



Lothar Fendrich  
Wolfgang Fengler *Hrsg.*

# Handbuch Eisenbahninfrastruktur

*3. Auflage*

---

# Handbuch Eisenbahninfrastruktur

---

Lothar Fendrich · Wolfgang Fengler  
(Hrsg.)

# Handbuch Eisenbahninfrastruktur

3., überarbeitete und aktualisierte Auflage

 Springer Vieweg

*Hrsg.*

Lothar Fendrich  
Wiesbaden, Deutschland

Wolfgang Fengler  
Bonn, Deutschland

ISBN 978-3-662-56061-7

ISBN 978-3-662-56062-4 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-662-56062-4>

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 GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2007, 2013, 2019

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. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

---

## Geleitwort zur 3. Auflage

Die Eisenbahninfrastruktur steht vor dem Hintergrund heutiger und zukünftiger Mobilitätsanforderungen vor strategischen Herausforderungen. Die Nutzung des Systems Schiene muss für die Kunden auch zukünftig attraktiv sein. Verfügbarkeit und Nachhaltigkeit der Schieneninfrastruktur spielen dabei eine entscheidende Rolle. Eine besonders wichtige strategische Aufgabe zur Sicherstellung einer nachhaltigen und zuverlässig verfügbaren Infrastruktur der Zukunft stellen daher die Modernisierung des Bestandsnetzes sowie die gezielte Ausweitung und Kapazitätserweiterung im Rahmen von Neu- und Ausbauprojekten dar.

Durch eine nicht ausreichende Finanzierung des Bestandsnetzes in der Vergangenheit hat sich über die Jahre ein Rückstau in Höhe von ca. 32 Milliarden Euro aufgebaut. Mit Hilfe der Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung II zwischen dem Bund und der DB AG wird deshalb seit 2015 das größte Modernisierungsprogramm für die Infrastruktur in der Geschichte der DB umgesetzt. In diesem Rahmen investiert die DB AG bis 2019 28 Milliarden Euro in die Erneuerung von unter anderem 8500 Kilometern Gleisen, 9200 Weichen sowie in die Modernisierung beziehungsweise den Neubau von 875 Brücken.

Um das System Schiene nachhaltig und verlässlich zu betreiben, sind insbesondere gut aus- und fortgebildete Mitarbeiter notwendig. Als Herzstück der Eisenbahninfrastruktur bündeln diese das Fachwissen, welches für die Qualitätssicherung wesentlich ist.

Die umfassenden Sachdarstellungen des vorliegenden Handbuches stellen eine einzigartige Qualität dar, die zum inspirierten Nachschlagen einer Fragestellung mit ihren vielfältigen Querverbindungen führt. Im Buch etwas nachzuschlagen ist eben eine andere Qualität der Wissensaneignung, als eine Datei am Bildschirm zu scrollen.

Die Nachfrage nach der nunmehr 3. Auflage dieses Handbuches bestätigt, dass genau dieser Bedarf an einer umfassenden Darstellung aller Gewerke der Eisenbahninfrastruktur besteht. Der Leser will sich nicht nur in seinem engeren Fachgebiet umtun, sondern sich zugleich auch in den Nachbardisziplinen umfassend und gezielt informieren.

Autoren, Herausgeber und Verlag beglückwünschen wir zu diesem außerordentlichen Gemeinschaftsprodukt, und wir danken ihnen zugleich für die Mühen, die sie für die Aktualisierung und Erweiterung dieses Standardwerkes auf sich genommen haben.

Wir wünschen dieser dritten Auflage des Handbuches der Eisenbahninfrastruktur eine erfolgreiche Aufnahme in den Fachkreisen des Bahnsystems.

Frank Sennhenn  
Vorstandsvorsitzender  
DB Netz AG

Dr. Volker Hentschel  
Vorstand Produktion  
DB Netz AG

---

## Vorwort der Herausgeber

Mit dieser nunmehr bereits 3. Auflage tragen wir dem offensichtlichen Bedarf der Fachwelt nach einem umfassenden, detailreichen und praxisgerechten Nachschlagewerk zur Eisenbahninfrastruktur Rechnung. Es richtet sich an angehende und an schon in der Praxis stehende Eisenbahningenieure in den DACH-Staaten.

Über 30 Autoren haben von der 1. Auflage in 2006 über die 2. Auflage in 2013 bis zur vorliegenden Auflage ihre Beiträge gewissenhaft überarbeitet, aktualisiert und, zum Teil erheblich, ergänzt und erweitert.

Getreu der Ursprungsidee wurde den Autoren große individuelle Gestaltungsfreiheit eingeräumt, um eine lehrbuchhafte Attitüde zu vermeiden und stattdessen dem jeweiligen Erfahrungs- und Erkenntnisschatz der Autoren, ihren unterschiedlichen Sicht- und Darstellungsweisen Vorrang zu geben.

So ist denn dieses Gemeinschaftswerk kein Lesebuch, sondern ein „Hand“- und Nachschlagewerk zum täglichen Gebrauch, das seinen Platz als Standardwerk gefunden hat.

An erster Stelle gilt unser herzlichster Dank allen Autoren, viele von ihnen bereits seit der 1. Auflage dabei, die sich bereitwilligst, ja enthusiastisch für dieses gemeinsame Werk über all die Jahre hinweg engagierten und auch in der terminengen Schlussphase dieser neuen Auflage nicht nachließen.

Autoren und Herausgeber eint das Engagement für den Ingenieurwachstum unserer Branche sowie für die Aus- und Weiterbildung der Fachleute in der Eisenbahninfrastruktur.

Unser Dank gilt Herrn Cheflektor Thomas Zipsner vom Springer-Verlag, der uns umsichtig begleitete und förderte. Besonderer Dank gebührt Frau Ellen Klabunde vom Lektorat Maschinenbau, die die Herausforderungen von Autorenavielfalt und Detailteufeln meisterte.

Wir freuen uns ganz besonders, dass seitens der DB Netz AG Herr Frank Sennhenn, Vorstandsvorsitzender, und Herr Dr.-Ing. Volker Hentschel, Vorstand Produktion, in ihrem Geleitwort aus Anwendersicht Sinnhaftigkeit und Nutzen dieses Handbuches herausstellen.

Möge auch diese 3. Auflage den Weg auf die Schreibtische und in die Hände vieler Nutzer in der Welt der Eisenbahninfrastruktur finden.

Wiesbaden/Bonn  
Januar 2019

Lothar Fendrich  
Wolfgang Fengler

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Das Zusammenwirken von Rad und Schiene</b>	<b>1</b>
	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	7
1.2.4	Rückstellsteifigkeit $c_{yg}$	9
1.2.5	Einfluss der Spurweite auf $\lambda_e, c_{yg}$	9
1.2.6	Möglichkeiten der Einflussnahme	10
1.2.7	Anmerkungen zur Wahl eines Radprofils	10
1.2.8	Bewegungsgleichungen von Radsätzen	11
1.3	Das Drehgestell am Gleis	12
1.3.1	„Steife“ Konstruktionen	12
1.3.2	„Weiche“ Drehgestelle	13
1.3.3	„Selbstlenkende“ und „Zwangsgesteuerte“ Drehgestelle	13
1.3.4	Gleichungssysteme für Fahrzeuge	14
1.4	Stabilität	17
1.4.1	Kritische Geschwindigkeit	17
1.4.2	Einflüsse auf die Laufstabilität	21
1.5	Bogenlauf	21
1.6	Maßnahmen zur Unterstützung guter Rad-Schiene-Interaktion	22
1.7	Beispiele und Erfahrungen	23
1.8	Entgleisungen	26
1.8.1	Entgleisungsursachen	26
1.8.2	Entgleisungskriterien	29
1.9	Zusammenfassung	29
	Literatur	38
<b>2</b>	<b>Auslegung des Eisenbahnoberbaus</b>	<b>41</b>
	Ulf Gerber	
2.1	Äußere Belastung	41
2.1.1	Äußere Vertikalbelastung	41
2.1.2	Äußere Längsbelastung	47
2.1.3	Äußere Seitenbelastung	47

2.2	Innere Belastung . . . . .	48
2.2.1	Innere Vertikalbelastung . . . . .	48
2.2.2	Innere Längsbelastung . . . . .	50
2.2.3	Innere Seitenbelastung . . . . .	52
2.3	Belastung und Belastbarkeit . . . . .	52
2.3.1	Vertikale Belastung und Belastbarkeit . . . . .	52
2.3.2	Belastung und Belastbarkeit in Längsrichtung . . . . .	56
2.3.3	Seitliche Belastung und Belastbarkeit . . . . .	57
2.4	Belastung und Auslegung der Oberbaukomponenten . . . . .	58
2.4.1	Schienen . . . . .	59
2.4.2	Schienenbefestigung . . . . .	60
2.4.3	Schwellen . . . . .	60
2.4.4	Schotter . . . . .	62
2.4.5	Elastische Elemente im Schotteroberbau . . . . .	62
2.5	Belastung und Anschaffungskosten des Eisenbahnoberbaus . . . . .	64
2.6	Zusammenfassung . . . . .	65
	Literatur . . . . .	67
<b>3</b>	<b>Schienen und Schienenschweißen . . . . .</b>	<b>69</b>
	Ralf Linsel und Klaus Meißner	
3.1	Schienenwerkstoffe und Schienenprofile . . . . .	69
3.1.1	Stahl als Baustoff, Schienenstahl als individueller Werkstoff . . . . .	69
3.1.2	Aufgaben der Schiene . . . . .	69
3.1.3	Eigenschaften des Schienenstahls . . . . .	72
3.1.4	Gefüge des Schienenstahls . . . . .	73
3.1.5	Schienenstahlherstellung . . . . .	73
3.1.6	Schienenformen (Schienenprofile) . . . . .	74
3.1.7	Walzlängen, Walzzeichen und Warmstempeln . . . . .	77
3.1.8	Verwendung und Verschleißbeanspruchung von Schienen . . . . .	77
3.1.9	Ziele . . . . .	77
3.2	Schienenschweißen . . . . .	78
3.2.1	Allgemeines . . . . .	78
3.2.2	Abbrennstumpfschweißen . . . . .	80
3.2.3	Ablauf der Abbrennstumpfschweißung . . . . .	81
3.2.4	Gaspressschweißen . . . . .	83
3.2.5	Aluminothermisches Gießschmelzschweißen . . . . .	84
3.2.6	Lichtbogenschweißen . . . . .	86
3.3	Schienenschleifen (Oberflächenbearbeitung) . . . . .	88
3.3.1	Allgemeines . . . . .	88
3.3.2	Neuschienenschleifen . . . . .	88
3.3.3	Präventivschleifen . . . . .	88
3.3.4	Erhaltungsschleifen (-fräsen) . . . . .	89
3.3.5	Schleifen von Schweißungen . . . . .	89

3.4	Fehler und Schäden an Schienen und Schienenschweißungen . . . . .	89
3.4.1	Allgemeines . . . . .	89
3.4.2	Schienenfehler, Übersicht . . . . .	89
3.4.3	Beschreibung der Schienenfehler . . . . .	90
3.5	Prüfen, Messen und Bewerten von Schienen und Schienenschweißungen . . . . .	95
3.5.1	Allgemeines . . . . .	95
3.5.2	Schienen . . . . .	95
3.5.3	Schweißungen . . . . .	96
3.5.4	Methoden der zerstörungsfreien Prüfung von Schienen . . . . .	98
3.6	Herstellen lückenloser Gleise und Weichen . . . . .	99
3.6.1	Allgemeines . . . . .	99
3.6.2	Spannungsausgleich im Gleis . . . . .	99
3.6.3	Spannungsausgleich in Weichen . . . . .	101
<b>4</b>	<b>Eisenbahndämme und Einschnitte . . . . .</b>	<b>103</b>
	Horst Rahn	
4.1	Einführung . . . . .	103
4.2	Baugrundtechnische Bewertung der Erdbauwerke und des Baugrundes . . . . .	105
4.2.1	Geologische, hydrologische Situation, Einfluss aus der Verwitterung . . . . .	108
4.2.2	Umweltschäden . . . . .	110
4.2.3	Aufschluss des Baugrundes . . . . .	113
4.2.4	Baugrundgutachten/geotechnischer Bericht . . . . .	115
4.3	Gründung von Erdbauwerken auf tragfähigem Baugrund . . . . .	116
4.3.1	Oberbodenabtrag und Untergrundplanum . . . . .	116
4.3.2	Dammaufbau . . . . .	121
4.3.3	Aushub tiefer Baugruben mit Unterwasserbaggerung/Saugwirkung . . . . .	171
4.4	Gründung von Erdbauwerken auf wenig tragfähigem Baugrund . . . . .	173
4.4.1	Allgemeine Grundlagen bei der Bewertung der Bahndämme auf wenig tragfähigem Baugrund . . . . .	173
4.4.2	Die Entstehung der Moore und die bautechnische Nutzung ihrer Eigenschaften . . . . .	175
4.4.3	Besonderheiten der Erkundung und Baugrundbeurteilung . . . . .	177
4.4.4	Überschütten von Moorflächen mit einer Arbeits- und Filterschicht . . . . .	179
4.4.5	Analyse der Schäden schwimmend gegründeter Bahndämme . . . . .	184
4.4.6	Wahl der Sanierungs- und Ertüchtigungsmethode bei Arbeiten an in Betrieb befindlichen Bahndämmen auf weichem Untergrund . . . . .	194

4.5	Schäden an Bauwerken im organischen Baugrund und die Rolle dieser Schichten als Überträger energiereicher Einwirkungen . . . . .	236
4.5.1	Vorbemerkungen . . . . .	236
4.5.2	Erschütterungen im Baufeld durch Sprengungen . . . . .	237
4.5.3	Die Vibration – ein wichtiges Hilfsmittel zur Beschleunigung von Ramm- und Ziehvorgängen mit seinen Nebenwirkungen in Mooregebieten . . . . .	239
4.5.4	Schäden durch dynamische Wirkungen . . . . .	244
	Literatur . . . . .	246
<b>5</b>	<b>Weichen</b> . . . . .	<b>249</b>
	Ekkehard Lay und Reinhold Rensing	
5.1	Allgemeines . . . . .	249
5.1.1	Geschichte und Definition . . . . .	249
5.1.2	Weichen als Kostenfaktor . . . . .	250
5.2	Weichen und Kreuzungen . . . . .	252
5.2.1	Allgemeines . . . . .	252
5.2.2	Weichenbauarten . . . . .	253
5.3	Weichen und Kreuzungen als Planungselement . . . . .	260
5.3.1	Grundlagen der Weichengeometrie . . . . .	260
5.3.2	Zweiggleisbogen . . . . .	261
5.3.3	Darstellung im Lageplan . . . . .	262
5.3.4	Anordnung von Weichen . . . . .	264
5.4	Bauteile von Weichen und Kreuzungen . . . . .	264
5.4.1	Allgemein . . . . .	264
5.4.2	Weichenfahrbahn . . . . .	266
5.4.3	Zungenvorrichtungsbereich . . . . .	267
5.4.4	Herzstückbereich . . . . .	275
5.4.5	Radlenker . . . . .	279
5.4.6	Endteil . . . . .	280
5.4.7	Spurführungstechnische Besonderheiten bei starren Herzstücken . . . . .	281
5.5	Schienenbefestigungssysteme in Weichen . . . . .	285
5.5.1	Zungenbereich . . . . .	285
5.5.2	Zwischenschienenbereich . . . . .	286
5.5.3	Herzstückbereich und Radlenker . . . . .	286
5.5.4	Befestigung auf den Schwellen . . . . .	287
5.6	Schwellen und Lagerungssysteme . . . . .	287
5.7	Stell- und Verschlussysteme . . . . .	289
5.7.1	Stellsysteme . . . . .	289
5.7.2	Arten der Verschlüsse . . . . .	291
5.8	Einbau von Weichen . . . . .	292
5.8.1	Allgemein . . . . .	292
5.8.2	Weicheneinbau und -umbau unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten . . . . .	293
5.8.3	Weicheneinbau- und -umbauverfahren . . . . .	293

5.9	Instandhaltung von Weichen . . . . .	301
5.9.1	Gesetzliche Grundlagen . . . . .	301
5.9.2	Anlagenverantwortung . . . . .	302
5.9.3	Elemente der Instandhaltung . . . . .	303
5.9.4	Inspektion . . . . .	303
5.9.5	Wartung . . . . .	313
5.9.6	Instandsetzung . . . . .	313
5.10	Weichendiagnose . . . . .	314
5.10.1	Allgemeines . . . . .	314
5.10.2	Anwendungsbereich und Systemvarianten . . . . .	314
5.10.3	Allgemeine Funktionsbeschreibung . . . . .	315
5.10.4	Nutzen . . . . .	315
5.11	Schnittstellen . . . . .	315
5.11.1	Betriebliche Schnittstellen . . . . .	315
5.11.2	Bautechnische Schnittstellen . . . . .	316
5.11.3	Energieversorgung . . . . .	317
5.11.4	Fahrleitungstechnische Schnittstellen . . . . .	317
5.12	Berechnung von Weichen . . . . .	317
5.12.1	Einführung . . . . .	317
5.12.2	Konstruktive Randbedingungen . . . . .	318
5.12.3	Berechnung der Weichen . . . . .	319
5.13	Ausblick und Entwicklungstendenzen . . . . .	322
5.13.1	Materialverbesserungen . . . . .	322
5.13.2	Verbesserungen der Überlaufgeometrie . . . . .	322
5.13.3	Verbesserungen der Stützpunktelastizität . . . . .	322
5.13.4	Schall- und Erschütterung . . . . .	322
5.13.5	Kunststoffschwellen . . . . .	323
5.13.6	Ferndiagnose und Überwachungssysteme . . . . .	324
	Literatur . . . . .	326
<b>6</b>	<b>Querschnittsgestaltung der Bahnanlagen . . . . .</b>	<b>327</b>
	Eberhard Jänsch	
6.1	Fahrzeugbegrenzung und Lichtraumprofil . . . . .	327
6.1.1	Einführung . . . . .	327
6.1.2	Verschiedene Berechnungsmethoden . . . . .	328
6.1.3	Statische Bezugslinien . . . . .	329
6.1.4	Kinematische Berechnungsmethode . . . . .	329
6.1.5	Regellichtraum nach EBO . . . . .	332
6.2	Elemente der Streckenquerschnitte bei der DB Netz AG . . . . .	334
6.2.1	Lichtraum . . . . .	334
6.2.2	Gleisabstand . . . . .	337
6.2.3	Fahrbahnbreite . . . . .	341
6.2.4	Abstand fester Anlagen von Gleismitte . . . . .	342
6.2.5	Lichte Weite und Höhe unter Überführungsbauwerken . . . . .	343
6.3	Streckenquerschnitte . . . . .	344
6.3.1	Streckenquerschnitt auf Erdkörpern . . . . .	344
6.3.2	Streckenquerschnitt auf Brücken und in Tunneln . . . . .	347

6.4	Abstände in Gleisanlagen mit Arbeitsstätten und Verkehrswegen . . . . .	347
6.5	Parallelführung von Schienenweg und Straße . . . . .	350
6.6	Bahnsteiganlagen . . . . .	351
6.6.1	Grundsätze für die Konzeption und Gestaltung . . . . .	351
6.6.2	Abmessungen . . . . .	352
	Literatur . . . . .	355
<b>7</b>	<b>Eisenbahnbrücken, Tunnel und Ingenieurbauwerke . . . . .</b>	<b>357</b>
	Tristan Mölter und Michael Fiedler	
7.1	Definition Ingenieurbauwerke . . . . .	357
7.2	Geschichte der Deutschen Eisenbahn . . . . .	357
7.3	Eisenbahnbrücken . . . . .	357
7.3.1	Geschichte der Eisenbahnbrücken in Deutschland . . . . .	357
7.3.2	Aktuelle Entwicklungen im Eisenbahnbrückenbau . . . . .	362
7.3.3	Normen und Regelwerke . . . . .	369
7.3.4	Anforderungen an Eisenbahnbrücken . . . . .	377
7.3.5	Entwurfsgrundlagen . . . . .	380
7.3.6	Entwurfsgrundsätze . . . . .	388
7.3.7	Ausrüstungselemente für Eisenbahnbrücken . . . . .	397
7.3.8	Hilfsbrücken und Baubehelfe . . . . .	401
7.4	Tunnel und Trogbauwerke . . . . .	406
7.4.1	Geschichte der Tunnel und Eisenbahntunnel in Deutschland . . . . .	406
7.4.2	Aktuelle Entwicklungen im Eisenbahntunnelbau . . . . .	407
7.4.3	Normen und Regelwerke . . . . .	408
7.4.4	Anforderungen an Eisenbahntunnel . . . . .	408
7.4.5	Entwurfsgrundlagen . . . . .	409
7.4.6	Tunnelbauverfahren . . . . .	414
7.4.7	Tunnelinspektion . . . . .	422
7.5	Lärmschutzwände . . . . .	424
	Literatur . . . . .	425
<b>8</b>	<b>Betriebsführung der Infrastruktur . . . . .</b>	<b>427</b>
	Jörn Pacht	
8.1	Betriebsführung der Infrastruktur . . . . .	427
8.2	Grundbegriffe des Bahnbetriebes . . . . .	427
8.2.1	Rechtsverordnungen und Regelwerke . . . . .	427
8.2.2	Einteilung der Eisenbahnunternehmen . . . . .	428
8.2.3	Grundsätzliche Klassifizierung der Betriebsverfahren . . . . .	428
8.2.4	Einteilung der Betriebsstellen . . . . .	429
8.2.5	Durchführung von Fahrten auf einer Eisenbahninfrastruktur . . . . .	431

8.3	Signalisierung am Fahrweg	437
8.3.1	Signalsysteme	437
8.3.2	Verwendung der Signale	441
8.4	Flankenschutz der Fahrwege	454
8.4.1	Flankenschutz gegen feindliche Zugfahrten	454
8.4.2	Flankenschutz gegen feindliche Rangierfahrten und unbeabsichtigt ablaufende Wagen	455
8.4.3	Flankenschutz gegen das Strecken von Zügen	455
8.4.4	Erfordernis von Schutzweichen	455
8.5	Bauen im Betrieb	456
8.5.1	Sicherung von Arbeitsstellen im Gleis	456
8.5.2	Betriebliche Maßnahmen zur Durchführung von Baumaßnahmen	459
8.6	Behandlung von Signal- und Weichenstörungen	462
8.6.1	Störfallbehandlung der Zugfolgesicherung	462
8.6.2	Störfallbehandlung der Fahrwegsicherung	464
8.6.3	Störfallbehandlung von Gleisfreimeldeanlagen	465
	Literatur	465
<b>9</b>	<b>Spurplangestaltung und betriebliche Infrastrukturplanung</b>	<b>467</b>
	Andreas Heppe und Werner Weigand	
9.1	Planungsphasen	467
9.1.1	Planungsphasen der Bauplanung nach HOAI	467
9.1.2	Infrastrukturplanung mittels Langfristfahrplan	469
9.2	Spurplangestaltung	490
9.2.1	Einleitung	490
9.2.2	Betriebliche Funktionen von Bahnhöfen	492
9.2.3	Verkehrliche Funktionen von Bahnhöfen	495
9.2.4	Gleisarten	498
9.2.5	Anordnung der Gleise und Gleisgruppen	499
9.3	Leistungsuntersuchungen	511
9.3.1	Leistungsverhalten	511
9.3.2	Untersuchungsverfahren für Leistungsuntersuchungen	514
9.3.3	Einsatz der verschiedenen Methoden	517
9.3.4	Ablauf der Untersuchungen	519
9.4	Zusammenfassung	522
	Literatur	523
<b>10</b>	<b>Leit- und Sicherungstechnik</b>	<b>525</b>
	Ulrich Maschek	
10.1	Einführung	525
10.1.1	Begriffsabgrenzung	525
10.1.2	Maßgebende Systemeigenschaften	525
10.1.3	Regelkreis der Betriebssicherheit im Schienenverkehr	527

10.2	Ortung . . . . .	528
10.2.1	Grundlagen . . . . .	528
10.2.2	Wirkprinzipien . . . . .	528
10.2.3	Gleisfreimeldung mittels Gleisstromkreis . . . . .	531
10.2.4	Gleisfreimeldung mittels Achszähler . . . . .	534
10.2.5	Anwendung von Gleisstromkreisen und Achszählern . . . . .	535
10.3	Sicherung beweglicher Fahrwegelemente . . . . .	536
10.3.1	Grundlagen . . . . .	536
10.3.2	Weiche und Kreuzung . . . . .	537
10.3.3	Gleissperre . . . . .	540
10.3.4	Bewegliche Brücke . . . . .	540
10.3.5	Drehscheibe und Schiebebühne . . . . .	540
10.3.6	Tor . . . . .	540
10.4	Technologien der Fahrwegsicherung . . . . .	540
10.4.1	Herleitung . . . . .	540
10.4.2	Technologie Fahrstraße . . . . .	542
10.4.3	Technologie Blockinformation . . . . .	552
10.5	Techniken zur Fahrwegsicherung . . . . .	554
10.5.1	Differenzierung zwischen Leit- und Sicherungstechnik . . . . .	555
10.5.2	Klassifizierung der Techniken . . . . .	555
10.5.3	Mechanisches Stellwerk . . . . .	557
10.5.4	Elektromechanisches Stellwerk . . . . .	557
10.5.5	Relaisstellwerk . . . . .	558
10.5.6	Elektronisches Stellwerk (ESTW) . . . . .	558
10.6	Leittechnik . . . . .	559
10.6.1	Aufgaben der Leittechnik . . . . .	559
10.6.2	Zugnummernmeldung (ZN) . . . . .	559
10.6.3	Zuglenkung (ZL) . . . . .	560
10.6.4	Fernsteuerung von Stellwerken . . . . .	561
10.6.5	Zentralen zur Betriebsführung . . . . .	561
10.7	Anordnung ortsfester Signale . . . . .	561
10.7.1	Bezeichnung der Vor- und Hauptsignale . . . . .	561
10.7.2	Standort quer zum Gleis . . . . .	562
10.7.3	Standort längs zum Gleis . . . . .	563
10.8	Zugbeeinflussung . . . . .	565
10.8.1	Anforderungen . . . . .	565
10.8.2	Systematisierung . . . . .	566
10.8.3	Systeme mit Balisen . . . . .	567
10.8.4	Führerraumsignalisierung . . . . .	568
10.8.5	Signum . . . . .	569
10.8.6	Punktförmige Zugbeeinflussung PZB 90 . . . . .	569
10.8.7	Geschwindigkeitsüberwachung für Neigetechnik (GNT) . . . . .	572
10.8.8	Linienförmige Zugbeeinflussung (LZB) . . . . .	573
10.8.9	European Train Control System (ETCS) . . . . .	574

<b>11</b>	<b>Funktionale Sicherheit</b> . . . . .	583
	Jens Braband	
11.1	Einleitung . . . . .	583
11.1.1	Wesentliche Unfallursachen . . . . .	583
11.1.2	Beispiel . . . . .	583
11.1.3	Epochen der Systemsicherheit . . . . .	584
11.2	Definition des Begriffs Sicherheit . . . . .	585
11.2.1	Klassische Definitionen . . . . .	585
11.2.2	Moderne, risikoorientierte Definition . . . . .	585
11.2.3	Risikoorientierter Ansatz . . . . .	586
11.2.4	Europäische gesetzliche Vorgaben . . . . .	586
11.2.5	Bedeutung der Normen . . . . .	588
11.3	Risikoanalyse . . . . .	589
11.3.1	Prozess der expliziten Risikoanalyse . . . . .	589
11.3.2	Definition von Sicherheitszielen . . . . .	590
11.3.3	Methoden zur expliziten Risikoanalyse . . . . .	604
11.3.4	Semi-quantitatives Verfahren Risk Score Matrix . . . . .	609
11.4	Sicherheitsnachweisführung . . . . .	611
11.4.1	Gefährdungsanalyse-Prozess . . . . .	612
11.4.2	Struktur und Hierarchie von Sicherheitsnachweisen . . . . .	616
11.4.3	Aufbau und Inhalt von Sicherheitsnachweisen . . . . .	618
11.5	Beurteilung von potenziellen Sicherheitsmängeln . . . . .	625
11.5.1	Bewertungsprozess . . . . .	626
11.5.2	Risikobewertung . . . . .	626
11.6	Ereignisanalyse . . . . .	629
11.6.1	Erfassung und Auswertung sicherheitsrelevanter Ereignisse . . . . .	629
11.6.2	Unfallursachen . . . . .	629
11.6.3	Unfallursachenanalyse . . . . .	630
11.6.4	Lernen auf Organisationsebene . . . . .	632
11.7	Sicherheitskultur . . . . .	632
11.7.1	Begriffsdefinition . . . . .	632
11.7.2	Indikatoren für eine positive Sicherheitskultur . . . . .	633
11.8	Beispiel . . . . .	633
11.8.1	Systemdefinition . . . . .	634
11.8.2	Gefährdungsidentifikation . . . . .	634
11.8.3	Risikoanalyse . . . . .	634
11.8.4	Gefährdungsanalyse . . . . .	634
	Literatur . . . . .	637
<b>12</b>	<b>Trassierung und Gleisplangestaltung</b> . . . . .	639
	Manfred Weigend	
12.1	Längsneigung der Eisenbahn . . . . .	639
12.1.1	Längsneigung der Streckengleise . . . . .	639
12.1.2	Längsneigung in Bahnhöfen . . . . .	641
12.1.3	Ausrundung der Längsneigung . . . . .	641

12.2	Allgemeine Regeln der Linienführung im Grundriss . . . . .	642
12.2.1	Grundregel für durchgehende Hauptgleise . . . . .	642
12.2.2	Grundregel für die übrigen Hauptgleise und die Nebengleise . . . . .	643
12.3	Elemente der Linienführung im Kreisbogen . . . . .	643
12.3.1	Radius, Überhöhung und Geschwindigkeit . . . . .	643
12.3.2	Größe der Überhöhung . . . . .	645
12.3.3	Der Überhöhungsfehlbetrag . . . . .	646
12.3.4	Die Regelüberhöhung . . . . .	647
12.3.5	Wahl der Bogenradien . . . . .	648
12.3.6	Länge der Kreisbögen und Geraden . . . . .	649
12.3.7	Gleisverziehungen . . . . .	649
12.4	Übergangsbogen und Überhöhungsrampe . . . . .	649
12.4.1	Die Klothoide mit gerader Überhöhungsrampe . . . . .	649
12.4.2	Übergangsbogen- und Rampenlänge . . . . .	652
12.4.3	Der Übergangsbogen mit geschwungener Rampe . . . . .	652
12.5	Der Bogen ohne Übergangsbogen . . . . .	655
12.5.1	Krümmungswechsel und Vergleichsradius . . . . .	655
12.5.2	Längen der Zwischengeraden oder Zwischenbögen . . . . .	657
12.5.3	Gegenbogen mit kleinen Radien . . . . .	658
12.6	Entwurf der Spurpläne . . . . .	659
12.6.1	Wahl und Anordnung der Weichen . . . . .	659
12.6.2	Die Weiche als Spurplanelement . . . . .	660
12.7	Optimierung vorhandener Anlagen . . . . .	668
12.7.1	Die „gute“ Trasse . . . . .	668
12.7.2	Maßnahmen zur Fahrzeitverkürzung . . . . .	669
12.7.3	Linienkorrekturen . . . . .	669
12.7.4	Einsatz von Neigetechnikfahrzeugen . . . . .	670
12.8	Zusammenfassung . . . . .	671
	Literatur . . . . .	672
<b>13</b>	<b>Bahnübergänge . . . . .</b>	<b>673</b>
	Eric Schöne	
13.1	Einführung . . . . .	673
13.2	Grundlagen . . . . .	674
13.2.1	Definitionen . . . . .	674
13.2.2	Anforderungen . . . . .	674
13.2.3	Rechtsgrundlagen . . . . .	675
13.3	Bautechnische Gestaltung . . . . .	678
13.3.1	Allgemeine Anforderungen . . . . .	678
13.3.2	Bahnübergangsbeläge . . . . .	678
13.3.3	Entwässerung . . . . .	680
13.4	Sicherungsmaßnahmen . . . . .	681
13.4.1	Technologien zur Sicherung . . . . .	681
13.4.2	Nichttechnische Sicherung . . . . .	683
13.4.3	Technische Sicherung . . . . .	690

13.5	Bahnübergangssicherung als Gemeinschaftsaufgabe . . .	703
13.5.1	Wechselwirkungen . . . . .	703
13.5.2	Beschilderung und Markierung . . . . .	703
13.5.3	Freihaltung der Aufstelllänge . . . . .	703
13.5.4	Verkehrsschau an Bahnübergängen . . . . .	708
13.5.5	Auflassung und Beseitigung . . . . .	708
	Literatur . . . . .	709
<b>14</b>	<b>Energieversorgung elektrischer Bahnen . . . . .</b>	<b>711</b>
	Bernd-Wolfgang Zweig und Arnd Stephan	
14.1	Grundlagen . . . . .	711
14.1.1	Aufgaben und Systemstruktur . . . . .	711
14.1.2	Elektrifizierungswürdigkeit . . . . .	712
14.1.3	Begriffsdefinitionen . . . . .	713
14.2	Bahnstromsysteme . . . . .	714
14.2.1	Entwicklung und Verbreitung . . . . .	714
14.2.2	Gleichstrombahnsysteme . . . . .	716
14.2.3	Wechselstrombahnsysteme mit Industriefrequenz . . . . .	718
14.2.4	Wechselstrombahnsysteme mit Sonderfrequenz .	721
14.3	Die 16,7-Hz-Bahnenergieversorgung in Deutschland . . .	721
14.3.1	Gesamtstruktur . . . . .	721
14.3.2	Teilsysteme . . . . .	722
14.4	Fahrleitungen . . . . .	728
14.4.1	Allgemeines . . . . .	728
14.4.2	Oberleitungen . . . . .	728
14.4.3	Stromschienenoberleitung . . . . .	766
14.4.4	Stromschienen . . . . .	767
14.5	Stromabnehmer . . . . .	774
14.5.1	Allgemeines . . . . .	774
14.5.2	Stromabnehmer für Oberleitungen . . . . .	774
14.5.3	Seitenstromabnehmer bei Grubenbahnen . . . . .	776
14.5.4	Stromabnehmer für Stromschienen . . . . .	776
14.6	Rückstromführung, Bahnerdung und Potentialausgleich .	776
14.6.1	Rückstromführung . . . . .	777
14.6.2	Bahnerdung . . . . .	779
14.6.3	Potentialausgleich . . . . .	780
14.7	Arbeiten in der Nähe spannungsführender Ober- und Bahnenergieleitungen (16,7 Hz, 15.000 V) . . . . .	780
14.7.1	Abstand von Personen . . . . .	780
14.7.2	Abstand von Baumaschinen und Geräten . . . . .	781
	Literatur . . . . .	785
<b>15</b>	<b>Stromversorgung der Infrastruktur . . . . .</b>	<b>787</b>
	Eberhard Hunger und Uwe Steinert	
15.1	Vorbemerkungen . . . . .	787
15.1.1	Energiebezug vom Versorgungsnetzbetreiber . . . . .	788
15.1.2	Energiebezug aus der Oberleitung . . . . .	788

15.2	Stromversorgung von Strecken . . . . .	789
15.2.1	Verbraucherstruktur . . . . .	789
15.2.2	Freie Strecke . . . . .	791
15.2.3	Tunnel . . . . .	796
15.2.4	Stellwerke an Strecken . . . . .	800
15.2.5	Bahnhöfe, Haltepunkte an Strecken . . . . .	802
15.3	Stromversorgung von Eisenbahnknoten . . . . .	804
15.3.1	Verbraucherstruktur . . . . .	804
15.3.2	Netzstruktur . . . . .	804
15.3.3	Stellwerke von Eisenbahnknoten . . . . .	806
15.3.4	Bahnhöfe von Eisenbahnknoten . . . . .	808
15.4	Sonderanlagen . . . . .	812
15.4.1	Zugbildungsanlagen . . . . .	812
15.4.2	Elektrische Weichenheizanlagen . . . . .	812
15.4.3	Zugvorheizanlagen . . . . .	816
15.4.4	Zugbehandlungsanlagen . . . . .	821
15.4.5	Werke . . . . .	823
15.4.6	Nebenverbraucher an der Oberleitung . . . . .	823
15.4.7	Alternative Stromversorgungsanlagen . . . . .	824
15.5	Schutzmaßnahmen . . . . .	826
15.5.1	Netzform und Erdung von EWHA . . . . .	827
15.5.2	Schutzeinrichtungen der EWHA . . . . .	828
15.5.3	Besonderheiten bei EWHA . . . . .	828
<b>16</b>	<b>Kabelanlagen . . . . .</b>	<b>831</b>
	Ralf Baumann und Andreas Boldt	
16.1	Bauarten und Verwendung . . . . .	831
16.1.1	Energiekabel und Leitungen . . . . .	834
16.1.2	Kabel und Leitungen mit verbessertem Verhalten im Brandfall . . . . .	835
16.1.3	Signal- und Nachrichtenkabel . . . . .	839
16.2	Garnituren . . . . .	840
16.2.1	Muffen und Verbinder . . . . .	841
16.2.2	Endverschlüsse . . . . .	842
16.3	Planung von Kabelanlagen . . . . .	843
16.3.1	Trassenplanung . . . . .	844
16.3.2	Typenauswahl und Dimensionierung . . . . .	845
16.3.3	Lagepläne . . . . .	848
16.3.4	Führung, Befestigung und Schutz . . . . .	849
16.4	Legung und Montage . . . . .	856
16.4.1	Auslegen und Kennzeichnen . . . . .	856
16.4.2	Garniturenmontage . . . . .	859
16.4.3	Ab- und Inbetriebnahmeprüfungen . . . . .	860
16.4.4	Schlussvermessung und Dokumentation . . . . .	860
16.5	Betrieb und Instandhaltung . . . . .	861
16.5.1	Kabelüberwachung . . . . .	861
16.5.2	Instandhaltung . . . . .	861

<b>17</b>	<b>Bahnbetriebliche Telekommunikationstechnik</b> . . . . .	865
	Thomas Schnurrer	
17.1	Einleitung . . . . .	865
17.1.1	Bahnbetriebliche Telekommunikationsanlagen . . . . .	865
17.1.2	Hauptaspekte der technologischen Entwicklung . . . . .	867
17.2	Das GSM-R Netz . . . . .	868
17.2.1	Frequenzbereich . . . . .	869
17.2.2	Funktionale Merkmale . . . . .	869
17.2.3	GSM-R-Architektur . . . . .	871
17.2.4	Anbindung ortsfester Teilnehmer . . . . .	875
17.2.5	GSM-R-Endgeräte . . . . .	877
17.2.6	Applikationen und betriebliche Netzkonfiguration . . . . .	879
17.2.7	Teilnehmerverwaltung . . . . .	882
17.2.8	Nationales und Internationales Roaming . . . . .	883
17.3	Analoge Funktechnik . . . . .	885
17.3.1	Analoger Zugfunk . . . . .	885
17.3.2	Analoger Rangierfunk . . . . .	890
17.3.3	Betriebs- und Instandhaltungsfunk (BiFu) . . . . .	891
17.3.4	BOS-Funksysteme . . . . .	892
17.4	Betriebsfermeldeanlagen . . . . .	892
17.5	Lautsprechersysteme . . . . .	895
17.6	Steuerungs- und Meldesysteme . . . . .	898
17.6.1	FÜSTE . . . . .	898
17.6.2	Meldeanlagen system MAS 90 . . . . .	899
17.7	Betriebliche Gefahrenmeldeanlagen . . . . .	901
17.7.1	Heißläufer- und Festbremsortungsanlagen (HOA/FBOA) . . . . .	902
17.7.2	Luftströmungsmeldeanlagen (LSMA) . . . . .	903
17.7.3	Windmeldeanlagen (WMA) . . . . .	904
17.8	Tunnelnotrufsysteme . . . . .	904
17.9	Videotechnik . . . . .	905
17.9.1	TV-Anlagen an Bahnübergängen . . . . .	905
17.9.2	Zugschlussbeobachtung und -feststellung . . . . .	906
17.10	Übertragungstechnik und -wege . . . . .	906
17.11	Ausblick . . . . .	909
	Literatur . . . . .	909
<b>18</b>	<b>Elektromagnetische Verträglichkeit</b> . . . . .	911
	Wilhelm Baldauf, Jens Burandt, Markus Höbl und Stefan Jäger	
18.1	Allgemeines . . . . .	911
18.2	EMV im hochfrequenten Bereich . . . . .	911
18.3	Beeinflussung von Anlagen der Leit- und Sicherungstechnik durch Bahnströme . . . . .	913
18.4	Beeinflussung von Gleisfreimeldeanlagen durch Eisenbahnfahrzeuge . . . . .	919
	Literatur . . . . .	925

<b>19</b>	<b>Umweltschutz</b> . . . . .	927
	Henning Schwarz	
19.1	Trinkwasser-Befüllungsanlagen und Strahlenschutz . . . . .	927
	19.1.1 Trinkwasser-Befüllungsanlagen . . . . .	927
	19.1.2 Strahlenschutz . . . . .	928
19.2	Schutz vor Lärm und Erschütterungen . . . . .	932
	19.2.1 Lärm . . . . .	932
	19.2.2 Erschütterungen und sekundärer Luftschall . . . . .	943
19.3	Vegetationskontrolle . . . . .	952
	19.3.1 Grundlagen . . . . .	952
	19.3.2 Vegetationskontrolle im Gleisbereich . . . . .	953
	19.3.3 Vegetationskontrolle am Gleisbereich . . . . .	954
19.4	Schutz von Natur und Landschaft . . . . .	961
	19.4.1 Grundlagen . . . . .	961
	19.4.2 Strategische Umweltprüfung . . . . .	961
	19.4.3 Umweltverträglichkeitsprüfung . . . . .	963
	19.4.4 Naturschutzfachliche Eingriffsregelung . . . . .	966
	19.4.5 Flora-Fauna-Habitat-Verträglichkeitsprüfung . . . . .	966
	19.4.6 Artenschutz . . . . .	968
19.5	Entsorgung von Abfällen bei Bau- und Instandhaltung von Eisenbahninfrastruktur . . . . .	971
	19.5.1 Gesetzliche Grundlagen . . . . .	971
	Literatur . . . . .	976
<b>20</b>	<b>Netzzugang</b> . . . . .	981
	Claus Kandels	
20.1	Vorgaben der Europäischen Union . . . . .	981
	20.1.1 Interoperabilität . . . . .	981
	20.1.2 TSI . . . . .	981
	20.1.3 Diskriminierungsfreier Zugang . . . . .	982
20.2	Nationale Vorgaben . . . . .	982
20.3	Zulassung zum Eisenbahnverkehr in Deutschland . . . . .	983
	20.3.1 Zulassung als EVU . . . . .	983
	20.3.2 Fahrzeugzulassung . . . . .	983
	20.3.3 Das 4. Eisenbahnpaket . . . . .	984
	20.3.4 Eisenbahn-Inbetriebnahme- genehmigungsverordnung . . . . .	984
20.4	Vorgaben der DB Netz AG . . . . .	984
	20.4.1 Schienennetz-Benutzungsbedingungen (SNB) . . . . .	985
	20.4.2 Besondere Infrastrukturangaben . . . . .	985
	20.4.3 Sonstige Vorgaben/Themen . . . . .	986
	20.4.4 Nutzungsbedingungen für Serviceeinrichtungen (NBS) . . . . .	986
	20.4.5 Grundsatz-Infrastrukturnutzungsvertrag . . . . .	986
	20.4.6 Regelwerke . . . . .	986
	20.4.7 Außergewöhnliche Transporte . . . . .	987
	20.4.8 Ausblick Regelwerke → TNB . . . . .	988
	20.4.9 Probefahrten . . . . .	988

20.5	Infrastrukturregister . . . . .	989
20.5.1	Grundsätze . . . . .	990
20.5.2	Interaktive Karte . . . . .	990
20.5.3	Vorgaben der Europäischen Union zum Infrastrukturregister (RINF) . . . . .	1001
20.6	Zugriff auf Informationen zum Netzzugang . . . . .	1001
	Literatur . . . . .	1001
<b>21</b>	<b>Instandhaltung und Anlagenmanagement des Fahrwegs . . . . .</b>	<b>1003</b>
	Peter Veit	
21.1	Anlagenmanagement für den Fahrweg von Eisenbahnen . . . . .	1006
21.2	Modell zur wirtschaftlichen Bewertung von Fahrwegstrategien . . . . .	1007
21.3	LCC-basierte Fahrwegstrategien der ÖBB . . . . .	1010
21.3.1	Strategie Fahrweg – Stufe 1 . . . . .	1012
21.3.2	Forschungen zum Qualitätsverhalten des Fahrwegs . . . . .	1029
21.3.3	Neue Erkenntnisse durch neue Analysen . . . . .	1040
21.3.4	Strategie Fahrweg – Stufe 2 . . . . .	1042
21.4	Life-Cycle-Management für den Fahrweg . . . . .	1045
21.5	Ausblick . . . . .	1048
	Literatur . . . . .	1048
<b>22</b>	<b>Anlagenmonitoring des Fahrwegs . . . . .</b>	<b>1051</b>
	Ulrich Erdmann	
22.1	Anforderungen an Infrastrukturmanagementsysteme . . . . .	1051
22.1.1	Systemarchitektur . . . . .	1052
22.1.2	Datenimport/Schnittstellen . . . . .	1053
22.1.3	Das Analysesystem . . . . .	1054
22.1.4	Anforderungen und Grundformen der Darstellung . . . . .	1057
22.1.5	Fachübergreifende Grundlagen für weitergehende Analysen . . . . .	1059
22.2	Anwendung von Infrastrukturmanagementsystemen . . . . .	1063
22.2.1	Ist-Zustandsanalyse . . . . .	1064
22.2.2	Zustandsprognose . . . . .	1074
22.2.3	Instandhaltungsplanung . . . . .	1079
	<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>1089</b>

---

# Autorenverzeichnis

---

## Über die Herausgeber

**Prof. Dr.-Ing. Lothar Fendrich** Wiesbaden, Deutschland

**Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Fengler** Bonn, Deutschland

---

## Autorenverzeichnis

**Bernd Assmussen** Frankfurt, Deutschland

**Dr. Wilhelm Baldauf** EMV/LST/ETCS und Übertragungstechnik, DB Systemtechnik GmbH, München, Deutschland

**Dipl.-Ing. Ralf Baumann** BVG, Berlin, Deutschland

**Dr. Michael Below** Deutsche Bahn AG - Umwelt, Berlin, Deutschland

**Dipl.-Ing. Andreas Boldt** Technisches Büro (I.NP-O6S), DB AG, Berlin, Deutschland

**Prof. Dr. rer. nat. Jens Braband** Siemens Mobility GmbH, Braunschweig, Deutschland

**Jens Burandt** EMV/LST/ETCS und Übertragungstechnik, DB Systemtechnik GmbH, München, Deutschland

**Katharina Dieck** Frankfurt, Deutschland

**Ulrich Erdmann** Erdmann-Softwaregesellschaft mbH, Görlitz, Deutschland

**Dipl.-Ing. Michael Fiedler** Haar, Deutschland

**Dr.-Ing. Ulf Gerber** Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, Technische Universität Dresden, Dresden, Deutschland

**Felix Gerhardt** DB Netz AG, Frankfurt am Main, Deutschland

**Dr.-Ing. Andreas Heppe** DB Netz AG, Dresden, Deutschland

**Thorsten Herold** DB Netz AG, Frankfurt am Main, Deutschland

**Markus Hößl** EMV/LST/ETCS und Übertragungstechnik, DB Systemtechnik GmbH, München, Deutschland

**Dipl.-Ing. Eberhard Hunger** Berlin, Deutschland

**Stefan Jäger** EMV/LST/ETCS und Übertragungstechnik, DB Systemtechnik GmbH, München, Deutschland

**Prof. Dr.-Ing. Eberhard Jänsch** Schöneck, Deutschland

**Dipl.-Verwaltungsbetriebswirt Claus Kandels** Technischer Netzzugang (I.NMN 1), DB Netz AG, Frankfurt a.M., Deutschland

**Andreas König** Frankfurt, Deutschland

**Ekkehard Lay** Seeheim-Jugenheim, Deutschland

**Dipl. Ing. Ralf Linsel** Verantwortliche Schweißaufsicht VSAP, IFTEC GmbH & Co Kg, Leipzig, Deutschland

**Martina Lüttmann** Deutsche Bahn AG - Umwelt, Berlin, Deutschland

**PD Dr.-Ing. habil. Ulrich Maschek**

**Dipl.-Ing. Klaus Meißner** Leipzig, Deutschland

**Dipl.-Ing. Tristan Mölter** Velden/Vils, Deutschland

**Prof. Dr.-Ing. Jörn Pachl** Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrssicherung, TU Braunschweig, Braunschweig, Deutschland

**Dr.-Ing. Horst Rahn** Berlin, Deutschland

**Reinhold Rensing** R<sup>2</sup>-railconsult GmbH, Borken, Deutschland

**Roland Richter** Magdeburg, Deutschland

**em. Univ.-Prof. Dr. techn. Klaus Rießberger** TU Graz, Graz, Österreich

**Dipl.-Ing. Thomas Schnurrer** Zentrale Telekommunikation, DB Netz AG, Frankfurt a. M., Deutschland

**Dr.-Ing. Eric Schöne** TU Dresden, Dresden, Deutschland

**Henning Schwarz** Umweltschutz, DB Netz AG, Frankfurt a. Main, Deutschland

**Dipl. Ing. Uwe Steinert** Rail Power Systems GmbH, Berlin, Deutschland

**Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan** Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, Technische Universität Dresden, Dresden, Deutschland

**Holger Tobergte** Hasbergen, Deutschland

**Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Peter Veit** Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft, TU Graz, Graz, Österreich

**Werner Weigand** ehem. DB Netz AG, Frankfurt a. Main, Deutschland

**Dr.-Ing. Manfred Weigend** Taufkirchen, Deutschland

**Dr.-Ing. Bernd-Wolfgang Zweig** Rail Power Systems GmbH, Offenbach, Deutschland

# Das Zusammenwirken von Rad und Schiene

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.

K. Rießberger (✉)  
TU Graz  
Graz, Österreich

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 gesamteuropäischen 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)

- Raddurchmesser, gemessen in Profilmitt
- Radprofil (Abb. 1.1)
  - Radbreite 135–140 mm
  - Lauffläche, Laufflächenneigung (1 : 15... 1 : 40), Laufflächenform
  - Hohlkehle, Hohlkehlen-Ausrundung
  - Spurkranz, Spurkranzkuppe
  - Radrücken, Radrückenenentfernung 1360 mm
  - Radmittenentfernung 1500 mm
  - Spurmaß – Entfernung korrespondierender Punkte der Spurkranzflanke, gemessen 10 mm über Radprofilmitte (1426... 1412 mm)

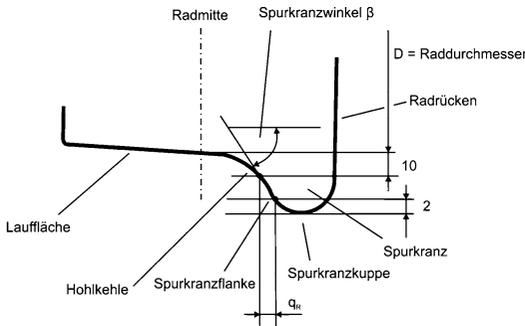


Abb. 1.1 Bezeichnungen Radprofil

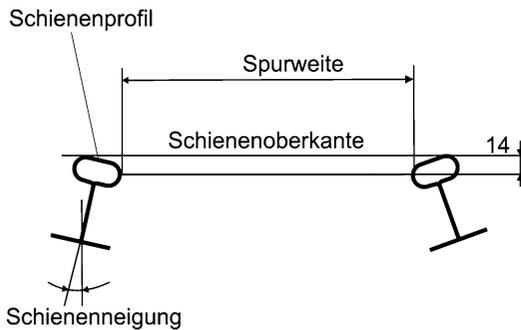


Abb. 1.2 Bezeichnungen im Gleis

- $q_R$ -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  $\sim 300$  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

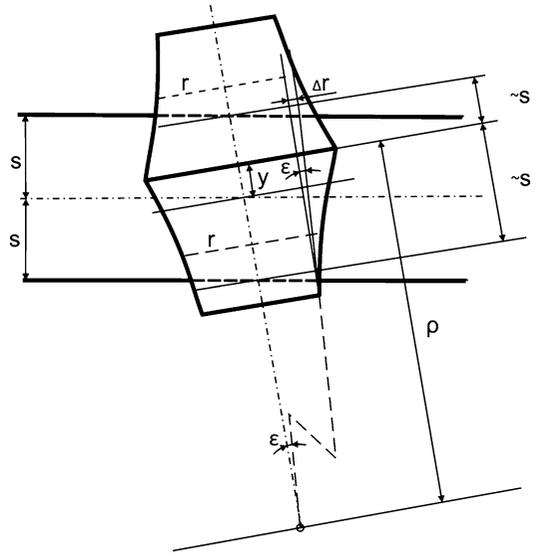


Abb. 1.3 Allgemeine Zusammenhänge

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  $2s$ . Bedingt durch die seitliche Verschiebung  $y$  laufen der linke und der rechte Kontaktpunkt auf unterschiedlichen Radien, die Rollradiendifferenz wird als  $\Delta r$  bezeichnet.

Es bedeuten

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

Aus Abb. 1.3 kann der folgende Zusammenhang entnommen werden:

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

Mit  $\rho$  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

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

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

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

und folglich

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

2. Räder mit geraden konischen Profilen

Mit  $\lambda$  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 (1.4) wird zu

$$y'' = \frac{2\lambda y}{2rs} = \frac{\lambda}{rs} y \quad (1.5)$$

Diese Differentialgleichung kann unschwer gelöst werden mit:

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

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.

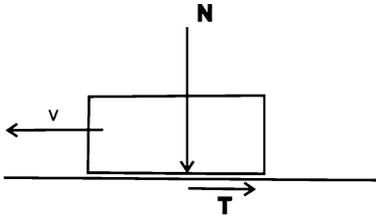
## 1.2.2 Das Reibungsgesetz

### 1.2.2.1 Reibungsgesetz nach Coulomb

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

$$T = -\mu N \frac{v}{|v|} \quad (1.7)$$

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



**Abb. 1.4** Coulomb'sches Reibungsgesetz

entgegengesetzt, mit

$N$  Normalkraft [N]

$T$  Reibungskraft (Tangentialkraft) [N]

$\mu$  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 Geschwindigkeitsdifferenz der einander berührenden Flächen, notwendig ist.

Diese Schlupfe können auftreten in

- Längsrichtung ( $\sigma_x$ ),
- Querrichtung ( $\sigma_y$ ) und
- vertikaler Richtung ( $\sigma_z$ ),

wobei die Betrachtung in einer Tangentialebene im Kontaktpunkt erfolgt.

Die drei Arten von („starrem“) Schlupf sind definiert wie folgt:

#### 1. Längsschlupf

$$\sigma_x = \frac{R\omega - v}{\frac{R\omega + v}{2}} \cong \frac{R\omega - v}{v} \quad (1.8)$$

mit

$r$  Radradius [m];

$\omega$  Umfangsgeschwindigkeit des Rades [1/sec]

$v$  Geschwindigkeit des Radschwerpunkts [m/sec]

#### 2. Querschlupf

$$\sigma_y = \frac{v_{\text{lateral}}}{v} = \frac{v \cdot \alpha}{v} = \alpha \quad (1.9)$$

mit

$\alpha$  = Schräglaufwinkel [rad]

#### 3. Bohrschlupf

$$\sigma_z = \frac{\Omega_3 - \Omega'_3}{-\frac{1}{2}(R\omega + v)} \cong \frac{\Omega_3 - \Omega'_3}{-v} \quad (1.10)$$

mit

$\Omega_3$  Rotationsgeschwindigkeit, bezogen auf die geneigte Kontaktfläche [1/sec]

$\Omega'_3$  Rotationsgeschwindigkeit der Radbewegung um die Radsatzwelle [1/sec]

Der Bohrschlupf ist im Allgemeinen klein und wird bei Berührung an der Schienenoberfläche üblicherweise vernachlässigt.

Die Abhängigkeit der Kraftübertragung vom Längs- und Querschlupf kann qualitativ dem Abb. 1.5 entnommen werden [13].

In Abb. 1.6 werden die Größenordnungen von Längs- und Querschlupf bei durchschnittlichem Schienenzustand dargestellt.

Zu beachten ist dabei, dass ein hoher Querschlupf die Fähigkeit zur Übertragung von Längskräften negativ beeinflusst und umgekehrt.

Wenn Rad und Schiene nicht mehr als vollkommen starr angesehen werden („elastischer Schlupf“), stellt sich eine Aufteilung der Berührungsfläche in ein (oder mehrere) Haft- und Gleitgebiete mit unterschiedlichen Relativbewegungen zwischen den sich berührenden Elementen ein.

Die verschiedenen Aufteilungen der Berührungsfläche resultieren aus unterschiedlichen Kombinationen der Schlupfe.

### 1.2.2.3 Kalker-Gleichungen

Kalker hat in einer umfangreichen Arbeit das Berührungsproblem eingehend behandelt und allgemeine Lösungen angegeben [5].

Kleiner Schlupf erlaubt Linearisierungen. Unter diesen Bedingungen nehmen die von Kalker angegebenen Gleichungen folgende Form an:

$$\begin{aligned} T_x &= K_{11} \cdot \sigma_x \\ T_y &= K_{22} \cdot \sigma_y + K_{23} \cdot \sigma_z \\ M_z &= -K_{23} \cdot \sigma_y + K_{33} \cdot \sigma_z \end{aligned} \quad (1.11)$$

**Abb. 1.5** Abhängigkeit der Kraftübertragung vom Längs- und Querschlupf

