

# **FORMELSAMMLUNG ZUR VORLESUNG „FAHRDYNAMIK FÜR VERKEHRSINGENIEURE“ VERSION 3.1**

**Dr.-Ing. Martin Kache**

**3. April 2019**

## Vorwort

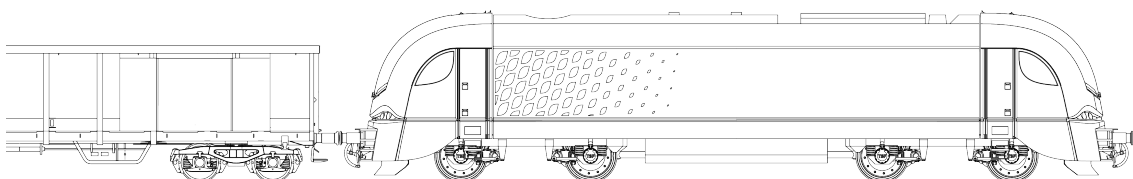
Diese Formelsammlung entstand im Rahmen der universitären Lehrveranstaltung „Fahrodynamik für Verkehrsingenieure“ an der TU Dresden und wird kontinuierlich weiterentwickelt. Sie soll die Studierenden bei der Lösung der vorlesungsbegleitenden Rechenübungen unterstützen und ihnen die Bearbeitung fahrdynamischer Fragestellungen im Rahmen von Praktika und studentischer Arbeiten ermöglichen. Ferner soll sie, falls das Interesse an diesem Fachgebiet geweckt werden konnte, auch zur Vertiefung des Stoffes und zum „Herumspielen“ einladen. Sie ist deshalb bewusst ausführlich gestaltet worden und soll auch nach einem gewissen zeitlichen Abstand zur Vorlesung einen raschen Wiedereinstieg in die Thematik ermöglichen.

Bei der Zusammenstellung der Formeln wurden verschiedene Quellen genutzt, bei denen es sich sowohl um fahrdynamische Standardwerke (Monographien) als auch um Zeitschriftenaufsätze oder am Lehrstuhl vorhandene Lehrmaterialien handelte. Ein individueller Nachweis der Herkunft einzelner Gleichungen erfolgt nicht, da es sich bei dieser Formelsammlung primär um ein Arbeitsmittel und weniger um eine wissenschaftliche Veröffentlichung handelt.

Für die Richtigkeit der Angaben in dieser Formelsammlung wird ausdrücklich weder Gewähr noch Haftung übernommen.

Der Autor nimmt Anmerkungen, Korrekturen oder Verbesserungsvorschläge dankbar per e-mail entgegen: [Martin.Kache@tu-dresden.de](mailto:Martin.Kache@tu-dresden.de)

Dresden, 3. April 2019



# INHALTSVERZEICHNIS

<b>0</b>	<b>Liste der verwendeten Formelzeichen</b>	<b>7</b>
<b>1</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>9</b>
1.1	Umrechnung SI-fremder Einheiten . . . . .	9
1.2	Fahrdynamische Grundgleichungen . . . . .	10
1.2.1	Allgemeine Bewegungsgleichung der Fahrbewegung . . . . .	10
1.2.2	Arbeit und Leistung . . . . .	11
1.3	Fahrdynamischer Massenfaktor . . . . .	11
1.4	Masse . . . . .	13
1.5	Spezifische Kräfte . . . . .	14
<b>2</b>	<b>Widerstandskräfte</b>	<b>15</b>
2.1	Fahrwiderstandskraft . . . . .	15
2.2	Streckenwiderstandskraft . . . . .	15
2.2.1	Neigungswiderstandskraft . . . . .	16
2.2.2	Krümmungswiderstandskraft/Bogenwiderstandskraft . . . . .	16
2.2.3	effektive Neigung, Massenband . . . . .	17

2.3	Fahrzeugwiderstandskraft von Schienenfahrzeugen . . . . .	18
2.3.1	Fahrzeugwiderstandskraft als Summe von Teilwiderstandskräften . . . . .	18
2.3.2	Grundwiderstand . . . . .	18
2.3.3	Luftwiderstandskraft . . . . .	20
2.3.4	Die empirische Fahrzeugwiderstandskraft . . . . .	23
2.3.5	Fahrzeugwiderstand von Hochgeschwindigkeitszügen . . . . .	24
2.3.6	Wagenzugwiderstand . . . . .	24
2.3.7	Anfahrwiderstand . . . . .	25
2.4	Fahrzeugwiderstände (Straßenfahrzeuge) . . . . .	25
<b>3</b>	<b>Antriebskräfte</b>	<b>27</b>
3.1	Zugkraft . . . . .	27
3.2	Zugkraft an der Kraftschlussgrenze . . . . .	27
3.3	Mechanische Übersetzung . . . . .	29
3.4	(Diesel-)Mechanischer Antrieb ohne hydrodynamische Elemente . . . . .	29
3.5	Dieselhydraulischer Antrieb . . . . .	30
3.5.1	Strömungsmaschinen . . . . .	30
3.6	Diselelektrischer Antrieb . . . . .	32
3.6.1	Berechnung Zugkraftcharakteristik . . . . .	32
<b>4</b>	<b>Kennlinienfelder</b>	<b>33</b>
<b>5</b>	<b>Leistungsbedarfsermittlung</b>	<b>35</b>
<b>6</b>	<b>Fahrdynamische Charakteristiken</b>	<b>37</b>

<b>7</b>	<b>Fahrzeitermittlung und Zugfahrtsimulation</b>	<b>39</b>
7.1	Kinematische Grundlagen . . . . .	39
7.1.1	Definitionen . . . . .	39
7.1.2	Gleichmäßig beschleunigte Bewegung . . . . .	40
7.1.3	Ungleichmäßig beschleunigte Bewegung . . . . .	40
7.2	Überschlagsrechnungen . . . . .	41
7.2.1	Trapezfahrschaulinie . . . . .	42
7.2.2	Dreiecksfahrschaulinie . . . . .	43
7.3	Abschätzung der Längsbeschleunigungen von Zugfahrten . . . . .	44
7.3.1	Varianten der mittleren Beschleunigung . . . . .	44
7.3.2	Näherung der mittleren Beschleunigungen für die verschiedenen Bewegungsphasen . . . . .	45
7.4	Klassische numerische Verfahren . . . . .	46
7.4.1	Zeitschrittverfahren . . . . .	46
7.4.2	Wegschrittverfahren . . . . .	46
7.4.3	Geschwindigkeitsschrittverfahren . . . . .	47
7.5	Beschleunigungsgrundfunktion . . . . .	47
7.6	Algorithmus nach Jentsch zur Integration bei ungleichmäßig beschleunigten Bewegungen . . . . .	49
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>A-1</b>
A.1	Fahrdynamische Massenfaktoren/Drehmassen ausgeführter Fahrzeuge . . . . .	A-2
A.2	Mittlere korrigierte Streckenneigung . . . . .	A-3
A.3	Gleichungsübersicht Krümmungswiderstandskraft (Bogenwiderstandskraft) . . . . .	A-4
A.4	Empirische Fahrzeugwiderstandsgleichungen für lokbespannte Züge	A-5

A.5	Baureihenspezifische Triebfahrzeugwiderstandsgleichungen . . . .	A-6
A.6	Fahrzeugwiderstandsgleichungen von Hochgeschwindigkeitszügen	A-7
A.7	Empirische Gleichungen für spezifische Wagenzugwiderstände . . . . .	A-8
A.8	Empirische Gleichungen zum Kraftschluss zwischen Rad und Schiene	A-10
A.9	Kraftschlussbeiwerte für Straßenfahrzeuge . . . . .	A-11

# 0 LISTE DER VERWENDETEN FORMELZEICHEN

Größe	Benennung
$a$	Beschleunigung (negativ: Verzögerung)
$a_m$	mittlere Beschleunigung
$a_{m,a}$	mittlere Beschleunigung (Beschleunigungsphase)
$a_{m,b}$	mittlere Bremsverzögerung
$b$	spezifischer Kraftstoffbedarf oder Verzögerung (Kontext beachten!)
$B$	Energiebedarf(-smenge)
$B_{DK}$	Diesekraftstoffbedarf(-smenge)
$E$	Energie
$E_S$	Energiebedarf ab Stromabnehmer
$h$	Höhe
$F$	absolute Kraft [kN]
$f$	spezifische Kraft, bezogen auf Gewichtskraft [N/kN]
$F_Z$	Zugkraft (Antriebskraft) am Zughaken
$F_T$	Zugkraft (Antriebskraft) an den Treibrädern
$F_W$	Widerstandskraft (allg.)
$F_{WS}$	Streckenwiderstandskraft
$F_{WF}$	Fahrzeugwiderstandskraft
$F_{WFT}$	Fahrzeugwiderstandskraft Triebfahrzeug
$F_{WFW}$	Fahrzeugwiderstandskraft Wagen(zug)
$F_{WFZ}$	Fahrzeugwiderstandskraft Zug
$F_B$	Bremskraft
$F_a$	Beschleunigungskraft
$F_G$	Gewichtskraft
$g$	Erdbeschleunigung
$H$	Heizwert des Kraftstoffes
$i$	Streckeneneigung / Übersetzungsverhältnis (Kontext beachten !)

Größe	Benennung
$J$	Massenträgheitsmoment
$l, (L)$	Länge (Bogen, Wegabschnitte, Zug)
$m$	Masse
$m_D$	Drehmasse
$n$	Drehzahl
$R$	Bogenradius
$r$	Radradius
$s, (S)$	Weg
$t, (T)$	Zeit, (Fahrzeit von Anfangspunkt bis Endpunkt)
$u$	Ruck
$v$	Geschwindigkeit
$x$	Wegkoordinate
$W$	Arbeit
$z$	Anzahl
$\alpha$	Überhöhungswinkel (Bogen), Neigungswinkel (Gerade)
$\beta$	Wagenkasten- <i>neigung(-swinkel) / Spurkranz-<i>neigungswinkel</i></i>
$\eta$	Wirkungsgrad
$\mu$	Reibwert <span style="margin-left: 100px;">oder</span> Drehmomentenwandlung <span style="border: 1px solid black; border-radius: 5px; padding: 2px;">Kontext beachten!</span>
$\tau$	Kraftschlussbeiwert zwischen Rad und Fahrbahn
$\vartheta$	Temperatur
$\xi$	fahrdynamischer Massenfaktor

**Beachte:** spezifische Größen werden mit Kleinbuchstaben bezeichnet, unter Beibehaltung der Indizes

# 1 GRUNDLAGEN

## 1.1 UMRECHNUNG SI-FREMDER EINHEITEN

### Kraft

$$1 \text{ kp} = 9,80665 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ lb}_f \text{ (pound-force)} = 4,448 \text{ N}$$

$$1 \text{ daN} = 10 \text{ N}$$

### Masse

$$1 \text{ lb} \text{ (pound)} = 0,454 \text{ kg}$$

$$1 \text{ t}_s = 907,2 \text{ kg}$$

### Länge

$$1 \text{ in} = 0,0254 \text{ m}$$

$$1 \text{ ft} = 0,3048 \text{ m}$$

$$1 \text{ mi} = 1609 \text{ m}$$

### Geschwindigkeit

$$1 \text{ mph} = 1,609 \text{ km/h}$$

$$1 \text{ km/h} = \frac{1}{3,6} \text{ m/s}$$

### Leistung

$$1 \text{ PS} = 0,7355 \text{ kW}$$

$$1 \text{ hp} = 0,7457 \text{ kW}$$

### Energie/Arbeit

$$1 \text{ J} = 1 \text{ Ws}$$

$$1 \text{ MJ} = \frac{1}{3,6} \text{ kWh}$$

### Druck

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 100 \text{ kPa}$$

## 1.2 FAHRDYNAMISCHE GRUNDGLEICHUNGEN

### 1.2.1 Allgemeine Bewegungsgleichung der Fahrbewegung

„Fahrdynamisches Grundgesetz“:

$$0 = -\xi m\ddot{x} + F_T - F_{WFT} - F_{WFW} - F_{WS} - F_B \quad (1.1)$$

#### Kräftegleichgewichte in den einzelnen Bewegungsabschnitten

**Anfahren:**

$$0 = -\xi m\ddot{x} + F_T(t, \tau) - F_{WFT}(s) - F_{WFW}(s) - F_{WS}(s) \quad (1.2)$$

**Beschleunigung:**

$$0 = -\xi m\ddot{x} + F_T(v, \tau) - F_{WFT}(v) - F_{WFW}(v) - F_{WS}(s) \quad (1.3)$$

**Beharrung:**

$$0 = F_T - F_{WFT} - F_{WFW} - F_{WS}(s), \quad \xi m\ddot{x} = 0 \quad (1.4)$$

**Auslauf:**

$$0 = -\xi m\ddot{x} - F_{WFT}(v) - F_{WFW}(v) - F_{WS}(s) \quad (1.5)$$

**Bremmung:**

$$0 = -\xi m\ddot{x} - F_B(v, t, \vartheta) - F_{WFT}(v) - F_{WFW}(v) - F_{WS}(s) \quad (1.6)$$

## 1.2.2 Arbeit und Leistung

$$W = \int_{s_1}^{s_2} F(s) ds \quad (1.7)$$

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{F ds}{dt} \rightarrow F \cdot v \quad \text{stationärer Fall} \quad (1.8)$$

## 1.3 FAHRDYNAMISCHER MASSENFAKTOR

$$\xi = 1 + \frac{E_{kin,rot}}{E_{kin,trans}} = 1 + \frac{\sum_{j=1}^m J}{\sum_{i=1}^n m \cdot r^2} \quad (1.9)$$

alternativ:

$$\xi = \frac{\sum_{i=1}^n m_i + \sum_{j=1}^m m_{Dj}}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad \text{mit: } m_D - \text{Drehmasse} \quad (1.10)$$

### Anhaltswerte für fahrdyn. Massenfaktor/Drehmassen

☞ Beispielwerte für konkrete Fahrzeuge: siehe **Anhang A.1**

Fahrzeug(verband)	$\xi$	$m_D$ / Radsatz
Schienenfahrzeuge		
dieselhydraulische Lokomotive	1,05...1,41	2,0...3,5 t
dieselelektrische Lokomotive	1,08...1,25	2,0...5,0 t
elektrische Lokomotive	1,10...1,28	3,0...5,0 t
Güterwagen (leer)	1,08...1,10	0,6 t

<b>Fahrzeugverband</b>	$\xi$	$m_D$ / Radsatz
Güterwagen (beladen)	1,03...1,04	0,6 t
Reisezugwagen	1,06...1,09	0,6 t
Zuschlag je Brems Scheibe	-	0,05 t
Reisezüge mit Lokomotive	1,1	-
leere Güterzüge mit Lokomotive	1,15	-
beladene Güterzüge mit Lokomotive	1,06	-
<b>Straßenfahrzeuge</b>		
Pkw (1. Gang)	1,27...1,50	-
Pkw (2. Gang)	1,10...1,20	-
Pkw (3. Gang)	1,08 ... 1,10	-
Pkw (4. Gang)	1,05... 1,08	-
Pkw (5. Gang)	1,03...1,05	-
Nfz (1. Gang)	2,80...3,10	-
Nfz (2. Gang)	1,70...1,40	-
Nfz (3. Gang)	1,20 ... 1,40	-
Nfz (4. Gang)	1,10... 1,20	-
Nfz (5. Gang)	1,05...1,10	-

Einfluss der **Zuladung** auf den Massenfaktor:

$$\xi_{bel} = 1 + (\xi_{leer} - 1) \cdot \frac{m_{leer}}{m_{bel}} \quad (1.11)$$

Berechnung des **Massenfaktors für Zugverbände**:

$$\xi_Z = \frac{\sum (\xi_T \cdot m_T) + \sum (\xi_W \cdot m_W)}{\sum m_T + \sum m_W} \quad (1.12)$$

Index T: Triebfahrzeuge, Index W: Wagen

## 1.4 MASSE

Fahrzeug- / Zugmasse:

$$m_Z = \sum m_T + \sum m_{W,leer} + \sum m_{zul} \quad (1.13)$$

Masse der Zuladung im Personenfernverkehr („Normale Zuladung“ gemäß DIN EN 15663):

$$\sum m_{zul} = z_P \cdot 0,08 \text{ t} \quad (1.14)$$

Masse der Zuladung im Personennahverkehr („Normale Zuladung“ gemäß DIN EN 15663):

$$\sum m_{zul} = z_P \cdot 0,07 \text{ t} \quad (1.15)$$

Reibmasse allgemein:

$$m_R = \sum m_{RS,T} \quad (1.16)$$

bei Annahme einer gleichmäßigen Massenverteilung auf alle Radsätze gilt:

$$m_R \approx m_T \cdot \frac{z_T}{z_T + z_L} \quad (1.17)$$

es bedeuten:

$m_T$	[t]	Triebfahrzeugmasse
$m_W$	[t]	Wagenzugmasse
$m_{bel}$	[t]	Masse des beladenen Fahrzeuges
$m_{zul}$	[t]	Masse der Zuladung
$m_{RS,T}$	[t]	Treibradsatzfahrmasse
$z_P$	[-]	Anzahl der Passagiere
$z_L$	[-]	Anzahl der Laufradsätze
$z_T$	[-]	Anzahl der Treibradsätze

## 1.5 SPEZIFISCHE KRÄFTE

„spezifisch“ → Bezug auf die Gewichtskraft:

$$f = \frac{F}{m \cdot g} \quad (1.18)$$

! Einheiten beachten !

f	[-]	spezifische Kraft
F	[ <b>kN</b> ]	absolute Kraft
m	[ <b>t</b> ]	Fahrzeugmasse
g	[m/s <sup>2</sup> ]	Erdbeschleunigung

## 2 WIDERSTANDSKRÄFTE

### 2.1 FAHRWIDERSTANDSKRAFT

$$F_W = F_{WF} + F_{WS} \quad (2.1)$$

$F_W$	[kN]	Fahrwiderstandskraft
$F_{WF}$	[kN]	Fahrzeugwiderstandskraft
$F_{WS}$	[kN]	Streckenwiderstandskraft

### 2.2 STRECKENWIDERSTANDSKRAFT

$$F_{WS} = f_{WS} m_Z g = F_i + F_k \quad (2.2)$$

$$f_{WS} = i + f_k \quad (2.3)$$

$F_i$	[kN]	Neigungswiderstandskraft
$F_k$	[kN]	Krümmungswiderstandskraft (auch: Bogenwiderstandskraft)
$f_{WS}$	[-]	spezifische Streckenwiderstandskraft
$f_k$	[-]	spezifische Krümmungswiderstandskraft
$i$	[-]	Strecken­neigung (zum Teil auch Angabe in ‰)

## 2.2.1 Neigungswiderstandskraft

$$F_i = m_z g i \quad \text{für } i \leq 100 \text{ ‰} \quad (2.4)$$

$$F_i = m g \sin \alpha \quad \text{für } i > 100 \text{ ‰} \quad (2.5)$$

$\alpha$  [°] Längsneigungswinkel des Gleises

Streckenlängsneigung

$$i = \frac{\Delta z}{\Delta x} \quad (2.6)$$

Steigung:  $\Delta z > 0 \rightarrow i > 0$

Gefälle:  $\Delta z < 0 \rightarrow i < 0$

 mittlerer (korrigierter) Streckenwiderstand: siehe **Anhang A.2**

## 2.2.2 Krümmungswiderstandskraft/Bogenwiderstandskraft

$$F_k = f_k m_z g \quad (2.7)$$

**Gleichung von Protopapadakis:**

$$f_k = \frac{\mu \cdot (0,72 \cdot b + 0,47 \cdot c)}{R} \quad (2.8)$$

$\mu$  [-] Gleitreibwert Radl-Schiene ( $\mu \approx 0,165$  (Winter)... $0,220$  (Sommer))

$R$  [m] Gleisbogenradius

$c$  [m] Radsatzabstand im Wagen/Drehgestell

$b$  [m] Laufkreisabstand (Normalspur:  $b = 1,5$  m)

 weitere empirische Gleichungen: siehe **Anhang A.3**

### 2.2.3 effektive Neigung, Massenband

$$F_i = m_z g i_e \quad (2.9)$$

- Modell: **Massenpunkt**

$$i_e = i_{km} \quad (2.10)$$

- Modell: **homogenes Massenband**

$$i_e = \frac{\sum(\Delta l_j \cdot i_j)}{l_z} \quad (2.11)$$

- Modell: **inhomogenes Massenband**

$$i_e = \frac{\sum(\Delta m_j \cdot i_j)}{m_z} \quad (2.12)$$

$\Delta l_j$	[m]	Länge des Zugteils, der im j-ten Streckenabschnitt steht
$\Delta m_j$	[t]	Anteil der Fahrzeug-/Zugmasse im j-ten Streckenabschnitt
$i_j$	[-]	Neigung im j-ten Abschnitt
$l_z$	[m]	gesamte Zuglänge
$m_z$	[t]	Gesamtmasse des Zuges

## 2.3 FAHRZEUGWIDERSTANDSKRAFT VON SCHIENENFAHRZEUGEN

### 2.3.1 Fahrzeugwiderstandskraft als Summe von Teilwiderstandskräften

$$F_{WF} = F_{W0} + F_{WL} \quad (2.13)$$

$F_{WF}$	[kN]	Fahrzeugwiderstandskraft
$F_{W0}$	[kN]	Grundwiderstandskraft
$F_{WL}$	[kN]	aerodynamische Widerstandskraft/Luftwiderstandskraft

### 2.3.2 Grundwiderstand

$$F_{W0} = mgf_{W0} \quad (2.14)$$

$$f_{W0} = \frac{f_{W0T} \cdot m_T + f_{W0W} \cdot m_W}{m_T + m_W} \quad (2.15)$$

Richtwerte für spezifische Grundwiderstandskraft bei Streckenfahrt:

- Lokomotiven allg.:  $f_{W0T} = 0,0025 \dots 0,0050$ ,
- ICE-Triebköpfe:  $f_{W0T} = 0,0013$ , ICE-Mittelwagen:  $f_{W0W} = 0,0006$ ,
- Reisezugwagen:  $f_{W0W} = 0,0012 \dots 0,0017$ ,
- Güterwagen - beladen:  $f_{W0W} = 0,0012 \dots 0,0017$ , leer:  $f_{W0W} = 0,0022 \dots 0,0028$ ,
- Züge allg.:  $f_{W0} = 0,0015 \dots 0,0025$

$$f_{W0} = f_{WR} + f_{WGI} + f_{WLa} \quad (2.16)$$

$f_{WGI}$	[kN]	spezifische Gleitwiderstandskraft
$f_{WLa}$	[kN]	spezifische Lagerwiderstandskraft
$f_{WR}$	[kN]	spezifische Rollwiderstandskraft

### Spezifische Rollwiderstandskraft

$$f_{WR} = 0,00046 + 0,0006 \left( \frac{v}{100} \right)^2 \quad (2.17)$$

**Spezifische Gleitwiderstandskraft** Richtwerte für versch. Fahrzeugtypen:

- Wagen:  $f_{WGI} = 0,0005 \dots 0,001$
- dieselhydraulische Lok:  $f_{WGI} = 0,002 \dots 0,0025$
- BR 143: (Versuche):  $f_{WGI} = 0,0015$
- BR 346 (Stangenantrieb !):  $f_{WGI} = 0,003 \dots 0,004$

### Lagerwiderstandskraft

- Gleitlager:  $f_{WLa} = 0,0006$
- Wälzlager:  $f_{WLa} = 0,0002$

### 2.3.3 Luftwiderstandskraft

- allgemeine Gleichung für Züge:

$$F_{WLZ} = \frac{1}{2} \cdot \rho_L \cdot (c_{w,T} + c_{w,W1} + (n-2) \cdot c_{w,Wm} + c_{w,Wn}) \cdot A_{norm} \cdot (v + \Delta v)^2 \quad (2.18)$$

- Triebzugformel (Zusammenfassung Lokomotive und letzter Wagen)

$$F_{WLZ} = \frac{1}{2} \cdot \rho_L \cdot (c_{w,Te} + n \cdot c_{w,Wm}) \cdot A_{norm} \cdot v^2 \quad (2.19)$$

- vereinfacht gilt:

$$c_{w,Te} = c_{w,T} + c_{w,Wn} \quad (2.20)$$

es bedeuten:

$A_{norm}$	[m <sup>2</sup> ]	normierte Fahrzeugquerschnittsfläche ( $A_{norm} = 10 \text{ m}^2$ )
$F_{WLZ}$	[N]	Luftwiderstandskraft des Zuges
$c_{w,T}$	[-]	Luftwiderstandsbeiwert der Lok vor dem Zug
$c_{w,Te}$	[-]	Luftwiderstandsbeiwert der einzeln fahrenden Lok
$c_{w,W1}$	[-]	Luftwiderstandsbeiwert erster Wagen
$c_{w,Wm}$	[-]	Luftwiderstandsbeiwert der Mittelwagen
$c_{w,Wn}$	[-]	Luftwiderstandsbeiwert des letzten Wagens
$n$	[-]	Anzahl der Wagen
$v$	[m/s]	Fahrgeschwindigkeit
$\Delta v$	[m/s]	Gegenwindzuschlag ( $\Delta v = 2, 8 \dots 5, 6 \text{ m/s}$ )
$\rho_L$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Luftdichte ( $\rho_{norm} = 1, 225 \text{ kg/m}^3$ )

– Luftdichte von trockener Luft

$$\rho_L = \frac{p_L}{287 \text{ kJ/kgK} \cdot T} \quad (2.21)$$

- \* Wertebereich Luftdruck:  $p_L \approx 99000 \dots 103000 \text{ Pa}$
- \* mittlerer Luftdruck/Normluftdruck:  $p_L = 101325 \text{ Pa}$
- \* Wertebereich Lufttemperatur:  $T = -40 \dots +40 \text{ °C} = 233,15 \dots 313,15 \text{ K}$
- \* Wetterdaten und crash-Kurs Meteorologie: [www.weiden-wetter.de](http://www.weiden-wetter.de)

- Luftwiderstandsbeiwerte von **Lokomotiven und Triebwagen/Triebzügen**

	$c_{w,Te}$	$c_{w,T}$	$(c_{w,Te} + n \cdot c_{w,Wm})$
4-achs. E-Lok, „normal“	0,80		
4-achs. E-Lok, windschnittig	0,45		
6-achs. E-Lok, „normal“	1,10		
6-achs. E-Lok, windschnittig	0,55		
4-achs. Diesellok	0,60		
6-achs. Diesellok	1,10		
Diesellok Mittelführerstand	1,00		
BR 103	0,50	0,3	
BR 112	0,54		
BR 110	0,61		
BR 611			0,92

- Luftwiderstandsbeiwerte von **Wagen** (als Folgewagen)

	$c_{w,Wm}$
26,4 m - Reisezugwagen der DB AG	0,11
Mittelwagen ICE	0,08
Endwagen ( $c_{w,Wn}$ )	0,30
Güterwagen allg.	0,15...0,30
offener Güterwagen Eaos, leer	0,409
offener Güterwagen Eaos, beladen	0,141
Flachwagen, leer + ohne Rungen	0,165
Flachwagen, leer + mit Rungen	0,236
Flachwagen mit 1 Container mittig	0,452
Flachwagen mit 2 Containern mittig	0,276
Flachwagen mit 3 Containern	0,218
Flachwagen mit 2 Containern außen	0,392

## Luftwiderstandskraft im Tunnel

$$F_{WLZ, Tu} = \theta_{Tu} F_{WLZ} \quad (2.22)$$

Ermittlung  $F_{WLZ}$ : siehe Gleichung 2.18

### Wann sollte der Tunnelwiderstand berücksichtigt werden?

$F_{WLZ, Tu} > F_{WLZ}$  wenn:

$l_{Tu} > 500m$  **und**  $l_{Tu} > l_Z$

- **Tunnelfaktor**  $\theta_{Tu}$  abhängig von:
  - Tunnellänge  $l_{Tu}$
  - Versperrungsgrad  $k_V = \frac{A_{norm}}{A_{Tu}}$
  - Rauheit der Tunnelauskleidung
  - Zuglänge  $l_Z$
  - Oberfläche des Zuges
- Richtwerte für  $\theta_{Tu}$ :

Reisezüge				Güterzüge			
$l_{Tu}$	$k_V$	$l_Z$	$\theta_{Tu}$	$l_{Tu}$	$k_V$	$l_Z$	$\theta_{Tu}$
15,0 km	0,25	391 m	1,8	15,0 km	0,25	487 m	1,7
8,1 km	0,24	391 m	1,6	8,1 km	0,24	487 m	1,4
8,6 km	0,39	391 m	2,9	8,6 km	0,39	487 m	2,7
5,5 km	0,13	114 m	1,4				

## 2.3.4 Die empirische Fahrzeugwiderstandskraft

$$F_{WFZ} = F_{WFT} + F_{WFW} = F_{WFT} + f_{WFW} m_W g \quad (2.23)$$

☞ Empirische Gleichungen für die summierten Fahrzeugwiderstände lokbespannter Züge: siehe **Anhang A.4**

## Fahrzeugwiderstandskraft der Lokomotiven, Triebwagen und Triebzüge

### Allgemeine Gleichung für den Triebfahrzeugwiderstand

$$F_{WFT} = A + B \cdot \frac{v}{100} + C \cdot \left( \frac{v + \Delta v}{100} \right)^2 \quad (2.24)$$

☞ Empirische Fahrzeugwiderstandsgleichungen für ausgeführte Triebfahrzeuge enthält **Anhang A.5**.

Falls die konkrete Gleichung für den Triebfahrzeugwiderstand eines Fahrzeuges unbekannt ist, kann unter Nutzung der untenstehend tabellierten Erfahrungswerte mit Gleichung 2.25 gerechnet werden.

$$F_{WFT} = \alpha_T \cdot m_T \cdot g + C \cdot \left( \frac{v + \Delta v}{100} \right)^2 \quad (2.25)$$

$F_{WFT}$	[kN]	Triebfahrzeugwiderstandskraft
$m_T$	[t]	Triebfahrzeugmasse
$v$	[km/h]	Fahrgeschwindigkeit

- einzusetzende Werte Faktor  $\alpha_T$ :

Tfz-Typ	$\alpha_T$
4-achs. Diesellok	0,0022-0,0035
6-achs. Diesellok	0,0035-0,0045
4-achs. E-Lok	0,0030-0,0040
6-achs. E-Lok	0,0035-0,0050

Tfz-Typ	$\alpha_T$
E-Lok für HGV	0,0020-0,0030
Lok mit Stangenantrieb	0,0045-0,0050
Lok mit Hohlwellenantrieb	0,0050
Lok mit Tatzlagerantrieb	0,0045
Lok mit Kardantrieb	0,0035

- einzusetzende Werte Faktor C:

Merkmal	C
4-achs., eckige Kopfform	3,5-4,5 kN
4-achs., runde Kopfform	2,5-3,5 kN
6-achs., eckige Kopfform	4,0-5,0 kN
6-achs., runde Kopfform	3,0-4,0 kN
Stromlinienform	2,0-2,5 kN
Mittelführerstand	5-10 kN
Kleinlok	4-5 kN
Zuschlag Stromabnehmer	1 kN

- einzusetzende Werte  $\Delta v$ : 10-20km/h

### 2.3.5 Fahrzeugwiderstand von Hochgeschwindigkeitszügen

☞ Eine Zusammenstellung von Fahrzeugwiderstandsgleichung von Hochgeschwindigkeitszügen enthält **Anhang A.6**.

### 2.3.6 Wagenzugwiderstand

#### Allgemeine Gleichung für den Wagenzugwiderstand

$$F_{WFW} = f_{WFW} m_{WG} = \left[ \alpha + \beta \cdot \frac{v}{100} + \gamma \cdot \left( \frac{v}{100} \right)^2 \right] m_{WG} \quad (2.26)$$

☞ Empirische Gleichungen für den spezifischen Wagenzugwiderstand verschiedener Züge enthält **Anhang A.7**.

### 2.3.7 Anfahrwiderstand

- Formel der DR (nach Wende) für  $i \geq 0,003$ :

$$f_{WFA} = 0,006 + 0,3i \quad (2.27)$$

## 2.4 FAHRZEUGWIDERSTÄNDE (STRASSENFAHRZEUGE)

### Roll- und Walkwiderstand

$$F_{WR} = f_{WR} \cdot m_F \cdot g \cdot \cos\alpha \quad (2.28)$$

- in guter Näherung gilt:

$$F_{WR} = f_{WR} \cdot m_F \cdot g \quad (2.29)$$

$F_{WR}$	[kN]	Roll- und Walkwiderstandskraft
$f_{WR}$	[-]	Roll- und Walkwiderstandskonstante
$m_F$	[t]	Fahrzeugmasse
$\alpha$	[°]	Steigungswinkel

- Anhaltspunkte Fahrzeugmassen (Angaben in t)

Klasse	leer	beladen
Pkw	1,1...2,1	1,5...2,6
Geländewagen	2,1...2,4	2,7...2,9
Kleintransporter	1,8...2,3	2,8...5,0
Lkw	-	15-41

- Roll- und Walkwiderstandskonstante für Kfz  $f_{WR,Kfz}$  ( $v \leq 100$  km/h,  $f_{WR} \approx \text{const.}$ , Zuschlag bei ausgefahrener Straße: 50...100 %):

Asphaltstraße	0,010
Betonfahrbahn	0,011... 0,014
Kopfsteinpflaster	0,015...0,030
schlechte, ausgefahrene Straße	0,035
Erdweg	0,045...0,100
loser Sand	0,150...0,300

- lineare Näherung des spezifischen Rollwiderstandes nach Wong für  $v \leq 128$  km/h auf Betonfahrbahn:

$$f_{WR} = 0,01 \cdot \left(1 + \frac{v}{100}\right) \quad (2.30)$$

## Luftwiderstand

$$F_{WL} = c_W \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot A \cdot (v + v_W)^2 \quad (2.31)$$

$F_{WL}$	[N]	Luftwiderstandskraft
$c_W$	[-]	Luftwiderstandsbeiwert (0,2...0,5)
$\rho_L$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Luftdichte <sup>1</sup> ( $\rho_L \approx 1,2$ kg/m <sup>3</sup> )
$A$	[m <sup>2</sup> ]	Fahrzeugquerschnittsfläche
$v$	[m/s]	Fahrzeuggeschwindigkeit
$v_W$	[m/s]	Windgeschwindigkeit

- Fahrzeugquerschnittsflächen - näherungsweise gilt:

$$A \approx 0,9 \cdot H \cdot b_F \quad (2.32)$$

Pkw	$\approx 1,5 \dots 2,5$ m <sup>2</sup> ,	typisch: $A = 1,9$ m <sup>2</sup>
Lkw	$\approx 4,0 \dots 9,0$ m <sup>2</sup> ,	typisch: $A = 8,9 \dots 9,7$ m <sup>2</sup>

$H$	[m]	Fahrzeughöhe
$b_F$	[m]	Fahrzeugbreite

- Anhaltspunkte  $c_W$ -Werte

Pkw	0,25...0,40
Bus (konventionell)	0,50...0,55
Bus (optimiert, z.B. Neoplan Starliner)	0,35...0,37
Lkw	0,40...0,90

<sup>1</sup> zur Abhängigkeit der Luftdichte von Temperatur und Druck: siehe Gl. 2.21

# 3 ANTRIEBSKRÄFTE

## 3.1 ZUGKRAFT

für Lokomotiven gilt:

$$F_Z = F_T - F_{WFT} \quad (3.1)$$

$F_Z$	[kN]	Zughakenzugkraft
$F_T$	[kN]	Treibradzugkraft
$F_{WFT}$	[kN]	Triebfahrzeugwiderstandskraft

## 3.2 ZUGKRAFT AN DER KRAFTSCHLUSSGRENZE

$$F_{T,max} = m_R \cdot g \cdot \tau \quad (3.2)$$

$F_{T,max}$	[kN]	Treibradzugkraft an der Kraftschlussgrenze
$m_R$	[kN]	Reibungsmasse (Fahrzeugmassenanteil auf angetriebenen Radsätzen)
$\tau$	[kN]	Kraftschlussbeiwert

## Kraftschlussbeiwert



### GLEICHUNGEN ZUM KRAFTSCHLUSSBEIWERT

Es wurden in der Vergangenheit von verschiedenen Bahnverwaltungen empirische Gleichungen (siehe unten und **Anhang A.8**) für den Zusammenhang  $\tau(v)$  aus Versuchen gewonnen. Die Versuche liegen einige Jahrzehnte zurück und wurden mit Fahrzeugen durchgeführt, die dem damaligen Stand der Technik entsprachen. Das Verhalten der heutigen schlupfgeregelten Triebfahrzeuge mit Drehstromantriebstechnik wird deshalb von den im Folgenden aufgeführten Gleichungen nur sehr unzureichend reproduziert.

#### Kraftschluss Rad-Schiene nach **Curtius-Kniffler**

$$\tau = 0,161 + \frac{7,5}{44 + v[\text{km/h}]} \quad (3.3)$$

modifizierte Formel von Curtius-Kniffler für Fahrzeuge mit Drehstromantriebstechnik (nach Wende)

$$\tau = 1,3 \dots 1,5 \cdot \left( 0,161 + \frac{7,5}{44 + v[\text{km/h}]} \right) \quad (3.4)$$

#### Anhaltswerte für Kraftschlussbeiwerte Rad-Schiene im Anfahrpunkt

Fall	$\tau$
trockenes Gleis, mit Sanden	0,4
trockenes Gleis, ohne Sanden	0,3
Idealbedingungen (ohne Sanden)	0,40...0,42
<b>„Standardwert“</b>	0,30...0,33
sicher erreichbar (Streckenbetrieb)	0,25...0,30
Rangieren/Grubenbahn/Werkbahn	0,15...0,20



Vergleichswerte für Straßenfahrzeuge: siehe **Anhang A.9**

### 3.3 MECHANISCHE ÜBERSETZUNG

- Übersetzungsverhältnis Zahnradgetriebe:

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{n_{an}}{n_{ab}} = \frac{z_2}{z_1} \quad (3.5)$$

$n_1$	[1/min]	Antriebsdrehzahl
$n_2$	[1/min]	Abtriebsdrehzahl
$z_1$	[1]	Zähnezahl des antreibenden Zahnrades
$z_2$	[1]	Zähnezahl des Zahnrades am Abtrieb

- Drehmomentübersetzung Zahnradgetriebe:

$$i = \frac{M_2}{M_1} = \frac{M_{ab}}{M_{an}} \quad (3.6)$$

### 3.4 (DIESEL-)MECHANISCHER ANTRIEB OHNE HYDRODYNAMISCHE ELEMENTE

#### Parameter

$v$	[m/s]	Fahrzeuggeschwindigkeit
$\eta_{SG}$	[-]	Wirkungsgrad des Schaltgetriebes
$\eta_{RG}$	[-]	Wirkungsgrad des Radsatzgetriebes
$i_{SG}$	[-]	Übersetzung des Schaltgetriebes
$i_{RG}$	[-]	Übersetzung des Radsatzgetriebes
$\psi$	[-]	Hilfsleistungsfaktor ( $\psi = 0,03 \dots 0,07$ )
$M_M$	[Nm]	Motordrehmoment
$M_{MS}$	[Nm]	Motorschleppmoment
$n_M$	[s <sup>-1</sup> ]	Motordrehzahl
$r_T$	[m]	Treibrad-Radius (Pkw: 0,3 m / Lkw: 0,52 m)

- Treibkraft am Rad(satz)

$$F_T = \frac{1}{r_T} \cdot \eta_{SG} \cdot \eta_{RG} \cdot i_{SG} \cdot i_{RG} \cdot M_M \cdot (1 - \psi) \quad (3.7)$$

- Motorbremskraft am Rad(satz)

$$F_{B,R} = \frac{i_{SG} \cdot i_{RG} \cdot M_{MS}}{\eta_{SG} \cdot \eta_{RG} \cdot r_T} \quad (3.8)$$

- Fahrzeuggeschwindigkeit

$$v = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_T}{i_{SG} \cdot i_{RG}} \cdot n_M \quad (3.9)$$

- Fahrzeuggeschwindigkeit (**zugeschnittene Größengleichung**):

$$v = \frac{3 \cdot \pi \cdot r_T}{25 \cdot i_{SG} \cdot i_{RG}} \cdot n_M \quad (3.10)$$

– mit:

$v$  [km/h] Fahrzeuggeschwindigkeit  
 $n_M$  [min<sup>-1</sup>] Motordrehzahl

## 3.5 DIESELHYDRAULISCHER ANTRIEB

### 3.5.1 Strömungsmaschinen

- Drehmomentenverhältnis

$$\mu = \frac{M_{Tu}}{M_P} \quad (3.11)$$

- Drehzahlverhältnis

$$\nu = \frac{n_{Tu}}{n_P} \quad (3.12)$$

- hydraulischer Wirkungsgrad

- Wandler:

$$\eta_h = \frac{P_{Tu}}{P_P} = \frac{M_{Tu}}{M_P} \cdot \frac{n_{Tu}}{n_P} \cdot \frac{2\pi}{2\pi} = \mu \cdot \nu \quad (3.13)$$

- Kupplung ( $M_P = M_{Tu}$ ):

$$\eta_h = \frac{P_{Tu}}{P_P} = \frac{M_{Tu}}{M_P} \cdot \frac{n_{Tu}}{n_P} \cdot \frac{2\pi}{2\pi} = \nu \quad (3.14)$$

- Leistungszahl

$$\lambda = \frac{M_P}{\rho \cdot D_P^5 \cdot 4\pi^2 n_P^2} \quad (3.15)$$

- es bedeuten:

$M_{Tu}$	[Nm]	Drehmoment am Turbinenrad
$M_P$	[Nm]	Drehmoment am Pumpenrad
$n_{Tu}$	[ $min^{-1}$ ]	Drehzahl des Turbinenrades
$n_P$	[ $min^{-1}$ ]	Drehzahl des Pumpenrades
$P_{Tu}$	[Nm]	Leistung am Turbinenrad
$P_P$	[Nm]	Leistung am Pumpenrad
$\rho$	[ $kg/m^3$ ]	Dichte des Hydrauliköles
$D_P$	[m]	Profildurchmesser

## 3.6 DIESELELEKTRISCHER ANTRIEB

- Behelf nach Wende auf statistischer Basis:

$$F_T = \frac{(1 - \psi) \cdot P_{DM}}{v} \cdot \eta_{Lü} \quad (3.16)$$

- für konventionelle Leistungsübertragung (Lü) mit **Gleichstromtechnik** gilt:

$$\eta_{Lü} = 0,94 \cdot \left(1 - e^{-7 \cdot \frac{v}{v_{max}}}\right) + 0,097 - 0,24 \cdot \frac{v}{v_{max}} \quad (3.17)$$

$$- 0,077 \cdot \left[1 + 1,55 \cdot \left(1 - \frac{v}{v_{max}}\right)\right] \cdot \left(1 - \frac{P_{DM}}{P_{DM,max}}\right)$$

- für Leistungsübertragung (Lü) mit **Drehstromantriebstechnik** gilt:

$$\eta_{Lü} = 0,921 \left(1 - e^{-\frac{12 \cdot v}{v_{max}}}\right) + 0,022 - \frac{0,088 \cdot v}{v_{max}} - 0,1 \left(1 - \frac{P_{DM}}{P_{DM,max}}\right) \quad (3.18)$$

- mit:

$\eta_{Lü}$  [-] Wirkungsgrad der Leistungsübertragung  
 $P_{DM}$  [-] Dieselmotorleistung

### 3.6.1 Berechnung Zugkraftcharakteristik

Gegeben ist die Drehmoment-Charakteristik  $M_M(n_M)$  der Fahrmotoren. Dann gilt:

$$v = \frac{2 \cdot \pi n_M \cdot r_{min}}{i_{RG}} \quad (3.19)$$

$$F_T = \frac{i_{RG} \cdot \eta_{RG} \cdot z_M}{r} \cdot M_M \quad (3.20)$$

$r_{min}$  Minimaler Treibradsatzradius  
 $i_{RG}$  Übersetzung des Radsatzgetriebes  
 $\eta_{RG}$  Wirkungsgrad des Radsatzgetriebes  
 $z_M$  Anzahl der Fahrmotoren  
 $M_M$  Motordrehmoment  
 $n_M$  Motordrehzahl

## 4 KENNLINIENFELDER

- Triebfahrzeugwirkungsgrad Dieselfahrzeuge:

$$\eta_{Tfz} = \frac{1000 \cdot F_z \cdot v}{b_{DK,t} \cdot H} \quad (4.1)$$

- Triebfahrzeugwirkungsgrad Ellok:

$$\eta_{Tfz} = \frac{F_z \cdot v}{P_A \cdot 3,6} \quad (4.2)$$

$F_z$	[kN]	Zugkraft am Zughaken
$b_{DK,t}$	[kg/h]	zeitbezogener Kraftstoffbedarf
H	[kJ/kg]	Heizwert des Dieselkraftstoffes ( $H_{DK} = 42100$ kJ/kg)
$P_A$	[kW]	aufgenommene Leistung am Stromabnehmer

- wegbezogene elektrische Zugförderungsarbeit:

$$W_s = \frac{P_A}{v} \quad [kWh/km] \quad (4.3)$$



## 5 LEISTUNGSBEDARFSERMITTLUNG

- **Dieseltriebfahrzeuge:** *Traktionsleistungsbedarf* des Dieselmotors:

$$P_{DM,T} = v \cdot \frac{F_{WFT} + m_W \cdot g \cdot f_{WFW} + (m_T + m_W) \cdot g \cdot (f_a + f_{WS})}{3,6 \cdot \eta_{Lü} \cdot (1 - \psi)} \quad (5.1)$$

- Dieseltriebfahrzeuge im Reisezugverkehr - Leistungsbedarf des Dieselmotors:

$$P_{DM} = P_{DM,T} + z_A \cdot p_{ZSS} \quad (5.2)$$

- **elektrische Triebfahrzeuge:** Leistungsbedarf *je Fahrmotor*:

$$P_{FM} = v \cdot \frac{F_{WFT} + m_W \cdot g \cdot f_{WFW} + (m_T + m_W) \cdot g \cdot (f_a + f_{WS})}{3,6 \cdot z_{FM} \cdot \eta_{RS}} \quad (5.3)$$

mit:

$f_a$	[-]	spezifische Beschleunigungskraft/-reserve
$f_{WFW}$	[-]	spezifische Wagenzugwiderstandskraft
$f_{WS}$	[-]	spezifische Streckenwiderstandskraft
$F_{WFT}$	[kN]	Triebfahrzeugwiderstandskraft
$m_T$	[t]	Triebfahrzeugmasse

$m_W$	[t]	Wagenzugmasse
$P_{DM,T}$	[kW]	Traktionsleistung des Dieselmotors
$P_{FM}$	[kW]	Leistung je Fahrmotor
$p_{ZSS}$	[kW]	Hilfsleistungsbedarf <sup>1</sup> je Wagenradsatz
$v$	[km/h]	Geschwindigkeit
$z_A$	[-]	Anzahl der Wagenradsätze
$z_{FM}$	[-]	Anzahl der Fahrmotoren
$\eta_{Lü}$	[-]	Wirkungsgrad der Leistungsübertragung
$\eta_{RS}$	[-]	Wirkungsgrad des Radsatzantriebes
$\psi$	[-]	Hilfsleistungsfaktor

#### ANHALTSWERTE FÜR DIE SPEZIFISCHE BESCHLEUNIGUNGSRESERVE

Güterzüge:	$f_a(v_{max}) = 0,0010$
Reisezüge Fernverkehr:	$f_a(v_{max}) = 0,0025$
Reisezüge Nahverkehr:	$f_a(v_{max}) = 0,0025 \dots 0,0045$

#### ANHALTSWERTE LEISTUNGSÜBERTRAGUNGSWIRKUNGSGRAD

Dieselhydraulik:	$\eta_{Lü} \leq 0,8$
Dieselelektrik:	$\eta_{Lü} \leq 0,85$

#### ANHALTSWERTE HILFSLEISTUNGSBEDARF

Reisezugwagen (Altbau)	$p_{ZSS} \approx 6 \dots 8 \text{ kW}$
Reisezugwagen (Neubau)	$p_{ZSS} \approx 12 \dots 14 \text{ kW}$
Doppelstockwagen	$p_{ZSS} \approx 16 \dots 18 \text{ kW}$

<sup>1</sup>ZSS - Zugsammelschiene (zentrale elektrische Energieversorgung des Wagenzuges)

## 6 FAHRDYNAMISCHE CHARAKTERISTIKEN

### Steigfähigkeit

$$i = \frac{F_Z(v) - F_{WFW}(v) - \xi_Z m_Z a}{m_Z g} \quad (6.1)$$

Anmerkung:  $a$  wird in der Regel mit dem Wert 0 belegt

### Beschleunigungsvermögen

$$a = \frac{F_Z(v) - F_{WFW}(v) - i m_Z g}{\xi_Z m_Z} \quad (6.2)$$

### Spezifischer Zugkraftüberschuß

$$f_a[N/t] = \frac{F_Z(v)[N] - F_{WFW}(v)[N]}{m_Z[t]} - i[\%]g \quad (6.3)$$

### Schleppvermögen

$$m_W = \frac{F_Z(v) - m_T(a\xi_Z + gi)}{a\xi_Z + g(f_{WFW} + i)} \quad (6.4)$$



# 7 FAHRZEITERMITTLUNG UND ZUGFAHRTSIMULATION

## 7.1 KINEMATISCHE GRUNDLAGEN

### 7.1.1 Definitionen

- Geschwindigkeit

$$v = \frac{dx}{dt} = \dot{x} = \dot{s} \quad (7.1)$$

- Beschleunigung

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = \ddot{x} = \ddot{s} \quad (7.2)$$

- Ruck

$$u = \frac{da}{dt} = \dot{a} = \ddot{v} = \ddot{\ddot{x}} \quad (7.3)$$

## 7.1.2 Gleichmäßig beschleunigte Bewegung

$$\frac{dv}{dt} = a = \text{const}$$
$$v(t) = at + v_0 \quad (7.4)$$

$$x(t) = \frac{a}{2}t^2 + v_0t + x_0 \quad (7.5)$$

Zeit ohne Bedeutung oder unbekannt: → **Umrechnung von v(t) in v(s):**

$$v = \frac{dx}{dt} \rightarrow dt = \frac{dx}{v} \quad (7.6)$$

$$a = \frac{dv}{dt} \rightarrow dt = \frac{dv}{a} \quad (7.7)$$

$$v(x) = \sqrt{2a(x - x_0) + v_0^2} \quad (7.8)$$

## 7.1.3 Ungleichmäßig beschleunigte Bewegung

- wichtigste Fälle:

### 1. zeitabhängige Beschleunigungsfunktion

$$a = f(t) \quad (7.9)$$

$$v = \int a dt = \int f(t) dt \quad (7.10)$$

$$x = \int v dt \quad (7.11)$$

### 2. geschwindigkeitsabhängige Beschleunigungsfunktion

$$a = f(v) = \frac{dv}{dt} \quad (7.12)$$

$$t = \int \frac{dv}{f(v)} \quad (7.13)$$

$$x = \int \frac{v dv}{f(v)} \quad (7.14)$$

### 3. **wegabhängige** Beschleunigungsfunktion

$$a = f(x) \quad (7.15)$$

wegen:

$$a = \frac{dv}{dt}$$

und

$$v = \frac{dx}{dt}$$

gilt:

$$v dv = a dx = f(x) dx \quad (7.16)$$

$$\frac{1}{2} (v^2 - v_0^2) = \int f(x) dx \quad (7.17)$$

Integration führt auf eine Funktion  $v(x)$ , Zeit kann dann durch Umstellung und Integration ermittelt werden:

$$t = \int \frac{1}{v(x)} dx \quad (7.18)$$

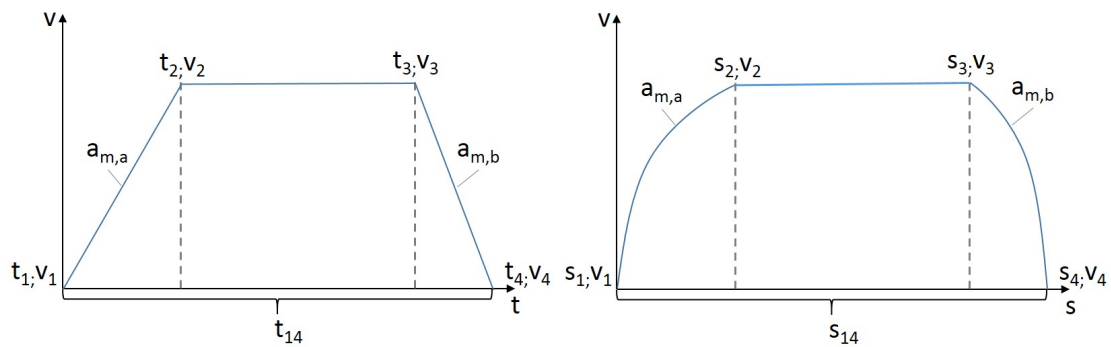
## 7.2 ÜBERSCHLAGSRECHNUNGEN

$$t = \int_{v_1}^{v_2} \frac{1}{a(v)} dv \approx \int_{v_1}^{v_2} \frac{1}{a_m} dv \approx \frac{v_2 - v_1}{a_m} \quad (7.19)$$

und:

$$s = \int_{v_1}^{v_2} \frac{v}{a(v)} dv \approx \int_{v_1}^{v_2} \frac{v}{a_m} dv \approx \frac{v_2^2 - v_1^2}{2a_m} \quad (7.20)$$

## 7.2.1 Trapezfahrtschaulinie



Beschleunigung:

$$t_{12} = \frac{v_2 - v_1}{a_{m,a}} \quad (7.21)$$

$$s_{12} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2a_{m,a}} \quad (7.22)$$

Beharrung:

$$t_{23} = \frac{s_{23}}{v_2} \quad (7.23)$$

$$s_{23} = s_{14} - (s_{12} + s_{34}) \quad (7.24)$$

Bremmung:

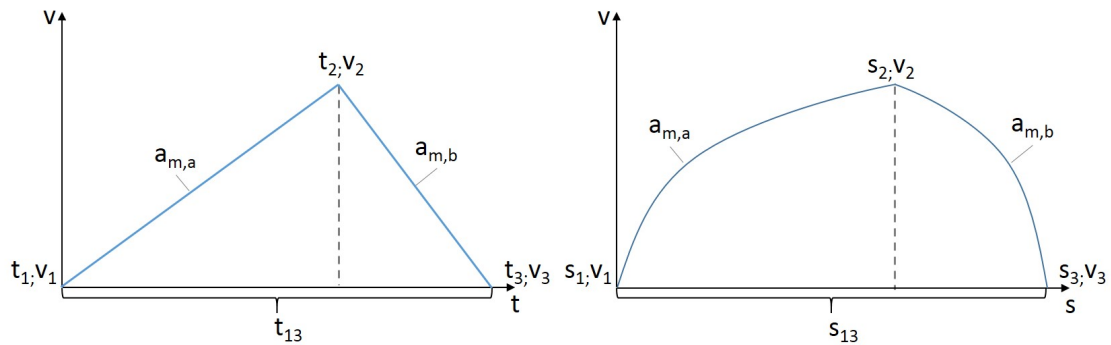
$$t_{34} = \frac{v_4 - v_3}{a_{m,b}} \quad (7.25)$$

$$s_{34} = \frac{v_4^2 - v_3^2}{2a_{m,b}} \quad (7.26)$$

Fahrzeit:

$$t_{14} = \frac{1}{v_2} \cdot \left[ \frac{(v_2 - v_1)^2}{2a_{m,a}} + s_{14} - \frac{(v_4 - v_3)^2}{2a_{m,b}} \right] \quad (7.27)$$

## 7.2.2 Dreiecksfahrtschaulinie



Beschleunigung:

$$t_{12} = \frac{v_2 - v_1}{a_{m,a}} \quad (7.28)$$

$$s_{12} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2a_{m,a}} \quad (7.29)$$

Bremmung:

$$t_{34} = \frac{v_3 - v_2}{a_{m,b}} \quad (7.30)$$

$$s_{34} = \frac{v_3^2 - v_2^2}{2a_{m,b}} \quad (7.31)$$

maximal erreichbare Geschwindigkeit:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot s_{13} + \frac{v_1^2}{a_{m,a}} - \frac{v_3^2}{a_{m,b}}}{\frac{1}{a_{m,a}} - \frac{1}{a_{m,b}}}} \quad (7.32)$$

Fahrzeit:

$$t_{13} = t_{12} + t_{13} = \frac{v_2 - v_1}{a_{m,a}} + \frac{v_3 - v_2}{a_{m,b}} \quad (7.33)$$

## 7.3 ABSCHÄTZUNG DER LÄNGSBESCHLEUNIGUNGEN VON ZUGFAHRTEN



### ERFAHRUNGSWERTE ZUR LÄNGSBESCHLEUNIGUNG

#### Beschleunigung:

Güterzüge	0,05...0,20 m/s <sup>2</sup>
Reisezüge	0,30...0,60 m/s <sup>2</sup>
S-/U-/Straßenbahn	0,80...1,30 m/s <sup>2</sup>

#### Bremmung:

	<i>Betriebsbremsung</i>	<i>Schnellbremsung</i>
Güterzüge	-0,25...-0,40 m/s <sup>2</sup>	-0,40...-0,50 m/s <sup>2</sup>
Reisezüge	-0,50...-0,75 m/s <sup>2</sup>	-0,60...-1,00 m/s <sup>2</sup>
S-/U-/Straßenbahn	-0,80...-1,20 m/s <sup>2</sup>	-2,00...-3,00 m/s <sup>2</sup>

### 7.3.1 Varianten der mittleren Beschleunigung

- Wende empfiehlt:
  - Beschleunigung und Auslauf: **zeitbezogene mittlere Beschleunigung**

$$a_{m,t} = \frac{v_1 - v_0}{t_1 - t_0} \quad (7.34)$$

- Bremsung: **wegbezogene mittlere Beschleunigung**

$$a_{m,s} = \frac{(v_1^2 - v_0^2)}{2 \cdot (s_1 - s_0)} \quad (7.35)$$

## 7.3.2 Näherung der mittleren Beschleunigungen für die verschiedenen Bewegungsphasen

### Beschleunigen an der Kraftschlußgrenze

- mittlere Beschleunigung mit  $v_m = 0,5 \cdot v_{\ddot{u}}$ :

$$a_{m,a} = \frac{m_R \cdot g \cdot \tau_m - F_{WFT}(v_m) - F_{WFW}(v_m) - F_{WS}}{m_Z \cdot \xi_Z} \quad (7.36)$$

### Beschleunigen an der Leistungsgrenze

- mittlere Beschleunigung:

$$a_{m,a} = \frac{p_a(v_A) + p_a(v_E)}{\frac{\xi_Z \cdot (v_A + v_E)}{3,6}} \quad (7.37)$$

- mit:

$$p_a(v_A) = \frac{P_T}{m_Z} - g \cdot (f_{WFZ}(v_A) + f_{WS}) \cdot \frac{v_A}{3,6} \quad (7.38)$$

$$p_a(v_E) = \frac{P_T}{m_Z} - g \cdot (f_{WFZ}(v_E) + f_{WS}) \cdot \frac{v_E}{3,6} \quad (7.39)$$

**Fahrzeugauslauf** (mit  $v_m$  = arithmetisches Mittel aus Auslaufanfangs- und Auslaufendgeschwindigkeit)

$$a_m = -\frac{F_{WFT}(v_m) + F_{WFW}(v_m) + F_{WS,m}}{m_Z \cdot \xi_Z} \quad (7.40)$$

- in Trapezfahrtschaulinie:

$$t_{Ausl} = \frac{v_{Ausl,E} - v_{Ausl,A}}{a_m} \quad (7.41)$$

$$s_{Ausl} = \frac{v_{Ausl,E}^2 - v_{Ausl,A}^2}{2a_m} \quad (7.42)$$

## 7.4 KLASSISCHE NUMERISCHE VERFAHREN

### 7.4.1 Zeitschrittverfahren

$$a_i = a(v_i) = \text{const.} \quad (7.43)$$

$$v_{i+1} = v_i + a_i \cdot \Delta t \quad (7.44)$$

$$v_m = \frac{v_i + v_{i+1}}{2} \quad (7.45)$$

$$\Delta s = v_m \cdot \Delta t \quad (7.46)$$

$$t_{i+1} = t_i + \Delta t \quad (7.47)$$

$$s_{i+1} = s_i + \Delta s \quad (7.48)$$

$$a_{i+1} = a(v_{i+1}) \quad (7.49)$$

### 7.4.2 Wegschrittverfahren

$$a_i = a(v_i) = \text{const.} \quad (7.50)$$

$$v_{i+1} = \sqrt{v_i^2 + 2 \cdot a_i \cdot \Delta s} \quad (7.51)$$

$$v_m = \frac{v_i + v_{i+1}}{2} \quad (7.52)$$

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{v_m} \quad (7.53)$$

$$t_{i+1} = t_i + \Delta t \quad (7.54)$$

$$s_{i+1} = s_i + \Delta s \quad (7.55)$$

$$a_{i+1} = a(v_{i+1}) \quad (7.56)$$

### 7.4.3 Geschwindigkeitsschrittverfahren

$$v_{i+1} = v_i \pm \Delta v \quad (7.57)$$

$$a_m = \frac{a(v_i) + a(v_{i+1})}{2} \quad (7.58)$$

$$\Delta t = \frac{v_{i+1} - v_i}{a_m} \quad (7.59)$$

$$\Delta s = \frac{v_{i+1}^2 - v_i^2}{2a_m} \quad (7.60)$$

$$t_{i+1} = t_i + \Delta t \quad (7.61)$$

$$s_{i+1} = s_i + \Delta s \quad (7.62)$$

## 7.5 BESCHLEUNIGUNGSGRUNDFUNKTION

- spezifische überschüssige Antriebskraft in der Ebene

$$\rho = \frac{F_T - F_{WFT} - F_{WFW}}{(m_T + m_W) \cdot g} = \frac{F_Z - f_{WFW} \cdot m_W \cdot g}{(m_T + m_W) \cdot g} \quad (7.63)$$

- abschnittsweise Näherung Zughakenzugkraft:

$$F_Z = K_1 \cdot v^2 + K_2 \cdot v + K_3 \quad (7.64)$$

- Berücksichtigung dreier Stützstellen ( $F_{Zi}; v_i$ ) ergibt Koeffizienten:

$$F_{Z1} = K_1 \cdot v_1^2 + K_2 \cdot v_1 + K_3$$

$$F_{Z2} = K_1 \cdot v_2^2 + K_2 \cdot v_2 + K_3$$

$$F_{Z3} = K_1 \cdot v_3^2 + K_2 \cdot v_3 + K_3$$

- für überschüssige Antriebskraft in der Ebene ergibt sich nach Umformen und Zusammenfassen:

$$\rho = \kappa_1 \cdot v^2 + \kappa_2 \cdot v + \kappa_3 \quad (7.65)$$

für die einzelnen Koeffizienten in Gleichung 7.65 ergibt sich:

$$\kappa_1 = \frac{K_1 - \frac{\gamma}{100^2} \cdot m_W \cdot g}{(m_T + m_W) \cdot g} \quad (7.66)$$

$$\kappa_2 = \frac{K_2 - \frac{\beta}{100} \cdot m_W \cdot g}{(m_T + m_W) \cdot g} \quad (7.67)$$

$$\kappa_3 = \frac{K_3 - \alpha \cdot m_W \cdot g}{(m_T + m_W) \cdot g} \quad (7.68)$$

mit:

- $K_i$  Koeffizienten der Näherungsformel für Zughakenzugkraft
- $\alpha$  konstanter Faktor des spez. Wagenzugwiderstandes
- $\beta$  linearer Koeffizient des spez. Wagenzugwiderstandes
- $\gamma$  quadratischer Koeffizient des spez. Wagenzugwiderstandes

- die Koeffizienten der Beschleunigungsgrundfunktion für ungleichmäßig beschleunigte Bewegungen  $a(v) = A \cdot v^2 + B \cdot v + C$ :

$$A = \frac{12960}{\xi_Z} \cdot g \cdot \kappa_1 \quad (7.69)$$

$$B = \frac{12960}{\xi_Z} \cdot g \cdot \kappa_2 \quad (7.70)$$

$$C = \frac{12960}{\xi_Z} \cdot g \cdot (\kappa_3 - f_{WS}) \quad (7.71)$$

**! Beachte:  $v$  [km/h],  $a$  [km/h<sup>2</sup>]**

## 7.6 ALGORITHMUS NACH JENTSCH ZUR INTEGRATION BEI UNGLEICHMÄSSIG BESCHLEUNIGTEN BEWEGUNGEN

- Fahrzeit:

$$\Delta t = \int_{v_I}^{v_{II}} \frac{1}{a(v)} dv \quad (7.72)$$

- Fahrstrecke:

$$\Delta s = \int_{v_I}^{v_{II}} \frac{v}{a(v)} dv \quad (7.73)$$

mit:

$a(v)$	[km/h <sup>2</sup> ]	Beschleunigungsgrundfunktion
$\Delta s$	[km]	zurückgelegte Streckenlänge
$\Delta t$	[h]	Fahrzeit
$v_I$	[km/h]	Anfangsgeschwindigkeit im Bewegungsabschnitt
$v_{II}$	[km/h]	Endgeschwindigkeit im Bewegungsabschnitt

- Integrationsalgorithmus für  $a(v) = A \cdot v^2 + B \cdot v + C$ :

– Diskriminante

$$Z = 4 \cdot A \cdot C - B^2 \quad (7.74)$$

– für  $Z > 0$  gilt:

$$\Delta t = \frac{2}{\sqrt{Z}} \cdot \left( \arctan \frac{2 \cdot A \cdot v_{II} + B}{\sqrt{Z}} - \arctan \frac{2 \cdot A \cdot v_I + B}{\sqrt{Z}} \right) \quad (7.75)$$

bei gegebener Zeit:

$$v_{II} = \frac{\sqrt{Z}}{2 \cdot A} \cdot \tan \left[ \left( \arctan \frac{2 \cdot A \cdot v_I + B}{\sqrt{Z}} \right) + \frac{\sqrt{Z} \cdot \Delta t}{2} \right] - \frac{B}{2 \cdot A} \quad (7.76)$$

- für  $Z < 0$  gilt:

$$\Delta t = \frac{1}{\sqrt{-Z}} \cdot \ln \left( \frac{2 \cdot A \cdot v_{II} + B - \sqrt{-Z}}{2 \cdot A \cdot v_{II} + B + \sqrt{-Z}} \cdot \frac{2 \cdot A \cdot v_I + B + \sqrt{-Z}}{2 \cdot A \cdot v_I + B - \sqrt{-Z}} \right) \quad (7.77)$$

bei gegebener Zeit:

$$v_{II} = \frac{1}{A} \cdot \left( \frac{\sqrt{-Z}}{1 - Y} - \frac{\sqrt{-Z} + B}{2} \right) \quad (7.78)$$

mit:

$$Y = \frac{2 \cdot A \cdot v_I + B - \sqrt{-Z}}{2 \cdot A \cdot v_I + B + \sqrt{-Z}} \cdot e^{\Delta t \cdot \sqrt{-Z}} \quad (7.79)$$

- mit Verwendung von  $\Delta t$  gilt für  $\Delta s$ :

$$\Delta s = \frac{1}{2 \cdot A} \cdot \left[ \left( \ln \frac{A \cdot v_{II}^2 + B \cdot v_{II} + C}{A \cdot v_I^2 + B \cdot v_I + C} \right) - B \cdot \Delta t \right] \quad (7.80)$$

# **A ANHANG**

## A.1 FAHRDYNAMISCHE MASSENFAKTOREN/DREHMASSEN AUSGEFÜHRTER FAHRZEUGE

<b>Fahrzeug(verband)</b>	<b>ξ</b>
Elektrische Lokomotiven	
BR 101	1,11
BR 111	1,15
BR 143	1,16
BR 151	1,27
BR 155	1,16
Diesellokomotiven	
BR 218	1,05
BR 232	1,17
BR 360	1,21
Elektrische Triebzüge	
BR 401 (ICE 1)	1,08
BR 425/426	1,06
Dieseltriebzüge	
BR 612	1,06
BR 628.4	1,04

## A.2 MITTLERE KORRIGIERTE STRECKENNEIGUNG

mittlerer Neigungswiderstand

$$i_m = \frac{z_E - z_A}{x_E - x_A} \quad (\text{A.1})$$

$$i_m = \frac{\sum [i_j \cdot l_{Nj}]}{L} \quad (\text{A.2})$$

- $i_j$  [-] Neigung des j-ten Streckenabschnittes  
 $l_{Nj}$  [m] Länge des j-ten Streckenabschnittes  
 $L$  [m] Länge der betrachteten Fahrstrecke

mittlerer Bogenwiderstand:

$$f_{k,m} = \frac{\sum_{i=0}^n (l_{Bi} \cdot f_{ki})}{L} \quad (\text{A.3})$$

- $l_{Bi}$  [m] Länge des i-ten Bogens  
 $f_{ki}$  [-] spezifischer Krümmungswiderstand des i-ten Bogens  
 $L$  [m] Länge der betrachteten Fahrstrecke

mittlere korrigierte Neigung

$$i_{km} = i_m + f_{k,m} \quad (\text{A.4})$$

## A.3 GLEICHUNGSÜBERSICHT KRÜMMUNGSWIDERSTANDSKRAFT (BOGENWIDERSTANDSKRAFT)

Schramm (allg. Näherung)

$$f_k = \frac{0,160 \cdot c + 0,162}{R} \quad (\text{A.5})$$

R [m] Gleisbogenradius  
c [m] Achsstand im Wagen/Drehgestell

Röckl ( $R \geq 300m$ )

$$f_k = \frac{0,65}{R - 55} \quad (\text{A.6})$$

Röckl ( $R < 300m$ )

$$f_k = \frac{0,5}{R - 30} \quad (\text{A.7})$$

Röckl für Meterspur

$$f_k = \frac{0,4}{R - 20} \quad (\text{A.8})$$

Formel der SŽD<sup>1</sup> (1520 mm -Breitspur)

$$f_k = \frac{0,7}{R} \quad (\text{A.9})$$

SBB<sup>2</sup>(Ablauf- und Rangierbetrieb)

$$f_k = 0,107 \cdot \frac{1 + c}{R} \quad (\text{A.10})$$

---

<sup>1</sup>Sowjetische Eisenbahnen

<sup>2</sup>Schweizer Bundesbahnen

## A.4 EMPIRISCHE FAHRZEUGWIDERSTANDSGLEICHUNGEN FÜR LOKBESPANNT ZÜGE

- (Schwedischer) Reisezug mit Ellok (Rc6) und 5 Schnellzugwagen:

$$F_{WFZ} = 3,36 + 0,793 \cdot \frac{v}{100} + 8,49 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.11})$$

- (Französischer) Reisezug mit Ellok (BB 22200) und 6 Schnellzugwagen:

$$F_{WFZ} = 2,54 + 3,34 \cdot \frac{v}{100} + 5,72 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.12})$$

- (Französischer) Regionalzug mit Ellok (BB 16500) und 7 Doppelstockwagen:

$$F_{WFZ} = 6,2 + 4,0 \cdot \frac{v}{100} + 8,0 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.13})$$

- Talgozug (Typ VII, 9 Wagen) mit Ellok (Renfe serie 252 (Europrinter)):

$$F_{WFZ} = 1,551 + 3,714 \cdot \frac{v}{100} + 4,064 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.14})$$

## A.5 BAUREIHENSPEZIFISCHE TRIEBFAHRZEUGWIDERSTANDSGLEICHUNGEN

### Lokomotiven

#### Elektrische Lokomotiven

- BR 101

$$F_{WFT} = 1,43 + 0,84 \cdot \frac{v}{100} + 2,80 \cdot \left(\frac{v + \Delta v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.15})$$

- BR 143

$$F_{WFT} = 3,62 + 0,95 \cdot \frac{v}{100} + 4,45 \cdot \left(\frac{v + \Delta v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.16})$$

#### Diesellokomotiven

- BR 218

$$F_{WFT} = 2,85 + 3,48 \cdot \left(\frac{v + \Delta v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.17})$$

- BR 232 (ex 132)

$$F_{WFT} = 4,56 + 3,53 \cdot \left(\frac{v + 12}{100}\right)^2 \quad (\text{A.18})$$

- BR 290

$$F_{WFT} = 1,75 + 4,95 \cdot \left(\frac{v + \Delta v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.19})$$

### Triebwagen und Triebzüge

- BR 420

$$F_{WFT} = 2,49 + 2,5 \cdot \frac{v}{100} + 4,10 \cdot \left(\frac{v + \Delta v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.20})$$

- BR 628

$$F_{WFT} = 0,79 + 0,79 \cdot \frac{v}{100} + 2,9 \cdot \left(\frac{v + 15}{100}\right)^2 \quad (\text{A.21})$$

- X 72500 (SNCF)

$$F_{WFT} = 2,0 + 1,78 \cdot \frac{v}{100} + 3,59 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.22})$$

## A.6 FAHRZEUGWIDERSTANDSGLEICHUNGEN VON HOCHGESCHWINDIGKEITSZÜGEN

### Gleichungen nach Peters für ICE:

**ICE 1** (BR 401) mit 12 Mittelwagen

$$F_{WFZ} = 5,77 + 3,62 \cdot \frac{v}{100} + 8,94 \cdot \left(\frac{v+15}{100}\right)^2 \quad (\text{A.23})$$

**ICE 2** (BR 402)

$$F_{WFZ} = 3,13 + 1,96 \cdot \frac{v}{100} + 5,81 \cdot \left(\frac{v+15}{100}\right)^2 \quad (\text{A.24})$$

**2 x ICE 2**

$$F_{WFZ} = 6,26 + 3,92 \cdot \frac{v}{100} + 11,00 \cdot \left(\frac{v+15}{100}\right)^2 \quad (\text{A.25})$$

**ICE 3** (BR 403)

$$F_{WFZ} = 3,30 + 2,42 \cdot \frac{v}{100} + 5,52 \cdot \left(\frac{v+15}{100}\right)^2 \quad (\text{A.26})$$

**2 x ICE 3**

$$F_{WFZ} = 6,60 + 4,84 \cdot \frac{v}{100} + 10,63 \cdot \left(\frac{v+15}{100}\right)^2 \quad (\text{A.27})$$

**ICE 3M** (Mehrsystemvariante BR 406)

$$F_{WFZ} = 3,45 + 2,75 \cdot \frac{v}{100} + 5,89 \cdot \left(\frac{v+15}{100}\right)^2 \quad (\text{A.28})$$

**TGV PSE** ( $m_z=401$  t, LüP = 200 m,  $v_{max} = 270$  km/h)

$$F_{WFZ} = 2,43 + 3,06 \cdot \frac{v}{100} + 5,39 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.29})$$

**TGV Duplex** ( $m_z=424$  t, LüP = 200 m,  $v_{max} = 320$  km/h)

$$F_{WFZ} = 2,7 + 3,2 \cdot \frac{v}{100} + 5,35 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.30})$$

**Shinkansen, Reihe 300** (JR)

$$F_{WFT} = 9,62 + 9,67 \cdot \frac{v}{100} + 8,9 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.31})$$

**X2000** (SJ - 5 Mittelwagen)

$$F_{WFT} = 2,34 + 1,64 \cdot \frac{v}{100} + 6,1 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.32})$$

## A.7 EMPIRISCHE GLEICHUNGEN FÜR SPEZIFISCHE WAGENZUGWIDERSTÄNDE

### Gleichungen für Reisezüge

Gleichung der DR<sup>3</sup> für Reisezüge aus Drehgestell-Wagen und Doppelstockzüge

$$f_{WFW} = 0,0016 + 0,0032 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.33})$$

Gleichung der DB<sup>4</sup> für Reisezüge

$$f_{WFW} = 0,0019 + 0,00025 \cdot \frac{v}{100} + 0,0696 \cdot \left(0,02 + \frac{2,7}{m_W}\right) \cdot \left(\frac{v+15}{100}\right)^2 \quad (\text{A.34})$$

$m_W$  - Wagenzugmasse des Wagenzuges [t]

Gleichung der französischen Staatsbahn SNCF für Reisezüge

$$f_{WFW} = 0,0015 + 0,0022 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.35})$$

Gleichung der tschechischen Staatsbahn ČD für Reisezüge ( $m_A \approx 10t$ ,  $m_W = 500...700t$ )

$$f_{WFW} = 0,00135 + 0,0008 \cdot \frac{v}{100} + 0,0033 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.36})$$

### Gleichungen für Güterzüge

Gleichung der DR für Güterzüge aus leeren und beladenen Wagen unterschiedlicher Bauart:

$$f_{WFW} = 0,0016 + 0,0057 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.37})$$

Gleichung der DR für Güterzüge aus beladenen zwei- und mehrachsigen Wagen unterschiedlicher Bauart:

$$f_{WFW} = 0,0016 + 0,0032 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.38})$$

Gleichung der DR für spezielle Güter-Ganzzüge aus voll beladenen 4- oder 6-achsigen Wagen gleicher Bauart:

$$f_{WFW} = 0,0012 + 0,0022 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.39})$$

<sup>3</sup>Mit „DR“ ist im Kontext dieser Formelsammlung die Deutsche Reichsbahn der DDR gemeint.

<sup>4</sup>Mit „DB“ ist im Kontext dieser Formelsammlung die Deutsche Bundesbahn gemeint.

Gleichung von Rheinbraun für beladene Kohlezüge (Güter-Ganzzüge) aus 14 4-achsigen Wagen gleicher Bauart:

$$f_{WFW} = 0,0010 + 0,0015 \cdot \left( \frac{v + 15}{100} \right)^2 \quad (\text{A.40})$$

Gleichung der französischen Staatsbahn SNCF für Güterzüge

$$f_{WFW} = 0,0015 + 0,0063 \cdot \left( \frac{v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.41})$$

Gleichung der französischen Staatsbahn SNCF für Güterganzzüge

$$f_{WFW} = 0,0012 + 0,0025 \cdot \left( \frac{v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.42})$$

## A.8 EMPIRISCHE GLEICHUNGEN ZUM KRAFTSCHLUSS ZWISCHEN RAD UND SCHIENE

**Hinweis:** Die Geschwindigkeit ist in der Einheit **km/h** einzusetzen.

SNCF - KraftschlussFormel

$$\tau = \tau_0 \cdot \frac{8 + 0,1 \cdot v[\text{km/h}]}{8 + 0,2 \cdot v[\text{km/h}]} \quad (\text{A.43})$$

mit Sand  $\tau_0=0,40$   
ohne Sand  $\tau_0=0,33$

SNCF - Kraftschluss-Formel für Fahrt im Gleisbogen

$$\tau = \tau_0 \cdot \frac{8 + 0,1 \cdot v[\text{km/h}]}{8 + 0,2 \cdot v[\text{km/h}]} \cdot \left(1 - \frac{1200}{R^2}\right) \quad (\text{A.44})$$

## A.9 KRAFTSCHLUSSBEIWERTE FÜR STRASSENFAHRZEUGE

**Hinweis:** Die Geschwindigkeit ist in der Einheit **km/h** einzusetzen.

Kraftschluss Reifen-Straße für saubere, trockene Fahrbahn:

$$\tau = 0,7 - 0,00192 \cdot v \quad (\text{A.45})$$

Kraftschluss Reifen-Straße für nasse Fahrbahn:

$$\tau = 0,214 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 - 0,64 \cdot \frac{v}{100} + 0,615 \quad (\text{A.46})$$

Anhaltswerte für *mittleren* Kraftschluss auf diversem Untergrund

Fahrbahnart und -zustand	Kraftschlussbeiwert $\tau$
Sandweg fest, feucht	0,30
Sandweg locker, trocken	<b>0,2</b>
Kiesweg fest	0,35
Kiesweg locker	0,30
Mutterboden trocken	0,40
Mutterboden nass	0,30
Lehmboden trocken	0,50...0,55
Lehmboden nass	0,30...0,45
Grasnarbe erdfeucht	0,55
Grasnarbe nass	0,25
Asphalt/Beton trocken	0,60... <b>0,8</b>
Asphalt/Beton nass, sauber	0,40...0,60
Asphalt/Beton nass, verschmutzt	0,30...0,40
Pflasterstraße trocken	0,48...0,55
Pflasterstraße nass, sauber	0,25...0,30
Pflasterstraße nass, verschmutzt	0,15...0,20
festgefahrene Schneedecke	0,20
Glatteis	0,05...0,10

Gleitreibungsbeiwerte (bei blockierten Rädern):

<b>Paarung</b>	$\mu_{GI}$
Reifen-Gußasphalt	0,3...0,63
Reifen-Zementbeton	0,34...0,44
Reifen-Asphaltbeton	0,24...0,53
Stahlrad-Schiene	0,05...0,09