



Formelsammlung zur Vorlesung „Fahrdynamik/Bahnfahrzeuge“ Version 5.0

Dr.-Ing. Martin Kache

4. April 2020

Vorwort

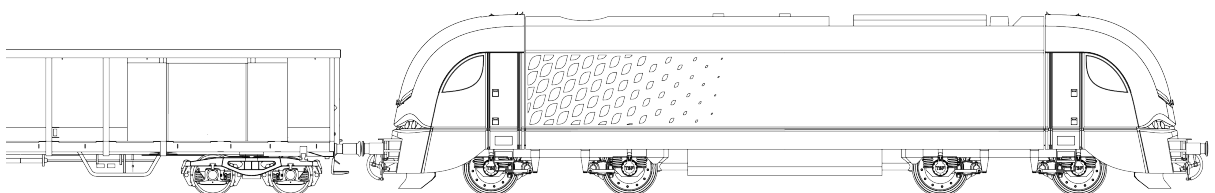
Diese Formelsammlung entstand im Rahmen der universitären Lehrveranstaltung „Fahr-
dynamik der Schienenfahrzeuge“ an der TU Dresden und wird kontinuierlich weiterentwickelt.
Sie soll die Studierenden bei der Lösung der vorlesungsbegleitenden Rechenübungen un-
terstützen und ihnen die Bearbeitung fahrdynamischer Fragestellungen im Rahmen von Prak-
tika 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 gewis-
sen zeitlichen Abstand zur Vorlesung einen raschen Wiedereinstieg in die Thematik ermögli-
chen.

Bei der Zusammenstellung der Formeln wurden verschiedene Quellen genutzt, bei denen es
sich sowohl um fahrdynamische Standardwerke (Monographien) als auch um Zeitschriften-
aufsätze 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

Dresden, 4. April 2020



Inhaltsverzeichnis

0. Liste der verwendeten Formelzeichen	7
1. Grundlagen	9
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
2. Widerstandskräfte	15
2.1. Fahrwiderstandskraft	15
2.2. Streckenwiderstandskräfte	15
2.2.1. Streckenwiderstandskraft allgemein	15
2.2.2. Neigungswiderstandskraft	16
2.2.3. Krümmungswiderstandskraft/Bogenwiderstandskraft	16
2.2.4. Weichenwiderstand	17
2.2.5. 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. Anfahrwiderstand	20
2.3.4. Luftwiderstandskraft	21
2.3.5. Die empirische Fahrzeugwiderstandskraft	25
2.3.6. Fahrzeugwiderstand von Hochgeschwindigkeitszügen	26
2.3.7. Wagenzugwiderstand	26
3. Antriebskräfte	27
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	31
3.5.1. Strömungsmaschinen	31
3.5.2. Wandlerstufe	32
3.5.3. Kupplungsstufe	33

3.5.4. Ermittlung der Zugkraft mittels Typenzugkraftkurven	34
3.6. Dieselelektrischer Antrieb	35
3.7. Zugkrafterzeugung mittels elektrischer Maschinen	36
3.7.1. Zugkrafterzeugung mittels Gleichstromreihenschlussmaschinen	36
3.7.2. Berechnungen Gleichstromreihenschlussmaschine	37
3.7.3. Zugkrafterzeugung mit Drehstrom-Asynchronmaschinen	38
3.7.4. Berechnung Zugkraftcharakteristik	40
4. Kennlinienfelder	41
5. Leistungsbedarfsermittlung	43
6. Fahrdynamische Charakteristiken	45
7. Fahrzeitermittlung und Zugfahrtsimulation	47
7.1. Kinematische Grundlagen	47
7.1.1. Definitionen	47
7.1.2. Gleichmäßig beschleunigte Bewegung	48
7.1.3. Ungleichmäßig beschleunigte Bewegung	48
7.2. Überschlagsrechnungen	49
7.2.1. Trapezfahrtschaulinie	50
7.2.2. Dreiecksfahrtschaulinie	51
7.3. Abschätzung der Längsbeschleunigungen von Zugfahrten	52
7.3.1. Varianten der mittleren Beschleunigung	52
7.3.2. Näherung der mittleren Beschleunigungen für die verschiedenen Bewegungsphasen	53
7.4. Klassische numerische Verfahren	54
7.4.1. Zeitschrittverfahren	54
7.4.2. Wegschrittverfahren	54
7.4.3. Geschwindigkeitsschrittverfahren	55
7.5. Beschleunigungsgrundfunktion	55
7.6. Algorithmus nach Jentsch zur Integration bei ungleichmäßig beschleunigten Bewegungen	57
A. Anhang	A-1
A.1. Fahrdynamische Massenfaktoren 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-6
A.5. Baureihenspezifische Triebfahrzeugwiderstandsgleichungen	A-7
A.6. Fahrzeugwiderstandsgleichungen von Hochgeschwindigkeitszügen	A-11
A.7. Empirische Gleichungen für (spezifische) Wagenzugwiderstände	A-14
A.8. Empirische Gleichungen zum Kraftschluss zwischen Rad und Schiene	A-19
A.9. Fahrzeugwiderstände (Straßenfahrzeuge)	A-20
A.10. Kraftschlussbeiwerte für Straßenfahrzeuge	A-23

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_{WFV}	Fahrzeugwiderstandskraft Wagen(zug)
F_{WFZ}	Fahrzeugwiderstandskraft Zug
F_B	Bremskraft
F_a	Beschleunigungskraft
F_G	Gewichtskraft
g	Erdbeschleunigung
H	Heizwert des Kraftstoffes
i	Streckeneneigung oder Übersetzungsverhältnis (Kontext beachten!)
J	Massenträgheitsmoment
$l, (L)$	Länge (Bogen, Wegabschnitte, Zug)
m	Masse
m_D	Drehmasse

0. Liste der verwendeten Formelzeichen

Größe	Benennung
m_A	Fahrzeugmasse je Radsatz
n	Drehzahl
R	Bogenradius
r	Radradius
$s, (S)$	Weg
$t, (T)$	Zeit, (Fahrzeit von Anfangspunkt bis Endpunkt)
u	Ruck
v	Geschwindigkeit
v_W	(Gegen-)Windgeschwindigkeit
x	Wegkoordinate
W	Arbeit
z	Anzahl
α	Überhöhungswinkel (Bogen), Neigungswinkel (Gerade)
β	Wagenkasten-neigung(-swinkel) / Spurkranz-neigungswinkel
η	Wirkungsgrad
μ	Reibwert oder Drehmomentenwandlung Kontext beachten!
τ	Kraftschlussbeiwert zwischen Rad und Fahrbahn
θ	Temperatur
ξ	fahrdynamischer Massenfaktor

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

1. Grundlagen

1.1. Umrechnung SI-fremder Einheiten

Kraft

1 kp = 9,80665 N = 1 kg · 9,81 m/s²
1 lb_f (pound-force) = 4,448 N
1 daN = 10 N = 0,01 kN

Masse

1 lb (pound) = 0,454 kg
1 t_s = 907,2 kg

Länge

1 in = 0,0254 m
1 ft = 0,3048 m
1 mi = 1609 m

Geschwindigkeit

1 mph = 1,609 km/h
1 km/h = $\frac{1}{3,6}$ m/s

1 kn = 1,852 km/h = 0,514 m/s

Leistung

1 PS = 0,7355 kW
1 hp = 0,7457 kW

Energie/Arbeit

1 J = 1 Ws = 1 Nm
1 kWh = 3,6 MJ = 3600 kJ

Druck

1 bar = 10⁵ Pa = 100 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:

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

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

Fahrzeug(verband)	ξ	m_D / Radsatz
Schienenfahrzeuge		
dieselhydraulische Lokomotive	1,10...1,15	2,0...3,5 t
dieselelektrische Lokomotive	1,15...1,25	2,0...5,0 t
elektrische Lokomotive	1,15...1,25	3,0...5,0 t
Güterwagen (leer)	1,08...1,10	0,6 t
Güterwagen (beladen)	1,03...1,04	0,6 t
Reisezugwagen	1,035...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	-

1. Grundlagen

Fahrzeug(verband)	ξ	m_D / Radsatz
Straßenfahrzeuge		
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	-

Anhang

Die Angabe fahrdynamischer Massenfaktoren für spezifische Fahrzeuge finden Sie im **Anhang A.1**.

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):

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

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

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

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	[kN]	absolute Kraft
m	[t]	Fahrzeugmasse
g	[m/s ²]	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. Streckenwiderstandskräfte

2.2.1. Streckenwiderstandskraft allgemein

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

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

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 ‰)

2.2.2. Neigungswiderstandskraft

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

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

α [°] Längsneigungswinkel des Gleises

Streckenlängsneigung

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

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

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

Anhang

Weiterführende zum mittleren (korrigierten) Streckenwiderstand finden Sie im **Anhang A.2.**

2.2.3. Krümmungswiderstandskraft/Bogenwiderstandskraft

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

Gleichung von Protopapadakis:

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

- μ [-] Gleitreibungswert Rad-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)

Anhang

Weitere empirische Gleichungen zum Bogenwiderstand finden Sie im **Anhang A.3.**

2.2.4. Weichenwiderstand

Überschlägig gilt für den spezifischen Weichenwiderstand f_p :

$$f_p = 0,0005 \dots 0,001. \quad \boxed{\text{zuzüglich Krümmungswiderstand!}} \quad (2.9)$$

Bei mehreren durchfahrenen Weichen gilt der mittlere spezifische Weichenwiderstand:

$$f_{pm} = \frac{\sum_1^n (f_p \cdot l_p)}{L}. \quad (2.10)$$

2.2.5. Effektive Neigung, Massenband

$$F_i = m_z g i_e \quad (2.11)$$

- Modell: **Massenpunkt**

$$i_e = i_{km} \quad (2.12)$$

- Modell: *homogenes* Massenband

$$i_e = \frac{\sum (\Delta l_j \cdot i_j)}{l_z} \quad (2.13)$$

- Modell: *inhomogenes* Massenband

$$i_e = \frac{\sum (\Delta m_j \cdot i_j)}{m_z} \quad (2.14)$$

Δl_j	[m]	Länge des Zugteils, der im j-ten Streckenabschnitt steht
Δm_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

Fahrzeugwiderstandskräfte von Straßenfahrzeugen

Für Vergleichsrechnungen u.a. kann es interessant sein, den Fahrzeugwiderstand von Straßenfahrzeugen zu ermitteln. Einen Überblick über die dazu benötigten Gleichungen enthält Anhang A.9.

2.3.1. Fahrzeugwiderstandskraft als Summe von Teilwiderstandskräften

$$F_{WF} = F_{W0} + F_{WL} \quad (2.15)$$

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

2.3.2. Grundwiderstand

$$F_{W0} = mgf_{w0} \quad (2.16)$$

$$f_{w0} = \frac{f_{w0T} \cdot m_T + f_{w0W} \cdot m_W}{m_T + m_W} \quad (2.17)$$

Richtwerte für die 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.: $f_{w0} = 0,0015 \dots 0,0025$

$$f_{W0} = f_{WR} + f_{WGI} + f_{WLa} \quad (2.18)$$

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

Spezifische Rollwiderstandskraft

$$f_{WR} = 0,00046 + 0,0006 \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (2.19)$$

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. Anfahwiderstand

- allgemein gilt:

$$f_{WFA} = 0,002 + 0,018 \cdot e^{-1m^{-1} \cdot s} \quad \text{für Gleitlager} \quad (2.20)$$

$$f_{WFA} = 0,002 + 0,004 \cdot e^{-3m^{-1} \cdot s} \quad \text{für Wälzlager} \quad (2.21)$$

s [m] zurückgelegter Weg

- für s = 0 erhält man den **Losbrechwiderstand**:

$$\text{Gleitlager} \quad f_{WFA,0} = 0,020$$

$$\text{Wälzlager} \quad f_{WFA,0} = 0,006$$

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

$$f_{WFA} = 0,006 + 0,3i \quad (2.22)$$

- DB-Versuche mit wälzachsgelegerten Fahrzeugen ergab:

- für $i = 0 \dots 0,01$:

$$f_{WFA} = 0,007 + 0,2 \cdot i \quad (2.23)$$

- für $i = 0,01 \dots 0,02$:

$$f_{WFA} = 0,009 + 0,35 \cdot (i - 0,01) \quad (2.24)$$

- für $i = 0,02 \dots 0,03$:

$$f_{WFA} = 0,0125 + 0,55 \cdot (i - 0,02) \quad (2.25)$$

2.3.4. Luftwiderstandskraft

- allgemeine Gleichung für Züge:

$$F_{WLZ} = \frac{1}{2} \cdot \rho_L \cdot (c_{w,T} + c_{w,W1} + (n - 2) \cdot c_{w,Wm} + c_{w,Wn}) \cdot A_{norm} \cdot (v + \Delta v)^2 \quad (2.26)$$

- Triebzugformel (Zusammenfassung Lokomotive und letzter Wagen)

$$F_{WLZ} = \frac{1}{2} \cdot \rho_L \cdot (c_{w,Te} + n \cdot c_{w,Wm}) \cdot A_{norm} \cdot v^2 \quad (2.27)$$

- vereinfacht gilt:

$$c_{w,Te} = c_{w,T} + c_{w,Wn} \quad (2.28)$$

es bedeuten:

A_{norm}	[m ²]	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
Δv	[m/s]	Gegenwindzuschlag ($\Delta v = 2, 8 \dots 5, 6 \text{ m/s}$)
ρ_L	[kg/m ³]	Luftdichte ($\rho_{norm} = 1, 225 \text{ kg/m}^3$)

- Luftdichte von trockener Luft

$$\rho_L = \frac{p_L}{287 \text{ J/kgK} \cdot T} \quad (2.29)$$

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

2. Widerstandskräfte

- 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 401 (Triebkopf)		0,21	
BR 401 (12 Zwischenwagen)			1,38
BR 403 (alt, <u>nicht ICE 3</u>)			0,68
BR 403 + BR 403 (alt, <u>nicht ICE 3</u>)			1,20
BR 611			0,92

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

	$c_{w,Wm}$
Reisezugwagen allg.	0,15
26,4 m - Wagen der DB AG	0,11
Mittelwagen ICE	0,08
Endwagen ($c_{w,Wn}$)	0,30
Güterwagen allg.	0,15...0,30
gedeckter Güterwagen Gls, Türen geschl.	0,092
gedeckter Güterwagen Gls, Türen offen	0,100
offener Güterwagen Fad, leer	0,228
offener Güterwagen Fad, mit Schüttgut	0,115
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

$$F_{WLZ,Tu} = \theta_{Tu} F_{WLZ} \quad (2.30)$$

Ermittlung F_{WLZ} : siehe Gleichung 2.26

- $F_{WLZ,Tu} > F_{WLZ}$ wenn: $l_{Tu} > 500m$ und $l_{Tu} > l_z$
- **Tunnelfaktor** θ_{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 θ_{Tu} :

Reisezüge				Güterzüge			
l_{Tu}	k_V	l_z	θ_{Tu}	l_{Tu}	k_V	l_z	θ_{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				

Luftwiderstandskraft durch selbstbelüftete Brems Scheiben

- DB - Formel:

$$F_{WBS} = n \cdot 8,64 \cdot 10^{-3} \cdot v^2 \quad (2.31)$$

F_{WBS}	[N]	Luftwiderstandskraft durch Brems Scheiben
n	[-]	Anzahl der Wagen
v	[km/h]	Fahrgeschwindigkeit

- SNCF - Formel (TGV):

$$F_{WBS} = n_{BS} \cdot \left[4,33 \cdot \frac{v}{100} + 3,16 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \right] \quad (2.32)$$

F_{WBS}	[N]	Luftwiderstandskraft durch Brems Scheiben
n_{BS}	[-]	Anzahl der Brems Scheiben
v	[km/h]	Fahrgeschwindigkeit

Der Luftimpulswiderstand

$$F_{WL}[kN] = 0,001 \cdot \frac{\rho_L \cdot \dot{Q}}{3,6} \cdot (v + \Delta v) \quad (2.33)$$

ρ_L	[kg/m ³]	Luftdichte (Normbedingungen: 1,225 kg/m ³)
\dot{Q}	[m ³ /s]	Luftvolumenstrom
v	[km/h]	Geschwindigkeit

Richtwerte für \dot{Q} :

- E-Traktion: 8 m/s³ je MW installierter Leistung
- Dieseltraktion: 16 m/s³ je MW installierter Leistung
- ICE 1: 67,7 m/s³ für beide Triebköpfe
- Ellok BR Rc4 (Schweden): 15,4 m/s³

2.3.5. Die empirische Fahrzeugwiderstandskraft

$$F_{WFZ} = F_{WFT} + F_{WFW} = F_{WFT} + f_{WFW} m_{WG} \quad (2.34)$$

 **Anhang**

Empirische Fahrzeugwiderstandsgleichungen für die summierten Fahrzeugwiderstände lokbespannter Züge sind im **Anhang A.4** zu finden.

Fahrzeugwiderstandskraft der Lokomotiven, Triebwagen und Triebzüge

Allgemeine Gleichung für den Triebfahrzeugwiderstand

$$F_{WFT} = A + B \cdot \frac{v}{100} + C \cdot \left(\frac{v + \Delta v}{100} \right)^2 \quad (2.35)$$

 **Anhang**

Empirische Fahrzeugwiderstandsgleichungen für für ausgeführte Triebfahrzeuge sind im **Anhang A.5** zu finden.

Falls die konkrete Gleichung für den Triebfahrzeugwiderstand eines Fahrzeuges unbekannt ist, kann unter Nutzung der untenstehend tabellierten Erfahrungswerte mit Gleichung 2.36 gerechnet werden.

$$F_{WFT} = \alpha_T \cdot m_T \cdot g + C \cdot \left(\frac{v + \Delta v}{100} \right)^2 \quad (2.36)$$

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

- einzusetzende Werte Faktor α_T :

Tfz-Typ	α_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
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

2. Widerstandskräfte

- 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 Δv : 10-20km/h

2.3.6. Fahrzeugwiderstand von Hochgeschwindigkeitszügen

Anhang

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

2.3.7. Wagenzugwiderstand

Allgemeine Gleichung für den Wagenzugwiderstand

$$F_{WFW} = f_{WFW} m_{Wg} = \left[\alpha + \beta \cdot \frac{v}{100} + \gamma \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \right] m_{Wg} \quad (2.37)$$

Anhang

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

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)
τ	[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	τ
trockenes Gleis, mit Sanden	0,4
trockenes Gleis, ohne Sanden	0,3
Idealbedingungen (ohne Sanden)	0,40...0,42
„Standardwert“	0,30...0,33
sicher erreichbar (Streckenbetrieb)	0,25...0,30
Rangieren/Grubenbahn/Werkbahn	0,15...0,20

Anhang

Vergleichswerte für die Kraftschlussausnutzung von Straßenfahrzeugen enthält **Anhang A.10**.

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
η_{SG}	[-]	Wirkungsgrad des Schaltgetriebes
η_{RG}	[-]	Wirkungsgrad des Radsatzgetriebes
i_{SG}	[-]	Übersetzung des Schaltgetriebes
i_{RG}	[-]	Übersetzung des Radsatzgetriebes
ψ	[-]	Hilfsleistungsfaktor ($\psi = 0,03 \dots 0,07$)
M_M	[Nm]	Motordrehmoment
M_{MS}	[Nm]	Motorschleppmoment
n_M	[s ⁻¹]	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)

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

3. Antriebskräfte

- Fahrzeuggeschwindigkeit

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

- Fahrzeuggeschwindigkeit (zuggeschnittene Größengleichung):

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

- mit:

$$\begin{array}{ll} v & [\text{km/h}] \text{ Fahrzeuggeschwindigkeit} \\ n_M & [\text{min}^{-1}] \text{ Motordrehzahl} \end{array}$$

- gesamtes Übersetzungsverhältnis

$$i_{ges} = i_{SG} \cdot i_{RG} \quad (3.11)$$

- gesamtes Übersetzungsverhältnis bei Höchstgeschwindigkeit

$$i_{ges}(v_{max}) = \frac{r_T \cdot n_3}{2,65 \cdot v_{max}} \quad (3.12)$$

$$\begin{array}{ll} v_{max} & [\text{km/h}] \text{ Höchstgeschwindigkeit} \\ n_3 & [\text{min}^{-1}] \text{ Drehzahl bei maximaler Motorleistung} \end{array}$$

- Mindest-Übersetzungsverhältnis für den 1. Gang

$$i_{ges,1} = \frac{(f_{W0} + i_{max}) \cdot m \cdot g \cdot r_T}{\eta_{SG} \cdot \eta_{RG} \cdot M_2 \cdot (1 - \psi)} \quad (3.13)$$

- es bedeuten:

$$\begin{array}{ll} f_{W0} & [-] \text{ Grundwiderstandskonstante} \\ i_{max} & [-] \text{ maximale Anfahrsteigung} \\ M_2 & [\text{kN}] \text{ maximales Motordrehmoment} \\ \eta_{SG} & [-] \text{ Wirkungsgrad des Schaltgetriebes} \\ \eta_{RG} & [-] \text{ Wirkungsgrad des Radsatzgetriebes} \end{array}$$

- Behelf zur überschlägigen Bestimmung der Zwischenübersetzungsverhältnisse (**besser:** Orientierung an bereits ausgeführten Getrieben)

$$i_{ges,n} = \frac{i_{ges,j}}{e^{j-n}} \quad (3.14)$$

3.5. Dieselhydraulischer Antrieb

3.5.1. Strömungsmaschinen

- Drehmomentenverhältnis

$$\mu = \frac{M_{Tu}}{M_P} \quad (3.15)$$

- Drehzahlverhältnis

$$v = \frac{n_{Tu}}{n_P} \quad (3.16)$$

- hydraulischer Wirkungsgrad

- Wandler:

$$\eta_h = \frac{P_{Tu}}{P_P} = \frac{M_{Tu}}{M_P} \cdot \frac{n_{Tu}}{n_P} \cdot \frac{2\pi}{2\pi} = \mu \cdot v \quad (3.17)$$

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

$$\eta_h = \frac{P_{Tu}}{P_P} = \frac{M_{Tu}}{M_P} \cdot \frac{n_{Tu}}{n_P} \cdot \frac{2\pi}{2\pi} = v \quad (3.18)$$

- Leistungszahl

$$\lambda = \frac{M_P}{\rho \cdot D_P^5 \cdot 4\pi^2 n_P^2} \quad (3.19)$$

- 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

3. Antriebskräfte

ρ [kg/m³] Dichte des Hydrauliköles
 D_p [m] Profildurchmesser

3.5.2. Wandlerstufe

- Fahrzeuggeschwindigkeit bei gegebener Getriebeabtriebsdrehzal

$$v = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_T}{i_{RG}} \cdot n_{Ga} \quad (3.20)$$

- Fahrzeuggeschwindigkeit bei gegebener Getriebeabtriebsdrehzal (zugeschnittene Größengleichung)

$$v = \frac{3 \cdot \pi \cdot r_T}{25 \cdot i_{RG}} \cdot n_{Ga} \approx 0,377 \cdot \frac{r_T}{i_{RG}} \cdot n_{Ga} \quad (3.21)$$

- Turbinendrehzahl bei gegebener Geschwindigkeit

$$n_{Tu} = i_{Ga} \cdot n_{Ga} = i_{Ga} \cdot \frac{i_{RG}}{2 \cdot \pi \cdot r_T} \cdot v \quad (3.22)$$

- Turbinendrehzahl bei gegebener Geschwindigkeit (zugeschnittene Größengleichung)

$$n_{Tu} = i_{Ga} \cdot \frac{25 \cdot i_{RG}}{3 \cdot \pi \cdot r_T} \cdot v \quad (3.23)$$

- Pumpendrehzahl bei gegebener Motordrehzahl

$$n_P = \frac{n_M}{i_{Ge}} \quad (3.24)$$

- Zugkraft am Treibradumfang bei vorliegender experimentell ermittelter Wirkungsgradkennlinie des Strömungsgetriebes

$$F_T = (1 - \psi) \cdot M_M \cdot i_{ges} \cdot \eta_{ges} \cdot \frac{1}{r_T} \quad (3.25)$$

mit:

$$i_{ges} = i_{Ge} \cdot \mu(v) \cdot i_{Ga} \cdot i_{RG} \quad (3.26)$$

$$\eta_{ges} = \eta_{Ge} \cdot \eta_h \cdot \eta_{Ga} \cdot \eta_{VG} \cdot \eta_{Gw} \cdot \eta_{RG} \quad (3.27)$$

– es bedeuten:

i_{Ge}	[-]	Übersetzungsverhältnis Getriebeeingangswelle/Pumpenwelle
i_{Ga}	[-]	Übersetzungsverhältnis Turbinenwelle/Getriebeausgangswelle
i_{RG}	[-]	Übersetzungsverhältnis Radsatzgetriebe
η_{Ge}	[-]	Wirkungsgrad Getriebeeingangswelle/Pumpenwelle
η_{Ga}	[-]	Wirkungsgrad Turbinenwelle/Getriebeausgangswelle
η_h	[-]	hydraulischer Wirkungsgrad des Wandlers
η_{VG}	[-]	Wirkungsgrad Verteilergetriebe (falls vorh.)
η_{RG}	[-]	Wirkungsgrad des Radsatzgetriebes
η_{Gw}	[-]	Wirkungsgrad der Gelenkwellen
ψ	[-]	Hilfsleistungsfaktor

3.5.3. Kupplungsstufe

- ähnlich dieselmechanischer Leistungsübertragung
- Auslegung der Kupplungen meist für einen Wirkungsgrad $\eta_K \approx 0,94...0,96$ (inklusive mechanischer Verluste) und $\nu = 0,97...0,98$ (d.h. 2...3 % Schlupf)
- Drehzahlbereich, in dem der DM arbeitet: $0,6 \cdot n_{M,nenn} \leq n_M \leq n_{M,nenn}$
- Zugkraft am Treibradumfang

$$F_T = \frac{i_{Ga} \cdot i_{Ge} \cdot i_{RG}}{r_T} \cdot \eta_{RG} \cdot \eta_K \cdot \eta_{Ge} \cdot \eta_{Ga} \cdot \eta_{VG} \cdot \eta_{Gw} \cdot (1 - \psi) \cdot M_M \quad (3.28)$$

- es bedeuten:

η_K [-] Wirkungsgrad der Strömungskupplung

- Fahrzeuggeschwindigkeit

$$v = \frac{2 \cdot \pi \cdot v_K \cdot r_T}{i_{Ge} \cdot i_{Ga} \cdot i_{RG}} \cdot n_M \quad (3.29)$$

- Fahrzeuggeschwindigkeit (zugeschnittene Größengleichung)

$$v = \frac{3 \cdot \pi \cdot r_T \cdot v_K}{25 \cdot i_{Ge} \cdot i_{Ga} \cdot i_{RG}} \cdot n_M \approx \frac{0,377 \cdot r_T \cdot v_K}{i_{Ge} \cdot i_{Ga} \cdot i_{RG}} \cdot n_M \quad (3.30)$$

- es bedeuten:

ν_K [-] Drehzahlverhältnis im Arbeitspunkt der Kupplung (i.d.R. 0,97...0,98)

- anzusetzende Wirkungsgrade:

η_{RG}	0,98
η_{Ga}	0,98
η_{Ge}	0,98
η_{Gw}	0,98...0,99
$\eta_{h,max}$	0,8...0,9
η_K	0,94...0,96
η_{VG}	0,98

3.5.4. Ermittlung der Zugkraft mittels Typenzugkraftkurven

- Getriebehersteller stellt Typenzugkraftkurven als Resultat von Prüfstandsmessungen zur Verfügung

- Diagramme enthalten meist folgende Kurven:

- Zugkraft:

$$\frac{F}{F_{iy}} \left(\frac{v}{v_y} \right) = \frac{F_T}{F_i(v_{max})} \left(\frac{v}{v_{max}} \right)$$

- Getriebewirkungsgrad:

$$\eta_{StG} \left(\frac{v}{v_y} \right) = \eta_{StG} \left(\frac{v}{v_{max}} \right)$$

- Getriebeeingangsdrehzahl:

$$\frac{n_1}{n_{1y}} \left(\frac{v}{v_y} \right) = \frac{n_{Ge}}{n_{Ge}(v_{max})} \left(\frac{v}{v_{max}} \right)$$

- es bedeuten:

F_{iy}	[kN]	ideelle Zugkraft bei maximaler Geschwindigkeit
v_y	[km/h]	Höchstgeschwindigkeit
n_1	[min^{-1}]	Getriebeeingangsdrehzahl
n_{1y}	[min^{-1}]	Getriebeeingangsdrehzahl bei maximaler Geschwindigkeit

- Zugkraft an den Treibachsen ergibt sich zu:

$$F_T(v) = \underbrace{\frac{F}{F_{iy}}}_{\text{Diagramm}} \cdot F_{iy} \quad (3.31)$$

- mit:

$$F_{iy} = \frac{3,6 \cdot (1 - \psi) \cdot P_{Nenn}}{v_{max}} \quad (3.32)$$

3.6. Dieselelektrischer Antrieb

- Behelf nach Wende auf statistischer Basis:

$$F_T = \frac{(1 - \psi) \cdot P_M}{v} \cdot \eta_{Lü} \quad (3.33)$$

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

$$\eta_{Lü} = 0,94 \cdot \left(1 - e^{-7 \cdot \frac{v}{v_{max}}}\right) + 0,097 - 0,24 \cdot \frac{v}{v_{max}} - 0,077 \cdot \left[1 + 1,55 \cdot \left(1 - \frac{v}{v_{max}}\right)\right] \cdot \left(1 - \frac{P_{DM}}{P_{DM,max}}\right) \quad (3.34)$$

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

$$\eta_{Lü} = 0,921 \left(1 - e^{-\frac{12 \cdot v}{v_{max}}}\right) + 0,022 - \frac{0,088 \cdot v}{v_{max}} - 0,1 \left(1 - \frac{P_{DM}}{P_{DM,max}}\right) \quad (3.35)$$

- mit:

$$\begin{array}{ll} \eta_{Lü} & [-] \text{ Wirkungsgrad der Leistungsübertragung} \\ P_{DM} & [-] \text{ Dieselmotorleistung} \end{array}$$

3.7. Zugkraftherzeugung mittels elektrischer Maschinen

3.7.1. Zugkraftherzeugung mittels Gleichstromreihenschlussmaschinen

Randbedingungen

- Kupferverluste werden über ohmschen Anker- bzw. Erregerwiderstand erfasst
- Eisen-, Reibungs- und Zusatzverluste werden nicht erfasst
- liegt keine magnetische Sättigung vor, wird ein linearer Zusammenhang von magnetischem Fluss Φ und Erregerstrom I_A angenommen (siehe Abbildung 3.1)
- Motorsteuerung erfolgt über Klemmenspannung und Erregerfeld

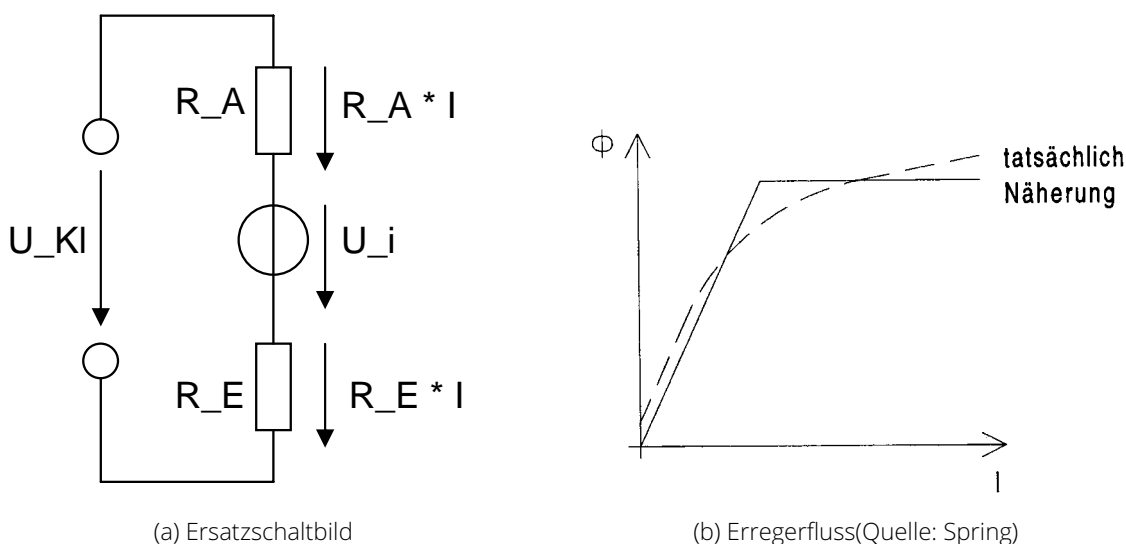


Abbildung 3.1.: Charakterisierung von Gleichstromreihenschlussmaschinen

U_{KI}	Rotorklemmspannung
U_i	Gegenurspannung / in Rotorwicklung induzierte Spannung
I_A	Strom durch Rotorwicklung
R_A	Widerstand der Rotorwicklung
R_E	Widerstand der Erregerwicklung
k_1	Maschinenkonstante
k_Φ	Flusskonstante
M_M	Motordrehmoment
n	Motordrehzahl
Φ	magnetischer Fluss des Erregerfeldes

3.7.2. Berechnungen Gleichstromreihenschlussmaschine

magnetisch ungesättigt	magnetisch gesättigt
$I_M = I_A = I_E$	
$U_i = k_1 \Phi n = k_1 k_\Phi I_A n$	$U_i = k_1 \Phi n$
$U_{KI} = U_i + I_A R_A + I_A R_E$	
$U_{KI} = k_1 k_\Phi I_A n + I_A (R_A + R_E)$	$U_{KI} = k_1 \Phi n + I_A (R_A + R_E)$
$M_M = \frac{U_i I_A}{2\pi n}$	
$M_M(I_A) = \frac{k_1 k_\Phi I_A n I_A}{2\pi n} = \frac{k_1 k_\Phi I_A^2}{2\pi}$	$M(I_A) = \frac{k_1 \Phi n I_A}{2\pi n} = \frac{k_1 \Phi I_A}{2\pi}$
$I_A = \frac{U_{KI}}{k_1 k_\Phi n + R_A + R_E}$	$I_A = \frac{U_{KI} - k_1 \Phi n}{R_A + R_E}$
$M_M(n) = \frac{k_1 k_\Phi U_{KI}^2}{2\pi (k_1 k_\Phi n + R_A + R_E)^2}$	$M_M(n) = \frac{k_1 \Phi U_{KI} - k_1^2 \Phi^2 n}{2\pi (R_A + R_E)}$

Ströme

- Reihenschlussmotor allgemein:

$$I_M = I_A = I_E$$

- Reihenschlussmotor im Feldschwächebetrieb:

$$\varepsilon = \frac{I_E}{I_A} \leq 1$$

$$I_M = I_A = I_E + I_{Sh}$$

- ε Erregergrad
- I_M Motorstrom
- I_A Anker-/Rotorstrom
- I_E Erreger-/Statorstrom
- I_{Sh} Strom parallel zur Statorwicklung (Shuntierstrom)

3.7.3. Zugkraftherzeugung mit Drehstrom-Asynchronmaschinen

Die Drehzahl des Feldes hängt von der Speisefrequenz und der Anzahl der Polpaare ab, sodass gilt:

$$n_d = \frac{f}{p} \quad (3.36)$$

n_d Drehfelddrehzahl
 f Speisefrequenz
 p Polpaarzahl

Die auf die Drehfelddrehzahl bezogene Drehzahldifferenz von Ständer und Läufer wird als Schlupf bezeichnet:

$$s = \frac{n_d - n}{n_d} = 1 - \frac{np}{f} \quad (3.37)$$

Einsträngiges vollständiges Ersatzschaltbild der Drehstromasynchronmaschine mit Käfigläufer:

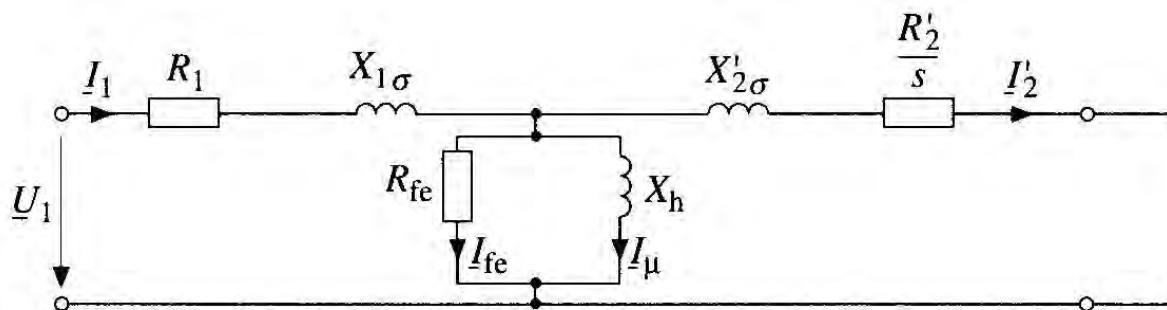


Abbildung 3.2.: Ersatzschaltbild Drehstromasynchronmaschine

U_1	Statorspannung
I_1	Statorstrom
I'_2	bezogener Rotorstrom
I_μ	Magnetisierungsstrom
I_{Fe}	Eisenverluststrom
R_1	Statorwiderstand
$R_{Fe+Reib}$	Reib- und Eisenverlustwiderstand
R'_2/s	auf Stator und Schlupf bezogener Läuferwiderstand
$X_{\sigma 1}$	Statorstreuinduktivität
X_μ	Hauptinduktivität
$X'_{\sigma 2}$	auf Stator bezogene Läuferinduktivität

Vereinfachtes Ersatzschaltbild für große Maschinen:
mit:

$$X = X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2} \quad (3.38)$$

$$L = L_{\sigma 1} + L'_{\sigma 2} \quad (3.39)$$

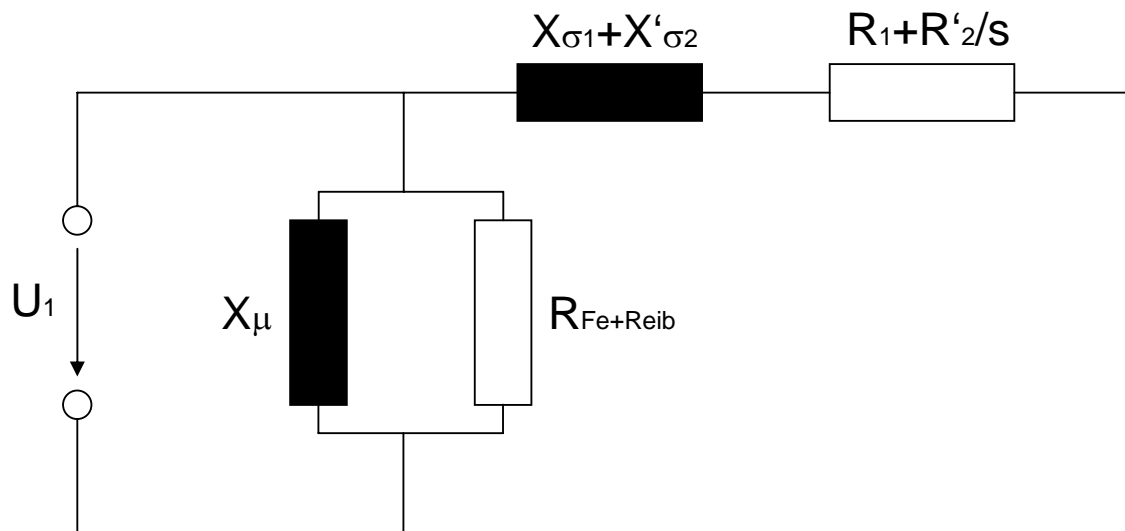


Abbildung 3.3.: vereinfachtes Ersatzschaltbild der DAM

Kippmoment M_K und zugehöriger Kippschlupf s_K können dann mit folgenden Gleichungen berechnet werden:

$$M_K = \frac{3}{2\pi n_d} \cdot \frac{U_1^2}{2X} = \frac{3p}{2\pi f} \cdot \frac{U_1^2}{4\pi f L} = \frac{3pU_1^2}{8\pi^2 f^2 L} \quad (3.40)$$

$$s_K = \frac{R'_2}{X} = \frac{R'_2}{2\pi f L} \quad (3.41)$$

Kloss'sche Formel

$$M = M_K \cdot \frac{2}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}} = M_K \frac{2}{\frac{1 - \frac{\eta p}{f}}{s_K} + \frac{s_K}{1 - \frac{\eta p}{f}}} \quad (3.42)$$

Soll-Schlupf bei vorgegebenen Drehmoment

$$s_{1/2} = \frac{M_K s_K}{M} \pm \sqrt{\frac{M_K^2}{M^2} s_K^2 - s_K^2} \quad (3.43)$$

3.7.4. Berechnung Zugkraftcharakteristik

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

$$v = \frac{2 \cdot \pi n_M \cdot r_{min}}{i_{RG}} \quad (3.44)$$

$$F_T = \frac{i_{RG} \cdot \eta_{RG} \cdot z_M}{r} \cdot M_M \quad (3.45)$$

r_{min}	Minimaler Treibradsatzradius
i_{RG}	Übersetzung des Radsatzgetriebes
η_{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:

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

4. Kennlinienfelder

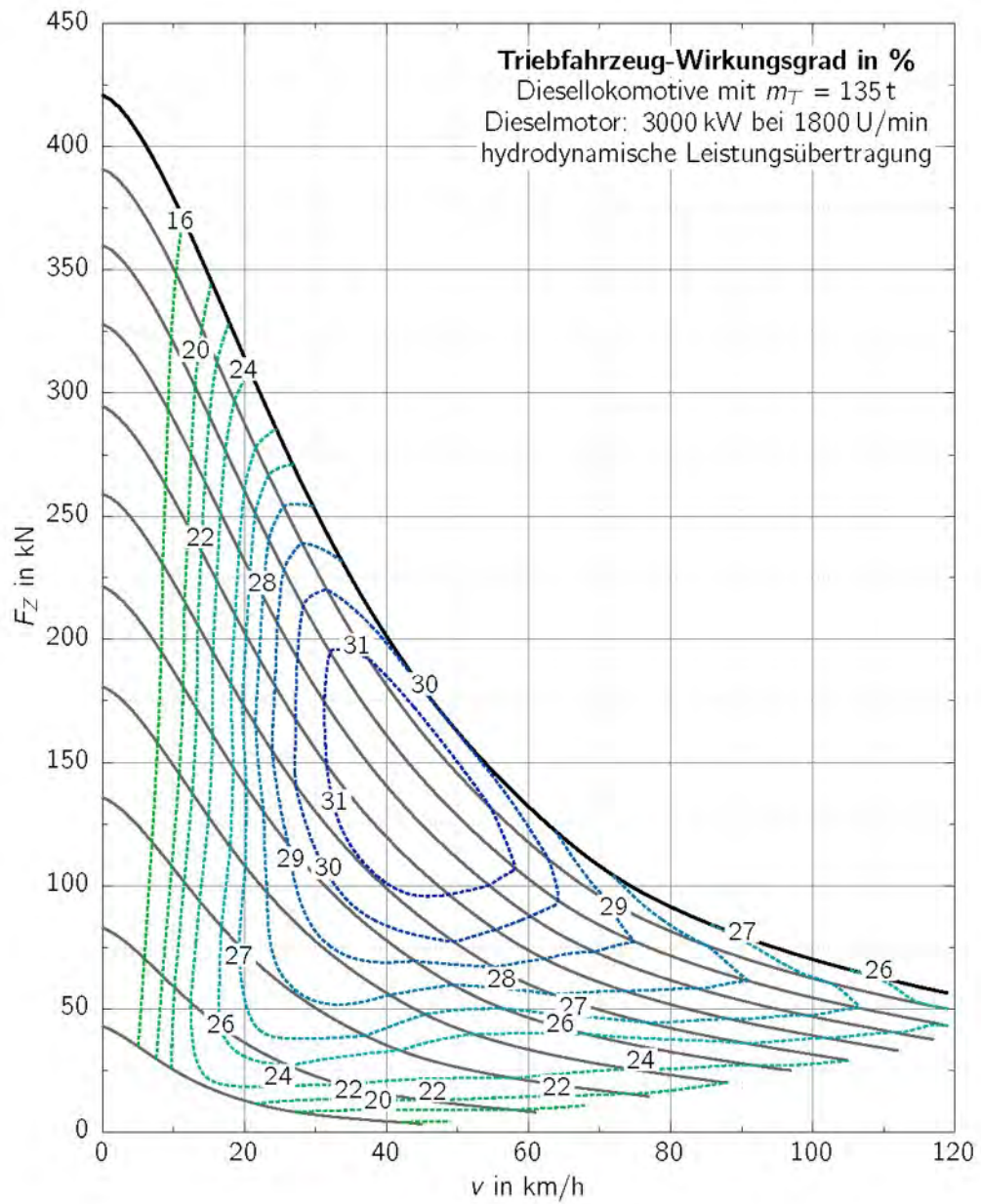


Abbildung 4.1.: Kennliniendfeld einer dieselhydraulischen Lokomotive (Beispiel)

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:

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

- 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
ρ_{ZSS}	[kW]	Komfortleistungsbedarf ¹ je Wagenradsatz
v	[km/h]	Geschwindigkeit
z_A	[-]	Anzahl der Wagenradsätze

¹ZSS - Zugsammelschiene (zentrale elektrische Energieversorgung des Wagenzuges)

5. Leistungsbedarfsermittlung

Z_{FM}	[-]	Anzahl der Fahrmotoren
$\eta_{Lü}$	[-]	Wirkungsgrad der Leistungsübertragung
η_{RS}	[-]	Wirkungsgrad des Radsatzantriebes
ψ	[-]	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:	$\eta_{Lü} \leq 0,80$
Dieselektrik:	$\eta_{Lü} \leq 0,85$

Anhaltswerte Komfortleistungsbedarf

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

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 auf 0 gesetzt

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

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

Anfahrgranzmasse

- Näherungsgleichung der DR

$$m_{W,A} = \frac{F_A - (i + 2 \cdot f_K) \cdot g \cdot m_T}{(0,006 + 1,3 \cdot i + 2 \cdot f_K) \cdot g} \quad (6.5)$$

F_A	[kN]	maximale Anfahrzugkraft des Triebfahrzeuges
i	[-]	Streckeneneigung an der Anfahrstelle
f_K	[-]	spezifischer Krümmungswiderstand an der Anfahrstelle
m_T	[t]	Triebfahrzeugmasse
$f_{WFA,0}$	[-]	spezifischer Losbrechwiderstand

- Näherungsgleichung der DB

$$m_{W,A} = \frac{F_A - (i \cdot g + a_0 \cdot \xi_Z) \cdot m_T}{f_{WZ0} \cdot g + i \cdot g + a_0 \cdot \xi_Z} \quad (6.6)$$

a_0	[m/s ²]	Anfahrbeschleunigung Reisezüge: $a_0 = 0,2 \text{ m/s}^2$ Güterzüge: $a_0 = 0,1 \text{ m/s}^2$
f_{WZ0}	[-]	spezifischer Grundwiderstand Leerwagenzug: $f_{WZ0} = 0,0020$ sonstige Züge: $f_{WZ0} = 0,0016$

Lokomotiv-Kenndiagramm und Schlepplastentafel

- „v-Geraden“:

$$F = F_Z(v) - m_W \cdot g \cdot f_{WFW} \quad (6.7)$$

- „i-Geraden“:

$$F = (m_T + m_W) \cdot g \cdot f_{WS} \quad (6.8)$$

- vereinfachte Anfahrgranzmassen (Endpunkte der i-Geraden, Begrenzungslinie):

$$m_{W,A} = \frac{F_Z(v=0) - m_T \cdot g \cdot i}{g \cdot (f_{W,A} + i)} \quad (6.9)$$

- mit:

$i = 0 \dots 0,01$	$f_{W,A} = 0,007 + 0,2 \cdot i$
$i = 0,01 \dots 0,02$	$f_{W,A} = 0,009 + 0,35 \cdot (i - 0,01)$
$i = 0,02 \dots 0,03$	$f_{W,A} = 0,0125 + 0,55 \cdot (i - 0,02)$

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:

$$vdv = adx = f(x)dx \quad (7.16)$$

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

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

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

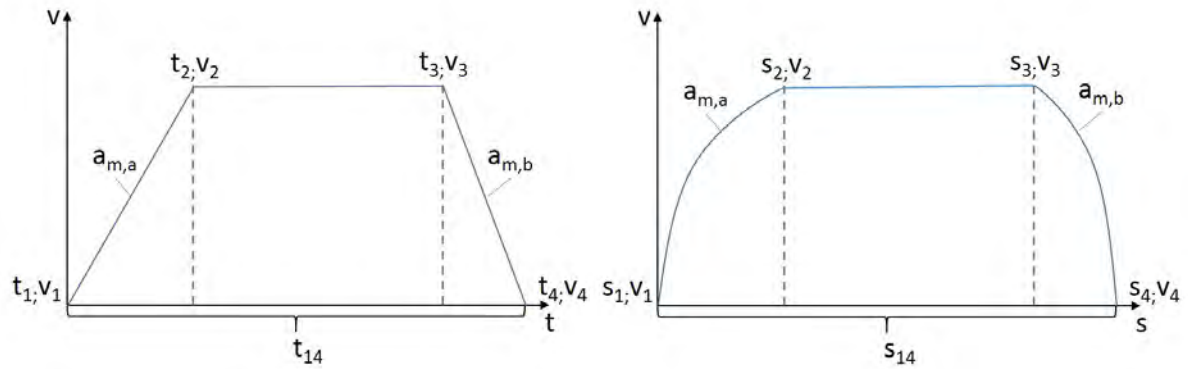
7.2. Überschlagsrechnungen

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

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:

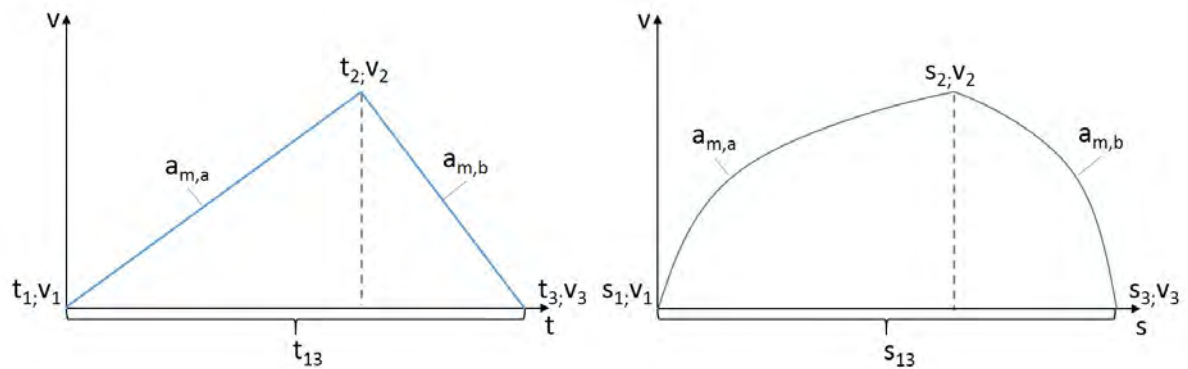
$$t_{34} = \frac{v_4 - v_3}{a_{m,b}} \quad (7.25)$$

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

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:

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

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

Bremsung:

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

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

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:

$$t_{13} = t_{12} + t_{34} = \frac{v_2 - v_1}{a_{m,a}} + \frac{v_3 - v_2}{a_{m,b}} \quad (7.33)$$

7.3. Abschätzung der Längsbeschleunigungen von Zugfahrten

Erfahrungswerte zur Längsbeschleunigung

Beschleunigung:

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

Bremmung:

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

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

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

- 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:

$$p = K_1 \cdot v^2 + K_2 \cdot v + K_3 \quad (7.65)$$

für die einzelnen Koeffizienten in Gleichung 7.65 ergibt sich:

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

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

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

mit:

- K_i Koeffizienten der Näherungsformel für Zughakenzugkraft
- α konstanter Faktor des spez. Wagenzugwiderstandes
- β linearer Koeffizient des spez. Wagenzugwiderstandes
- γ quadratischer Koeffizient des spez. Wagenzugwiderstandes

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

$$A = \frac{12960}{\xi_Z} \cdot g \cdot K_1 \quad (7.69)$$

$$B = \frac{12960}{\xi_Z} \cdot g \cdot K_2 \quad (7.70)$$

$$C = \frac{12960}{\xi_Z} \cdot g \cdot (K_3 - f_{ws}) \quad (7.71)$$

! Beachte: v [km/h], a [km/h²]

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 ²]	Beschleunigungsgrundfunktion
Δs	[km]	zurückgelegte Streckenlänge
Δt	[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:

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

7. Fahrzeitermittlung und Zugfahrtsimulation

- 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 Δt gilt für Δs :

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

A. Anhang

A.1. Fahrdynamische Massenfaktoren ausgeführter Fahrzeuge

Fahrzeug(verband)	ξ
Elektrische Lokomotiven	
BR 101	1,11
BR 103	1,12
BR 111	1,15
BR 120	1,11
BR 141	1,19
BR 143	1,16
BR 145	1,11
BR 146	1,11
BR 151	1,28
BR 152	1,10
BR 155	1,16
BR 185	1,10
Rh 1016/1116 (ÖBB Taurus)	1,10
Alstom Prima I	1,15
Diesellokomotiven	
BR 211	1,07
BR 216 (LG) ¹	1,06
BR 216 (SG) ²	1,09
BR 218	1,05
BR 232	1,17
BR 290 (LG)	1,16
BR 290 (SG)	1,09
Siemens ER 20	1,08
BR 323	1,10
BR 333	1,08
BR 360 (LG)	1,41
BR 360 (SG)	1,21
Elektrische Triebwagen und Triebzüge	
BR 401 (ICE 1)	1,08
BR 403/406	1,04
BR 423 (leer)	1,07
BR 423 (besetzt)	1,06
BR 425/426	1,06
Dieseltriebwagen	
BR 611	1,06
BR 612	1,06
BR 628.4	1,04
BR 650 (RS1)	1,04

¹LangsamGang (=Rangiergang)

²SchnellGang (=Streckengang)

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)

Hanker (allgemein)

$$f_k = \frac{0,5 \cdot c \cdot \mu}{R} \cdot \left(\mu \cdot \tan\beta + 1 + \frac{b}{c} \right) \quad (\text{A.5})$$

c	[m]	Achsstand des 2-achsigen Fahrzeuges / im Drehgestell
μ	[-]	Gleitreibwert Radlauffläche-Schiene
R	[m]	Bogenradius
β	[°]	Spurkranzneigungswinkel ($\beta \approx 70^\circ$)
b	[m]	Laufkreisabstand (Normalspur: 1,5 m)

Hanker (nasse Schiene, Normalspur)

$$f_k = \frac{0,107 + 0,1055 \cdot c}{R} \quad (\text{A.6})$$

Hanker (trockene Schiene, Normalspur)

$$f_k = \frac{0,1425 + 0,141 \cdot c}{R} \quad (\text{A.7})$$

Schramm (Freilauf)

$$f_k = \frac{0,5 \cdot \mu}{R} \cdot (1 + \mu_{Sp} \cdot \tan\beta) \cdot \left(\sqrt{c^2 + 0,25 \cdot b^2} + 0,5 \cdot b \right) \quad (\text{A.8})$$

Schramm (Spießgang)

$$f_k = \frac{0,5 \cdot \mu}{R} \cdot (1 + \mu_{Sp} \cdot \tan\beta) \cdot M \quad (\text{A.9})$$

mit:

$$M = \sqrt{\frac{c^2}{4} + R\sigma \left(\frac{R\sigma}{c^2} + 1 \right) + 0,25 \cdot b^2} + \sqrt{\frac{c^2}{4} + R\sigma \left(\frac{R\sigma}{c^2} - 1 \right) + 0,25 \cdot b^2} \quad (\text{A.10})$$

Kriterium für Freilauf

$$R \geq \frac{c^2}{2 \cdot \sigma}$$

Kriterium für Spießgang

$$R < \frac{c^2}{2 \cdot \sigma}$$

Schramm (allg. Näherung)

$$f_k = \frac{0,160 \cdot c + 0,162}{R} \quad (\text{A.11})$$

μ	[-]	Gleitreibwert Radlauffläche-Schiene ($\mu \approx 0,16$ (trocken)...0,25 (naß))
μ_{Sp}	[-]	Gleitreibwert Spurkranz-Schiene ($\mu_{Sp} \approx 0,25 / 0,05$ (Spurkranzschmierung))
R	[m]	Gleisbogenradius
c	[m]	Achsstand im Wagen/Drehgestell
b	[m]	Laufkreisabstand (Normalspur: b = 1,5 m)
σ	[m]	Spurspiel (Annahme: $\sigma=0,015$ m)
β	[°]	Spurkranzwinkel ($\beta \approx 70^\circ$)

A.3. Gleichungsübersicht Krümmungswiderstandskraft (Bogenwiderstandskraft)

Röckl ($R \geq 300m$)

$$f_k = \frac{0,65}{R-55} \quad (\text{A.12})$$

Röckl ($R < 300m$)

$$f_k = \frac{0,5}{R-30} \quad (\text{A.13})$$

Röckl für Meterspur

$$f_k = \frac{0,4}{R-20} \quad (\text{A.14})$$

Röckl für 750 mm - Spurweite

$$f_k = \frac{0,3}{R-10} \quad (\text{A.15})$$

Röckl für 600 mm - Spurweite

$$f_k = \frac{0,2}{R-5} \quad (\text{A.16})$$

Formel der SŽD (1520 mm -Breitspur)

$$f_k = \frac{0,7}{R} \quad (\text{A.17})$$

SBB (Ablauf- und Rangierbetrieb)

$$f_k = 0,107 \cdot \frac{1+c}{R} \quad (\text{A.18})$$

Hamelik und Adler (Straßenbahnen)

$$f_k = \frac{0,033 \cdot b + 0,158 \cdot c}{R} \quad (\text{A.19})$$

Maurich/Matthes/Stößel (Straßenbahnen)

$$f_k = \frac{0,153 \cdot b + 0,1 \cdot c}{R} \quad (\text{A.20})$$

A.4. Empirische Fahrzeugwiderstandsgleichungen für lokbespannte Züge

- BR 101 + 9 Wagen (inkl. Steuerwagen)

$$F_{WFZ} = 9,71 + 1,1 \cdot \frac{v}{100} + 10,7 \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.21})$$

- IC 2000 (10 Doppelstockwagen) mit Re 460 der SBB

$$F_{WFZ} = 6,8 + 7,0 \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.22})$$

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

$$F_{WFZ} = 3,36 + 0,793 \cdot \frac{v}{100} + 8,49 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.23})$$

- (Schwedischer) Reisezug mit Ellok (Rc6) und 13 Schnellzugwagen:

$$F_{WFZ} = 5,61 + 1,93 \cdot \frac{v}{100} + 14,63 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.24})$$

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

$$F_{WFZ} = 2,54 + 3,34 \cdot \frac{v}{100} + 5,72 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.25})$$

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

$$F_{WFZ} = 6,2 + 4,0 \cdot \frac{v}{100} + 8,0 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.26})$$

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

$$F_{WFZ} = 1,551 + 3,714 \cdot \frac{v}{100} + 4,064 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.27})$$

- Talgozug (Typ VII, 11 Wagen) mit Ellok (Renfe serie 252 (Europrinter)):

$$F_{WFZ} = 1,8 + 3,19 \cdot \frac{v}{100} + 4,85 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.28})$$

A.5. Baureihenspezifische Triebfahrzeugwiderstandsgleichungen

Lokomotiven

Dampflokomotiven

- BR 01 (Altbau)

$$F_{WFT} = 6,0 + 7,1 \cdot \left(\frac{v + \Delta v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.29})$$

- BR 03.10 (Altbau)

$$F_{WFT} = 4,1 + 3,6 \cdot \left(\frac{v + \Delta v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.30})$$

- BR 38 (P 8)

$$F_{WFT} = 4,1 + 6,1 \cdot \left(\frac{v + \Delta v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.31})$$

- BR 44 (Altbau)

$$F_{WFT} = 8,1 + 6,7 \cdot \left(\frac{v + \Delta v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.32})$$

- BR 50 (Altbau)

$$F_{WFT} = 5,4 + 9,2 \cdot \left(\frac{v + \Delta v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.33})$$

Elektrische Lokomotiven

- BR 101

$$F_{WFT} = 1,43 + 0,84 \cdot \frac{v}{100} + 2,80 \cdot \left(\frac{v + \Delta v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.34})$$

- BR 103

$$F_{WFT} = 3,05 + 0,63 \cdot \frac{v}{100} + 2,10 \cdot \left(\frac{v + \Delta v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.35})$$

- BR 110

$$F_{WFT} = 1,55 + 0,84 \cdot \frac{v}{100} + 2,80 \cdot \left(\frac{v + \Delta v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.36})$$

- BR 111

$$F_{WFT} = 1,50 + 0,84 \cdot \frac{v}{100} + 2,80 \cdot \left(\frac{v + \Delta v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.37})$$

- BR 120

$$F_{WFT} = 1,38 + 0,84 \cdot \frac{v}{100} + 2,80 \cdot \left(\frac{v + \Delta v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.38})$$

- BR 143

$$F_{WFT} = 3,62 + 0,95 \cdot \frac{v}{100} + 4,45 \cdot \left(\frac{v + \Delta v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.39})$$

- BR 145

$$F_{WFT} = 1,42 + 0,84 \cdot \frac{v}{100} + 2,80 \cdot \left(\frac{v + \Delta v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.40})$$

A. Anhang

- BR 152

$$F_{WFT} = 1,45 + 0,84 \cdot \frac{v}{100} + 2,80 \cdot \left(\frac{v + \Delta v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.41})$$

- CC 6500 (SNCF)

$$F_{WFT} = 1,0 + 0,75 \cdot \frac{v}{100} + 3,2 \cdot \left(\frac{v + \Delta v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.42})$$

- E 200 der Taiwanesischen Staatsbahn (TRA)

$$F_{WFT} = 2,443 + 0,631 \cdot \frac{v}{100} + 3,934 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.43})$$

- Re 460/Re 465 (SBB/BLS)

$$F_{WFT} \approx 2,25 - 3,83 \cdot \frac{v}{100} + 6,703 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.44})$$

- Rh 1016/1116 (ÖBB)

$$F_{WFT} = 1,012 + 0,99 \cdot \frac{v}{100} + 3,5 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.45})$$

- Gleichung von VUZ³ für Drehstromlokomotiven mit vier angetriebenen Radsätzen (ähnlich BR 186 oder BR 189):

$$F_{WFT} = 1,17 + 1,804 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.46})$$

- Alstom Prima I:

$$F_{WFT} = 1,107 + 0,9 \cdot \frac{v}{100} + 3,0 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.47})$$

- SS4 der Chinesischen Eisenbahn

$$F_{WFT} = 4,061 + 0,953 \cdot \frac{v}{100} + 1,605 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.48})$$

Diesellokomotiven

- BR 201 (ex 110)

$$F_{WFT} = 0,96 + 3,83 \cdot \left(\frac{v + 20}{100} \right)^2 \quad (\text{A.49})$$

- BR 211

$$F_{WFT} = 1,37 + 4,95 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.50})$$

- BR 212

$$F_{WFT} = 1,39 + 4,95 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.51})$$

- BR 215

$$F_{WFT} = 2,80 + 3,48 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.52})$$

³VUZ = Výzkumný Ústav Železniční (dt.: „Forschungsinstitut der Eisenbahn“) ist eine Tochtergesellschaft der Tschechischen Eisenbahn und betreibt den Versuchsring Velim

A.5. Baureihenspezifische Triebfahrzeugwiderstandsgleichungen

- BR 218

$$F_{WFT} = 2,85 + 3,48 \cdot \left(\frac{v + \Delta v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.53})$$

- BR 228 (ex 118)

$$F_{WFT} = 1,47 + 2,65 \cdot \left(\frac{v + 20}{100} \right)^2 \quad (\text{A.54})$$

- BR 220 (ex 120)

$$F_{WFT} = 4,63 + 3,92 \cdot \left(\frac{v + 20}{100} \right)^2 \quad (\text{A.55})$$

- BR 232 (ex 132)

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

- Siemens ER 20

$$F_{WFT} = 0,965 + 1,472 \frac{v}{100} + 3,340 \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.57})$$

- CC 72000 (SNCF)

$$F_{WFT} = 1,5 + 1,14 \cdot \frac{v}{100} + 3,0 \cdot \left(\frac{v + 12}{100} \right)^2 \quad (\text{A.58})$$

- BR 290

$$F_{WFT} = 1,75 + 4,95 \cdot \left(\frac{v + \Delta v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.59})$$

- BR 323 (Köf II)

$$F_{WFT} = 0,36 + 6,06 \cdot \left(\frac{v + \Delta v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.60})$$

- BR 333 (Köf III)

$$F_{WFT} = 0,38 + 0,91 \cdot \frac{v}{100} + 2,41 \cdot \left(\frac{v + \Delta v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.61})$$

- BR 346 (ex 106)

$$F_{WFT} = 1,2949 + 8,5 \cdot \left(\frac{v + \Delta v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.62})$$

- BR 360

$$F_{WFT} = 1,01 + 10 \cdot \left(\frac{v + \Delta v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.63})$$

- Dieselelektrische Lokomotive 4000 Class von Queensland Rail (Spurweite: 1000 mm)

$$F_{WFT} = 1,262 + 2,4 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.64})$$

Triebwagen und Triebzüge

- BR 420

$$F_{WFT} = 2,49 + 2,5 \cdot \frac{v}{100} + 4,10 \cdot \left(\frac{v + \Delta v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.65})$$

A. Anhang

- BR 425

$$F_{WFT} \approx 1,857 + 1,74 \cdot \frac{v}{100} + 6,00 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.66})$$

- BR 426

$$F_{WFT} \approx 1,143 + 1,93 \cdot \frac{v}{100} + 3,00 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.67})$$

- BR 612

$$F_{WFT} = 1,58 + 1,03 \cdot \frac{v}{100} + 2,9 \cdot \left(\frac{v+15}{100}\right)^2 \quad (\text{A.68})$$

- BR 628

$$F_{WFT} = 0,79 + 0,79 \cdot \frac{v}{100} + 2,9 \cdot \left(\frac{v+15}{100}\right)^2 \quad (\text{A.69})$$

- BR 640 (Coradia LINT)

$$F_{WFT} = 0,69212 + 0,44 \cdot \frac{v}{100} + 2,226 \cdot \left(\frac{v+15}{100}\right)^2 \quad (\text{A.70})$$

- Britische class 390 („Pendolino Britannico“), neunteilig

$$F_{WFT} = 5,4216 + 1,92 \cdot \frac{v}{100} + 9,336 \cdot \left(\frac{v+\Delta v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.71})$$

- Britische class 43 (auch „InterCity 125“ oder „HST“) mit 8 Zwischenwagen

$$F_{WFT} = 3,2217 + 3,13 \cdot \frac{v}{100} + 6,019 \cdot \left(\frac{v+\Delta v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.72})$$

- X 2100 (SNCF)

$$F_{WFT} = 0,35 + 0,48 \cdot \frac{v}{100} + 3,34 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.73})$$

- X 72500 (SNCF)

$$F_{WFT} = 2,0 + 1,78 \cdot \frac{v}{100} + 3,59 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.74})$$

- Z 20500 (SNCF)

$$F_{WFT} = 1,8 + 2,9 \cdot \frac{v}{100} + 5,6 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.75})$$

- RABDe 500 „ICN“ (SBB)

$$F_{WFT} = 2,1 + 1,9 \cdot \frac{v}{100} + 5,6 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.76})$$

- RABe 502 (SBB)

$$F_{WFT} = 5,5 + 5,9 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.77})$$

- Reihe 592 (Renfe) / Reihe 0500 (CP)

$$F_{WFT} = 2,452 + 3,233 \cdot \frac{v}{100} + 2,267 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.78})$$

A.6. Fahrzeugwiderstandsgleichungen von Hochgeschwindigkeitszügen

Gleichungen nach Peters für ICE:

- ICE 1 mit 12 Mittelwagen (BR 401)

$$F_{WFZ} = 5,77 + 3,62 \cdot \frac{v}{100} + 8,94 \cdot \left(\frac{v+15}{100} \right)^2 \quad (\text{A.79})$$

- ICE 1 mit 12 Mittelwagen (BR 401) im Tunnel

$$F_{WFZ} = 5,77 + 3,62 \cdot \frac{v}{100} + 10,66 \cdot \left(\frac{v+15}{100} \right)^2 \quad (\text{A.80})$$

- ICE 1 mit 11 Mittelwagen (BR 401)

$$F_{WFZ} = 5,46 + 3,51 \cdot \frac{v}{100} + 8,42 \cdot \left(\frac{v+15}{100} \right)^2 \quad (\text{A.81})$$

- ICE 1 mit 11 Mittelwagen (BR 401) im Tunnel

$$F_{WFZ} = 5,46 + 3,51 \cdot \frac{v}{100} + 10,09 \cdot \left(\frac{v+15}{100} \right)^2 \quad (\text{A.82})$$

- ICE 2 (BR 402)

$$F_{WFZ} = 3,13 + 1,96 \cdot \frac{v}{100} + 5,81 \cdot \left(\frac{v+15}{100} \right)^2 \quad (\text{A.83})$$

- 2 x ICE 2

$$F_{WFZ} = 6,26 + 3,92 \cdot \frac{v}{100} + 11,00 \cdot \left(\frac{v+15}{100} \right)^2 \quad (\text{A.84})$$

- ICE 3 (BR 403)

$$F_{WFZ} = 3,30 + 2,42 \cdot \frac{v}{100} + 5,52 \cdot \left(\frac{v+15}{100} \right)^2 \quad (\text{A.85})$$

- 2 x ICE 3

$$F_{WFZ} = 6,60 + 4,84 \cdot \frac{v}{100} + 10,63 \cdot \left(\frac{v+15}{100} \right)^2 \quad (\text{A.86})$$

- ICE 3M (Mehrsystemvariante BR 406)

$$F_{WFZ} = 3,45 + 2,75 \cdot \frac{v}{100} + 5,89 \cdot \left(\frac{v+15}{100} \right)^2 \quad (\text{A.87})$$

- 2 x ICE 3M (Mehrsystemvariante BR 406)

$$F_{WFZ} = 6,90 + 5,49 \cdot \frac{v}{100} + 11,34 \cdot \left(\frac{v+15}{100} \right)^2 \quad (\text{A.88})$$

Gleichungen für weitere Hochgeschwindigkeitszüge:

- Gleichung für TGV-Züge allgemein:

$$F_{WFZ} = 0,0077\sqrt{10n_{RS}m_Z} + 0,008m_Z \cdot \frac{v}{100} + (2,225 + 0,0352n_W) \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.89})$$

mit:

n_{RS}	[-]	Anzahl der Radsätze im Zug
n_W	[-]	Anzahl der Zwischenwagen
m_Z	[-]	Zugmasse

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

$$F_{WFZ} = 2,43 + 3,06 \cdot \frac{v}{100} + 5,39 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.90})$$

- TGV Atlantique ($m_Z=490$ t, LüP = 238 m, $v_{max} = 300$ km/h)

$$F_{WFZ} = 2,94 + 3,82 \cdot \frac{v}{100} + 6,37 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.91})$$

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

$$F_{WFZ} = 2,7 + 3,2 \cdot \frac{v}{100} + 5,35 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.92})$$

- Eurostar ($m_Z=816$ t, LüP = 393,7 m, $v_{max} = 300$ km/h)

$$F_{WFZ} = 4,82 + 6,53 \cdot \frac{v}{100} + 10,5 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.93})$$

- Talgo 250 / Renfe-Baureihe 130 ($v_{max} = 250$ km/h)

$$F_{WFZ} = 2,23 + 4,985 \cdot \frac{v}{100} + 4,828 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.94})$$

- Talgo 250 H / Renfe-Baureihe 730 ($v_{max} = 250$ km/h)

$$F_{WFZ} = 3,165 + 2,5 \cdot \frac{v}{100} + 5,55 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.95})$$

- Shinkansen, Reihe 0 (JR)

$$F_{WFT} = 10,23 + 13,5 \cdot \frac{v}{100} + 12,3 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.96})$$

- Shinkansen, Reihe 100 (JR)

$$F_{WFT} = 11,06 + 3,04 \cdot \frac{v}{100} + 12,05 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.97})$$

- Shinkansen, Reihe 200 (JR)

$$F_{WFT} = 8,2 + 2,96 \cdot \frac{v}{100} + 9,2 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.98})$$

- Shinkansen, Reihe 300 (JR)

$$F_{WFT} = 9,62 + 9,67 \cdot \frac{V}{100} + 8,9 \cdot \left(\frac{V}{100}\right)^2 \quad (\text{A.99})$$

- HSR 350x der Koreanischen Staatsbahn

– offene Strecke:

$$1,967 + 2,61 \cdot \frac{V}{100} + 3,38 \cdot \left(\frac{V}{100}\right)^2 \quad (\text{A.100})$$

– Tunnel:

$$1,967 + 2,61 \cdot \frac{V}{100} + 4,39 \cdot \left(\frac{V}{100}\right)^2 \quad (\text{A.101})$$

- RABe 503 / ETR 610 (SBB)

$$F_{WFT} = 3,2 + 3,0 \cdot \frac{V}{100} + 5,6 \cdot \left(\frac{V}{100}\right)^2 \quad (\text{A.102})$$

- X2000 (SJ - 5 Mittelwagen)

$$F_{WFT} = 2,34 + 1,64 \cdot \frac{V}{100} + 6,1 \cdot \left(\frac{V}{100}\right)^2 \quad (\text{A.103})$$

A.7. Empirische Gleichungen für (spezifische) Wagenzugwiderstände

Formel von Strahl

$$f_{WFW} = \alpha + \gamma \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.104})$$

α [-] Grundwiderstandskonstante
 γ [-] Luftwiderstandskonstante

- Grundwiderstandskonstante α

Wagenzüge allgemein	0,0014-0,0016
Leerwagenzüge	0,0020
Güter-Ganzzüge	0,0012

- Luftwiderstandskonstante γ

Reisezüge aus modernen Wagen	0,0028
Reisezüge aus historischen Wagen	0,0032
Leerwagen-Güterzüge	0,0107
gemischte Güterzüge	0,0057
voll beladene Güterzüge	0,0032
Güter-Ganzzüge allg.	$\gamma = 0,010 \cdot \frac{l_W}{m_W}$

l_W - Wagenzuglänge [m], m_W - Wagenzugmasse [t]

Formel von Sauthoff (1933)

$$f_{WFW} = \alpha + \beta \cdot \frac{v}{100} + \gamma \cdot \left(\frac{v+12}{100} \right)^2 \quad (\text{A.105})$$

$$\text{mit: } \gamma = \frac{0,683 \text{ kN}}{m_W \cdot g} \cdot (2,7 + n_W)$$

α [-]	Grundwiderstandskonstante	n_W [-]	Anzahl der Wagen
β [-]	Laufwerkswiderstandskonstante	m_W [t]	Wagenzugmasse
γ [-]	Luftwiderstandskonstante		

- Grundwiderstandskonstante α

Reisezüge aus historischen Wagen	0,0019
Reisezügen aus moderneren Wagen	0,0016
Standardwert DB AG	0,0019
Doppelstockgliederzüge (Altbau)	0,0020

- Laufwerkswiderstandskonstante β

allgemeiner Fall	0,00025
Doppelstockgliederzüge (Altbau)	0,00072

- Luftwiderstandskonstante γ

Doppelstockgliederzüge (Altbau)	0,00364
---------------------------------	---------

Gleichungen für Reisezüge

Gleichung der DR⁴ für Reisezüge allgemein

$$f_{WFW} = 0,00046 + \frac{0,0041}{\sqrt{m_A}} + 0,0011 \cdot \frac{v}{100} + 0,00277 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.106})$$

Gleichung der DR¹ für Personenzüge aus DG-Wagen und Doppelstockzüge

$$f_{WFW} = 0,0016 + 0,0032 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.107})$$

Gleichung der DR¹ für Schnellzüge

$$f_{WFW} = 0,0016 + 0,00025 \cdot \frac{v}{100} + \frac{0,0696 \cdot (n_A + 2,7)}{m_W} \cdot \left(\frac{v + 12}{100}\right)^2 \quad (\text{A.108})$$

n_A - Anzahl der Radsätze im Zug

m_W - Wagenzugmasse [t]

Gleichung der DB⁵ für Reisezüge

$$f_{WFW} = 0,0019 + 0,00025 \cdot \frac{v}{100} + 0,0696 \cdot \left(0,02 + \frac{2,7}{m_W}\right) \cdot \left(\frac{v + 15}{100}\right)^2 \quad (\text{A.109})$$

m_W - Wagenzugmasse des Wagenzuges [t]

Gleichung der französischen Staatsbahn SNCF für Reisezüge

$$f_{WFW} = 0,0015 + 0,0022 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.110})$$

Gleichung der tschechischen Staatsbahn ČD für Reisezüge aus X- und Y-Wagen mit GP 200 - Drehgestellen ($m_A \leq 15 \text{ t}$, $m_W = 500 \dots 700 \text{ t}$)

$$f_{WFW} = 0,00135 + 0,0008 \cdot \frac{v}{100} + 0,0033 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.111})$$

Gleichung der sowjetischen Staatsbahn SŽD für Reisezüge bis 160 km/h

$$f_{WFW} = 0,0014 + 0,0012 \cdot \frac{v}{100} + 0,0026 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.112})$$

Gleichung der Indischen Staatsbahnen (IR) für Reisezüge (Spurweite 1676 mm):

$$f_{WFW} = 0,0007 + 0,0021 \cdot \frac{v}{100} + 0,0008 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.113})$$

Gleichung der Thailändischen Staatsbahn (SRT) für Reisezüge (Spurweite 1000 mm):

$$f_{WFW} = 0,0016 + 0,00075 \cdot \frac{v}{100} + 0,0030 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 \quad (\text{A.114})$$

⁴Mit DR ist im Kontext dieser Formelsammlung die Deutsche Reichsbahn der DDR gemeint.

⁵Mit „DB“ ist im Kontext dieser Formelsammlung die Deutsche Bundesbahn gemeint.

Gleichungen für Güterzüge

Gleichung der Deutschen Bahn für gemischte Güterzüge:

$$f_{WFW} = 0,0011 + 0,0047 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.115})$$

Gleichung der Deutschen Bahn für Ganzzüge aus Schüttgutwagen Bauart Fal (Erz- und Kohletransport):

$$f_{WFW} = 0,0011 + 0,0020 \cdot \left(\frac{v+15}{100} \right)^2 \quad (\text{A.116})$$

Gleichung der DR⁶ für Güterzüge aus leeren und beladenen Wagen unterschiedlicher Bauart:

$$f_{WFW} = 0,0016 + 0,0057 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.117})$$

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

$$f_{WFW} = 0,0016 + 0,0032 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.118})$$

Gleichung der DR für Güterzüge aus leeren Wagen unterschiedlicher Bauart:

$$f_{WFW} = 0,0016 + 0,0107 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.119})$$

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

$$f_{WFW} = 0,0012 + 0,0022 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.120})$$

Gleichung der DR für Güterzüge allgemein (Empfehlung: $v \geq 50$ km/h)

$$0,00009 + 0,004 \cdot \frac{v}{100} + \left(\frac{0,025}{980} \cdot m_A^2 - 0,0012 \cdot m_A + 0,0141 \right) \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.121})$$

m_A - mittlere Radsatzfahrmasse des Wagenzuges [t]

Gleichung der DB⁷ für Güterzüge (Empfehlung: $v < 50$ km/h)

$$f_{WFW} = 0,0020 + 0,0047 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.122})$$

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

$$f_{WFW} = 0,0010 + 0,0015 \cdot \left(\frac{v+15}{100} \right)^2 \quad (\text{A.123})$$

Gleichung der ČD⁸ für Güterzüge aus leeren Güterwagen mit je vier Radsätzen und Radsatzfahrmasse unter 10 Tonnen⁹:

$$f_{WFW} = 0,0023 + 0,0044 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.124})$$

⁶Mit DR ist im Kontext dieser Formelsammlung die Deutsche Reichsbahn der DDR gemeint.

⁷Mit „DB“ ist im Kontext dieser Formelsammlung die Deutsche Bundesbahn gemeint.

⁸ČD - České Drahy - Tschechische Eisenbahnen

⁹Gleichungen A.124-A.126 stammen aus Versuchen in den frühen 1990er Jahren

Gleichung der ČD für gemischte Güterzüge und einer mittleren Radsatzfahrmasse zwischen 10t und 15t:

$$f_{WFW} = 0,0019 + 0,0035 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.125})$$

Gleichung der ČD für Güterzüge aus beladenen Güterwagen mit je vier Radsätzen und einer mittleren Radsatzfahrmasse von mehr als 15 t:

$$f_{WFW} = 0,0013 + 0,0015 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.126})$$

Gleichung von Michálek¹⁰ für Containerzüge mit der mittleren Radsatzfahrmasse m_A und einer bestimmten Anzahl z_F „neuer Fronten“ in Anströmrichtung durch unbeladene Zwischenwagen (siehe Abbildung A.1):

$$F_{WFW} = \left(0,000695 + \frac{0,00405}{m_A} \right) m_{Wg} + (26,75 + 0,689z_F) \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.127})$$

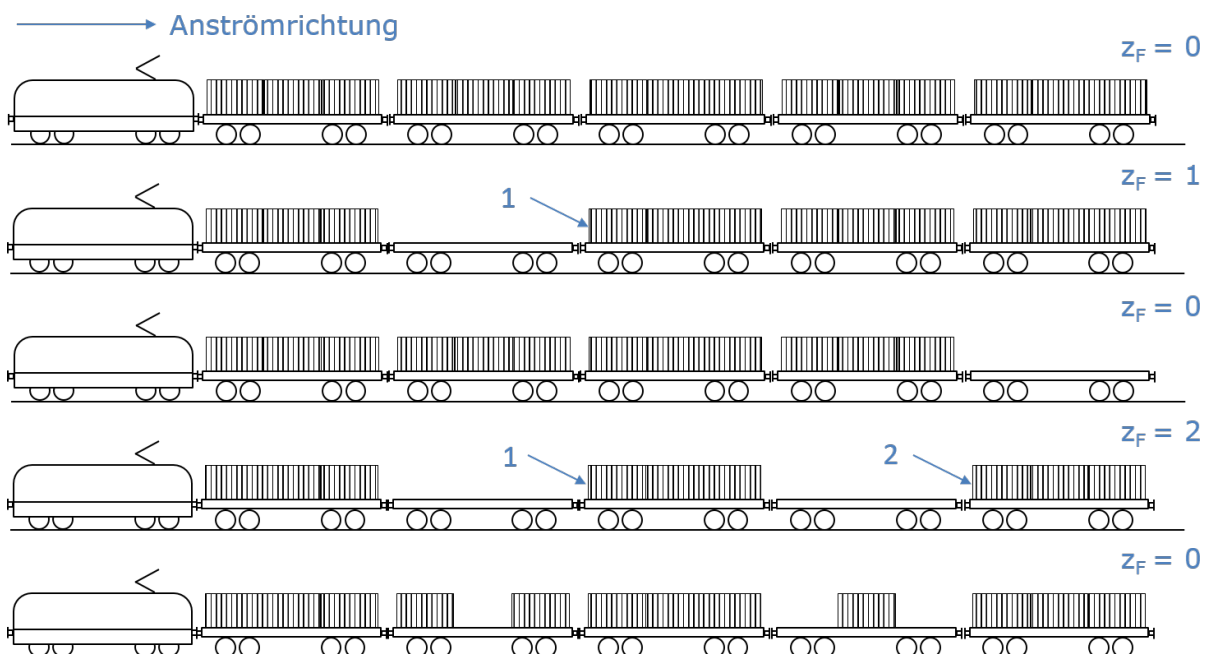


Abbildung A.1.: Zählung „neuer Fronten“ an Containerzügen - es werden nur angeströmte Flächen nach kompletten Leerwagen gezählt - Lücken durch unvollständig beladene Flachwagen werden nicht mitgezählt

Gleichung der französischen Staatsbahn SNCF für Güterzüge

$$f_{WFW} = 0,0015 + 0,0063 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.128})$$

Gleichung der französischen Staatsbahn SNCF für Güterganzzüge

$$f_{WFW} = 0,0012 + 0,0025 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.129})$$

¹⁰Untersuchungen der Universität Pardubice in der Tschechischen Republik (veröffentlicht 2017)

Gleichung der Italienischen Staatsbahn (FS) für Ganzzüge aus unbeladenen Flachwagen:

$$f_{WFW} = 0,0045 + 0,0020 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.130})$$

Gleichung der Italienischen Staatsbahn (FS) für Ganzzüge aus leeren gedeckten Güterwagen:

$$f_{WFW} = 0,0035 + 0,0022 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.131})$$

Gleichung der Italienischen Staatsbahn (FS) für Ganzzüge aus beladenen gedeckten Güterwagen:

$$f_{WFW} = 0,0025 + 0,0021 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.132})$$

Gleichung für Züge des kombinierten Verkehrs:

$$f_{WFW} = 0,0012 + 0,001 \frac{v}{100} + 0,0017 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.133})$$

Gleichung für Autotransportzüge:

$$f_{WFW} = 0,0012 + 0,001 \frac{v}{100} + 0,0056 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.134})$$

Gleichung der Indischen Staatsbahnen (IR) für Güterzüge (Spurweite 1676 mm):

$$f_{WFW} = 0,0009 + 0,0010 \cdot \frac{v}{100} + 0,0056 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.135})$$

Gleichung der Thailändischen Staatsbahn (SRT) für Güterzüge (Spurweite 1000 mm):

$$f_{WFW} = 0,0026 + 0,0030 \cdot \left(\frac{v}{100} \right)^2 \quad (\text{A.136})$$

A.8. Empirische Gleichungen zum Kraftschluss zwischen Rad und Schiene

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

Kraftschluss Rad-Schiene nach Kother

$$\tau = 0,116 + \frac{9,0}{42 + v[\text{km/h}]} \quad (\text{A.137})$$

SNCF - KraftschlussFormel

$$\tau = \tau_0 \cdot \frac{8 + 0,1 \cdot v[\text{km/h}]}{8 + 0,2 \cdot v[\text{km/h}]} \quad (\text{A.138})$$

	τ_0
mit Sand	0,40
ohne Sand	0,33

SNCF - Kraftschluss-Formel für Fahrt im Gleisbogen

$$\tau = \tau_0 \cdot \frac{8 + 0,1 \cdot v[\text{km/h}]}{8 + 0,2 \cdot v[\text{km/h}]} \cdot \left(1 - \frac{1200}{R^2}\right) \quad (\text{A.139})$$

SŽD-Formel für Dampflokomotiven

$$\tau = \frac{30}{100 + v[\text{km/h}]} \quad (\text{A.140})$$

Kraftschluss Rad-Schiene nach Kother für *Dampflokomotiven*

$$\tau = 0,093 + \frac{7,2}{42 + v[\text{km/h}]} \quad (\text{A.141})$$

A.9. Fahrzeugwiderstände (Straßenfahrzeuge)

Roll- und Walkwiderstand

$$F_{WR} = f_{WR} \cdot m_F \cdot g \cdot \cos\alpha \quad (\text{A.142})$$

- in guter Näherung gilt:

$$F_{WR} = f_{WR} \cdot m_F \cdot g \quad (\text{A.143})$$

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

- Anhaltspunkte Fahrzeugmassen [t]

Klasse	leer	beladen
Kleinwagen	1,1	1,5
untere Mittelklasse	1,3	1,8
Mittelklasse	1,5	2,1
Luxus	2,1	2,6
Geländewagen	2,3	2,9
Kleintransporter (leicht)	1,8	2,8
Kleintransporter (mittel)	2,0	3,5
Kleintransporter (schwer)	2,3	5,0
Lkw (leicht)	-	15
Lkw (mittel)	-	26
Lkw (schwer)	-	41

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

Asphaltstraße	0,010
Betonfahrbahn	0,011
rauhe Betonfahrbahn	0,014
sehr gutes Kopfsteinpflaster	0,015
gutes Steinpflaster	0,020
schlechtes Steinpflaster	0,030
schlechte, ausgefahrene Straße	0,035
sehr guter Erdweg	0,045
mittlere Erdwege	0,080
schlechter Erdweg	0,100
loser Sand	0,150-0,300

- lineare Näherung nach Wong für $v \leq 128 \text{ km/h}$ auf Betonfahrbahn:

$$f_{WR} = 0,01 \cdot \left(1 + \frac{v}{100}\right) \quad (\text{A.144})$$

Getriebewiderstand

$$F_{WG} = (1 - \eta_G) \cdot \frac{3,6 \cdot P_e}{v} \quad (\text{A.145})$$

F_{WG}	[kN]	Getriebewiderstandskraft
η_G	[-]	Gesamtwirkungsgrad des Antriebsstrangs
P_e	[kW]	effektiv abgegebene Motorleistung
v	[km/h]	Fahrgeschwindigkeit

- meist erfolgt Bezug auf Nennleistung (bei Nenndrehzahl):

$$F_{WG} = (1 - \eta_G) \cdot \frac{i_{ges} \cdot P_N}{2 \cdot \pi \cdot r_{dyn} \cdot n_N} \quad (\text{A.146})$$

- mit:

$$\eta_G = \prod_{i=1}^n \eta_i \quad (\text{A.147})$$

i_{ges}	[-]	Gesamtübersetzung des Antriebsstranges
P_N	[kW]	Motornennleistung
r_{dyn}	[m]	dynamischer Reifenradius der Antriebsräder
n_N	[s ⁻¹]	Nenndrehzahl
η_i	[-]	Teilwirkungsgrade

- Anhaltspunkte für Teilwirkungsgrade:

Element	η_i
Kupplung	0,99
Gelenke	0,99
Lagerreibung	0,95
Schaltgetriebe	0,90...0,97
Ausgleichsgetriebe	0,96

Luftwiderstand

$$F_{WL} = c_W \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot A \cdot (v + v_W)^2 \quad (\text{A.148})$$

F_{WL}	[N]	Luftwiderstandskraft
c_W	[-]	Luftwiderstandsbeiwert (0,2...0,5)
ρ_L	[kg/m ³]	Luftdichte ¹¹ ($\rho_L \approx 1,2 \text{ kg/m}^3$)
A	[m ²]	Fahrzeugquerschnittsfläche

¹¹zur Abhängigkeit der Luftdichte von Temperatur und Druck: siehe Gl. 2.29

v	[m/s]	Fahrzeuggeschwindigkeit
v_W	[m/s]	Windgeschwindigkeit

- Fahrzeugquerschnittsflächen - näherungsweise gilt:

$$A \approx 0,9 \cdot H \cdot b_F \quad (\text{A.149})$$

Pkw	$\approx 1,5 \dots 2,5 \text{ m}^2$	typisch: $A = 1,9 \text{ m}^2$
Lkw	$\approx 4,0 \dots 9,0 \text{ m}^2$	typisch: $A = 8,9 \dots 9,7 \text{ m}^2$

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

- Abgeleiteter Leistungsbedarf an den Treibrädern:

$$P_T = F_T \cdot v = \left(f_{WR} + i + \xi \cdot \frac{\ddot{x}}{g} \right) \cdot m \cdot g \cdot v + \frac{\rho}{2} \cdot c_W \cdot A \cdot v^3 \quad (\text{A.150})$$

A.10. Kraftschlussbeiwerte für Straßenfahrzeuge

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

Kraftschluss Reifen-Straße für saubere, trockene Fahrbahn:

$$\tau = 0,7 - 0,00192 \cdot v \quad (\text{A.151})$$

Kraftschluss Reifen-Straße für nasse Fahrbahn:

$$\tau = 0,214 \cdot \left(\frac{v}{100}\right)^2 - 0,64 \cdot \frac{v}{100} + 0,615 \quad (\text{A.152})$$

Anhaltswerte für *mittleren* Kraftschluss auf diversem Untergrund

Fahrbahnart und -zustand	Kraftschlussbeiwert τ
Sandweg fest, feucht	0,30
Sandweg locker, trocken	0,20
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... 0,80
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):

Paarung	μ_{Gl}
Reifen-Gußasphalt	0,3...0,63
Reifen-Zementbeton	0,34...0,44
Reifen-Asphaltbeton	0,24...0,53
Stahlrad-Schiene	0,05...0,09