

---

# Schienefahrzeugtechnik

---

Joachim Ihme

# Schienefahrzeugtechnik

 Springer Vieweg

Joachim Ihme  
Ostfalia HaW  
Wolfenbüttel, Deutschland

ISBN 978-3-658-13540-9  
DOI 10.1007/978-3-658-13541-6

ISBN 978-3-658-13541-6 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2016

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Lektorat: Thomas Zipsner

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature  
Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

---

# Vorwort

Das vorliegende Buch entstand aus Vorlesungen über Schienenfahrzeugtechnik, die ich seit 1990 an der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften an den Standorten Wolfenbüttel und Wolfsburg für Studierende des Maschinenbaus, des Fahrzeugbaus und der Elektrotechnik gehalten habe.

Leider wurde in den letzten 30 Jahren an Technischen Universitäten und Fachhochschulen die Lehre im Bereich der Schienenfahrzeugtechnik und des Eisenbahnwesens zurückgefahren, obwohl Deutschland nach wie vor wichtige Standorte der Schienenfahrzeug- und -zulieferindustrie aufzuweisen hat. Außerdem ist das Interesse an der Eisenbahn und an Schienenfahrzeugen bei Studienanfängern eher gering, seit die Modelleisenbahn im Wesentlichen Sammelobjekt für ältere Herren geworden ist und sich die Eisenbahn aus vielen Regionen zurückgezogen hat.

Deswegen finden die deutsche Schienenfahrzeugindustrie und die Bahnbetreiber immer weniger speziell für sie ausgebildete Ingenieurinnen und Ingenieure. Dem Vernehmen nach besteht daher die Notwendigkeit, neuen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern das notwendige Grundwissen und die speziellen Kenntnisse im Unternehmen zu vermitteln. Dazu möchte das vorliegende Buch auf dem Gebiet der Schienenfahrzeugtechnik einen einflussreichen Beitrag leisten. Außer als Vorlesungsunterlage ist es auch zum Selbststudium geeignet. Allerdings können hier nicht alle Aspekte der Schienenfahrzeugtechnik und des Schienenverkehrs behandelt und vertieft werden.

Zielgruppe für dieses Buch sind Studierende an Hochschulen und Universitäten nach dem Grundstudium des Maschinen- oder Fahrzeugbaus. Auch der interessierte Laie, z. B. der Eisenbahnfreund, kann in diesem Buch seine Kenntnisse erweitern. Er wird aber Dampflokomotiven und Landschaftsaufnahmen von Eisenbahnzügen weitgehend vermissen.

Ich danke allen Unternehmen und Institutionen, die mich mit Informationen und Bildmaterial unterstützt haben, insbesondere den Firmen Alstom, Bombardier, Siemens, Voith und Vossloh. Dem Springer Vieweg Verlag und Herrn Dipl.-Ing. Thomas Zipsner danke ich für die wiederum angenehme Zusammenarbeit. Last but not least danke ich meiner lieben Frau, die während der Erstellung des Manuskriptes auf viele gemeinsame Unternehmungen mit mir verzichten musste.

Alle nicht gekennzeichneten Abbildungen und Fotos stammen vom Verfasser. Für Anregungen aus dem Leserkreis und für Hinweise auf Fehler bin ich dankbar.

Braunschweig, im Februar 2016

Joachim Ihme  
Email: [j.ihme@ostfalia.de](mailto:j.ihme@ostfalia.de)

---

# Verwendete Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

---

## Verwendete Formelzeichen

$A$ [ $\text{m}^2$ , $\text{cm}^2$ , $\text{mm}^2$ ]	Fläche
$A_1$ [ $\text{m}^2$ ]	Querspanntfläche
$A_2$ [ $\text{m}^2$ ]	Zugoberfläche
$B$ [N, kN]	Bremskraft
$C$ [versch.]	Integrationskonstante
$D$ [-]	Dämpfungsmaß nach Lehr
$E$ [kWh]	Energie
$F$ [N, kN]	Kraft allgemein
$F_B$ [N, kN]	Bremskraft
$F_{GR}$ [N, kN]	Gewichtskraft auf Rad/Räder
$F_{MG}$ [N, kN]	Bremskraft der Magnetschienenbremse
$F_{WR}$ [N, kN]	Rollwiderstandskraft eines Rades
$G$ [N, kN]	Gewichtskraft
$I$ [A]	Stromstärke
$I$ [ $\text{mm}^4$ ]	Flächenmoment 2. Grades
$J$ [ $\text{kgm}^2$ ]	Massenträgheitsmoment
$\text{Im}$ [-]	Imaginärteil einer komplexen Zahl
$K_W$ [-]	Verhältnis der durchschnittlichen Luftwiderstandsbeiwerte
$L$ [m]	Länge, Zuglänge
$L$ [m]	Unebenheitswellenlänge
$M$ [Nm]	Moment, Drehmoment
$M_{\text{Kipp}}$ [Nm]	Kippmoment (beim Drehstrommotor)
$M_{\text{RL}}$ [Nm]	Lagerreibmoment
$N$ [N, kN]	Normalkraft
$P$ [kW]	Leistung
$P_{\text{1h}}$ [kW]	Stundenleistung (bei Elektrolokomotiven)
$P_{\text{Anfahr}}$ [kW]	Anfahrleistung (bei Elektrolokomotiven)

$P_{\text{Dauer}}$ [kW]	Dauerleistung (bei Elektrolokomotiven)
$P_V$ [kW]	Verlustleistung
$R$ [m]	Radius des Gleisbogens
$Re$ [-]	Reynold'sche Zahl
$Re$	Realteil einer komplexen Zahl
$S$ [N, kN]	Seitenkraft
$T$ [N, kN]	Tangentialkraft
$T$ [s]	Zeit(punkt)
$U$ [V, kV]	(Elektr.) Spannung
$U$ [N, kN]	Umfangskraft
$U_{\text{gl}}$ [V, kV]	Gleichspannungsmittelwert
$V$ [m <sup>3</sup> ]	Volumen
$W$ [N, kN]	Fahrwiderstandskraft
$W$ [cm <sup>3</sup> , mm <sup>3</sup> ]	Widerstandsmoment
$W_a$ [N, kN]	Luftwiderstand Bug und Heck
$W_B$ [N, kN]	Beschleunigungswiderstand
$W_b$ [N, kN]	Luftwiderstand Zugoberfläche (Luftreibung)
$W_K$ [N, kN]	Kurvenwiderstand
$W_{\text{Lauf}}$ [N, kN]	Laufwiderstand
$W_{\text{Luft}}$ [N, kN]	Luftwiderstand
$W_R$ [N, kN]	Rollwiderstand
$W_{\text{StoB}}$ [N, kN]	Stoßwiderstand
$W_{\text{Str}}$ [N, kN]	Streckenwiderstand
$Z$ [N, kN]	Zugkraft
$Z_{\text{max}}$ [N, kN]	Maximale Zugkraft
$a$ [m, mm]	Abstand, Radsatzabstand
$a$ [m/s <sup>2</sup> ]	Bremsverzögerung
$b$ [m/s <sup>2</sup> ]	Beschleunigung
$c$	Beiwert (allgemein)
$c$ [N/m]	Federkonstante
$c'$ [N/m]	Gravitationsfederhärte (gravitational stiffness)
$c_d$ [-]	Beiwert für Stoßwiderstand
$c_w$ [-]	Luftwiderstandsbeiwert
$c'_w$ [-]	Luftwiderstandsbeiwert für Schräganströmung
$c_{w,L}$ [-]	Luftwiderstandsbeiwert Lokomotive
$c_{w,W}$ [-]	Luftwiderstandsbeiwert Wagen
$e$ [m, mm]	Abstand, Exzentrizität
$f$ [Hz]	Frequenz
$f_R$ [-]	Rollwiderstandsbeiwert
$g$ [m/s <sup>2</sup> ]	Erdbeschleunigung
$h$ [m, mm]	Höhe; Unebenheit(samplitude)
$i$ [-]	Imaginäre Einheit, $i = \sqrt{-1}$

$k$ [Ns/m]	Dämpferkonstante
$k$ [-]	Schlupfbeiwert
$l$ [m, mm]	Abstand, Länge
$m$ [kg, t]	Masse
$m'$ [kg/m]	spezifische Masse (bei Schienen)
$n$ [-]	Anzahl, Wagenanzahl eines Zuges
$n$ [min <sup>-1</sup> ]	Drehzahl
$n$ [-]	Polytropenexponent
$p$ [bar]	Druck
$q$ [N/m <sup>2</sup> ]	Staudruck
$r$ [m, mm]	Halbmesser, Radius
$r_0$ [mm]	Rollkreisradius des Radsatzes bei mittiger Ausrichtung im Gleis
$s$ [%o]	Steigung
$s$ [m, mm]	Weg
$s_B$ [rad/m]	Bohrschlupf
$s_B$ [-]	Bremsschlupf
$s_T$ [-]	Treibschlupf (Antriebsschlupf); Tangentialschlupf
$s_U$ [-]	Umfangsschlupf
$s_B$ [m]	Bremsweg
$s_R$ [mm]	Laufkreisabstand des Radsatzes
$t$ [s]	Zeit
$t_A$ [s]	Ansprechdauer
$t_B$ [s]	Bremsdauer (Dauer bis zum Stillstand)
$t_S$ [s]	Schwelldauer
$u$ [mm]	Überhöhung (im Gleisbogen)
$v$ [m/s, km/h]	Fahrgeschwindigkeit
$v_0$ [m/s, km/h]	(Fahrzeug-)Bezugs-/Ausgangsgeschwindigkeit
$v_{res}$ [km/h]	Resultierende Anströmgeschwindigkeit
$x, y, z$	Koordinaten des (raumfesten) Koordinatensystems
$\Phi_h$ [m <sup>3</sup> /rad]	Spektrale Dichte einer Gleisunebenheit
$\Omega$ [rad/m]	Wegkreisfrequenz
$\alpha$ [°]	Winkel, Steigungswinkel
$\gamma$ [rad]	Neigungswinkel der Radaufstandsfläche
$\gamma_e$ [rad]	Effektive Konizität des Radsatzes
$\delta$ [rad/s]	Abklingkonstante
$\delta$ [rad/s <sup>2</sup> ]	Winkelbeschleunigung
$\varepsilon$ [rad]	Gierwinkel
$\eta$ [-]	Wirkungsgrad
$\kappa$ [-]	Exponent für adiabate Kompression
$\lambda$ [-]	Drehmassen(zuschlag)faktor
$\mu$ [-]	Reibbeiwert
$\mu_g$ [-]	Gleitbeiwert

---

$\mu_h$ [-]	Haftbeiwert
$\mu_K$ [-]	Reibbeiwert Bremsklotz (Bremsbelag) – Rad
$\mu_L$ [-]	Lagerreibbeiwert
$\nu$ [rad/s]	Eigen(kreis)frequenz
$\xi, \eta, \zeta$	Koordinaten des radsatzfesten Koordinatensystems
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Luftdichte
$\tau$ [°, rad]	Anströmwinkel
$\varphi$ [rad]	Phasenwinkel
$\psi$ [rad]	Wankwinkel
$\omega$ [rad/s]	Anregungs(kreis)frequenz
$\omega$ [rad/s]	Winkelgeschwindigkeit
$\omega_B$ [rad/s]	Bohrwinkelgeschwindigkeit

---

## Indizes

0	Ausgangswert, Bezugswert
I	Eingang
II	Ausgang
c	Feder
d	Dämpfer
eff	Effektivwert
F	Luftfeder
Gen	Generator
H	hinten
K	Kennungswandler
l	links
L	Fahrleitung
M	Motor
max	maximal, Höchst~
R	Rad
r	rechts
rel	relativ
res	resultierend
Ü	Übertragung
V	vorne

## Abkürzungen

ABB	ASEA-Brown-Boveri, schwedisch-schweizerischer Elektrokonzern
Adtranz	Tochtergesellschaft der Daimler-Benz AG, fusioniert aus AEG und ABB, seit 2001 von Bombardier übernommen
AEG	Allgemeines Eisenbahngesetz
AEG	Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft, aufgegangen in Adtranz
Alstom	Alstom Transport Deutschland GmbH
Bombardier	Bombardier Transportation (Unternehmensbereich des kanadischen Konzerns Bombardier Inc.)
BOStrab	Bau- und Betriebsordnung für Straßenbahnen
DB	Deutsche Bahn AG (ab 1994); Deutsche Bundesbahn (bis 1993)
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DR	Deutsche Reichsbahn
Duewag	Duewag AG (Düsseldorf-Uerdinger Waggonfabrik), heute Teil von Siemens Mobility
EBO	Eisenbahn- Bau- und Betriebsordnung
EN	Europäische Norm
FEM	Finite-Elemente-Methode
HeiterBlick	HeiterBlick GmbH, Leipzig
ICE	Intercity-Express (deutscher Hochgeschwindigkeitszug)
ISO	International Standard Organization
LHB	Linke-Hofmann-Busch GmbH, Salzgitter (jetzt Alstom Transport Deutschland)
MAN	Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg AG (jetzt Teil des VW-Konzerns)
Siemens	Siemens AG, Unternehmensbereich Mobility
SNCF	Société Nationale des Chemins de Fer français (Französische Staatsbahn)
SO	Schienenoberkante
Solaris	Solaris Bus & Coach S.A., Sitz: Posnan (PL)
Stadler	Stadler Rail AG, Sitz: Bussnang (CH)
Tatra	CKD Tatra Vagonka, Prag, tschechischer Hersteller u. A. von Straßenbahnwagen (seit 2001 Standort von Siemens Mobility)
TGV	Train à Grande Vitesse (französischer Hochgeschwindigkeitszug)
TEE	Trans-Europ-Express (Schnellzugsystem zwischen westeuropäischen Staaten 1957 bis 1987)
TSI	Technische Spezifikation für Interoperabilität
Üstra	Üstra Hannoversche Verkehrsbetriebe AG
UIC	Union International des Chemins de Fer (Internationaler Eisenbahnverband)
VDB	Verband der Bahnindustrie in Deutschland e. V.
VDV	Verband Deutscher Verkehrsbetriebe e. V.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	1
<b>2</b>	<b>Fahrwiderstände von Schienenfahrzeugen</b> .....	31
2.1	Laufwiderstand .....	32
2.2	Luftwiderstand .....	33
2.3	Zusatzwiderstand .....	35
2.4	Streckenwiderstand .....	37
2.5	Beschleunigungswiderstand .....	39
2.6	Luftwiderstand nach Hannoverscher Formel .....	40
2.7	Gesamtwiderstand .....	41
2.8	Beispiele und Aufgaben zu Kap. 2 .....	43
<b>3</b>	<b>Antriebsmaschinen, Leistungsübertragung</b> .....	47
3.1	Dampfmaschine .....	51
3.2	Elektromotor .....	54
3.2.1	Gleichstrommotor .....	58
3.2.2	Einphasen-Wechselstrommotor .....	60
3.2.3	Drehstrommotor .....	65
3.2.4	Mechanischer Teil der elektrischen Antriebe .....	70
3.3	Verbrennungsmotor .....	76
3.3.1	Mechanische Leistungsübertragung .....	79
3.3.2	Hydrodynamische Leistungsübertragung .....	81
3.3.3	Elektrische Leistungsübertragung .....	86
3.4	Gasturbine .....	92
3.5	Hybridfahrzeuge .....	95
<b>4</b>	<b>Bremsen für Schienenfahrzeuge</b> .....	99
4.1	Reibungsbehaftete Bremsen .....	101
4.1.1	Durchgehende Bremsen .....	109
4.1.2	Mechanische Bremsbauteile .....	116
4.1.3	Elektrische (generatorische) Bremse .....	119

4.1.4	Hydrodynamische Bremse	121
4.2	Vom Rad-Schiene-Kraftschluss unabhängige Bremsen	122
4.3	Berechnung von Bremswegen	126
4.4	Bremsgewicht	132
<b>5</b>	<b>Radsatzführung, Federung und Dämpfung</b>	<b>135</b>
5.1	Schwingempfinden des Menschen	136
5.2	Fahrzeugschwingungen durch Gleisunebenheiten	137
5.3	Theoretische Grundlagen der Schwingungssimulation	141
5.3.1	Simulation im Frequenzbereich	144
5.3.2	Simulation im Zeitbereich	149
5.4	Zusammenspiel von Fahrzeug und Gleis	152
5.5	Dynamisches Verhalten des Radsatzes	156
5.6	Laufwerke von Schienenfahrzeugen	175
5.6.1	Drehgestelle für Eisenbahnfahrzeuge	176
5.6.2	Laufwerke von Straßenbahnwagen	188
5.7	Bogen-Ein- und -Auslauf	194
5.8	Luftfederung	197
<b>6</b>	<b>Tragwerke und Aufbauten von Schienenfahrzeugen</b>	<b>205</b>
6.1	Festigkeitsanforderungen an Wagenkästen von Schienenfahrzeugen	206
6.1.1	Statische Lastannahmen	206
6.1.2	Dynamische Lastannahmen	209
6.1.3	Statische Versuche	210
6.1.4	Crashgerechte Auslegung	212
6.2	Geschichtliche Entwicklung und heutiger Stand bei Eisenbahn-Personenwagen	216
6.3	U-Bahn-, Stadtbahn- und Straßenbahnfahrzeuge	238
6.4	Lokomotiven	243
6.5	Güterwagen	249
6.6	Drehgestelle und Fahrwerke	256
<b>Literatur</b>		<b>263</b>
<b>Sachverzeichnis</b>		<b>267</b>