

Fakultät Verkehrswissenschaften
Professur für Elektrische Bahnen

Fahrzeuge des Schienenpersonennahverkehrs

Fahrdynamik – Vorlesung 1

Dipl.-Ing. Tobias Bregulla
Wintersemester 2022/2023

Inhalte

Vorlesung Fahrzeuge des SPNV (Fahrtdynamik)

1. Charakterisierung der schienengebundenen Transportsysteme im (städtischen) Nahverkehr
2. Vorschriften und Regelungen zu Fahrdynamischen Aspekten
3. Fahrdynamische Charakterisierung von Fahrzeugen des SPNV
4. Betrachtungen zu Energie und Fahrzeit
5. Leistungsauslegung von Fahrzeuge des SPNV



Charakterisierung der schienengebundenen Transportsysteme im (städtischen) Nahverkehr

Straßenbahn



Stadtbahn



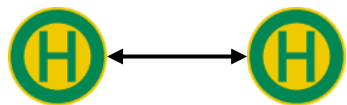
U-Bahn



S-Bahn



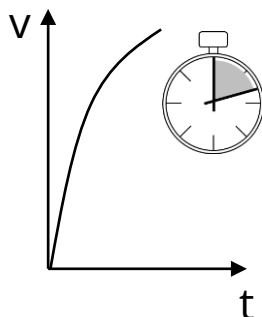
Fahrdynamische Charakterisierung von Straßenbahnsystemen



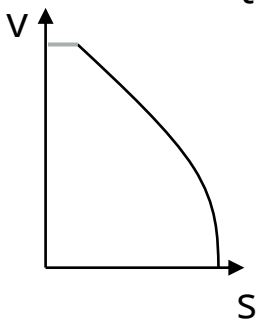
- sehr geringer mittlerer Haltestellenabstand (z.B. Dresden: 471 m)



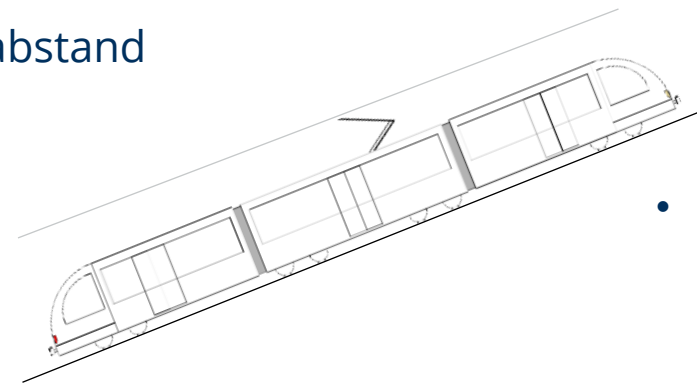
- geringe Höchstgeschwindigkeit (z.B. Dresden: 60 km/h)
- geringe Reisegeschwindigkeit (z.B. Dresden: ca. 20 km/h)



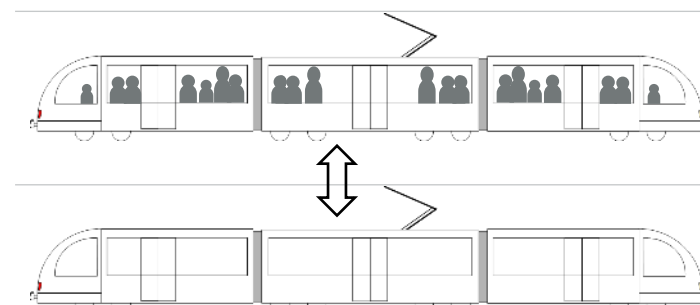
- hohe Anfahrbeschleunigung ($1,0 \dots 1,3 \text{ m/s}^2$)
- kurze Beschleunigungszeiten und -wege



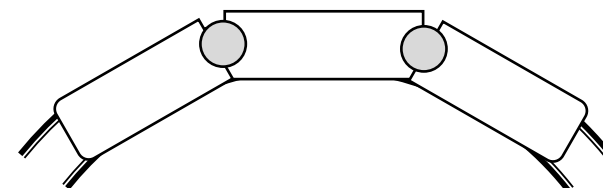
- hohe mittlere Bremsverzögerung (bis zu $2,73 \text{ m/s}^2$)
- kurze Bremswege



- hohe Längsneigungen möglich (z.B. Dresden: 77‰)



- großes Verhältnis von Höchst- zu Eigenmasse (z.B. NGT8DD: 1,35)



- geringe Bogenradien möglich (z.B. Dresden: 17,6m)

Elektrische Charakterisierung

- Gleichspannungssysteme 600 V (Dresden), 750 V (S-Bahn Berlin), 1200 V (S-Bahn Hamburg)
- Niedrige Spannungen führen zu hohen Strömen (Im Vergleich zur Vollbahn)
- Hohe Ströme führen zu Spannungsfällen und mehr nötigen Unterwerken (2-4 km)
- Unterschiedliche Fahrleitungsbauarten
 - Oberleitung
 - Flexibel (Einfach-OL/Kettenwerks-OL)
 - Stromschienen-OL
 - Stromschiene in Bodennähe
- Rückstromführung und Beeinflussung



Energie und Leistung

Charakteristika

- U-Bahnen sind in der Regel Hochleistungsbahnen
- Rückspeisefähigkeit bei DC Fahrzeugen nur bedingt gegeben → Bremswiderstand nötig
- Energieaustausch mit anderen Fahrzeugen
- Energiebezug aus dem vorgelagerten Drehstromnetz (3~ AC)



Kennzahlen ausgewählter Straßenbahnnetze



Berlin

Linienlänge: 300 km
 Ø Haltestellenabstand: 500 m
 Ø Reisegeschwindigkeit: 19 km/h



München

Streckenlänge: 82 km
 Ø Haltestellenabstand: 444 m
 Ø Reisegeschwindigkeit: 19 km/h



Leipzig

Linienlänge: 214 km
 Ø Haltestellenabstand: 530 m



Dresden

Linienlänge: 213 km
 Ø Haltestellenabstand: 471 m
 Ø Reisegeschwindigkeit: 20 km/h

Weitere deutsche Netze (Linienlänge)

Augsburg	45 km
Bochum/Gelsenkirchen	110 km
Bremen	106 km
Düsseldorf	77 km
Essen	83 km
Frankfurt a. M.	113 km
Halle	156 km
Karlsruhe	75 km
LU/MA/HD*	299 km
Magdeburg	106 km

*LU – Ludwigshafen, MA – Mannheim, HD - Heidelberg

Kennzahlen ausgewählter Straßenbahnnetze



Bordeaux

Linienlänge: 66 km
 Ø Haltestellenabstand: 547 m
 Ø Reisegeschwindigkeit: 18 km/h



Nantes

Linienlänge: 44 km
 Ø Haltestellenabstand: 534 m
 Ø Reisegeschwindigkeit: 25 km/h



Lyon

Linienlänge: 85 km
 Ø Haltestellenabstand: 703 m



Montpellier

Linienlänge: 65 km
 Ø Haltestellenabstand: 628 m
 Ø Reisegeschwindigkeit: 20 km/h

weitere große Straßenbahnnetze in Europa:

Brüssel	222 km
Budapest	304 km
Bukarest	342 km
Den Haag	130 km
Kattowice*	335 km
Mailand	182 km
Moskau	416 km
Prag	332 km
St. Petersburg	500 km
Warschau	348 km
Wien	225 km

*Straßenbahn im oberschlesischen Industriegebiet

Straßenbahn Lissabon

Streckenlänge:	26 km
Linienlänge:	48 km
Spurweite:	900 mm
min. Bogenradius:	9 m
max. Neigung:	145 ‰
Energieversorgung:	600 V DC



Charakterisierung der schienengebundenen Transportsysteme im (städtischen) Nahverkehr

Straßenbahn



Stadtbahn



U-Bahn

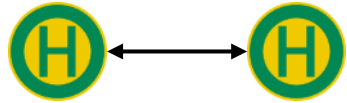


S-Bahn



Fahrdynamische Charakterisierung von Stadtbahnsystemen

(Beschränkung auf abweichende Aspekte)



- größerer* mittlerer Haltestellenabstand (z.B. Saarbahn: ca. 1000 m)



- größere* Höchstgeschwindigkeit (z.B. Regiotram Kassel: 100 km/h)
- höhere* Reisegeschwindigkeit



- Nutzung von 750 V Fahrdrabtspannung (statt 600 V)

*im Vergleich zu reinen Straßenbahnen

weitere Besonderheiten:



weitgehende Nutzung separater Gleiskörper



fallweise Betrieb auf Vollbahn-Infrastruktur



fallweise unterirdische Streckenführung

Charakterisierung der schienengebundenen Transportsysteme im (städtischen) Nahverkehr

Straßenbahn



Stadtbahn



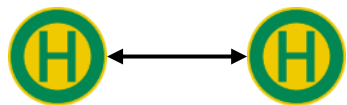
U-Bahn



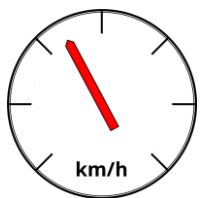
S-Bahn



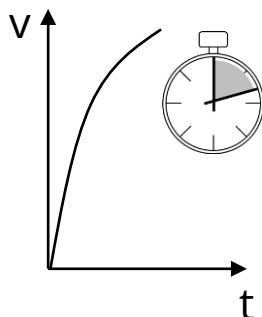
Fahrdynamische Charakterisierung von U-Bahnsystemen



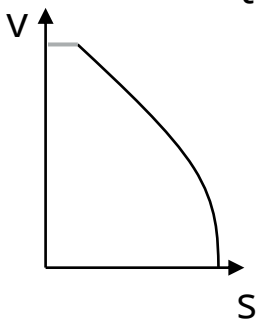
- vergleichsweise großer mittlerer Haltestellenabstand (z.B. München: 948 m)



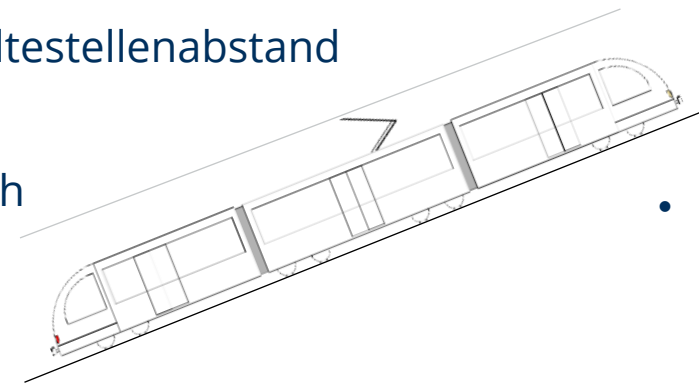
- Höchstgeschwindigkeit 80...100 km/h (z.B. München: 80 km/h)
- vergleichsweise hohe Reisegeschwindigkeit (z.B. München: ca. 35 km/h)



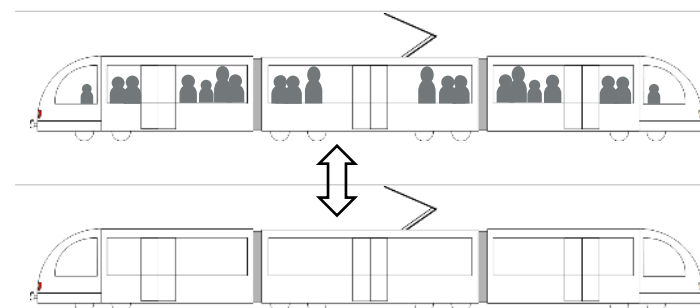
- hohe Anfahrbeschleunigung (1,0...1,3 m/s²)
- kurze Beschleunigungszeiten und -wege



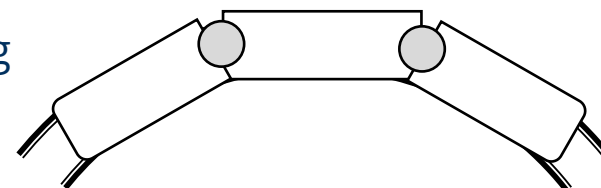
- relativ hohe mittlere Bremsverzögerung (ca. 1,1 m/s²; geringer als Straßenbahn)
- kurze Bremswege



- relativ hohe Längsneigungen möglich (z.B. München: 50 ‰)



- großes Verhältnis von Höchst- zu Eigenmasse (z.B. München, Typ C: 1,69)



- geringe Bogenradien möglich (z.B. Berlin: 75 m)

Kennzahlen ausgewählter U-Bahn-Netze

Beispiel 1: Berlin

Linienlänge:	146 km
Spurweite:	1435 mm
min. Bogenradius:	74,8 m
max. Neigung:	40 ‰
kleinster Haltestellenabstand:	380 m
größter Haltestellenabstand:	1866 m
mittlerer Haltestellenabstand:	787 m
Energieversorgung:	600 V DC
Anteil Tunnelstrecken:	79%
Reisegeschwindigkeit:	25,8...33,9 km/h



Kennzahlen ausgewählter U-Bahn-Netze

Beispiel 2: München

Streckenlänge:	95 km
Spurweite:	1435 mm
min. Bogenradius:	270 m (Betriebsgleis) 70 m (Werkstatt)
max. Neigung:	50 ‰*
kleinster Haltestellenabstand:	513 m
größter Haltestellenabstand:	4208 m
mittlerer Haltestellenabstand:	948 m
Energieversorgung:	750 V DC
zulässige Höchstgeschwindigkeit:	80,0 km/h
∅ Reisegeschwindigkeit:	35,2 km/h

*Auslegung der C-Züge erfolgte laut Hersteller (Siemens) für max. 5% Längsneigung



Kennzahlen ausgewählter U-Bahn-Netze

Beispiel 3: London

Streckenlänge:	402 km
Spurweite:	1435 mm
kleinster Haltestellenabstand:	300 m
größter Haltestellenabstand:	6300 m
Energieversorgung:	630 V DC
Anteil Tunnelstrecken:	45%
Höchstgeschwindigkeit:	ca. 100 km/h
Reisegeschwindigkeit:	33 km/h



Charakterisierung der schienengebundenen Transportsysteme im (städtischen) Nahverkehr

Straßenbahn



Stadtbahn



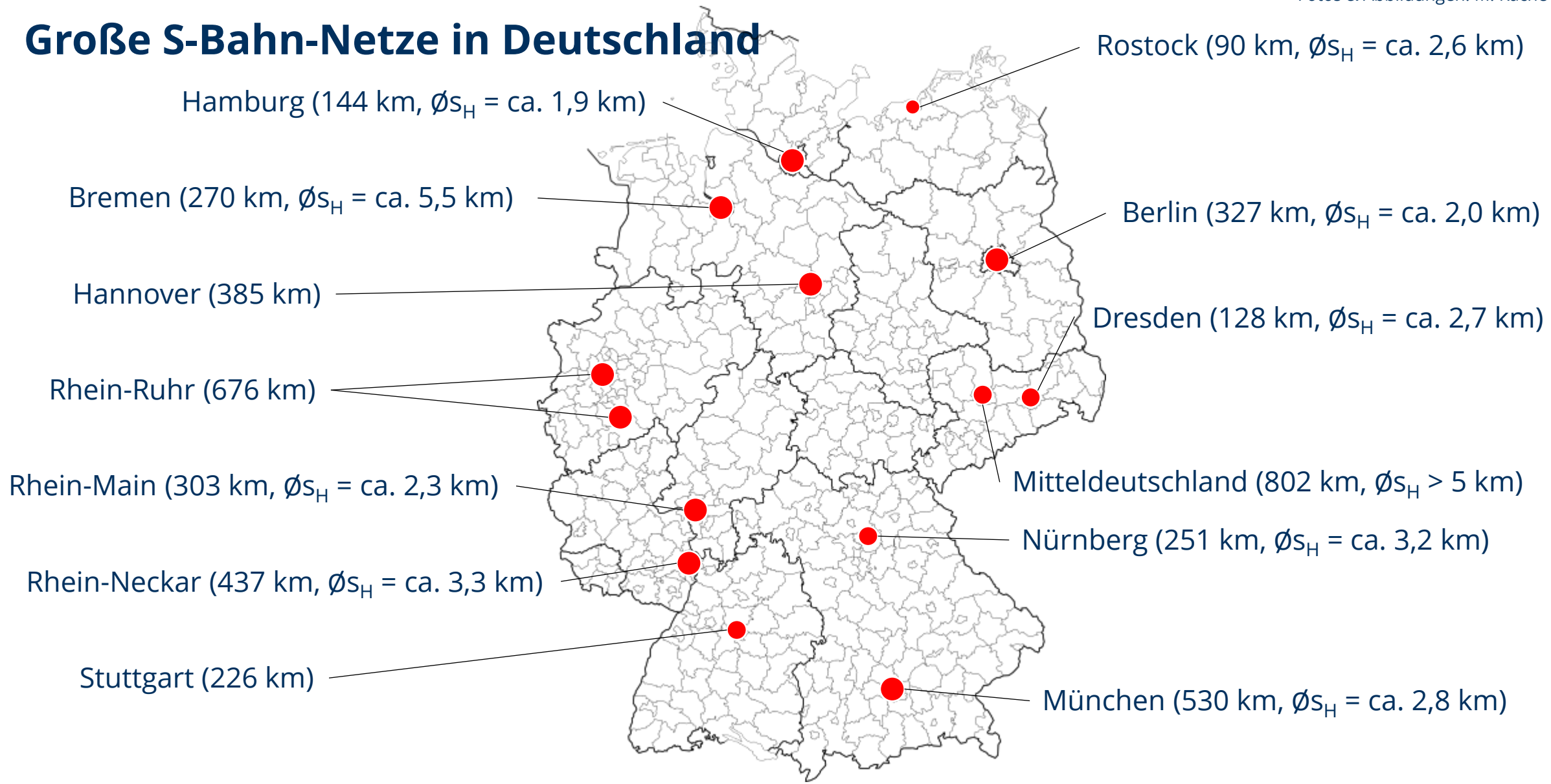
U-Bahn



S-Bahn



Große S-Bahn-Netze in Deutschland



Elektrische Charakterisierung

- Gleichspannungssysteme 750 V (S-Bahn Berlin), 1200 V (S-Bahn Hamburg)
- Wechselspannungssysteme 15 kV 16,7 Hz (München, Dresden)
- Jeweils geltende charakteristische Eigenschaften von DC oder AC Bahnen



S-Bahn – große Bandbreite möglicher Fahrzeugeinsätze



$P_{T,nenn}$: 3,700 MW
 m_z : 275...325 t
 $p_{T,nenn}$: **11,5...13,5 kW/t**
 Kapazität: ca. 500...700 Pers.
 a_{max} : **0,7...0,8 m/s²**
 τ_{erf} : **0,33**
 V_{max} : 120 km/h



$P_{T,nenn}$: 2,350 MW
 m_z : 105...146 t
 $p_{T,nenn}$: **16...22 kW/t**
 Kapazität: ca. 500 Pers./Zug*
 a_{max} : **1,0 m/s²**
 τ_{erf} : **0,14**
 V_{max} : 140 km/h



$P_{T,nenn}$: 4,200 MW
 m_z : 275...325 t
 $p_{T,nenn}$: **12,9...15,3 kW/t**
 Kapazität: ca. 500...700 Pers.
 a_{max} : **0,85...1,0 m/s²**
 τ_{erf} : **0,37**
 V_{max} : 160 km/h



$P_{T,nenn}$: 2,376 MW
 m_z : 236...330 t
 $p_{T,nenn}$: **7...10 kW/t**
 Kapazität: ca. 1200 Pers./Vollzug
 a_{max} : **1,0 m/s²**
 τ_{erf} : **0,14**
 V_{max} : 100 km/h



$P_{T,nenn}$: 2,020...3,030 MW
 m_z : 114...173 t
 $p_{T,nenn}$: **17...18 kW/t**
 Kapazität: ca. 300...500 Pers.
 a_{max} : **1,1 m/s²**
 τ_{erf} : **0,25**
 V_{max} : 160 km/h

*max. Dreifachtraktion möglich

Inhalte

Vorlesung Fahrzeuge des SPNV (Fahrtdynamik)

1. Charakterisierung der schienengebundenen Transportsysteme im (städtischen) Nahverkehr
2. Vorschriften und Regelungen zu Fahrtdynamischen Aspekten
3. Fahrtdynamische Charakterisierung von Fahrzeugen des SPNV
4. Betrachtungen zu Energie und Fahrzeit
5. Leistungsauslegung von Fahrzeugen des SPNV



Fotos & Abbildungen: M. Kache

Festlegungen 1: 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 2: 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 $1,71 \text{ m/s}^2$ - $2,73 \text{ m/s}^2$



Querbesehleunigungs- und Ruckgrenzwerte im SPNV

Straßenbahn/Stadtbahn/U-Bahn

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

S-Bahn/Nahverkehrszüge ohne Neigetechnik

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



Festlegungen 3: Typenempfehlung Stadtbahnfahrzeuge (VDV 150), Typenempfehlung U-Bahn-Fahrzeuge (VDV 151)



Längsruckbegrenzung:	1,3 m/s ³	0,8 m/s ³
Beschleunigung bis v _Ü :	1,3 m/s ²	1,3 m/s ²
mittlere Betriebsbremsverzögerung:	1,2 m/s ²	1,2 m/s ²
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

Sonderformen

- Mehrsystem- oder Zweikraftfahrzeuge auf BOStrab und EBO Strecken
 - RegioTram Kassel
 - Karlsruher Modell
 - Chemnitzer Modell



Inhalte

Vorlesung Fahrzeuge des SPNV (Fahrtdynamik)

1. Charakterisierung der schienengebundenen Transportsysteme im (städtischen) Nahverkehr
2. Vorschriften und Regelungen zu Fahrtdynamischen Aspekten
3. Fahrtdynamische Charakterisierung von Fahrzeugen des SPNV
4. Betrachtungen zu Energie und Fahrzeit
5. Leistungsauslegung von Fahrzeugen des SPNV



Fotos & Abbildungen: M. Kache

Fahrdynamische Charakterisierung von Fahrzeugen des SPNV

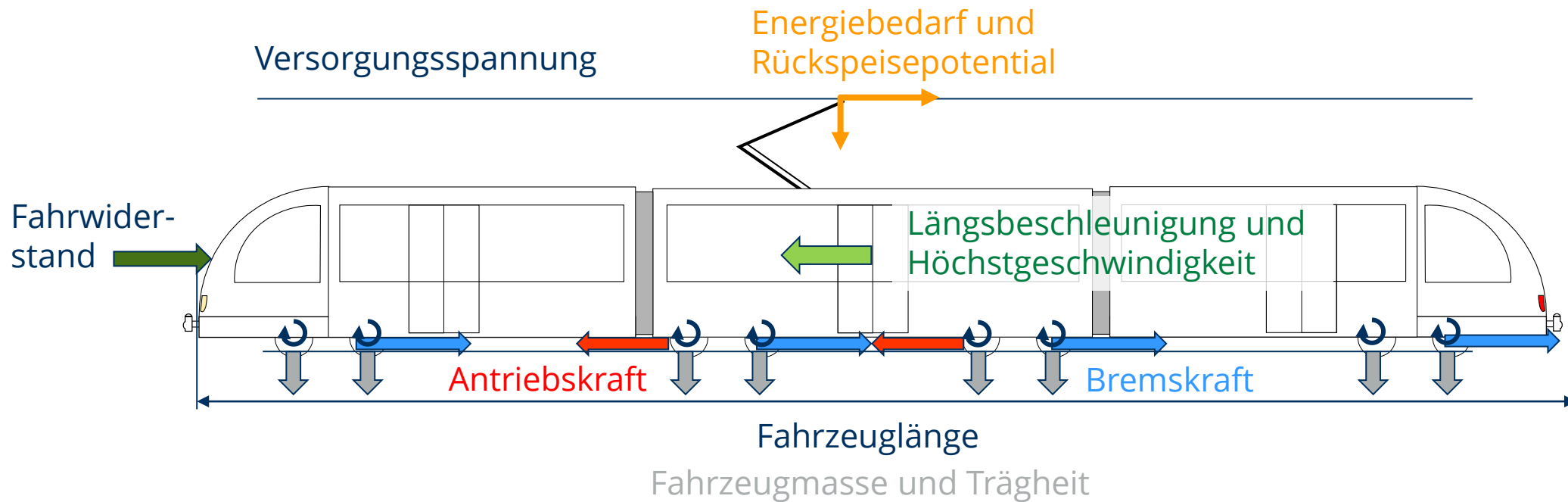


Abbildung: M. Kache

Fahrdynamische Grundgleichung

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

Mit

F_T Treibradzugkraft

ξma Beschleunigungskraft

F_{WFT} Widerstand des Triebfahrzeugs

F_{WFW} Widerstand der Wagen (optional)

F_{WS} Widerstand der Strecke

F_B Bremskraft

Fahrzustände

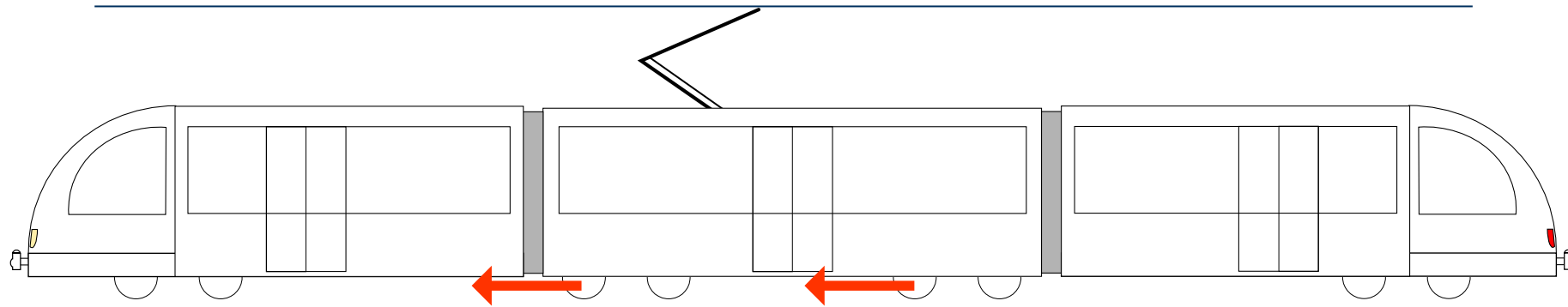
$$0 = F_T - \xi ma - F_{WFT} - F_{WFW} - F_{WS} - F_B$$

Es ergeben sich unterschiedliche Fahrzustände:

- Zugfahrt mit Zugkraft
 - Beschleunigungsfahrt $F_B = 0, \xi ma > 0$
 - Beharrungsfahrt $F_B = 0, \xi ma = 0$
- Zugfahrt ohne Zugkraft $F_T = 0$
 - Spezialfall Beharrung $\xi ma = 0, F_{WS} = F_{WFT} + F_{WFW}, F_B = F_T = 0$
 - Bremsung $F_B > 0$
 - Auslauf $F_B = 0$

Fahrdynamische Charakterisierung

Antriebskraft

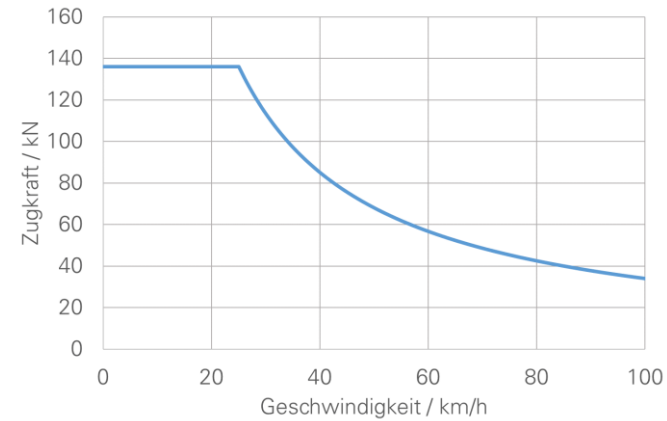


Antriebskraft

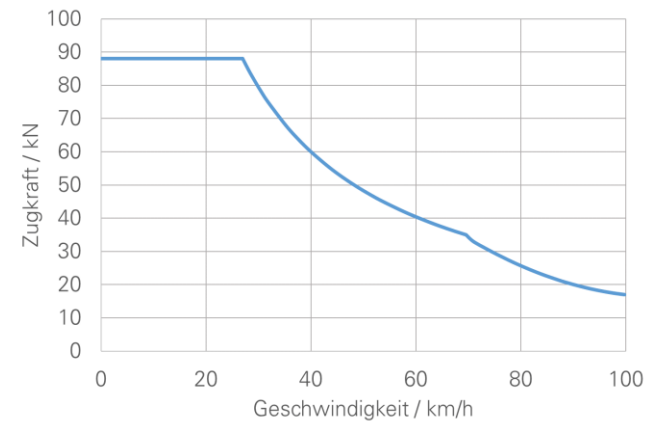
Abbildung: M. Kache

Fahrdynamische Charakterisierung Antriebskraft

Citadis
3BM2BP
(2-System)



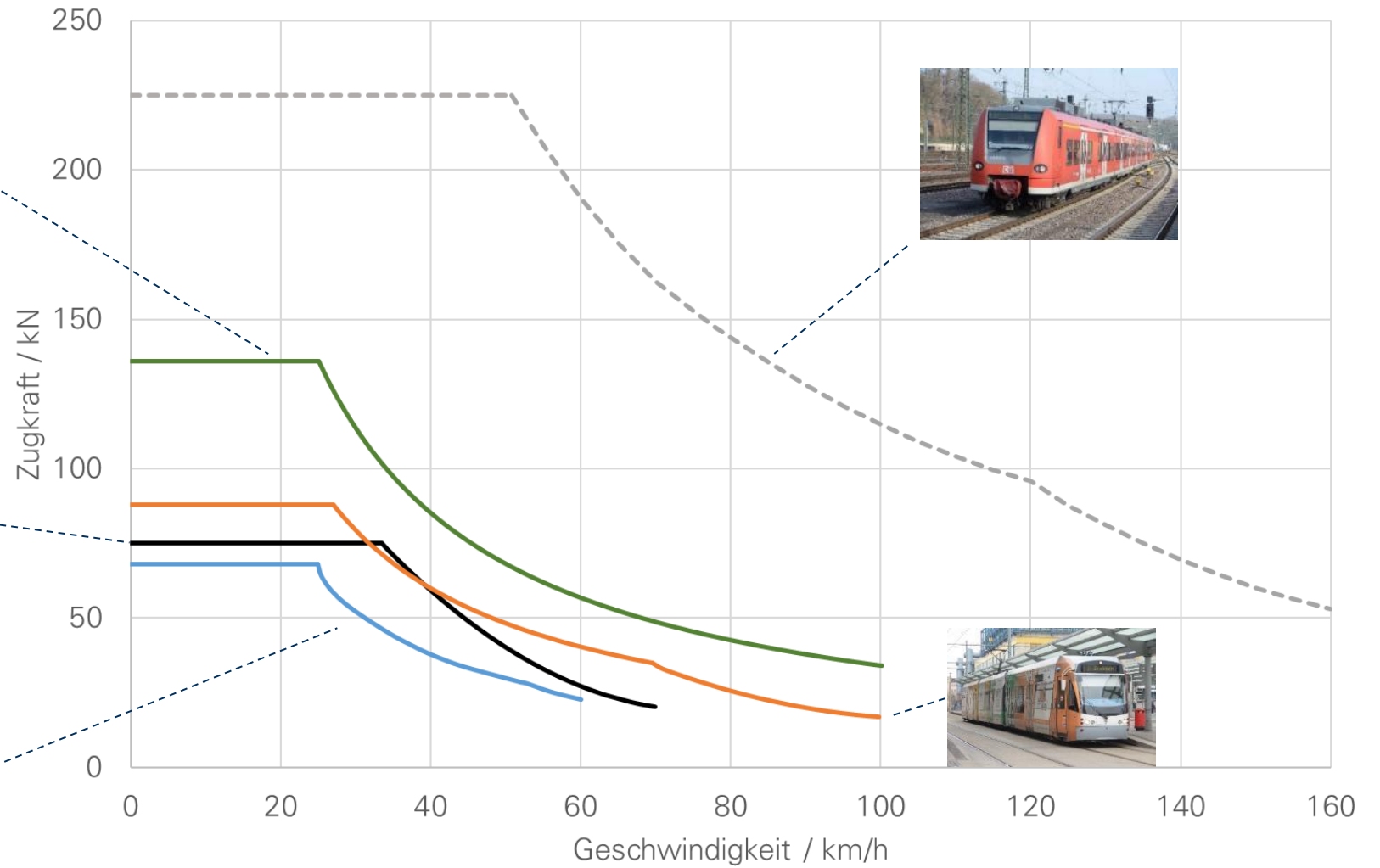
Saarbahn
(2-System)



Fotos & Abbildungen: M. Kache

Fahrdynamische Charakterisierung

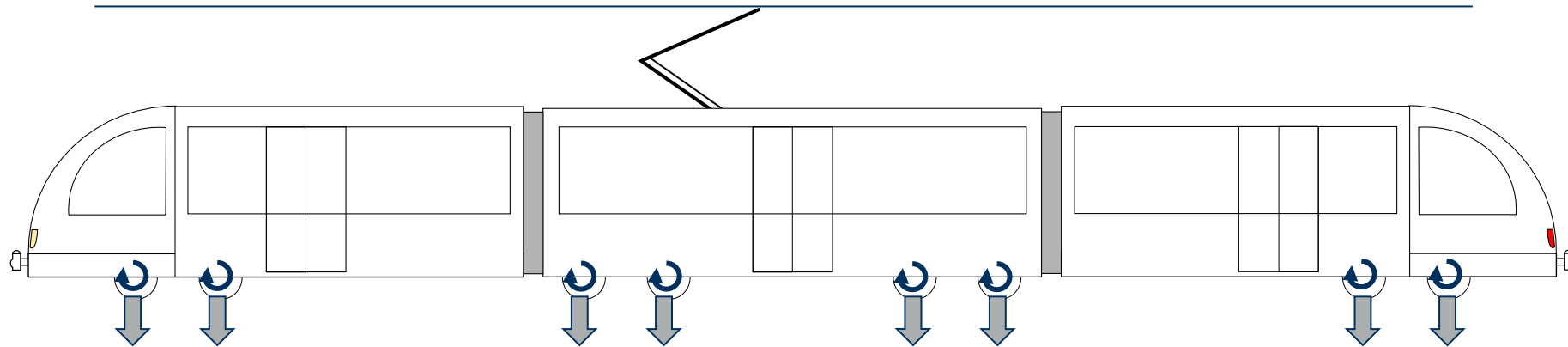
Antriebskraft



Fotos & Abbildungen: M. Kache

Fahrdynamische Charakterisierung

Masse und Trägheit



Fahrzeugmasse und Trägheit

Abbildung: M. Kache

Fahrdynamische Charakterisierung

Masse und Trägheit: Massefaktor

Straßenbahn Dresden

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

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



NGT D8DD: 1,102



NGT D12DD: 1,099



NGT 6: 1,108



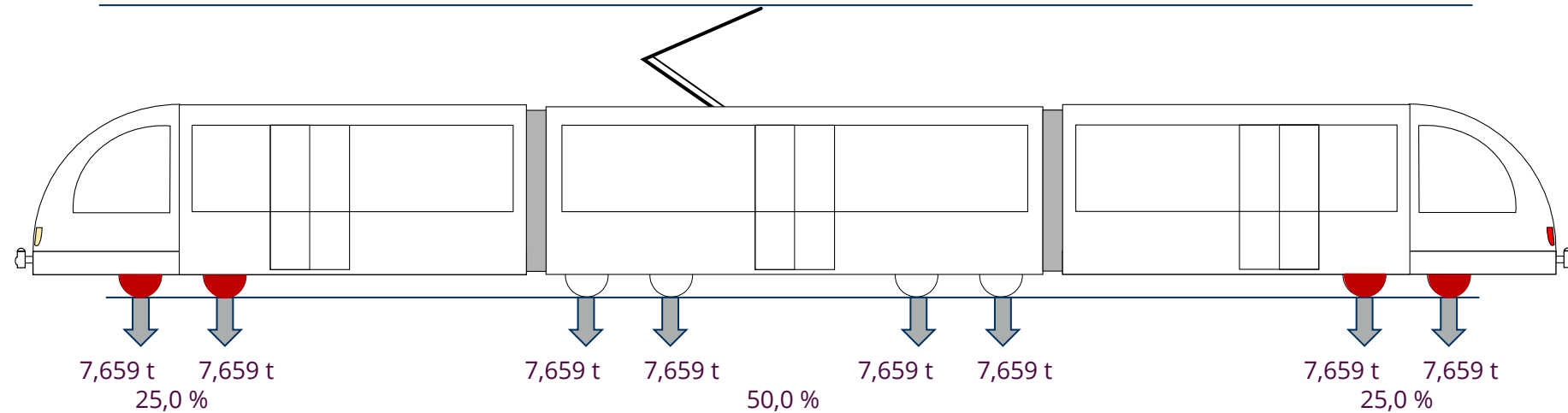
NGT 8: 1,114

Fahrdynamische Charakterisierung

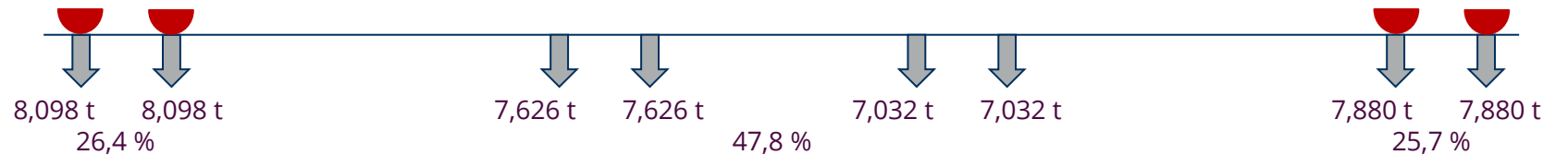
Masse und Trägheit: Massenverteilung

Leermasse: 61,3 t
 Höchstmasse: 87,7 t

Theorie



Praxis



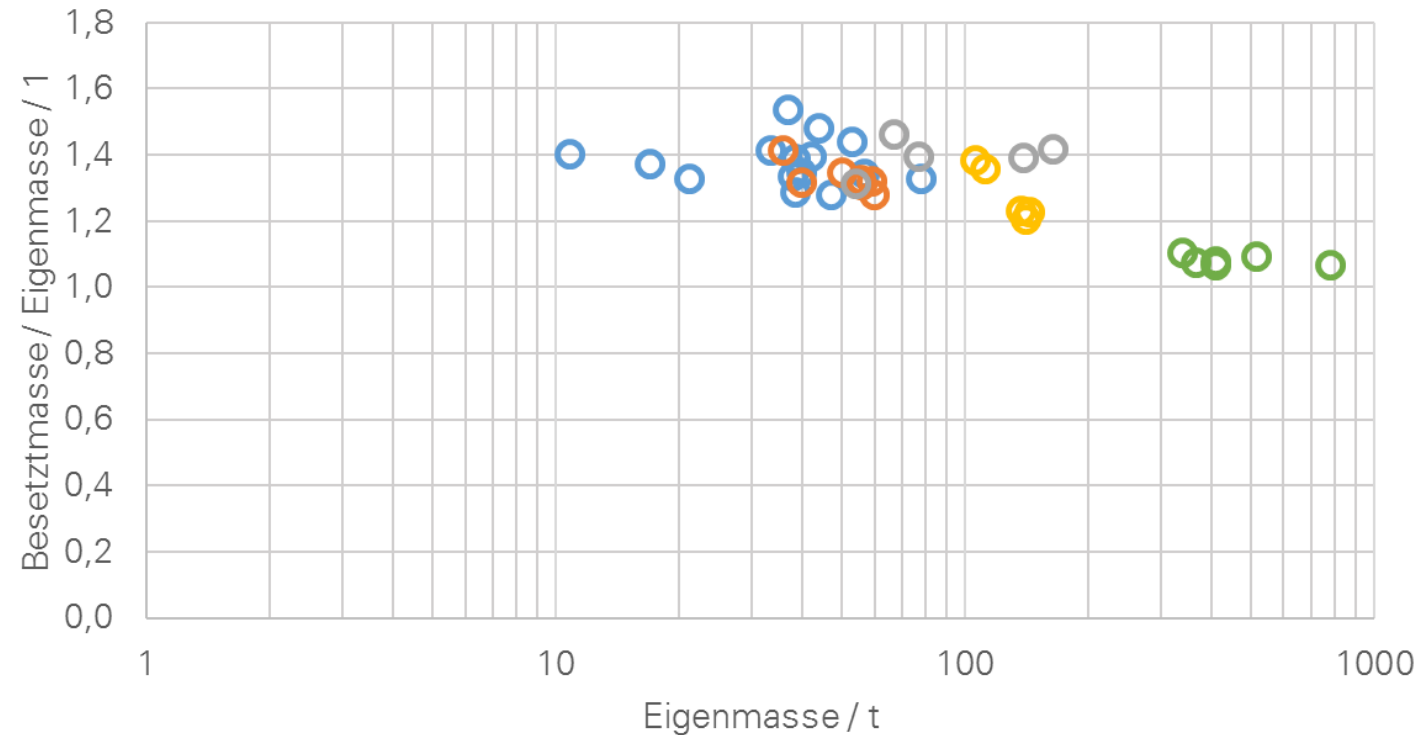
Legende:

-  angetriebene Radsätze
-  nicht angetriebene Radsätze

Abbildung: M. Kache

Fahrdynamische Charakterisierung

Masse und Trägheit



- Straßen- und Stadtbahnen
- Stadtbahnen
- U-Bahnen
- NV-Triebzüge
- FV-Triebzüge

Fahrzeuglängen 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)

