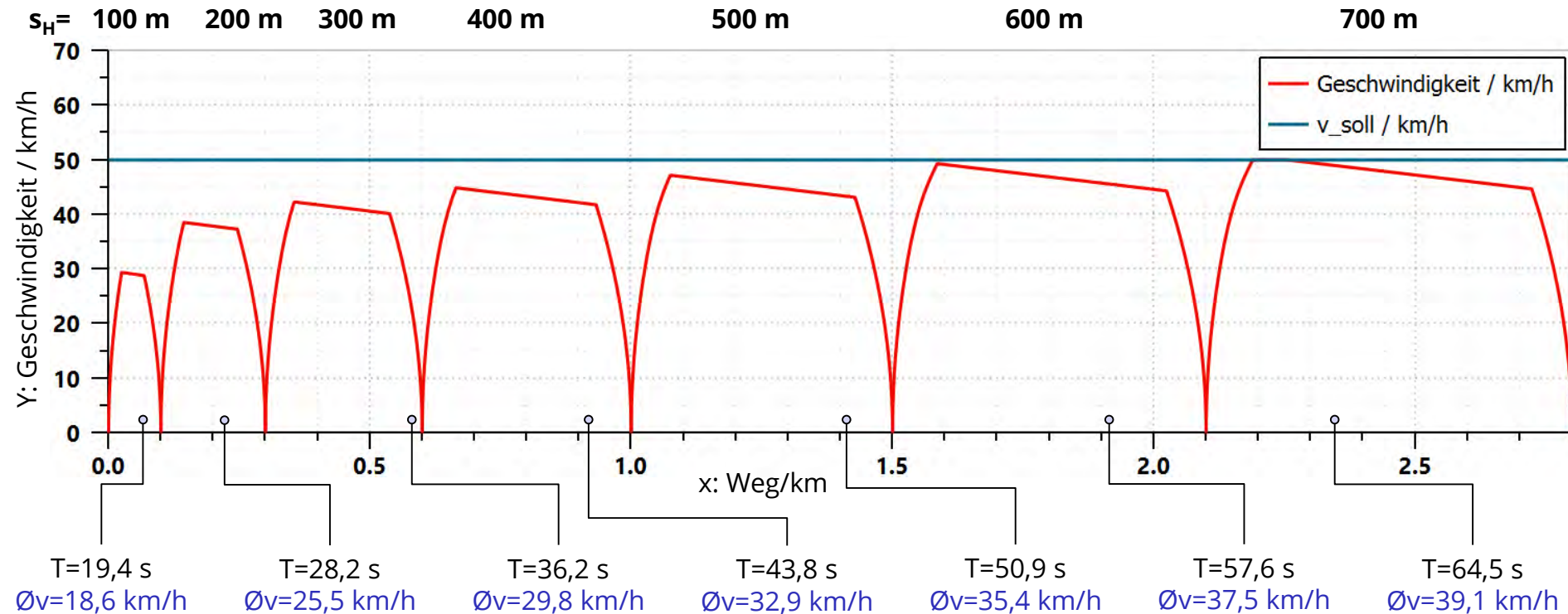
- Randbedingungen:
- max. Anfahrbeschleunigung:  $1,3 \text{ m/s}^2$
  - mittlere Bremsverzögerung:  $1,0 \text{ m/s}^2$
  - ebenes, gerades Gleis



# Fahrspiel(e) Straßenbahn

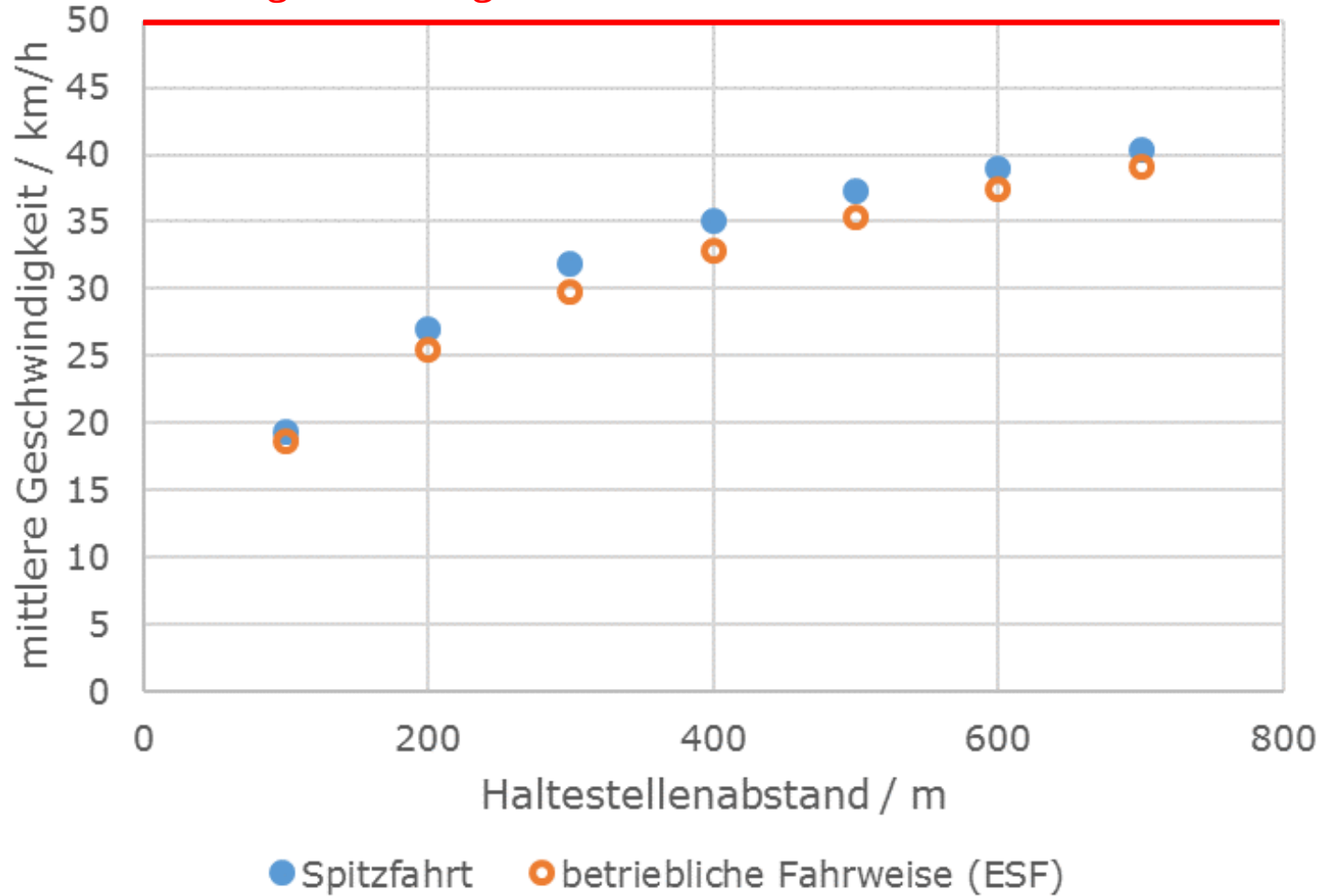
## Randbedingungen:

- max. Anfahrbeschleunigung: 1,3 m/s<sup>2</sup>
- mittlere Bremsverzögerung: 1,0 m/s<sup>2</sup>
- ebenes, gerades Gleis
- ausgenutzte Fahrzeitreserve: 3...7%



# Fahrspiel(e) Straßenbahn

„Nenngeschwindigkeit“



Randbedingungen:

- max. Anfahrbeschleunigung:  $1,3 \text{ m/s}^2$
- mittlere Bremsverzögerung:  $1,0 \text{ m/s}^2$
- ebenes, gerades Gleis
- ausgenutzte Fahrzeitreserve: 3...7%

# Fallbeispiel Straßenbahn

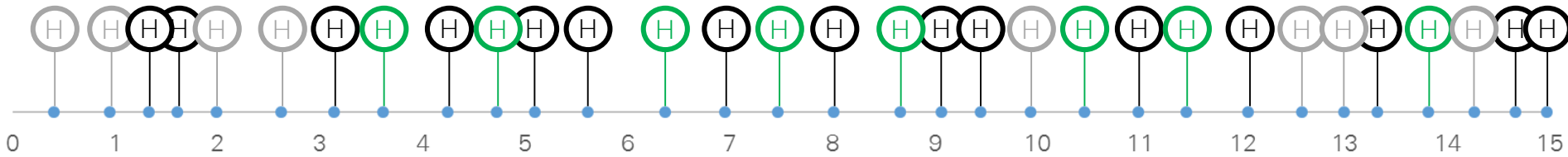
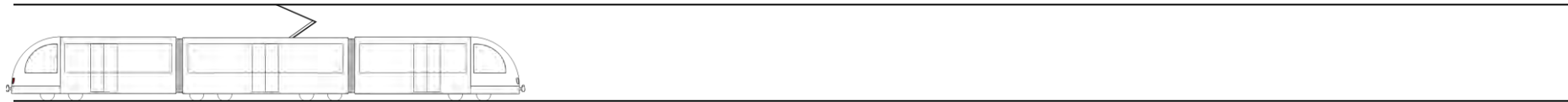
„Speckgürtel“




Vorstadt

Innenstadt

Vorstadt

Einkaufszentrum



-  Haltestelle
-  Haltestelle mit durchschnittlich geringem Fahrgastaufkommen
-  Haltestelle mit Umsteigebeziehungen (Verkehrsknoten)

## Streckendaten

Höchstgeschwindigkeit:	50 km/h
Streckenlänge:	14,97 km
Anzahl der Haltestellen:	31
mittlerer Haltestellenabstand:	483 m
Standardabweichung Haltestellenabstand:	107 m

# Fallbeispiel Straßenbahn

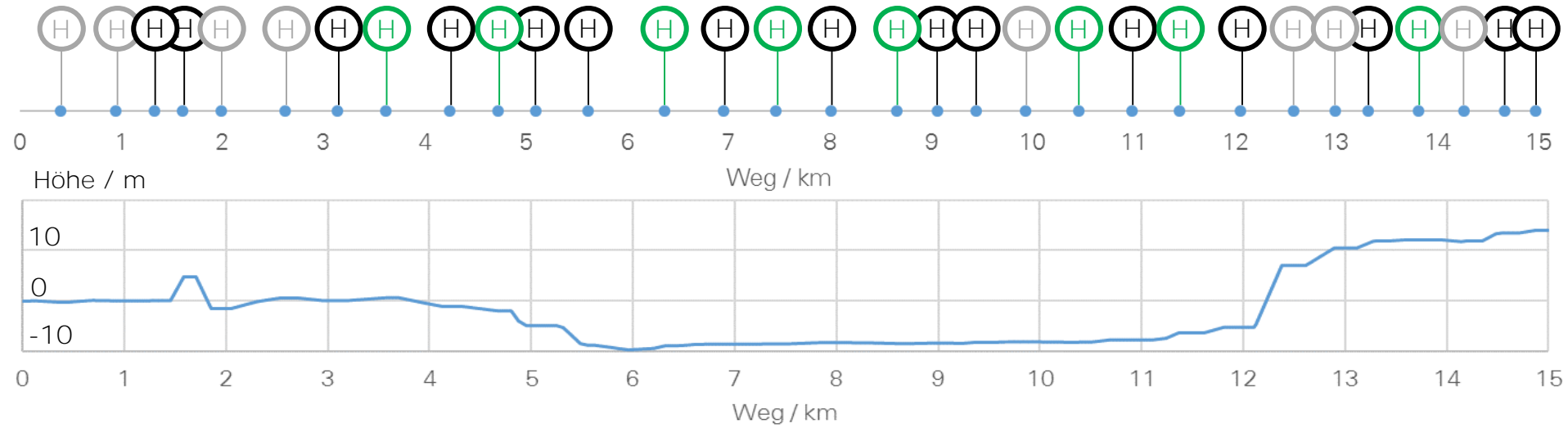
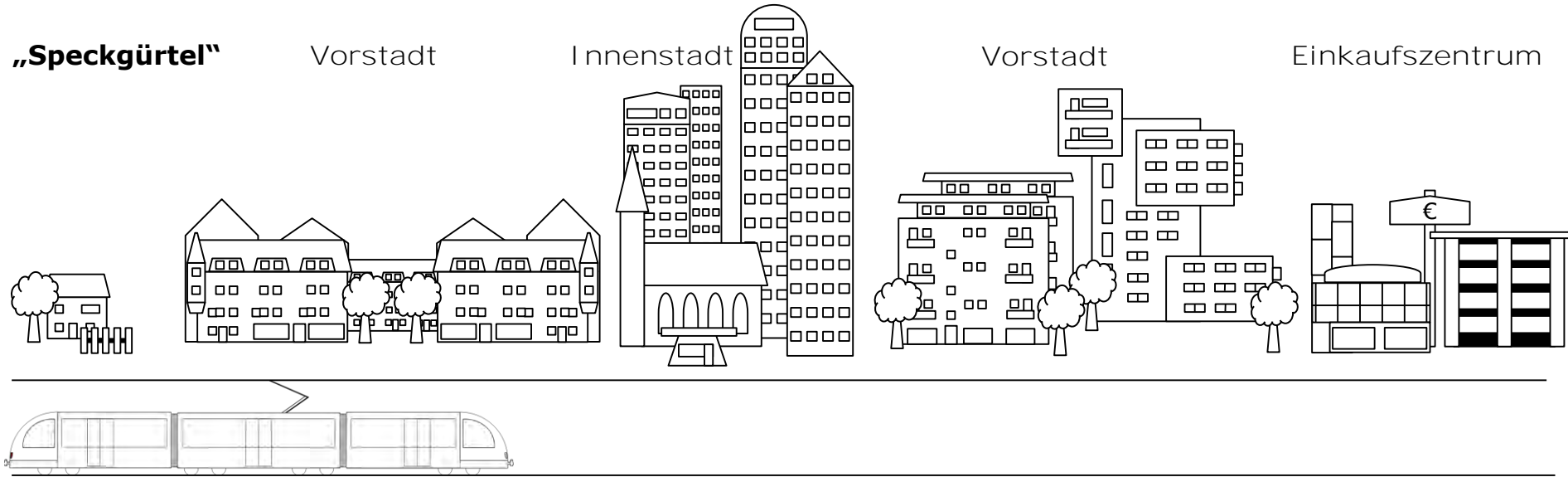
„Speckgürtel“

Vorstadt

Innenstadt

Vorstadt

Einkaufszentrum



# Fallbeispiel Straßenbahn

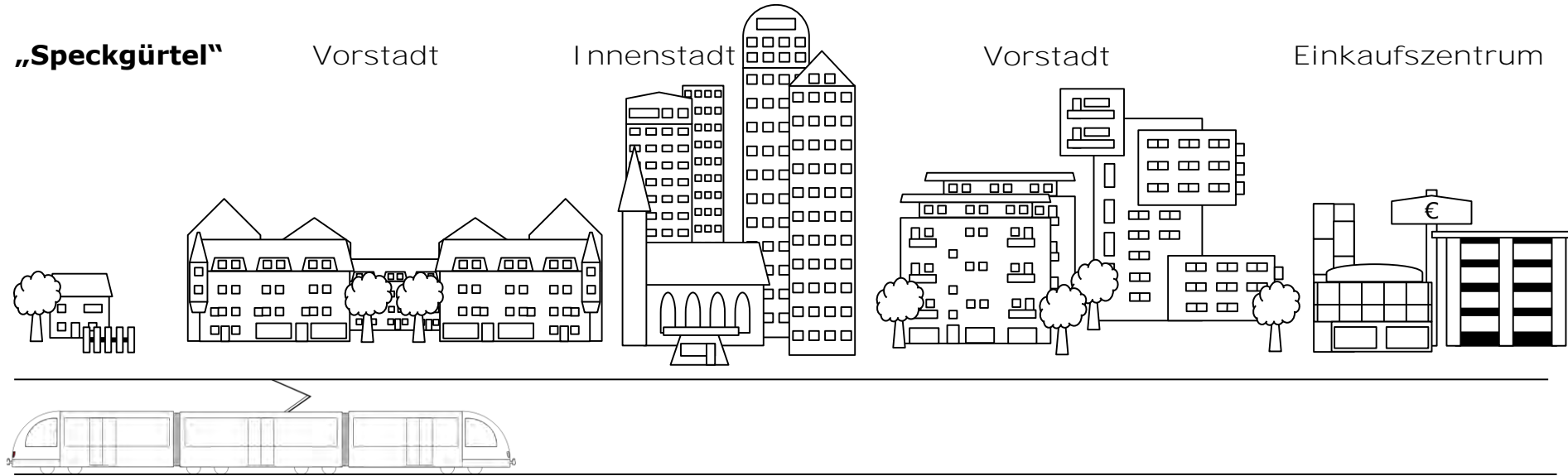
„Speckgürtel“

Vorstadt

Innenstadt

Vorstadt

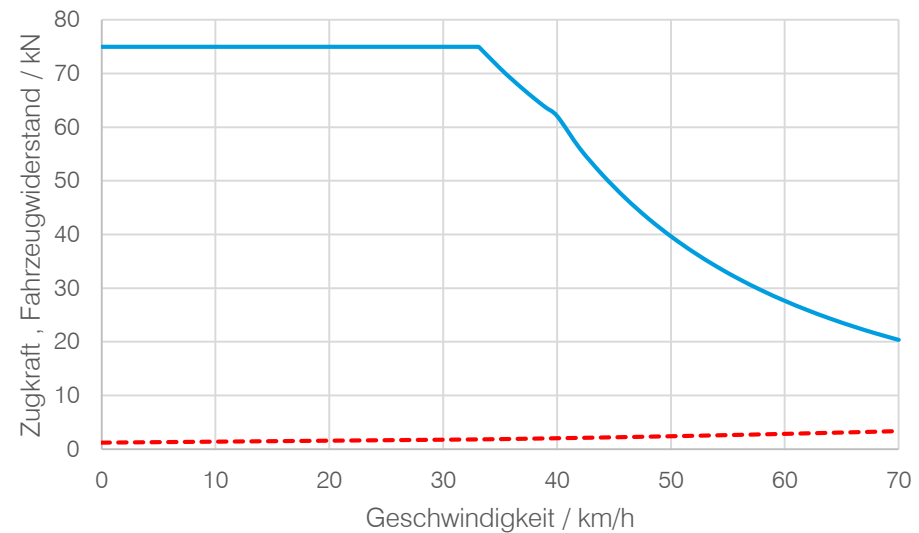
Einkaufszentrum



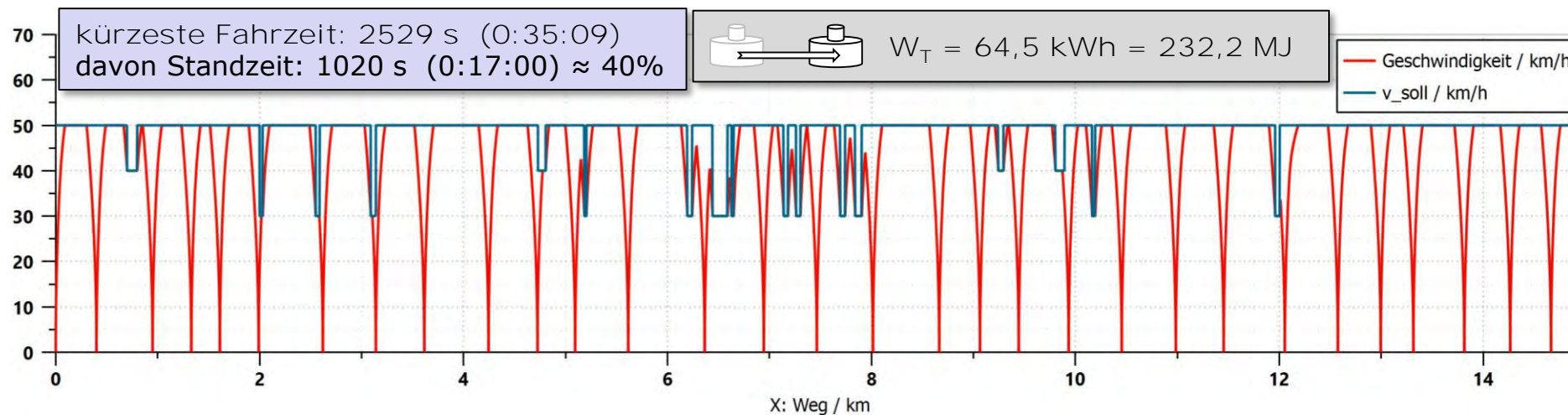
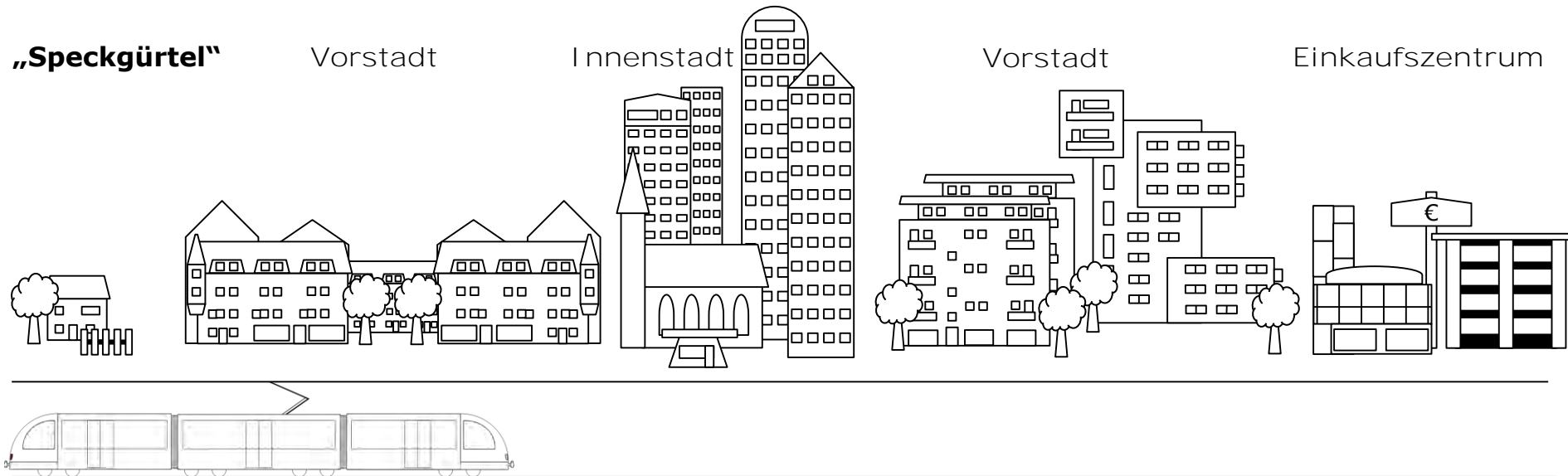
Fahrzeug: Orientierung an Citadis 302



- Masse: 50 t
- Massenfaktor: 1,1
- Leistung: 690 kW
- $v_{\max}$ : 70 km/h



# Fallbeispiel Straßenbahn - Spitzfahrt



# Fallbeispiel Straßenbahn – Betriebliche Fahrweise

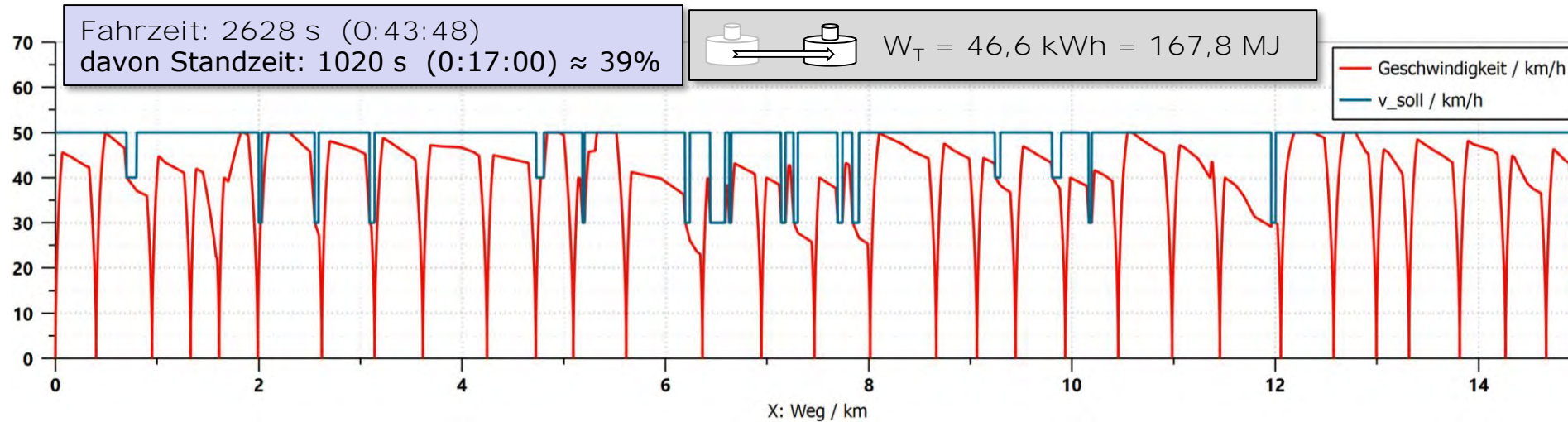
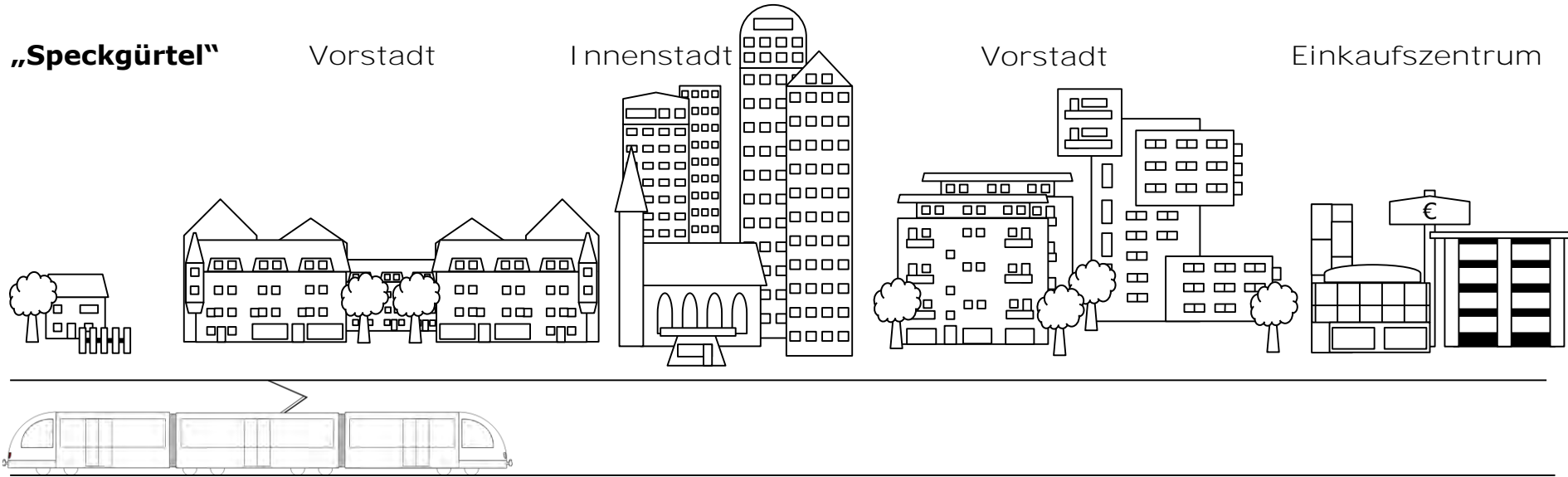
„Speckgürtel“

Vorstadt

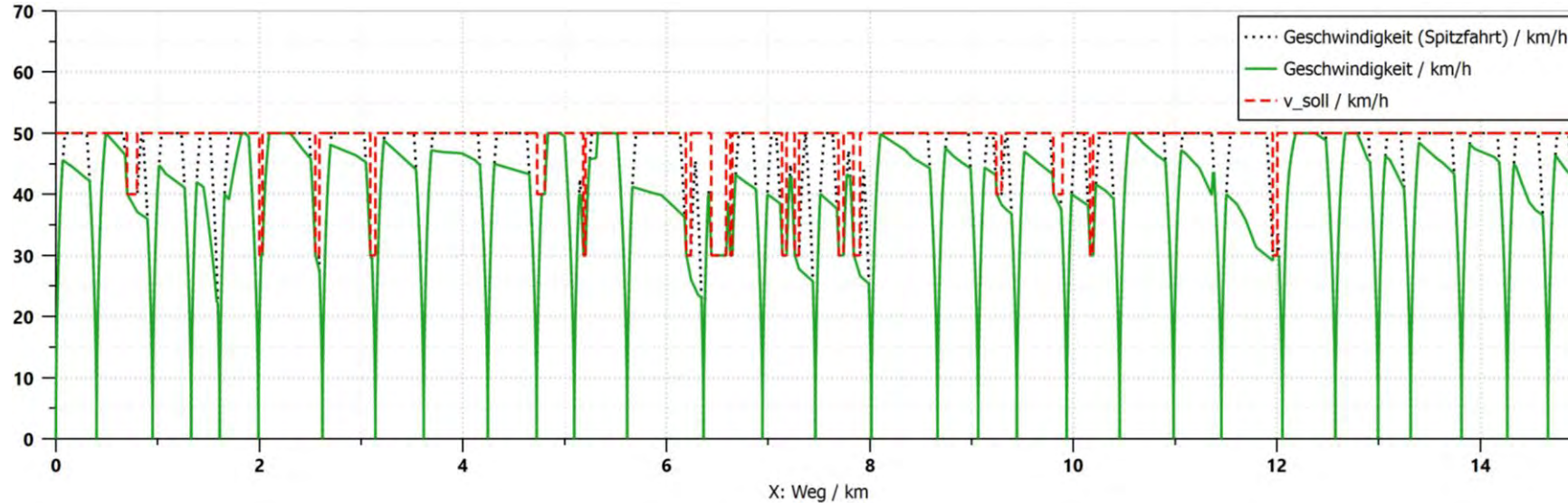
Innenstadt

Vorstadt

Einkaufszentrum

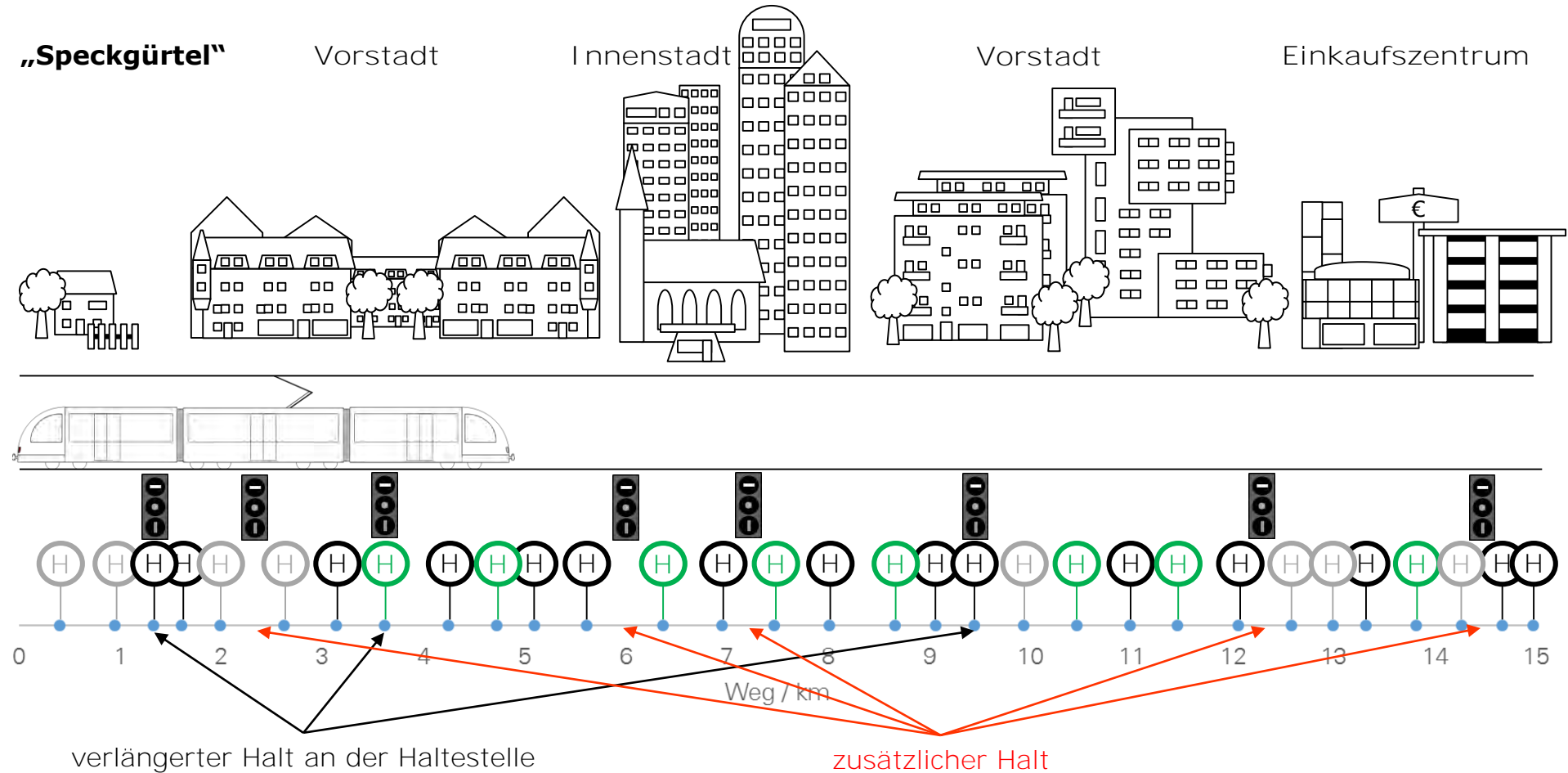


# Fallbeispiel Straßenbahn – Vergleich Fahrweisen





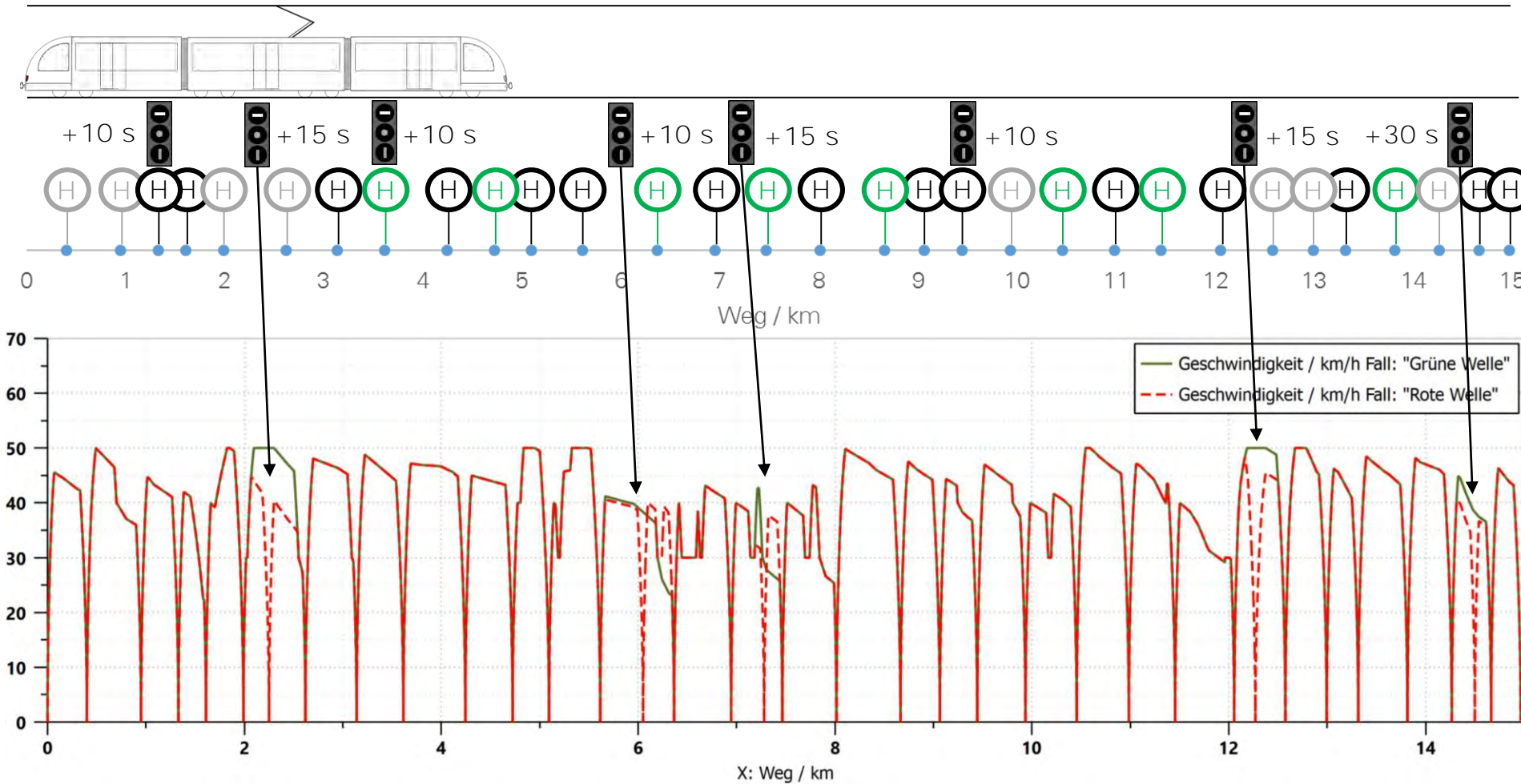
	Spitzfahrt	Betriebliche Fahrweise	Verhältnis (Bezug: Spitzfahrt)
Treibradarbeit	64,5 kWh	46,6 kWh	0,72
Bremsarbeit (Treibräder)	51,4 kWh	34,0 kWh	0,66
Fahrzeit	2529 s	2628 s	1,04
Zeitanteil Beschleunigung	8,6 %	8,2 %	0,95
Zeitanteil Beharrung	32,4 %	9,5 %	0,29
Zeitanteil Auslauf	0,0 %	28,9 %	-
Zeitanteil Bremsen	18,8 %	14,7 %	0,78
Zeitanteil Stillstand	40,2 %	38,7 %	0,96

# Fallbeispiel Straßenbahn – Einfluss Lichtsignalanlagen

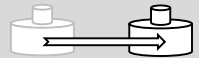


# Fallbeispiel Straßenbahn - Einfluss Lichtsignalanlagen

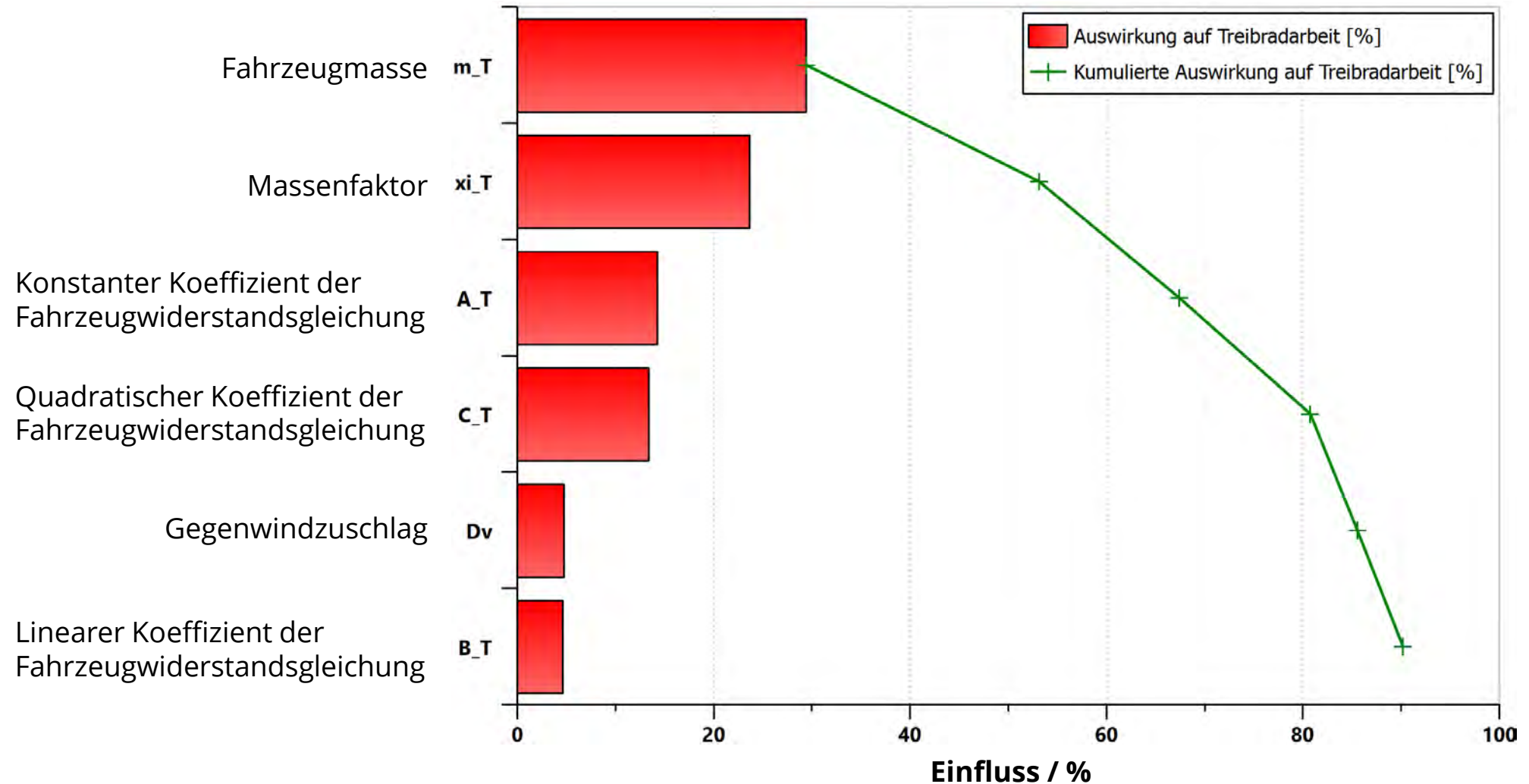
 +6,4 %  
 +7,0 %



Fahrzeit: 2796 s (0:46:36)  
 davon Standzeit: 1135 s (0:18:55)  $\approx$  41%  
 Fahrzeitmehrbedarf durch LSA: 168s


 $W_T = 49,8 \text{ kWh} = 179,3 \text{ MJ}$   
 $\Delta W_T = +3,24 \text{ kWh} = 11,7 \text{ MJ}$

# Fallbeispiel Straßenbahn – Einflussfaktoren Treibradarbeitsberechnung



# Zusammenfassung – Einflussfaktoren Energiebedarf

## Einflüsse auf den spezifischen Energieverbrauch:

1. Fahrweise
2. Energieeffizienz von Antrieb und Hilfsbetrieben
3. Energiebedarf für Komfort- und Hilfseinrichtungen
4. Fahrzeugmasse
5. Fahrwiderstand (Fahrzeug + Strecke)
6. Haltestellenabstände
7. Anzahl von Verkehrshalten und v-Beschränkungen
8. Möglichkeit und Effizienz von Energierückspeisung oder Energiespeicherung

# Zusammenfassung – Maßnahmen zur Senkung des Energiebedarfes

## Maßnahmen zur Reduzierung des Energieverbrauches:

1. **Energiesparende Fahrweise anwenden (Auslauf nutzen)**
2. **Vorrangschaltung bei Straßenkreuzungen (Reduzierung der Anfahrten)**
3. **Ermöglichung von Energierückspeisung oder -speicherung**
4. **kurze Haltestellenabstände vermeiden**
5. **Einrichtung der Funktion „Halt auf Verlangen“ (Reduzierung der Anfahrten)**