

Lothar Fendrich
Wolfgang Fengler *Hrsg.*

Handbuch Eisenbahn- infrastruktur

2. Auflage

Handbuch Eisenbahninfrastruktur

Lothar Fendrich • Wolfgang Fengler
(Hrsg.)

Handbuch Eisenbahn infrastruktur

2., neu bearbeitete Auflage

Herausgeber
Lothar Fendrich
Colmar
Frankreich

Wolfgang Fengler
Institut für Bahnsysteme und
Öffentlichen Verkehr
Professur für Gestaltung von Bahnanlagen
TU Dresden
Dresden
Deutschland

ISBN 978-3-642-30020-2 ISBN 978-3-642-30021-9 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-642-30021-9

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-Verlag Berlin Heidelberg 2007, 2013

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.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
www.springer-vieweg.de

Geleitwort zur 2. Auflage

Die Eisenbahninfrastruktur weist eine große Anlagenvielfalt mit komplexen Wechselwirkungen auf und ist – Fluch und Segen zugleich – insgesamt äußerst langlebig. Die Lebenszyklen der einzelnen Anlagentypen des Fahrwegs, wie Oberbau, Brücken, Tunnel, Energie-, Leit- und Sicherungstechnik, sind dabei jedoch sehr unterschiedlich. Eine optimale Nutzungsdauer der Anlage kann nur durch eine entsprechende Anfangsqualität, gepaart mit einer auf Lebenszykluskosten basierenden gemeinsamen Planung von Investition und Instandhaltung, erreicht werden. Zudem bedarf es einer stabilen Organisation des Eisenbahninfrastrukturbetreibers und einer Ausrichtung auf die Streckensicht, um die richtige Maßnahme zum richtigen Zeitpunkt setzen zu können. Denn Prognosefähigkeit und -stabilität des Anlageverhaltens sind es letztlich, die Planbarkeit und gesicherten Mittelfluss garantieren.

Nachhaltigkeit bildet das Leitmotiv der Anlagenbewirtschaftung, in der alle Instandhaltungsentscheidungen mit Hilfe mittel- und langfristiger Betrachtungen wirtschaftlich und technisch abzusichern sind. Dazu müssen die Verantwortlichen aller Ebenen über ihre Mandats- und Amtsperioden hinaus denken und planen; denn nachhaltige Substanzerhaltung geht über Vorstandsperioden hinaus.

Während wir heute die planerischen und investiven Leistungen der vorigen Generationen ernten, gilt es auch heute, künftige Ergebnisse zu säen. Dies ist umso wichtiger, als nicht nur der demografische Wandel, sondern auch der zunehmende Mangel an gut ausgebildeten Ingenieuren und an technischem Fachpersonal zum aktiven Gegensteuern zwingt.

Umfassende Ausbildung zur Berufsfähigkeit, als Aufgabe unserer Gesellschaft, und lebenslanges Lernen zum Erhalt und Ausbau der Berufsfertigkeiten, als Herausforderung für jeden Einzelnen von uns, sind die beiden Säulen, auf denen auch Bestand und Entwicklung der Eisenbahninfrastruktur ruht.

Dazu leistet das nunmehr bereits in der 2. Auflage erscheinende Handbuch Eisenbahninfrastruktur einen wichtigen Beitrag, in dem es die große Bandbreite von Bahnanlagen und ihre Komplexität in 21 umfang- und inhaltsreichen Kapiteln dem Nutzer nahe bringt.

In dieses Gemeinschaftswerk haben über dreißig Fachleute aus allen Bereichen der Eisenbahninfrastruktur ihre (Er-)Kenntnisse und Erfahrungen in dem Bewusstsein ihrer Verantwortung für die nachfolgende Fachgeneration niedergelegt. Es freut mich besonders, dass auch eine Reihe von österreichischen Experten hier mitgearbeitet hat.

Ich spreche übrigens bewusst nicht vom Leser, sondern vom Nutzer dieses Werkes, denn in diesem Handbuch soll gezielt nachgeschlagen werden, um detailstark im eigenen Fachgebiet zu bleiben und um sein Wissen in den Nachbardisziplinen zu vertiefen. Man nimmt dieses Handbuch „zur Hand“, um die Eisenbahninfrastruktur „im Griff“ zu haben.

Ich beglückwünsche die Herausgeber Lothar Fendrich und Wolfgang Fengler sowie alle Autoren zu dieser 2. Auflage, die umfänglich und inhaltlich stark erweitert wurde. Sie haben mit Energie und Enthusiasmus, mit Zähigkeit und Nachdruck ein ausgezeichnetes Kompendium verfasst.

Möge dieses Handbuch Eisenbahninfrastruktur für unsere Eisenbahnen in Europa Nutzen stiften.

Wien, im März 2013

Ing. Mag. (FH) Andreas Matthä
Vorstandssprecher ÖBB-Infrastruktur AG

Vorwort zur 2. Auflage

Dem im Vorwort zur ersten Auflage formulierten Anspruch, ein umfassendes, detailreiches und praxisgerechtes Nachschlagewerk vorzulegen, will auch diese zweite Auflage gerecht werden.

Nach nunmehr sieben Jahren wurden nicht nur alle Beiträge überarbeitet, aktualisiert und, zum Teil erheblich, erweitert, sondern es konnten für einzelne Kapitel auch neue Autoren und Mitautoren gewonnen werden, die sich zusammen mit allen anderen Beteiligten für diese neue Auflage engagierten.

Insbesondere das Kapitel Ingenieurbauwerke wurde ganz umgestaltet und mit umfangreichem Bildmaterial ausgestattet. Mit dem neuen Kapitel Weichen wird eine Lücke der ersten Auflage geschlossen. Das neue Kapitel Spurlanggestaltung und betriebliche Infrastrukturplanung erweitert den Blickwinkel der 1. Auflage und trägt dem Umstand Rechnung, dass die Gestaltung der Bahnanlagen heute stärker als früher den Taktverkehren des Personenverkehrs Rechnung tragen muss und insofern heute erheblich von betrieblichen Zwängen dominiert wird, die es zu kennen und zu berücksichtigen gilt.

Die nunmehr erweiterte Herausgeberschaft verdeutlicht den Teamgedanken, der diesem Gemeinschaftswerk von Anfang an zugrunde liegt. So gebührt allen Autoren unser aufrichtigster Dank für ihre Bereitschaft, sich den Mühen einer gewissenhaften Überarbeitung ihrer Beiträge zu unterziehen respektive als neu Hinzugekommene ihr Fachwissen und ihre Erfahrung in dieses Handbuch einzubringen.

Mit tiefem Bedauern haben wir von zwischenzeitlich verstorbenen Mitstreitern der 1. Auflage Abschied nehmen müssen: Dem Verfasser des Geleitworts Herrn Prof. Robert E. Rivier, École Polytechnique Fédérale de Lausanne († 2007), und dem Verfasser des Kapitels *Beanspruchung von Gleisen und Weichen* Herrn Prof. Dr.-Ing. Johannes Franz, Honorarprofessor an der Technische Universität Berlin († 2008). Den Platz des Kapitels nimmt in der 2. Auflage das Kapitel *Auslegung des Eisenbahnoberbaus* ein.

Wir freuen uns ganz besonders, dass Herr Ing. Mag. (FH) Andreas Matthä, Vorstandssprecher der ÖBB-Infrastruktur AG, in seinem trefflichen Geleitwort die Komplexität der Eisenbahninfrastruktur herausstellt und damit aus Anwendersicht die Sinnhaftigkeit dieses Werkes untermauert. Dafür danken wir ihm herzlich.

Unser Dank gilt auch Herrn Dipl.-Ing. Thomas Lehnert vom Springer-Verlag, der schon seit längerem mit freundlicher Beharrlichkeit auf diese zweite Auflage drängte und die Arbeiten daran geduldig begleitete. Ganz besonders bedanken wir uns bei Frau Sigrid Cuneus von der Redaktion Technik

des Springer-Verlages, die wiederum mit hohem Engagement und bewundernswerter Umsicht Herausgeber und Autoren motivierend und anspornend betreut hat.

Möge auch diese zweite Auflage des Handbuches Eisenbahninfrastruktur viele Nutzer in der Praxis der eisernen Bahn und an den Hochschulen und Universitäten finden.

Colmar/Dresden, im Dezember 2013

Lothar Fendrich
Wolfgang Fengler

Vorwort zur 1. Auflage

Mit diesem Handbuch wird eine fachübergreifende Darstellung der wesentlichen geltenden Parameter für Bau, Ausbau sowie Instandhaltung und Betrieb von Eisenbahninfrastruktur vorgelegt. Dies entspricht dem dringenden Bedarf nach einem umfassenden, detailreichen und praxisgerechten Nachschlagewerk neueren Datums für Ingenieure der verschiedenen Fachrichtungen im Bereich der Eisenbahninfrastruktur.

Das 1961 von Prof. Dr.-Ing. Ewald Graßmann, Berlin, herausgegebene Handbuch des Eisenbahn-Bauwesens erfüllt heutige Anforderungen nicht mehr. In der Zwischenzeit ist eine Fülle von Fachbüchern erschienen, die sich jeweils nur einem Bereich des Eisenbahnwesens widmen.

Das aktuelle Werk wendet sich an den praktisch tätigen und planenden Ingenieur und auch an Studierende. Es will die technischen und operativen Grundlagen und Zusammenhänge der Eisenbahninfrastruktur in Maß und Zahl darstellen. Der Nutzer soll nicht durch ausufernde Prosatexte ermüdet werden, sondern durch eine knappe, aber fakten- und detailreiche Darstellung einen schnellen Zugriff auf das gesuchte Wissensgebiet respektive auf die nachzuschlagenden Einzelheiten erhalten.

Zugleich sollen die Komplexität und die Verzahnung der Ingenieurdisziplinen der Eisenbahninfrastruktur vermittelt werden, wobei theoretische Grundlagen mit praktischen Erfahrungen verbunden werden. Im Einzelnen werden anerkannte Verfahren und Berechnungen sowie ein umfangreiches Datenwerk mit Bildern, Zahlen, Tabellen und Diagrammen, nach denen man heute unter Zeitdruck meist vergeblich in den verschiedensten Einzelpublikationen sucht, an die Hand gegeben. Der in der Regel in seinem engeren Fachgebiet kundige Leser soll über dieses hinaus gerade in den Kapiteln der anderen Gewerke der Eisenbahninfrastruktur auf umfassende Darstellungen zurückgreifen können, die ihm fundierten Erkenntniszugewinn für seine Arbeit an den vielfältigen Schnittstellen bieten. Insofern ist das Werk auch für Studierende gedacht, die sich mit den Besonderheiten des Systems Schiene vertraut machen wollen.

Inhaltlich orientiert es sich an den „Technischen Spezifikationen für die Interoperabilität (TSI)“, welche die Teilsysteme Infrastruktur, Energieversorgung, Zugsteuerung–Zugsicherung–Signalgebung, Fahrzeuge, Instandhaltung, Betrieb, Umwelt und Fahrgäste ausweist. Bereits in der Gliederung kommt das Grundanliegen zum Ausdruck: die Darstellung der für das System Schiene und damit auch für die Eisenbahninfrastruktur charakteristischen Verbundwirkungen und technischen Integrationen.

Im Gliederungs- und auch inhaltlichen Mittelpunkt steht die Interaktion Rad/Schiene respektive Fahrzeug/Gleis, um die sich die systemischen Wechselwirkungen Pantograph/Oberleitung und Fahrzeug/Trassierung mit Lichtraum sowie Eisenbahninfrastruktur insgesamt/Umfeld-Umwelt gruppieren.

Darüber hinaus wurde Wert darauf gelegt, auch Fachgebiete angemessen darzustellen, die nicht immer im unmittelbaren Blickfeld des Interesses an Eisenbahninfrastruktur stehen, wie die Stromversorgungsanlagen der Infrastruktur, das Lernen aus Schadensfällen des Baugrundes, Kabelanlagen, Funktionale Sicherheit fester Anlagen, Anforderungen an die eisenbahnbetriebliche Kommunikation.

Als Autoren konnten 31 anerkannte Fachleute aus Deutschland und Österreich gewonnen werden. Naturgemäß ergeben sich durch die Vielzahl der Autoren aus den verschiedenen Fachgebieten unterschiedliche Sicht- und Darstellungsweisen. Es ist mir wichtig festzustellen, dass die Individualität der jeweiligen Autoren nicht eingeengt wurde, sondern im Gegenteil die inhaltlichen Schwerpunkte, die die Autoren gesetzt haben, deutlich blieben.

Bei der Bearbeitung der einzelnen Kapitel wurde den Autoren auch deshalb große individuelle Gestaltungsfreiheit eingeräumt, um eine lehrbuchhafte Attitude zu vermeiden und stattdessen dem jeweiligen individuellen Erfahrungs- und Erkenntnischatz des Bearbeiters Vorrang zu geben.

An erster Stelle gilt mein herzlichster Dank allen Autoren, die sich von Anfang an bereitwillig, ja enthusiastisch für dieses Gemeinschaftswerk engagiert haben und auch in der terminengen Schlussphase nicht nachließen.

Mein Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Thomas Lehnert vom Springer-Verlag, der den Anstoß zu diesem Handbuch gab und sein Werden umsichtig begleitete und förderte. Ein besonderer Dank gebührt Frau Sigrid Cuneus von der Redaktion Technik des Springer-Verlages, die die Herausforderungen von Autorenvialt und Detailteufeln vorbildlich gemeistert hat.

Möge dieses Handbuch Eisenbahninfrastruktur viele Leser und Nutzer finden, und zwar nicht nur in den deutschsprachigen DACH-Staaten, sondern insbesondere auch in den neuen und künftigen Mitgliedsländern der Europäischen Union.

Berlin, im September 2006

Lothar Fendrich

Inhalt

1	Das Zusammenwirken von Rad und Schiene	1
	Klaus Rießberger	
1.1	Einleitung.....	1
1.2	Der Radsatz im Gleis.....	2
1.2.1	Einführung.....	2
1.2.2	Das Reibungsgesetz.....	3
1.2.3	Äquivalente Konizität.....	5
1.2.4	Rückstellsteifigkeit c_{yg}	7
1.2.5	Einfluss der Spurweite auf λ_e , c_{yg}	8
1.2.6	Möglichkeiten der Einflussnahme.....	8
1.2.7	Anmerkungen zur Wahl eines Radprofils.....	9
1.2.8	Bewegungsgleichungen von Radsätzen.....	9
1.3	Das Drehgestell am Gleis.....	11
1.3.1	„Steife“ Konstruktionen.....	11
1.3.2	„Weiche“ Drehgestelle.....	12
1.3.3	„Selbstlenkende“ und „Zwangsgesteuerte“ Drehgestelle.....	12
1.3.4	Gleichungssysteme für Fahrzeuge.....	13
1.4	Stabilität.....	14
1.4.1	Kritische Geschwindigkeit.....	14
1.4.2	Einflüsse auf die Laufstabilität.....	18
1.5	Bogenlauf.....	20
1.6	Maßnahmen zur Unterstützung guter Rad-Schiene- Interaktion.....	22
1.7	Beispiele und Erfahrungen.....	22
1.8	Entgleisungen.....	26
1.8.1	Entgleisungsursachen.....	26
1.8.2	Entgleisungskriterien.....	28
1.9	Zusammenfassung.....	28
	Anhang 1.....	29
	Literatur.....	37
2	Auslegung des Eisenbahnoberbaus	39
	Ulf Gerber	
2.1	Äußere Belastung.....	39
2.1.1	Äußere Vertikalbelastung.....	39
2.1.2	Äußere Längsbelastung.....	45
2.1.3	Äußere Seitenbelastung.....	45

2.2	Innere Belastung.....	46
2.2.1	Innere Vertikalbelastung.....	46
2.2.2	Innere Längsbelastung.....	49
2.2.3	Innere Seitenbelastung.....	51
2.3	Belastung und Belastbarkeit.....	51
2.3.1	Vertikale Belastung und Belastbarkeit	51
2.3.2	Belastung und Belastbarkeit in Längsrichtung	54
2.3.3	Seitliche Belastung und Belastbarkeit.....	55
2.4	Belastung und Auslegung der Oberbaukomponenten.....	56
2.4.1	Schienen.....	57
2.4.2	Schienenbefestigung.....	58
2.4.3	Schwellen.....	59
2.4.4	Schotter.....	60
2.5	Belastung und Anschaffungskosten des Eisenbahnoberbaus	61
2.6	Zusammenfassung.....	62
	Literatur	64
3	Schienen und Schienenschweißen.....	65
	Klaus Meißner und Alfred Wöhhart	
3.1	Schienenwerkstoffe und Schienenprofile	65
3.1.1	Stahl als Baustoff, Schienenstahl als individueller Werkstoff.....	65
3.1.2	Aufgaben der Schiene.....	65
3.1.3	Eigenschaften des Schienenstahls.....	67
3.1.4	Gefüge des Schienenstahls.....	69
3.1.5	Schienenstahlherstellung	70
3.1.6	Schienenformen (Schienenprofile)	70
3.1.7	Walzlängen, Walzzeichen und Warmstempeln.....	73
3.1.8	Verwendung und Verschleißbeanspruchung von Schienen.....	74
3.1.9	Ziele.....	74
3.2	Schienenschweißen.....	74
3.2.1	Allgemeines	74
3.2.2	Abbrennstumpfschweißen.....	75
3.2.3	Gaspressschweißen.....	79
3.2.4	Aluminothermisches Gießschmelzschweißen	80
3.2.5	Lichtbogenschweißen	82
3.3	Schienenschleifen (Oberflächenbearbeitung).....	83
3.3.1	Allgemeines	83
3.3.2	Neuschienenschleifen	84
3.3.3	Präventivschleifen	84
3.3.4	Erhaltungsschleifen (-fräsen)	84
3.3.5	Schleifen von Schweißungen	84
3.4	Fehler und Schäden an Schienen und Schienenschweißungen.....	85
3.4.1	Allgemeines	85
3.4.2	Schienenfehler, Übersicht	85

3.4.3	Beschreibung der Schienenfehler	85
3.5	Prüfen, Messen und Bewerten von Schienen und Schienenschweißungen.....	88
3.5.1	Allgemeines	88
3.5.2	Schienen.....	89
3.5.3	Schweißungen.....	90
3.5.4	Methoden der zerstörungsfreien Prüfung von Schienen.....	90
3.6	Herstellen lückenloser Gleise und Weichen.....	90
3.6.1	Allgemeines	90
3.6.2	Spannungsausgleich im Gleis	93
3.6.3	Spannungsausgleich in Weichen.....	95
4	Eisenbahndämme und Einschnitte.....	97
	Horst Rahn	
4.1	Einführung.....	97
4.2	Baugrundtechnische Bewertung der Erdbauwerke und des Baugrundes	99
4.2.1	Geologische, hydrologische Situation, Einfluss aus der Verwitterung.....	101
4.2.2	Umweltschäden	103
4.2.3	Aufschluss des Baugrundes.....	106
4.2.4	Baugrundgutachten/geotechnischer Bericht.....	107
4.3	Gründung von Erdbauwerken auf tragfähigem Baugrund ...	109
4.3.1	Oberbodenabtrag und Untergrundplanum.....	110
4.3.2	Dammaufbau.....	114
4.3.3	Aushub tiefer Baugruben mit Unterwasserbaggerung/ Saugwirkung	162
4.4	Gründung von Erdbauwerken auf wenig tragfähigem Baugrund	163
4.4.1	Allgemeine Grundlagen bei der Bewertung der Bahndämme auf wenig tragfähigem Baugrund.....	163
4.4.2	Die Entstehung der Moore und die bautechnische Nutzung ihrer Eigenschaften	166
4.4.3	Besonderheiten der Erkundung und Baugrundbeurteilung	168
4.4.4	Überschütten von Moorflächen mit einer Arbeits- und Filterschicht.....	171
4.4.5	Analyse der Schäden schwimmend gegründeter Bahndämme.....	175
4.4.6	Wahl der Sanierungs- und Ertüchtigungsmethode bei Arbeiten an in Betrieb befindlichen Bahndämmen auf weichem Untergrund.....	184
4.5	Schäden an Bauwerken im organischen Baugrund und die Rolle dieser Schichten als Überträger energiereicher Einwirkungen	227
4.5.1	Vorbemerkungen	227
4.5.2	Erschütterungen im Baufeld durch Sprengungen	228

4.5.3	Die Vibration – ein wichtiges Hilfsmittel zur Beschleunigung von Ramm- und Ziehvorgängen mit seinen Nebenwirkungen in Moorgebieten.....	230
4.5.4	Schäden durch dynamische Wirkungen.....	234
	Literatur.....	237
5	Weichen	239
	Ekkehard Lay und Reinhold Rensing	
5.1	Allgemeines.....	239
5.1.1	Geschichte und Definition.....	239
5.1.2	Weichen als Kostenfaktor.....	240
5.2	Weichen und Kreuzungen.....	242
5.2.1	Allgemeines.....	242
5.2.2	Weichenbauarten.....	243
5.3	Weichen und Kreuzungen als Planungselement.....	249
5.3.1	Grundlagen der Weichengeometrie.....	249
5.3.2	Zweiggleisbogen.....	251
5.3.3	Darstellung im Lageplan.....	252
5.3.4	Anordnung von Weichen.....	254
5.4	Bauteile von Weichen und Kreuzungen.....	254
5.4.1	Allgemein.....	254
5.4.2	Weichenfahrbahn.....	255
5.4.3	Zungenvorrichtungsbereich.....	257
5.4.4	Zwischenschienenteil.....	265
5.4.5	Herzstückbereich.....	265
5.4.6	Radlenker.....	269
5.4.7	Endteil.....	270
5.4.8	Spurführungstechnische Besonderheiten bei starren Herzstücken.....	270
5.5	Schienenbefestigungssysteme in Weichen.....	273
5.5.1	Zungenbereich.....	274
5.5.2	Zwischenschienenbereich.....	275
5.5.3	Herzstückbereich und Radlenker.....	275
5.5.4	Befestigung auf den Schwellen.....	276
5.6	Schwellen und Lagerungssysteme.....	277
5.7	Stell- und Verschlussysteme.....	278
5.7.1	Stellsysteme.....	279
5.7.2	Arten der Verschlüsse.....	280
5.8	Einbau von Weichen.....	281
5.8.1	Allgemein.....	281
5.8.2	Weicheneinbau und -umbau unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten.....	281
5.8.3	Weicheneinbau- und -umbauverfahren.....	282
5.9	Instandhaltung von Weichen.....	289
5.9.1	Gesetzliche Grundlagen.....	289
5.9.2	Anlagenverantwortung.....	290
5.9.3	Elemente der Instandhaltung.....	291
5.9.4	Inspektion.....	291

5.9.5	Wartung	298
5.9.6	Instandsetzung	298
5.10	Weichendiagnose	301
5.10.1	Allgemeines	301
5.10.2	Anwendungsbereich und Systemvarianten	301
5.10.3	Allgemeine Funktionsbeschreibung	301
5.10.4	Nutzen	302
5.11	Schnittstellen	302
5.11.1	Betriebliche Schnittstellen	302
5.11.2	Bautechnische Schnittstellen:	303
5.11.3	Energieversorgung	304
5.11.4	Fahrleitungstechnische Schnittstellen	304
5.12	Ausblick und Entwicklungstendenzen	304
5.12.1	Materialverbesserungen	304
5.12.2	Verbesserungen der Überlaufgeometrie	305
5.12.3	Verbesserungen der Stützpunktelastizität	305
5.12.4	Schall- und Erschütterung	305
5.12.5	Verschlusstechnik	305
5.12.6	Ferndiagnose und Überwachungssysteme	306
	Literatur	306
6	Querschnittsgestaltung der Bahnanlagen	307
	Anton Schmitt und Eberhard Jänsch	
6.1	Fahrzeugbegrenzung und Lichtraumprofil	307
6.1.1	Einführung	307
6.1.2	Verschiedene Berechnungsmethoden	308
6.1.3	Statische Bezugslinien	309
6.1.4	Kinematische Berechnungsmethode	309
6.1.5	Regellichraum nach EBO	312
6.2	Elemente der Streckenquerschnitte bei der DB Netz AG	314
6.2.1	Lichtraum	314
6.2.2	Gleisabstand	317
6.2.3	Fahrbahnbreite	321
6.2.4	Abstand fester Anlagen von Gleismitte	322
6.2.5	Lichte Weite und Höhe unter Überführungsbauwerken	323
6.3	Streckenquerschnitte	324
6.3.1	Streckenquerschnitt auf Erdkörpern	324
6.3.2	Streckenquerschnitt auf Brücken und in Tunneln	325
6.4	Abstände in Gleisanlagen mit Arbeitsstätten und Verkehrswegen	326
6.5	Parallelführung von Schienenweg und Straße	330
6.6	Bahnsteiganlagen	331
6.6.1	Grundsätze für die Konzeption und Gestaltung	331
6.6.2	Abmessungen	332
	Literatur	335

7 Eisenbahnbrücken, Tunnel und Ingenieurbauwerke	337
Tristan Mölter und Michael Fiedler	
7.1 Definition Ingenieurbauwerke	337
7.2 Geschichte der Deutschen Eisenbahn	337
7.3 Eisenbahnbrücken	337
7.3.1 Geschichte der Eisenbahnbrücken in Deutschland	337
7.3.2 Aktuelle Entwicklungen im Eisenbahnbrückenbau ...	342
7.3.3 Normen und Regelwerke	349
7.3.4 Anforderungen an Eisenbahnbrücken	357
7.3.5 Entwurfsgrundlagen	359
7.3.6 Entwurfsgrundsätze	368
7.3.7 Ausrüstungselemente für Eisenbahnbrücken	376
7.3.8 Hilfsbrücken und Baubehelfe	380
7.4 Tunnel und Trogbauwerke	384
7.4.1 Geschichte der Tunnel und Eisenbahntunnel in Deutschland	385
7.4.2 Aktuelle Entwicklungen im Eisenbahntunnelbau	386
7.4.3 Normen und Regelwerke	386
7.4.4 Anforderungen an Eisenbahntunnel	387
7.4.5 Entwurfsgrundlagen	388
7.4.6 Tunnelbauverfahren	392
7.4.7 Tunnelinspektion	399
7.5 Lärmschutzwände	400
Literatur	404
8 Betriebsführung der Infrastruktur	405
Jörn Pachl	
8.1 Betriebsführung der Infrastruktur	405
8.2 Grundbegriffe des Bahnbetriebes	405
8.2.1 Rechtsverordnungen und Regelwerke	405
8.2.2 Einteilung der Eisenbahnunternehmen	406
8.2.3 Grundsätzliche Klassifizierung der Betriebsverfahren	406
8.2.4 Einteilung der Betriebsstellen	407
8.2.5 Durchführung von Fahrten auf einer Eisenbahninfrastruktur	409
8.3 Signalisierung am Fahrweg	415
8.3.1 Signalsysteme	415
8.3.2 Verwendung der Signale	419
8.4 Flankenschutz der Fahrwege	432
8.4.1 Flankenschutz gegen feindliche Zugfahrten	432
8.4.2 Flankenschutz gegen feindliche Rangierfahrten und unbeabsichtigt ablaufende Wagen	433
8.4.3 Flankenschutz gegen das Strecken von Zügen	433
8.4.4 Erfordernis von Schutzweichen	433
8.5 Bauen im Betrieb	434
8.5.1 Sicherung von Arbeitsstellen im Gleis	434
8.5.2 Betriebliche Maßnahmen zur Durchführung von Baumaßnahmen	437
Literatur	440

9 Spurplangestaltung und betriebliche Infrastrukturplanung	441
Werner Weigand und Andreas Heppe	
9.1 Planungsphasen.....	441
9.1.1 Planungsphasen der Bauplanung nach HOAI.....	441
9.1.2 Infrastrukturplanung mittels Langfristfahrplan.....	443
9.2 Spurplangestaltung.....	462
9.2.1 Einleitung.....	462
9.2.2 Betriebliche Funktionen von Bahnhöfen.....	464
9.2.3 Verkehrliche Funktionen von Bahnhöfen.....	467
9.2.4 Gleisarten.....	469
9.2.5 Anordnung der Gleise und Gleisgruppen.....	471
9.3 Leistungsuntersuchungen.....	482
9.3.1 Leistungsverhalten.....	482
9.3.2 Untersuchungsverfahren für Leistungsuntersuchungen.....	485
9.3.3 Einsatz der verschiedenen Methoden.....	488
9.3.4 Ablauf der Untersuchungen.....	489
9.4 Zusammenfassung.....	492
Literatur.....	493
10 Leit- und Sicherungstechnik	495
Ulrich Maschek	
10.1 Einführung.....	495
10.1.1 Begriffsabgrenzung.....	495
10.1.2 Maßgebende Systemeigenschaften.....	495
10.1.3 Regelkreis der Betriebssicherheit im Schienenverkehr.....	497
10.2 Ortung.....	498
10.2.1 Grundlagen.....	498
10.2.2 Wirkprinzipien.....	498
10.2.3 Gleisfreimeldung mittels Gleisstromkreis.....	501
10.2.4 Gleisfreimeldung mittels Achszähler.....	504
10.2.5 Anwendung von Gleisstromkreisen und Achszählern.....	506
10.3 Sicherung beweglicher Fahrweegelemente.....	506
10.3.1 Grundlagen.....	506
10.3.2 Weiche und Kreuzung.....	506
10.3.3 Gleissperre.....	510
10.3.4 Bewegliche Brücke.....	510
10.3.5 Drehscheibe und Schiebebühne.....	510
10.3.6 Tor.....	510
10.4 Technologien der Fahrwegsicherung.....	511
10.4.1 Herleitung.....	511
10.4.2 Technologie Fahrstraße.....	512
10.4.3 Technologie Blockinformation.....	522
10.5 Techniken zur Fahrwegsicherung.....	524
10.5.1 Differenzierung zwischen Leit- und Sicherungstechnik.....	524

10.5.2	Klassifizierung der Techniken.....	525
10.5.3	Mechanisches Stellwerk	526
10.5.4	Elektromechanisches Stellwerk.....	527
10.5.5	Relaisstellwerk	527
10.5.6	Elektronisches Stellwerk (ESTW).....	528
10.6	Leittechnik.....	528
10.6.1	Aufgaben der Leittechnik	528
10.6.2	Zugnummernmeldung (ZN).....	529
10.6.3	Zuglenkung (ZL).....	530
10.6.4	Fernsteuerung von Stellwerken	530
10.6.5	Zentralen zur Betriebsführung.....	531
10.7	Anordnung ortsfester Signale	531
10.7.1	Bezeichnung der Vor- und Hauptsignale	531
10.7.2	Standort quer zum Gleis	532
10.7.3	Standort längs zum Gleis.....	532
10.8	Zugbeeinflussung	535
10.8.1	Anforderungen	535
10.8.2	Systematisierung.....	536
10.8.3	Systeme mit Balisen	537
10.8.4	Führerraumsignalisierung	537
10.8.5	Signum	538
10.8.6	Punktförmige Zugbeeinflussung PZB 90	539
10.8.7	Geschwindigkeitsüberwachung für Neigetechnik (GNT)	542
10.8.8	Linienzugbeeinflussung (LZB)	542
10.8.9	European Train Control System (ETCS).....	543
	Symbolverzeichnis.....	551
11	Funktionale Sicherheit	553
	Jens Braband	
11.1	Einleitung.....	553
11.1.1	Wesentliche Unfallursachen	553
11.1.2	Beispiel	553
11.1.3	Epochen der Systemsicherheit	554
11.2	Definition des Begriffs Sicherheit	554
11.2.1	Klassische Definitionen	554
11.2.2	Moderne, risikoorientierte Definition	555
11.2.3	Risikoorientierter Ansatz.....	556
11.2.4	Europäische gesetzliche Vorgaben	556
11.2.5	Bedeutung der Normen.....	558
11.3	Risikoanalyse.....	559
11.3.1	Prozess der expliziten Risikoanalyse	559
11.3.2	Definition von Sicherheitszielen	560
11.3.3	Methoden zur expliziten Risikoanalyse	574
11.3.4	Semi-quantitatives Verfahren Risk Score Matrix	578
11.4	Sicherheitsnachweisführung.....	581
11.4.1	Gefährdungsanalyse-Prozess	582
11.4.2	Struktur und Hierarchie von Sicherheitsnachweisen.....	584

11.4.3	Aufbau und Inhalt von Sicherheitsnachweisen.....	589
11.5	Beurteilung von potenziellen Sicherheitsmängeln	594
11.5.1	Bewertungsprozess.....	595
11.5.2	Risikobewertung	596
11.6	Ereignisanalyse.....	598
11.6.1	Erfassung und Auswertung sicherheitsrelevanter Ereignisse	598
11.6.2	Unfallursachen	598
11.6.3	Unfallursachenanalyse	599
11.6.4	Lernen auf Organisationsebene.....	600
11.7	Sicherheitskultur.....	600
11.7.1	Begriffsdefinition.....	601
11.7.2	Indikatoren für eine positive Sicherheitskultur.....	602
11.8	Beispiel	602
11.8.1	Systemdefinition.....	602
11.8.2	Gefährdungsidentifikation	603
11.8.3	Risikoanalyse	603
11.8.4	Gefährdungsanalyse.....	604
	Weiterführende Literatur	606
12	Trassierung und Gleisplangestaltung	607
	Manfred Weigend	
12.1	Längsneigung der Eisenbahn.....	607
12.1.1	Längsneigung der Streckengleise	607
12.1.2	Längsneigung in Bahnhöfen.....	609
12.1.3	Ausrundung der Längsneigung	609
12.2	Allgemeine Regeln der Linienführung im Grundriss.....	610
12.2.1	Grundregel für durchgehende Hauptgleise.....	610
12.2.2	Grundregel für die übrigen Hauptgleise und die Nebengleise.....	611
12.3	Elemente der Linienführung im Kreisbogen.....	611
12.3.1	Radius, Überhöhung und Geschwindigkeit	611
12.3.2	Größe der Überhöhung.....	613
12.3.3	Der Überhöhungsfehlbetrag	614
12.3.4	Die Regelüberhöhung	616
12.3.5	Wahl der Bogenradien.....	617
12.3.6	Länge der Kreisbögen und Geraden	617
12.3.7	Gleisverziehungen	617
12.4	Übergangsbogen und Überhöhungsrampe	618
12.4.1	Die Klothoide mit gerader Überhöhungsrampe....	618
12.4.2	Übergangsbogen- und Rampenlänge	620
12.4.3	Der Übergangsbogen mit geschwungener Rampe	621
12.5	Der Bogen ohne Übergangsbogen.....	624
12.5.1	Krümmungswechsel und Vergleichsradius.....	624
12.5.2	Längen der Zwischengeraden oder Zwischenbögen	626
12.5.3	Gegenbogen mit kleinen Radien	627
12.6	Entwurf der Spurpläne	627
12.6.1	Wahl und Anordnung der Weichen.....	627

12.6.2	Die Weiche als Spurplanelement.....	628
12.7	Optimierung vorhandener Anlagen.....	637
12.7.1	Die „gute“ Trasse	637
12.7.2	Maßnahmen zur Fahrzeitverkürzung.....	637
12.7.3	Linienkorrekturen	638
12.7.4	Einsatz von Neigetechnikfahrzeugen.....	639
12.8	Zusammenfassung	640
	Anhang.....	640
	Literatur.....	641
13	Bahnübergänge	643
	Eric J. Schöne	
13.1	Einführung	643
13.2	Grundlagen.....	644
13.2.1	Definitionen.....	644
13.2.2	Anforderungen.....	644
13.2.3	Rechtsgrundlagen	645
13.3	Bautechnische Gestaltung.....	647
13.3.1	Allgemeine Anforderungen	647
13.3.2	Bahnübergangsbeläge	648
13.3.3	Entwässerung.....	650
13.4	Sicherungsmaßnahmen	650
13.4.1	Technologien zur Sicherung	650
13.4.2	Nichttechnische Sicherung.....	652
13.4.3	Technische Sicherung	660
13.5	Bahnübergangssicherung als Gemeinschaftsaufgabe	671
13.5.1	Wechselwirkungen.....	671
13.5.2	Beschilderung und Markierung	672
13.5.3	Freihaltung der Aufstelllänge.....	673
13.5.4	Verkehrsschau an Bahnübergängen	677
13.5.5	Auffassung und Beseitigung.....	677
	Literatur.....	678
14	Energieversorgung elektrischer Bahnen.....	681
	Arnd Stephan und Bernd-Wolfgang Zweig	
14.1	Grundlagen.....	681
14.1.1	Aufgaben und Systemstruktur.....	681
14.1.2	Elektrifizierungswürdigkeit.....	682
14.1.3	Begriffsdefinitionen	683
14.2	Bahnstromsysteme	684
14.2.1	Entwicklung und Verbreitung	684
14.2.2	Gleichstrombahnsysteme.....	686
14.2.3	Wechselstrombahnsysteme mit Industriefrequenz	689
14.2.4	Wechselstrombahnsysteme mit Sonderfrequenz ..	691
14.3	Die 16,7-Hz-Bahnenergieversorgung in Deutschland.....	691
14.3.1	Gesamtstruktur	691
14.3.2	Teilsysteme.....	694
14.4	Fahrleitungen.....	698

14.4.1	Allgemeines.....	698
14.4.2	Oberleitungen.....	699
14.4.3	Stromschienenoberleitung	737
14.4.4	Stromschienen.....	737
14.5	Stromabnehmer	742
14.5.1	Allgemeines.....	742
14.5.2	Stromabnehmer für Oberleitungen.....	743
14.5.3	Seitenstromabnehmer bei Grubenbahnen.....	745
14.5.4	Stromabnehmer für Stromschienen.....	745
14.6	Rückstromführung, Bahnerdung und Potenzialausgleich... ..	746
14.6.1	Rückstromführung.....	747
14.6.2	Bahnerdung.....	749
14.6.3	Potenzialausgleich.....	750
14.7	Arbeiten in der Nähe spannungsführender Ober- und Bahnenergieleitungen (16,7 Hz, 15.000 V)	751
14.7.1	Abstand von Personen.....	751
14.7.2	Abstand von Baumaschinen und Geräten	751
	Literatur.....	752
15	Stromversorgung der Infrastruktur.....	757
	Eberhard Hunger und Jörg Mohrich	757
15.1	Vorbemerkungen	757
15.1.1	Energiebezug vom Versorgungsnetzbetreiber.....	758
15.1.2	Energiebezug aus der Oberleitung	758
15.2	Stromversorgung von Strecken.....	759
15.2.1	Verbraucherstruktur.....	759
15.2.2	Freie Strecke	761
15.2.3	Tunnel.....	766
15.2.4	Stellwerke an Strecken	770
15.2.5	Bahnhöfe, Haltepunkte an Strecken	772
15.3	Stromversorgung von Eisenbahnknoten.....	774
15.3.1	Verbraucherstruktur	774
15.3.2	Netzstruktur	774
15.3.3	Stellwerke von Eisenbahnknoten	775
15.3.4	Bahnhöfe von Eisenbahnknoten.....	777
15.4	Sonderanlagen	781
15.4.1	Zugbildungsanlagen	781
15.4.2	Elektrische Weichenheizanlagen.....	782
15.4.3	Zugvorheizanlagen.....	785
15.4.4	Zugbehandlungsanlagen	792
15.4.5	Werke	792
15.4.6	Nebenverbraucher an der Oberleitung	793
15.4.7	Alternative Stromversorgungsanlagen	793
15.5	Schutzmaßnahmen	795
15.5.1	Netzform und Erdung von EWHA.....	796
15.5.2	Schutzeinrichtungen der EWHA.....	797
15.5.3	Besonderheiten bei EWHA	797

16	Kabelanlagen	799
	Ralf Baumann und Andreas Boldt	
16.1	Bauarten und Verwendung	799
16.1.1	Energiekabel und Leitungen	803
16.1.2	Kabel und Leitungen mit verbessertem Verhalten im Brandfall	806
16.1.3	Signal- und Nachrichtenkabel	807
16.2	Garnituren	808
16.2.1	Muffen und Verbinder	809
16.2.2	Endverschlüsse	810
16.3	Planung von Kabelanlagen	812
16.3.1	Trassenplanung	812
16.3.2	Typenauswahl und Dimensionierung	813
16.3.3	Lagepläne	817
16.3.4	Führung, Befestigung und Schutz	817
16.4	Legung und Montage	824
16.4.1	Auslegen und Kennzeichnen	824
16.4.2	Garniturenmontage	827
16.4.3	Ab- und Inbetriebnahmeprüfungen	828
16.4.4	Schlussvermessung und Dokumentation	829
16.5	Betrieb und Instandhaltung	829
16.5.1	Kabelüberwachung	829
16.5.2	Instandhaltung	830
16.6	Normen, Richtlinien, Empfehlungen	831
17	Bahnbetriebliche Telekommunikationstechnik	835
	Thomas Schnurrer	
17.1	Einleitung	835
17.1.1	Bahnbetriebliche Telekommunikationsanlagen	835
17.1.2	Hauptaspekte der technologischen Entwicklung	837
17.2	Das GSM-R Netz	838
17.2.1	Frequenzbereich	839
17.2.2	Funktionale Merkmale	840
17.2.3	GSM-R-Architektur	841
17.2.4	Anbindung ortsfester Teilnehmer	845
17.2.5	GSM-R-Endgeräte	847
17.2.6	Applikationen und betriebliche Netzkonfiguration	849
17.2.7	Teilnehmerverwaltung	852
17.2.8	Nationales und Internationales Roaming	853
17.3	Analoge Funktechnik	855
17.3.1	Analoger Zugfunk	855
17.3.2	Analoger Rangierfunk	860
17.3.3	Betriebs- und Instandhaltungsfunk (BiFu)	861
17.3.4	BOS-Funksysteme	862
17.4	Betriebsfernmeldeanlagen	862
17.5	Lautsprechersysteme	865

17.6	Steuerungs- und Meldesysteme	868
17.6.1	FÜSTE	868
17.6.2	Meldeanlagen system MAS 90.....	869
17.7	Betriebliche Gefahrenmeldeanlagen	872
17.7.1	Heißläufer- und Festbremsortungsanlagen (HOA/FBOA).....	872
17.7.2	Luftströmungsmeldeanlagen (LSMA).....	873
17.7.3	Windmeldeanlagen (WMA).....	874
17.8	Tunnelnotrufsysteme	874
17.9	Videotechnik.....	875
17.9.1	TV-Anlagen an Bahnübergängen.....	875
17.9.2	Zugschlussbeobachtung und -feststellung.....	876
17.10	Übertragungstechnik und -wege	876
17.11	Ausblick.....	879
	Literatur.....	880
18	Elektromagnetische Verträglichkeit	881
	Franz Klier	
18.1	Allgemeines.....	881
18.2	EMV im hochfrequenten Bereich	881
18.3	Beeinflussung von Anlagen der Leit- und Sicherungstechnik durch Bahnströme	883
18.4	Beeinflussung von Gleisfreimeldeanlagen durch Eisenbahnfahrzeuge	888
	Weiterführende Literatur	894
19	Umweltschutz	897
	Bernhard Koch	
19.1	Umweltmanagement	897
19.1.1	Ziel und Nutzen von Managementsystemen unter besonderer Berücksichtigung des Umweltmanagements	897
19.1.2	Normen des Umweltmanagements	898
19.1.3	Integrierte Managementsysteme (IMS).....	903
19.1.4	Delegation von Unternehmer-/Betreiberpflichten .	903
19.1.5	Beauftragtenwesen	904
19.2	Anlagenbezogener Umweltschutz.....	906
19.2.1	Abwasseranlagen und Abwasserbehandlungsanlagen	906
19.2.2	Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen	909
19.2.3	Innenreinigungsanlagen	914
19.2.4	Genehmigungsbedürftige Anlagen nach der 4. BImSchV	916
19.2.5	Trinkwasser-Befüllungsanlagen.....	920
19.2.6	Strahlenschutz	920

19.3	Schutz vor Lärm und Erschütterungen.....	923
19.3.1	Lärm	923
19.3.2	Erschütterungen und sekundärer Luftschall.....	934
19.4	Vegetationskontrolle.....	949
19.4.1	Grundlagen und Definitionen.....	949
19.4.2	Vegetationskontrolle für den Bereich im Gleis.....	951
19.4.3	Vegetationskontrolle für den Bereich am Gleis....	952
19.4.4	Positive Aspekte für den Naturschutz.....	958
19.5	Schutz von Natur und Landschaft.....	959
19.5.1	Grundlagen.....	959
19.5.2	Strategische Umweltprüfung.....	960
19.5.3	Umweltverträglichkeitsprüfung.....	961
19.5.4	Naturschutzfachliche Eingriffsregelung.....	964
19.5.5	Flora-Fauna-Habitat-Verträglichkeitsprüfung.....	965
19.5.6	Artenschutz.....	965
19.6	Umweltschutzanforderungen an Planungs- und Instandhaltungsprozesse	969
19.6.1	Entsorgung	969
	Literatur.....	979
20	Netzzugang.....	985
	Anton Schmitt	
20.1	Vorgaben der Europäischen Union.....	985
20.1.1	Interoperabilität.....	985
20.1.2	Diskriminierungsfreier Zugang.....	985
20.2	Nationale Vorgaben.....	985
20.2.1	Zulassung als EVU.....	986
20.2.2	Fahrzeugzulassung	986
20.3	Vorgaben des Eisenbahninfrastrukturunternehmens	988
20.3.1	Schienennetz-Benutzungsbedingungen.....	989
20.4	Beschreibung der Infrastruktur im Infrastrukturregister .	993
20.4.1	Grundsätze	996
20.4.2	Interaktive Karte.....	996
20.4.3	Vorgaben der TSI RINF.....	999
20.5	Zusammenfassung und Ausblick.....	999
	Literatur.....	1008
21	Instandhaltung und Anlagenmanagement des Fahrwegs	1009
	Peter Veit	
21.1	Anlagenmanagement für den Fahrweg von Eisenbahnen .	1012
21.2	Modell zur wirtschaftlichen Bewertung von Fahrwegstrategien	1013
21.3	LCC-basierte Fahrwegstrategien der ÖBB.....	1016
21.3.1	Strategie Fahrweg – Stufe 1	1018
21.3.2	Forschungen zum Qualitätsverhalten des Oberbaus.....	1034
21.3.3	Strategie Fahrweg – Stufe 2	1046

21.4	Life-Cycle-Management für den Fahrweg	1048
21.5	Ausblick	1053
	Literatur	1053
22	Anlagenmonitoring des Fahrwegs	1055
	Ulrich Erdmann	
22.1	Anforderungen	1055
22.1.1	Systemarchitektur	1056
22.1.2	Datenimport/Schnittstellen	1057
22.1.3	Das Analysesystem	1058
22.1.4	Anforderungen und Grundformen der Darstellung	1061
22.1.5	Mobile Lösungen	1065
22.1.6	Fachübergreifende Grundlagen für weitergehende Analysen	1065
22.2	Anwendung von Infrastruktur-Managementsystemen	1069
22.2.1	Ist-Zustandsanalyse	1070
22.2.2	Zustandsprognose	1081
22.2.3	Instandhaltungsplanung	1087
	Sachverzeichnis	1091

Autorenverzeichnis

Ralf Baumann, Dipl.-Ing. Berliner Verkehrsbetriebe (BVG), 10179 Berlin, Deutschland
E-Mail: Ralf.Baumann@BVG.DE

Andreas Boldt, Dipl.-Ing. Deutsche Bahn AG, 10245 Berlin, Deutschland
E-Mail: Andreas.Boldt@deutschebahn.com

Jens Braband, Prof. Dr. rer. nat. Siemens AG, 38126 Braunschweig, Deutschland
E-Mail: jens.braband@siemens.com

Ulrich Erdmann Erdmann-Softwaregesellschaft mbH, 02829 Schöpstal, 02826 Görlitz, Deutschland
E-Mail: info@erdmannsoftware.com

Michael Fiedler, Dipl.-Ing. 85540 Haar, Deutschland
E-Mail: fiedlerm69@gmail.com

Ulf Gerber, Dr.-Ing. TU Dresden, 01069 Dresden, Deutschland
E-Mail: ulf.gerber@tu-dresden.de

Andreas Heppe, Dr.-Ing. TU Dresden, 01062 Dresden, Deutschland
E-Mail: andreas.heppe@tu-dresden.de

Eberhard Hunger, Dipl.-Ing. Balfour Beatty Rail GmbH, 10247 Berlin, Deutschland
E-Mail: eberhard.hunger@bbrail.com

Eberhard Jänsch, Prof. Dr.-Ing. 61137 Schöneck, Deutschland
E-Mail: eb@hsr-jaensch.de

Franz Klier, Dipl.-Ing. DB Systemtechnik, 80939 München, Deutschland

Bernhard Koch, Dipl.-Ing. DB Netz AG, 60486 Frankfurt a. M., Deutschland
E-Mail: Bernhard.Koch@deutschebahn.com

Ekkehard Lay, Dipl.-Ing. (FH) 64342 Seeheim-Jugenheim, Deutschland

Ulrich Maschek, Dr.-Ing. TU Dresden, 01069 Dresden, Deutschland
E-Mail: u.maschek@tu-dresden.de

Klaus Meißner, Dipl.-Ing. 04157 Leipzig, Deutschland
E-Mail: w.klaus.meissner@gmx.de

Jörg Mohrich, Dipl.-Ing. (FH) Balfour Beatty Rail GmbH, 04103 Leipzig, Deutschland
E-Mail: joerg.mohrich@bbrail.com

Tristan Mölter, Dipl.-Ing. 84149 Velden, Deutschland
E-Mail: tristan.moelter@gmx.de

Jörn Pachl, Prof. Dr.-Ing. TU Braunschweig, 38106 Braunschweig, Deutschland
E-Mail: j.pachl@tu-bs.de

Horst Rahn, Dr.-Ing. Rolandstraße 113, 13156 Berlin, Deutschland

Reinhold Rensing, Dipl.-Ing. R²-railconsult GmbH, 46325 Borken, Deutschland
E-Mail: rensing@r2-railconsult.de

Klaus Rießberger, Prof. Dr. techn. TU Graz, 8010 Graz, Österreich
E-Mail: klaus.riessberger@tugraz.at

Anton Schmitt, Dipl.-Ing. DB Netz AG, 60486 Frankfurt a. M., Deutschland
E-Mail: anton.schmitt@deutschebahn.com

Thomas Schnurrer, Dipl.-Ing. (FH) DB Netz AG, 60326 Frankfurt a. M., Deutschland
E-Mail: Thomas.Schnurrer@deutschebahn.com

Eric J. Schöne, Dr.-Ing. TU Dresden, 01062 Dresden, Deutschland
E-Mail: eric.schoene@tu-dresden.de

Arnd Stephan, Prof. Dr.-Ing. TU Dresden, 01069 Dresden, Deutschland
E-Mail: arnd.stephan@tu-dresden.de

Peter Veit, Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft, Technische Universität Graz, Rechbauerstrasse 12, 8010 Graz, Österreich
E-Mail: peter.veit@tugraz.at

Werner Weigand, Dr.-Ing. DB Netz AG, 60326 Frankfurt a. M., Deutschland
E-Mail: werner.weigand@deutschebahn.com

Manfred Weigand, Dr.-Ing. 82024 Taufkirchen, Deutschland
E-Mail: dr.weigand@weigend.de

Alfred Wöhhart ÖBB-Infrastruktur AG, 1020 Wien, Österreich
E-Mail: alfred.woehnhart@oebb.at

Bernd-Wolfgang Zweig, Dr.-Ing. Balfour Beatty Rail GmbH, 63067 Offenbach/Main, Deutschland
E-Mail: bernd-wolfgang.zweig@bbrail.com

Klaus Rießberger

1.1 Einleitung

Der Rad-Schiene-Kontakt bestimmt die Leistungsfähigkeit des Systems Eisenbahn. Aufgrund der Dynamik und der hohen Kontaktspannungen ist er der kritische Punkt bei allen Bahnen, ganz besonders jedoch bei Hochgeschwindigkeits- und Schwerlastverkehr. Der Kontakt Rad-Schiene ist aber auch maßgeblich für Lärm und Verschleiß verantwortlich. Die Rauigkeit von Schiene und Rad regt die Lärmemissionen an, durch Materialabtrag verändern sich zudem die jeweiligen Profile in Längs- und Querrichtung, was im Laufe des Betriebes veränderte Kontaktsituationen hervorruft. Hinzu kommt, dass das Durchfahren von engeren Bögen durch Eisenbahnfahrzeuge mit erheblichen Gleitanteilen (Schlupfen) verbunden ist, die Räder also eher rutschen als rollen. Außerdem hat es eine große Tradition, ausgerechnet am Kontaktpunkt Rad-Schiene die Trennung von Bauingenieurwesen und Maschinenbau vorzunehmen. Im Folgenden wird noch deutlich dargelegt werden, dass Kräfte und Bewegungen und mit ihnen der Verschleiß immer aus dem Zusammenwirken zweier Komponenten herrühren, der Schiene und dem Rad, oder genauer, dem Laufwerk und dem Gleis, und daher von beiden Fachbereichen pflegliche Maßnahmen nötig sind um dauerhaft ein befriedigendes Zusammenwirken der Komponenten sicherzustellen.

In Europa hatten die Staaten bis vor wenigen Jahren die Normenhoheit, eine Abstimmung zwischen den Bahnen zum Zwecke der internationalen Kompatibilität erfolgte im Rahmen von Arbeitssitzungen im Internationalen Eisenbahnverband (UIC). Seit der Einrichtung von europäischen Institutionen zur Schaffung eines gesamt-europäischen Eisenbahnraumes gelten für die Bahnen der Mitgliedsländer der Europäischen Union (EU) gemeinsame und einheitliche Richtlinien, die in nationales Recht umgesetzt werden (und wurden) und denen im Zuge der laufenden Erneuerung der Bahnanlagen zunehmend entsprochen werden wird.

Für den Radsatz und das Gleis sind die Hauptabmessungen und die zugehörigen Toleranzen durch Normen festgelegt.

Für den Radsatz gelten folgende Bezeichnungen und Maße (für Normalspur 1435 mm) (Abb. 1.1):

- Raddurchmesser, gemessen in Profilmittre
- Radprofil
 - Radbreite 135–140 mm
 - Lauffläche, Laufflächenneigung (1:15...1:40), Laufflächenform
 - Hohlkehle, Hohlkehlen-Ausrundung
 - Spurkranz, Spurkranzkuppe
 - Radrücken, Radrückenentfernung 1360 mm
 - Radmittenentfernung 1500 mm
 - Spurmaß – Entfernung korrespondierender Punkte der Spurkranzflanke, gemessen 10 mm über Radprofilmitte (1426...1412 mm)

K. Rießberger (✉)
TU Graz, 8010 Graz, Österreich
E-Mail: klaus.riessberger@tugraz.at

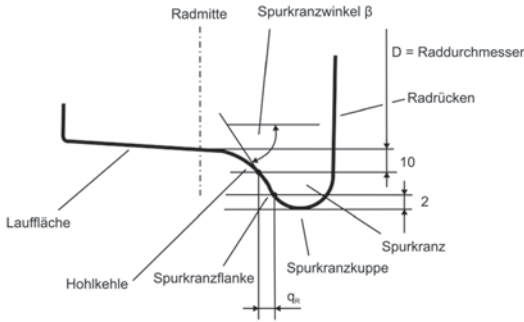


Abb. 1.1 Bezeichnungen für den Radsatz

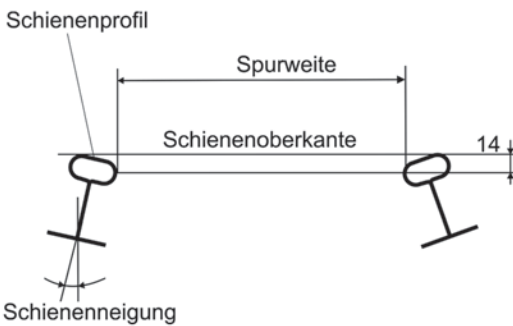


Abb. 1.2 Bezeichnungen im Gleis

- q_R -Maß als Kennwert für die Neigung der Spurkranzflanke ($> 6,5$ mm)

Für das Gleis werden folgende Begriffe verwendet (Abb. 1.2):

- Spurweite, gemessen 14 mm unter Schienenoberkante (SOK) 1435 mm
 - GrößtWert 1470 mm
 - KleinstWert 1425 mm
- Schienenneigung (1:20....1:40)
- Schienenkopfrundung ~ 300 mm
- Schienenfahrkante, Radius der Schienenfahrkante

Daraus ergibt sich

- Spurspiel als Differenz von Spurweite und Spurmaß
 - GrößtWert 58 mm
 - KleinstWert -1 mm

Für Weichen sind zahlreiche weitere Maße festgelegt, die zur Sicherstellung der einwandfreien Funktion laufend kontrolliert werden um auftretenden Verschleiß rechtzeitig zu korrigieren.

1.2 Der Radsatz im Gleis

1.2.1 Einführung

Wir betrachten einen Radsatz als starre Verbindung von zwei Rädern und einer Welle. Wie in Abb. 1.3 dargestellt, läuft der Radsatz auf einem Gleis, bestehend aus zwei Schienen mit einem Abstand der Kontaktpunkte von 2 s. Bedingt durch die seitliche Verschiebung y laufen der linke und der rechte Kontaktpunkt auf unterschiedlichen Radien, die Rollradiendifferenz wird als Δr bezeichnet.

Es bedeuten

- r nomineller Halbmesser eines Rades [m]
- s halber Abstand der Radaufstandspunkte [m]
- ρ Halbmesser der Bahnkurve [m]
- y Verschiebung der Radsatzmitte von der Gleismitte [m]

Aus Abb. 1.3 kann der folgende Zusammenhang entnommen werden: [8]

$$\tan \varepsilon = \frac{\Delta r}{2s} = \frac{r}{\rho} \quad \text{mit } \Delta r = f(y) \quad (1.1)$$

Mit ρ wird in dieser Formel der Radius bezeichnet, mit welchem zu diesem Zeitpunkt die rollende Bewegung in der horizontalen Ebene stattfindet. Er ergibt sich zu:

$$\rho = \frac{2rs}{\Delta r} = \frac{2rs}{f(y)} \quad (1.2)$$

Grundsätzlich lautet die Gleichung für die Bahnkrümmung

$$y'' = \frac{(1 + y'^2)^{3/2}}{\rho} = \frac{(1 + y'^2)^{3/2}}{\frac{2rs}{f(y)}} \quad (1.3)$$

Somit wäre die Differentialgleichung der seitlichen Bewegung für die (langsame) Fortbewegung eines Radsatzes am Gleis gefunden. Da es sich hierbei um eine nichtlineare Gleichung handelt, kann eine geschlossene Lösung nicht angegeben werden.

Diesem Problem wird (hier) mit zwei Vereinfachungen begegnet:

1. Die Bahn der Radsatzmitte weicht nur leicht von der Gleisachse ab
 $y^2 \ll 1$, damit wird

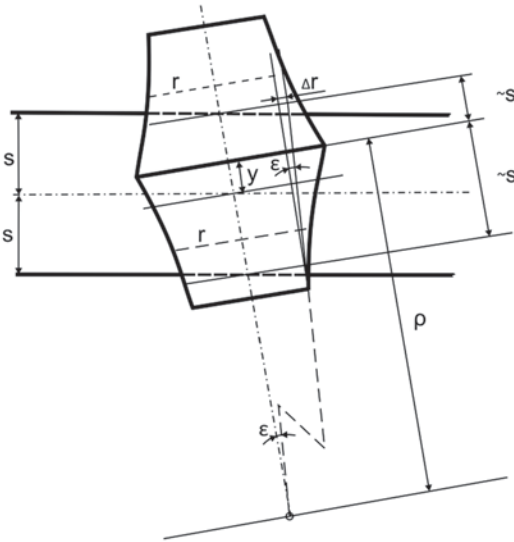


Abb. 1.3 Allgemeine Zusammenhänge zwischen Radsatz und Gleis

$$(1 + y'^2)^{3/2} \cong 1$$

und folglich

$$y'' = \frac{f(y)}{2rs} = \frac{1}{\rho} \tag{1.4}$$

2. Räder mit geraden konischen Profilen

Mit λ als Neigung des geraden konischen Profils wird

$$\Delta r = f(y) \Rightarrow \Delta r = 2\lambda y$$

Dann gilt

$$\Delta r = r_1 - r_2 = r_0 + \lambda y - (r_0 - \lambda y) = 2\lambda y$$

und die Gleichung (4) wird zu

$$y'' = \frac{2\lambda y}{2rs} = \frac{\lambda}{rs} y \tag{1.5}$$

Diese Differentialgleichung kann unschwer gelöst werden mit:

$$y(x) = y_{\max} \cdot \sin \sqrt{\frac{\lambda}{rs}} \cdot x \tag{1.6}$$

Diese Lösung wurde erstmals im Jahr 1883 von KLINGEL präsentiert. Aus ihrer mathematischen

Formulierung leitet sich die Bezeichnung „Sinuslauf“ für die periodische seitliche Bewegung eines Radsatzes während seines Laufes ab. Es ist festzuhalten, dass

- die Lösung nach KLINGEL nur für niedrige Geschwindigkeiten gültig ist, da keine Massenwirkungen enthalten sind,
- die Bewegung ausschließlich vom zurückgelegten Weg bestimmt wird
- nur die Annahme eines geraden konischen Profils zu einer linearen Differentialgleichung führt,
- jedes Hohlprofil zu nicht linearen Bewegungen führt,
- die Bewegungen eines ungefesselten, langsam freilaufenden Radsatzes durch reines Rollen (ohne relative Gleitbewegungen bzw. Schlupf) hervorgerufen werden,
- jede Verbindung der betrachteten Achse mit einem Wagenkasten oder mit einer anderen Achse in einem Drehgestell die Bewegung behindert und zum Auftreten von Gleitbewegungen (Schlupfen) an den Radaufstandspunkten führt.

1.2.2 Das Reibungsgesetz

1.2.2.1 Reibungsgesetz nach Coulomb

Im Jahre 1776 veröffentlichte COULOMB das nach ihm benannte Reibungsgesetz (Abb. 1.4).

$$T = -\mu N \frac{v}{|v|} \tag{1.7}$$

Die Reibungskraft T ist in ihrer Größe proportional der Normalkraft N und der Relativbewegung entgegengesetzt,

mit

N Normalkraft [N]

T Reibungskraft (Tangentialkraft) [N]

μ Reibungskoeffizient [1]

1.2.2.2 Schlupfe

Seit mehr als 100 Jahren ist bekannt, dass für die Übertragung von Tangentialkräften mittels Reibung das Auftreten eines Schlupfes, d. h. einer