

Puschmann | Schmieder | Dölling | Braun | Mielsch | Altmann | Ullmann
Fahrleitungen elektrischer Bahnen

Autoren:

Dipl.-Ing. Rainer Puschmann (verantwortlich für die Kapitel 2, 3, 4, 10, 13, 17)

rainer.puschmann@expert-consultancy.com

Dr.-Ing. Axel Schmieder (verantwortlich für die Kapitel 1, 12, 15, Anhang Normen)

axel.schmieder@outlook.de

Dr.-Ing. André Dölling (verantwortlich für die Kapitel 7, 11, 16, 18)

andre.doelling@siemens.com

Dipl.-Ing. (FH) Wolfgang Braun (verantwortlich für die Kapitel 6, 8)

wolfgang.a.braun@siemens.com

Dipl.-Ing. (FH) Florian Mielsch (verantwortlich für die Kapitel 4, 14)

florian.mielsch@siemens.com

Dipl.-Ing. (FH) Martin Altmann (verantwortlich für das Kapitel 5)

martin.altmann@siemens.com

Dipl.-Ing. (FH) Hans Ullmann (verantwortlich für das Kapitel 9)

ullmann.hans@siemens.com

Titelbild:

Oberleitungsbauart Re 330 auf der Hochgeschwindigkeitsstrecke

Erfurt–Bamberg mit dem Siemens-Triebzug ICE 4 im Jahr 2024.

Das Bild wurde mit freundlicher Unterstützung

der Deutschen Bahn AG bereitgestellt.

Fahrleitungen elektrischer Bahnen

Planung
Berechnung
Ausführung
Betrieb

von
Rainer Puschmann, Axel Schmieder,
André Dölling, Wolfgang Braun,
Florian Mielsch, Martin Altmann,
Hans Ullmann

4., wesentlich überarbeitete und
erweiterte Auflage, 2025

DRUCK+VERLAG ERNST VÖGEL GMBH
Stamsried

Bibliografische Information Der Deutschen Nationalbibliothek

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

Autoren und Verlag haben alle Texte in diesem Buch mit großer Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht ausgeschlossen werden. Eine Haftung des Verlags oder der Autoren, gleich aus welchem Rechtsgrund, ist ausgeschlossen. Die in diesem Buch wiedergegebenen Bezeichnungen können Warenzeichen sein, deren Benutzung durch Dritte für deren Zwecke die Rechte der Inhaber verletzen kann.

www.voegel.com

ISBN 978-3-89650-587-3

4. Auflage, 2025

Herausgeber: Siemens Mobility GmbH, Erlangen

Verlag: DRUCK+VERLAG ERNST VÖGEL GMBH, Stamsried

© 2025 by DRUCK+VERLAG ERNST VÖGEL GMBH, Stamsried

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwendung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechts ist ohne Zustimmung des Verlags und der Autoren unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, in elektronischen Systemen. Dies gilt auch für die Entnahme von einzelnen Abbildungen und bei auszugsweiser Verwendung von Texten.

Printed in Germany

Geleitwort zur vierten deutschen Auflage

Die dritte Auflage des Buches Fahrleitungen elektrischer Bahnen aus dem Jahr 2014 ist seit einigen Jahren vergriffen. Für alle Fachkräfte bei Bahnbetreibern und Behörden sowie in der Bahnindustrie ist es eine große Freude, dass nun eine vierte, wesentlich ergänzte Auflage vorliegt. Die Autoren haben auch diese Auflage neben ihrer beruflichen Tätigkeit erstellt. Die Siemens Mobility GmbH hat die Entstehung dieses Werks maßgeblich unterstützt.

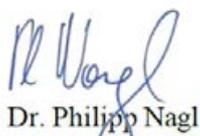
Die Energieversorgung der Fahrzeuge durch Fahrleitungen ist die effizienteste Art der Elektromobilität. Dafür muss die Fahrleitung ständig verfügbar sein. Klimatische Einflüsse sollen keine betrieblich behindernden Einflüsse auf die Energieübertragung haben. Die Aufwendungen für die Instandhaltung sollen über die gesamte Lebensdauer der Anlage gering sein. Im Schadensfall soll sich die Fahrleitung schnell wieder in Betrieb nehmen lassen, da sie nicht redundant ausführbar ist. Auch mit den notwendigen Investitionen muss die elektrische Bahn wirtschaftlich bleiben. Qualitätsgerechte Fahrleitungen und deren Instandhaltung tragen wesentlich zur Pünktlichkeit im Zugbetrieb bei. Mit Zunahme der Leistungen und Fahrgeschwindigkeit elektrischer Bahnen im Fernverkehr haben auch die Anforderungen an die Fahrleitungen ständig zugenommen: In vielen Ländern entstanden und entstehen neue Bahnstrecken für den Schienenschnellverkehr. Einige Länder wie Frankreich, Spanien, Japan und China haben bereits Reisegeschwindigkeiten bis 350 km/h erreicht. Dafür ist die zuverlässige Versorgung der ortsveränderlichen Verbraucher mit elektrischer Energie eine wesentliche Voraussetzung. Das erfordert auch die Weiterentwicklung von Fahrleitungen. Die Harmonisierung europäischer Bahnen für einen grenzüberschreitenden Betrieb ohne technische Hindernisse treibt die Europäische Union weiter voran. Hierfür entstanden in den vergangenen Jahren neue Richtlinien, technische Spezifikationen und Normen. Diese enthalten für Fahrleitungen wichtige Vorgaben, die bei der Gestaltung der Anlagen zu erfüllen sind. Eine sorgfältige Analyse der Anforderungen und deren Beachtung bei der Auslegung und Errichtung der Fahrleitungen sind Voraussetzung für den interoperablen Bahnbetrieb.

In der zurückliegenden Dekade 2010 bis 2020 elektrifizierte die Deutsche Bahn durchschnittlich 65 km im Jahr. Die geplante Erhöhung des Elektrifizierungsgrades von gegenwärtig 62 % auf zukünftig 75 % bis 2030 erfordert die Neuelektrifizierung von 4 500 Streckenkilometer. Mit einem Planungsvorlauf von drei Jahren sind ab 2025 durchschnittlich 720 km im Jahr zu elektrifizieren. Diese Aufgabe stellt hohe Anforderungen an die Planung, Materialbereitstellung und Errichtung. Nur eine ausreichende Anzahl von qualifizierten und erfahrenen Fachkräften bei den Planungs- und Errichtungsfirmen, der Deutschen Bahn als auch den Aufsichtsbehörden mit ihren Prüfsachverständigen erlaubt, dieses Ziel zu erreichen.

Der Aufbau und der wesentlich erweiterte Inhalt tragen dem Rechnung und folgen wie bisher dem Systemgedanken des Fachbuchs.

Das Buch ist für den täglichen Gebrauch bei der Planung, Ausführung und Betrieb von Fahrleitungen als auch insbesondere für das Studium, die Aus- und Weiterbildung der in der Praxis in diesem Fachgebiet tätigen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Bahnunternehmen wichtig. Die Deutsche Bahn begrüßt daher die neue Auflage des Buches ausdrücklich und dankt sowohl den Autoren für ihre erhebliche Mühe, das rund 1 700 Seiten umfassende zweibändige Buch zu erstellen, der Siemens Mobility GmbH für die Unterstützung der Autoren bei der Gestaltung des Inhalts als auch dem Verlag für die gute Ausstattung des Werkes.

Berlin,
im Juni 2024



Dr. Philipp Nagl

Vorstandsvorsitzender DB InfraGO AG

Vorwort zur vierten Auflage

Die ersten beiden deutschen Auflagen des Buches „Fahrleitungen elektrischer Bahnen“ von *A.I. Gukov, F. Kießling, R. Puschmann, P. Schmidt* und *A. Schmieder* erschienen 1997 und 1998 im B. G. Teubner Verlag. Diese waren schnell vergriffen. Die Leser mussten daher auf die 2001 erschienene erste englische Ausgabe „Contact Lines for Electric Railways“ von den Autoren *Friedrich Kießling, Rainer Puschmann* und *Axel Schmieder* zurückgreifen, die erstmals der Publicis MC&D Verlag Erlangen-München als Fachbuch der Siemens AG veröffentlichte. Die Mitautoren der ersten und zweiten deutschen Auflage *Anatoli I. Gukov* und *Peter Schmidt* waren zwischenzeitlich verstorben.

Eine zweite englische Ausgabe erschien 2009. Dabei wirkte als weiterer Autor *Egid Schneider* mit. Übersetzungen in die chinesische, spanische und russische Sprache folgten 2003, 2008 bzw. 2018. Die Übersetzung aus der englischen in die spanische Sprache hat *Tomas Vega* als Mitautor wesentlich mitgestaltet.

Nach der Fertigstellung der zweiten englischen Ausgabe hatten der Verlag und die Siemens AG den Wunsch, eine aktualisierte dritte Auflage dieses Fachbuches in deutscher Sprache herauszubringen. Diese Auflage nutzte die Inhalte der zweiten englischen Fassung von 2009 für das Anwendungsgebiet in Deutschland. Mit der dritten deutschen Auflage, die 2014 erschien, wurde der Inhalt in siebzehn statt bisher vierzehn Kapiteln gegliedert. Der Umfang stieg von bisher 822 Seiten auf 1 238 Seiten. Aus dem Autorenkreis schied *Egid Schneider* aus. Wesentliche Teile der dritten deutschen Ausgabe gingen auch auf seine Beiträge zurück.

2017 erschien die dritte englische Ausgabe, an der *Egid Schneider* als Autor wieder mitwirkte. Grundlage bildeten die Gliederung der dritten deutschen Auflage sowie überarbeitete und ergänzte Inhalte.

Die letzten Jahrzehnte brachten eine deutliche Erhöhung der Fahrgeschwindigkeiten im konventionellen Eisenbahnbetrieb und auch Hochgeschwindigkeitsverkehr, welche erhebliche Auswirkungen auf die Gestaltung der Fahrleitungen hatten.

Die europäischen und asiatischen Länder, so Belgien, Deutschland, Frankreich, Österreich, die Schweiz, Italien, Spanien, Japan und China, erweiterten ihre Hochgeschwindigkeitsnetze. In China entstand das größte Hochgeschwindigkeitsnetz mit Betriebsgeschwindigkeiten bis 350 km/h, das zwischenzeitlich mehr als 42 000 km umfasst. Japan erweiterte das Hochgeschwindigkeitsnetz und erhöhte die Betriebsgeschwindigkeit.

Auf dem Gebiet der elektrischen Bahnen und insbesondere der stationären Anlagen veränderten sich wichtige Berechnungsannahmen und -abläufe. Im Jahr 2020 erschien die neue EN 50119, als die Produktnorm für Oberleitungen, und eine Reihe anderer Normen, die für das Fachgebiet wesentlich sind.

In der Schweiz ging zwischenzeitlich der Gotthard-Tunnel, als der weltweit längste Tunnel für eine Hochgeschwindigkeitsverbindung, in Betrieb. Für all diese Anlagen waren für die hohen Geschwindigkeiten auf offener Strecke und im Tunnel angepasste und weiterentwickelte Bauweisen für die Fahrleitungen erforderlich.

Die Autoren waren an einigen dieser Projekte beteiligt und beschrieben ihre Erfahrungen in den bis dahin erschienen Ausgaben. Die Autoren nutzen aber auch ihre Erfahrungen im Rahmen von Normenarbeitsgruppen zur Aktualisierung wesentlicher Bahnnormen. Wichtige Erkenntnisse konnten die Autoren bei Seminaren für Mitarbeiter der europäischen Bahnen, bei Plan- und Abnahmeprüfungen gewinnen. Das Fachbuch verkörperte zunehmend eine Sammlung an wissenschaftlich-technischen Erkenntnissen und Erfahrungen aus der Gestaltung, Planung, Errichtung und Instandhaltung von Oberleitungen.

Im Jahr 2018 empfahl Seniorautor *Friedrich Kießling* die Erweiterung des Autorenkreises als Voraussetzung für die Erarbeitung einer vierten deutschen Auflage. *Martin Altmann, Wolfgang Braun, André Dölling, Florian Mielsch* und *Hans Ullmann* verstärkten den Autorenkreis. Diese Entscheidung sollte sich bereits ein Jahr später als vorausschauend für die Zukunft des Fachbuchs erweisen. Im Jahr 2019 verstarb *Friedrich Kießling*.

Die Aufnahme eines neuen Kapitels zu Stromabnehmern und die Berücksichtigung zahlreicher aktueller Erkenntnisse und praktischer Erfahrungen im Fachgebiet Fahrleitung führten zu einer zweibändigen vierten deutschen Auflage mit jetzt 18 Kapiteln.

Das grundlegende Kapitel eins mit der Darstellung der Theorie der Energieübertragung enthält nun auch die Beschreibung des international verbreiteten Mehrspannungssystems, welches zwischenzeitlich auch für vier Strecken in Deutschland Anwendung fand.

Das Kapitel zwei enthält die neuen Anforderungen an die Planung und Errichtung von Fahrleitungsanlagen auf Basis der aktuellen Normung. Im Kapitel drei nehmen die historischen und aktuellen Ausführungen und die prinzipiellen Möglichkeiten zur Ausführung solcher Anlagen einen wesentlichen Teil ein.

Das Kapitel vier mit den Berechnungen von Fahrleitungsanlagen ließ sich dank der Leserhinweise und eigener Erfahrungen der Autoren erweitern und systematisieren. Die neuen Autoren *Martin Altmann*, *Wolfgang Braun* und *André Dölling* aktualisierten und erweiterten die Kapitel fünf bis acht zu den elektrischen Grundlagen dank ihrer nationalen und internationalen Erfahrungen. Das Kapitel Fahrleitungsschutz gestaltete *Hans Ullmann* unter Berücksichtigung der Schutzprinzipien nach EN 50633 neu.

Das Buch enthält nun auch ein neues Kapitel zu Stromabnehmern als die Schnittstelle zwischen der Fahrleitung und den Fahrzeugen. Das Kapitel elf, über das Zusammenwirken von Stromabnehmer und Fahrleitung, enthält Beispiele für das Kontaktkraft- und Anhubverhalten an Zwangspunkten wie Weichen, unter Bauwerken und Überlappungen.

Das Kapitel zwölf beschreibt die Bauteile und Baugruppen der Fahrleitung. Ein weiteres Kapitel 13 behandelt die Planung der Fahrleitungsanlagen, nun auch mit den deutschen Erfahrungen aus tangentialen Weichenbelastungen. Diese haben zwischenzeitlich Einzug ins deutsche Regelwerk gefunden.

Das Kapitel 14 Tragwerke, aktualisiert und erweitert durch *Florian Mielsch*, enthält nun auch Beispiele, die den Forderungen der Eurocodes für Bauwerke entsprechen und die Neuerungen aus der aktualisierten EN 50119 berücksichtigen. Das Kapitel 15 enthält nun auch Oberleitungen für Autobahnen. Das Kapitel 16 beschreibt die Errichtung und Abnahme der Anlagen. Das Kapitel 17 behandelt ausgeführte Anlagen bei Straßenbahnen, Stadt- und U-Bahnen, S-Bahnen sowie Bahnen des Regionalverkehrs, des konventionellen und insbesondere des Hochgeschwindigkeitsfernverkehrs in vielen Ländern. Neu sind die Abschnitte zu den ausgeführten Fahrleitungsanlagen in Belgien, Frankreich, Japan und Australien.

André Dölling beschreibt im wesentlich erweiterten Kapitel 18 die Instandhaltung der Fahrleitung mit den hierfür notwendigen Fahrzeugen, Werkzeugen und Diagnoseeinrichtungen. Er nutzt hierfür die umfangreichen Erfahrungen der Deutschen Bahn, der Österreichischen Bundesbahn und der Schweizer Bundesbahnen. Die in den letzten Jahren weiterentwickelten Bauarten und Werkstoffe auf offenen Strecken und im Tunnel für Fahrleitungen im Hochgeschwindigkeits- und Nahverkehr ziehen eine Anpassung und Weiterentwicklung der Instandhaltungsroutinen nach sich.

Das vorliegende Fachbuch unterstützt die Aus- und Weiterbildung der Fachkräfte in diesem umweltfreundlichen Wirtschaftszweig im deutschsprachigen Raum, später im englischen Sprachraum.

Ein Buch, wie das vorliegende, schreibt sich nicht von selbst, sondern bedarf vieler Stunden Arbeit über mehrerer Jahre und auch vielfältiger Unterstützung beim Erstellen der Manuskripte, der Zeichnungen, des Layouts und der Druckvorbereitung. Für die mannigfaltige Unterstützung danken die Autoren insbesondere:

- Der Siemens Mobility GmbH mit Henrike Diers, Stefan Piller, Katja Elschner, Stephan Rister und Markus Zachmeier, die dieses Buch und die Entwicklung und Forschung auf dem Gebiet der elektrischen Bahnen förderten.
- Vielen Personen und Einrichtungen, die mit Zuarbeiten das Entstehen des Buches unterstützten. Genannt seien die Fachkollegen Andreas Bauer, Lutz Steinert, Ralf Hickethier, Ralf Knode, Thomas Reichmann, Markus Staub, Helge Molthan, Rainer Matthes, Thomas Nickel, Jan-Thomas Walter und Steffen Walter.
- Barbara Bucher von DRUCK+VERLAG ERNST VÖGEL GMBH aus Stamsried für die exzellente Ausstattung des Buchs mit Vierfarbendruck und verständnisvoller Unterstützung.
- Den Anlagenverantwortlichen und Verantwortlichen Elektrofachkräften für Oberleitungen sowie im Speziellen Wolfgang Böttcher, Michael Perschbacher, Christoph Kaschky, Gert Hackeneis, Marco Böttcher der DB AG für ihre Erfahrungen und Rückmeldungen zum inhaltlichen Ausbau des Kapitels 18.
- Dr. Fritjof Aufschläger, Felix Schmelzer und Dr. Sebastian Terfloth für die wissenschaftlichen Beiträge für die Verbesserung in den Kapitel 16 und 18.
- Der TU Dresden, Professur für elektrische Bahnen, für die Forschung und Lehre auf dem Gebiet der elektrischen Bahnen und damit den zahlreichen wissenschaftlichen Rückfluss. Besonderer Dank geht an Luise Wottke für die Unterstützung bei den umfangreichen Kontaktkraft- und Anhubsimulationen im Kapitel elf sowie Markus Schiebel für die zahlreichen Hinweise im Rahmen des wissenschaftlichen Reviews.

- Der ÖBB Infrastruktur AG mit Franz Kurzweil und Wolfgang Sturzeis, die erstmals Inhalte im Abschnitt 16 und 18 für dieses Buch beisteuerten.
- Den Schweizer Bundesbahnen mit Thomas Bolleter, Frank Seifert und Pascal Bühlmann, die erstmals Inhalte im Abschnitt 18 für dieses Buch lieferten.
- Petra Netrvalová von Faiveley Transport in Pilsn für ihre Unterstützung bei der Gestaltung des Stromabnehmerkapitels.
- Guido Sievers von Stemmann-Technik GmbH aus Schüttdorf für die freundliche Bereitstellung umfangreicher Informationen zu Stromabnehmern.
- Gerhard Löffler von der Siemens Mobility Austria GmbH für die Bereitstellung von Zeichnungen des Siemens Mireo Stromabnehmers.
- Wolfgang Meisen von der DB Systemtechnik GmbH aus München für die Vermittlung seiner Erfahrungen hinsichtlich des Erkennen von Fehlern beim Betriebs von Stromabnehmern bei der Deutschen Bahn.
- Allen Lesern für die Erkennung von Fehlern und Vorschläge für Verbesserungen.
- Michael Schwarz, der die Manuskripte, die vielen Bilder und das Layout bearbeitete.

Die Autoren hoffen, dass die überarbeitete und stark erweiterte vierte Auflage des Buches „Fahrleitung elektrischer Bahnen“ die Interessen der Fachwelt erfüllt und so zur Weiterentwicklung des Fachgebietes sowie zur flächendeckenden Einführung der Interoperabilität in Europa beitragen kann. Die Autoren sind für eventuelle Hinweise und Anregungen dankbar. Nur durch die Anwendung des Buches in der Praxis lassen sich Notwendigkeiten zur Verbesserung des Fachbuchs erkennen.

In Dankbarkeit für die langjährige freundschaftliche und kreative Zusammenarbeit widmen die Autoren die vierte deutsche Auflage dem Gedenken an Herrn Dr. Friedrich Kießling.

Erlangen,
im Juni 2024

*Rainer Puschmann, Axel Schmieder,
Martin Altmann, Wolfgang Braun,
André Dölling, Florian Mielsch,
Hans Ullmann*

Inhaltsverzeichnis

1	Bahnenergieversorgung	41
1.0	Symbole und Abkürzungen	41
1.1	Aufgaben der Bahnenergieversorgung	42
1.2	Bahnstromarten	43
1.3	Aufbau der Bahnenergieversorgung	46
1.3.1	Bereitstellung und Übertragung	46
1.3.2	Verteilung und Zuführung	46
1.4	Gleichstrombahnnetze	48
1.4.1	Allgemeines	48
1.4.2	Metro Ankaray in Ankara	49
1.4.2.1	Streckenversorgung und Schaltung	49
1.4.2.2	Unterwerke und Komponenten	50
1.4.3	Speisung mit DC 3,0 kV in Spanien	52
1.4.3.1	Einführung	52
1.4.3.2	Unterwerke	52
1.4.3.3	Steuerung und Schutz	52
1.5	AC-16,7-Hz-Bahnnetze	53
1.5.1	Energieerzeugung	53
1.5.2	16,7-Hz-Bahnenergienetze in Europa	57
1.5.3	16,7-Hz-Bahnenergieversorgung der DB AG	58
1.5.3.1	Energieerzeugung	58
1.5.3.2	Energieübertragung	60
1.5.3.3	Bahnstromschaltanlagen, Funktion und Bauarten	60
1.5.3.4	110-kV-Freiluftschaltanlagen	61
1.5.3.5	Schaltanlagen-Monitoring	64
1.5.3.6	15-kV-Innenraumschaltanlagen	66
1.5.3.7	Schutz	68
1.5.3.8	Stationsleittechnik	69
1.5.3.9	Ortssteuereinrichtungen und Fernwirktechnik	71
1.5.4	Netzleittechnik der DB Energie	71
1.5.4.1	Entwicklung, Aufgaben und Aufbau	71
1.5.4.2	Zentralschaltstellen	72
1.5.4.3	Hauptschaltleitung	73
1.6	AC-50-Hz-Bahnnetze	73
1.6.1	Energiebereitstellung und Netzaufbau	73
1.6.2	Mehrspannungs-Energieversorgung 2 AC 50/25 kV 50 Hz und 2 AC 30/15 kV 16,7 Hz	74
1.6.3	Strecke Madrid–Sevilla, Versorgung mit AC 25 kV 50 Hz	78
1.6.3.1	Beschreibung der Anlage	78
1.6.3.2	Beschreibung der elektrischen Auslegung	79
1.6.3.3	Unterwerke	79
1.6.3.4	Fernsteuerung	81
1.6.4	Strecke HSL Zuid, Versorgung mit 2 AC 50/25 kV 50 Hz	81
1.6.4.1	Beschreibung der Anlage	81
1.6.4.2	Unterwerke und Autotransformatorstationen	84
1.7	Literatur	84

2 Anforderungen und Vorgaben für Fahrleitungen	87
2.0 Symbole und deren Bedeutung	87
2.1 Allgemeine Anforderungen	88
2.1.1 Einführung	88
2.1.2 Geometrische Anforderungen	88
2.1.3 Mechanische Anforderungen	89
2.1.4 Elektrische Anforderungen	90
2.1.4.1 Stromart und Nennspannung	90
2.1.4.2 Isolationskoordination	91
2.1.4.3 Elektromagnetische Verträglichkeit	94
2.1.5 Anforderungen aus der Interoperabilität	94
2.1.6 Wirtschaftliche Anforderungen	95
2.2 Vorgaben für Zuverlässigkeit und Sicherheit	95
2.2.1 Grundbegriffe	95
2.2.2 Regulative und normative Anforderungen	97
2.2.3 Belastung, Beanspruchung und Beanspruchbarkeit	97
2.2.4 Anforderungen durch Strom und Spannung	98
2.2.4.1 Personen- und Anlagenschutz	98
2.2.4.2 Schutz durch Abstand	99
2.2.4.3 Schutz durch Hindernisse	103
2.2.4.4 Schutz gegen indirektes Berühren	103
2.3 Bahnbautechnische und betriebliche Vorgaben	104
2.3.1 Einführung	104
2.3.2 Betriebliche Anforderungen	104
2.3.2.1 Fernverkehr	104
2.3.2.2 Nahverkehr	105
2.3.3 Anforderungen aus dem Gleisabstand	106
2.3.3.1 Fernverkehr	106
2.3.3.2 Nahverkehr	107
2.3.4 Anforderungen aus Gleisquer- und -längsneigungen	107
2.3.4.1 Fernverkehr	107
2.3.4.2 Nahverkehr	107
2.3.5 Anforderungen aus Lichtraumprofilen	108
2.3.5.1 Begriffe	108
2.3.5.2 Bezugslinie, Fahrzeugbegrenzung- und Lichtraumumgrenzungslinie	109
2.3.5.3 Interoperable Begrenzung- und Lichtraumumgrenzungslinien für Stromabnehmer	113
2.3.5.4 Lichtraumprofile im Tunnel	114
2.3.5.5 Lichtraumprofile für Nahverkehr	115
2.4 Anforderungen der Stromabnehmer an die Fahrleitung	115
2.4.1 Stromabnehmergeometrie	115
2.4.2 Stromabnehmerabstand	116
2.5 Umgebungsbedingte Anforderungen	116
2.5.1 Temperaturen	116
2.5.2 Windgeschwindigkeiten und Windlasten	117
2.5.3 Schnee- und Eislasten	119
2.5.4 Atmosphärischen	120
2.5.5 Blitzüberspannungen	121
2.6 Umweltverträglichkeit	122
2.6.1 Allgemeines	122
2.6.2 Schadstoffemission	122
2.6.3 Landschaftsverbrauch	123

2.6.4	Natur- und Vogelschutz	123
2.6.5	Ästhetik	124
2.6.6	Elektrische und magnetische Felder	124
2.7	Literatur	124
3	Begriffe, Fahrleitungsbauweisen und -arten	127
3.0	Symbole und deren Bedeutung	127
3.1	Begriffe	127
3.2	Historische Entwicklung der Fahrleitungen	131
3.2.1	Allgemeines	131
3.2.2	Oberleitungen für Fernbahnen	137
3.2.3	Oberleitungen für Straßenbahnen	141
3.2.4	Oberleitungen für gleislose Fahrzeuge	142
3.2.5	Stromschienen für Stadtbahnen und Metros	143
3.3	Oberleitungen	145
3.3.1	Aufbau und Eigenschaften	145
3.3.2	Einfachoberleitungen	147
3.3.2.1	Einführung	147
3.3.2.2	Einpunktaufhängung mit fest abgespanntem Fahrdraht	147
3.3.2.3	Pendelaufhängung mit oder ohne selbsttätige Nachspannung	147
3.3.2.4	Gleitende Aufhängung	148
3.3.2.5	Elastische Stützpunkte	148
3.3.2.6	Einfachoberleitung mit Beilseilaufhängung	148
3.3.3	Hochkettenoberleitungen	149
3.3.3.1	Ausführungsarten	149
3.3.3.2	Kettenwerk mit Hängern am Stützpunkt	149
3.3.3.3	Kettenwerk mit versetzten Stützpunkthängern	150
3.3.3.4	Kettenwerk mit Y-Beiseil	150
3.3.3.5	Kettenwerk mit windschiefer Anordnung	152
3.3.3.6	Kettenwerk mit Hilfstragseilen als Verbundoberleitung	153
3.3.4	Flachkettenoberleitungen	153
3.3.5	Wahl der Bauweise, Gestaltung und Kennwerte	154
3.3.5.1	Grundlagen	154
3.3.5.2	Leiterquerschnitte und Zugkräfte	154
3.3.5.3	Spannweite	154
3.3.5.4	Systemhöhe	156
3.3.5.5	Fahrdrathöhe und deren Änderung	156
3.3.5.6	Oberleitungen im Tunnel	157
3.3.5.7	Vordurchhang	157
3.3.5.8	Y-Beiseil	158
3.3.5.9	Verlauf des Kontaktpunkts	158
3.3.5.10	Elastizität und deren Ungleichförmigkeit	158
3.3.5.11	Nachspannlänge	159
3.3.5.12	Festpunkte	160
3.3.5.13	Nachspanneinrichtungen	161
3.3.5.14	Feste Endverankerungen	161
3.3.5.15	Nicht isolierende und isolierende Überlappungen	161
3.3.5.16	Elektrische Trennungen und Trenneinrichtungen	165
3.3.5.17	Elektrische Verbindungen	165
3.3.5.18	Schutzstrecken und Phasentrennstellen	165
3.4	Stromschienenoberleitung	166
3.5	Dritte-Schienen-Anlagen	166

3.6	Bahnenergieleitungen	168
3.7	Literatur	168
4	Berechnungen für Fahrleitungen	173
4.0	Symbole und Abkürzungen	173
4.1	Ständige und veränderliche Lasten	179
4.1.1	Einführung	179
4.1.1.1	Koordinatensystem	179
4.1.2	Eigenlasten	180
4.1.3	Ständige Lasten – Vertikale Kraftkomponenten	181
4.1.4	Ständige Lasten – Radiale Kraftkomponenten	181
4.1.4.1	Allgemeines	181
4.1.4.2	Fahrdrahtstützpunkt in Gleisgeraden	182
4.1.4.3	Fahrdrahtstützpunkt in Gleisbögen	183
4.1.4.4	Endverankerung	185
4.1.4.5	Festpunktverankerung	186
4.1.5	Längskräfte in der Oberleitung	188
4.1.5.1	Streckeneneigungen	188
4.1.5.2	Rückstellkräfte	190
4.1.6	Windlasten	193
4.1.7	Eislasten	195
4.2	Leiterzugkräfte und Durchhang	195
4.2.1	Zulässige Zugkräfte und -spannungen	195
4.2.2	Änderung der Zugkräfte und -spannungen	198
4.2.2.1	Einzelleiter	198
4.2.2.2	Mittelzugspannung bei Bahnenergieleitungen	203
4.2.3	Durchhangsberechnung	203
4.2.3.1	Durchhänge bei gleich hohen Aufhängungen	203
4.2.3.2	Durchhänge bei ungleich hohen Aufhängungen	207
4.2.3.3	Durchhänge bei Bahnenergieleitungen	209
4.2.3.4	Durchhang von Kettenwerken	210
4.2.4	Hochzugkräfte an Stützpunkten	213
4.3	Begrenzungslinien und Seitenverschiebung des Stromabnehmers	215
4.3.1	Fahrzeugebe- und Lichtraumungrenzungslinie des Stromabnehmers	215
4.3.2	Mechanisch-kinematische und elektrisch-kinematische Begrenzungslinie	215
4.3.3	Hüllkurve des Stromabnehmers	217
4.3.4	Nachweishöhe	218
4.3.5	Einflüsse auf die Seitenverschiebung des Stromabnehmers	220
4.3.5.1	Bezugslinie des Stromabnehmers e_p	220
4.3.5.2	Seitenverschiebung durch Kinematik	223
4.3.5.3	Seitenverschiebung des Stromabnehmers	229
4.3.6	Einflüsse auf die Fahrdrahtseitenlage und deren Grenzen	235
4.3.6.1	Grundlagen	235
4.3.6.2	Summe der Oberleitungstoleranzen $\sum T_{OCL}$	235
4.3.6.3	Gebrauchstauglichkeitsnachweis	238
4.3.6.4	Stabilitätsnachweis	239
4.3.6.5	Beispiele für den Gebrauchstauglichkeits- und Stabilitätsnachweis für die 1950-mm-Wippe	241
4.4	Fahrdrahtseitenlage ohne Wind	242
4.4.1	Radialkraft und Fahrdrahtverschiebung	242
4.4.2	Fahrdrahtseitenlage in Geraden ohne Wind	243
4.4.3	Fahrleitungsseitenlage in Gleisbögen ohne Wind	243

4.4.4	Fahrdrabtseitenlage in Übergangsbögen ohne Wind	245
4.5	Fahrdrabtseitenlage mit Wind	248
4.5.1	Windlast für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit	248
4.5.2	Fahrdrabtseitenlage in Geraden mit Wind	250
4.5.3	Fahrleitungsseitenlage in Gleisbögen mit Wind	254
4.5.4	Fahrdrabtseitenlage in Übergangsbögen mit Wind	256
4.6	Windantrieb von Kettenwerken	258
4.7	Spannweite	261
4.7.1	Allgemeines	261
4.7.2	Einflüsse auf die Spannweite	261
4.7.3	Berechnung der maximalen Spannweite	262
4.8	Maximalwerte für Längsspannweite und Nachspannlänge	269
4.8.1	Vorgehensweise bei der Ermittlung der maximalen Längsspannweiten	269
4.8.2	Nachspannlängen	269
4.9	Literatur	270
5	Ströme und Spannungen im Fahrleitungsnetz	273
5.0	Symbole und deren Bedeutung	273
5.1	Elektrische Eigenschaften von Fahrleitungen	276
5.1.1	Grundlegende Zusammenhänge	276
5.1.2	Impedanzen	277
5.1.2.1	Komponenten	277
5.1.2.2	Widerstandsbelag	277
5.1.2.3	Induktivität, Reaktanz und Impedanz	280
5.1.2.4	Impedanz der Fahrschienen	282
5.1.2.5	Impedanz der AC-Oberleitungen	282
5.1.2.6	Messung von Oberleitungsimpedanzen	285
5.1.2.7	Berechnete und gemessene Impedanzbeläge	288
5.1.2.8	Impedanzen von Mehrspannungsanlagen	289
5.1.3	Kapazitätsbelag	291
5.2	Spannungen im Fahrleitungsnetz	292
5.2.1	Grundlegende Anforderungen und Prinzipien	292
5.2.2	Spannungsfall	293
5.2.2.1	Einführung	293
5.2.2.2	Einseitige Speisung	294
5.2.2.3	Zweiseitige Speisung	295
5.2.3	Spannung und Stromverteilung im Mehrspannungssystem	298
5.2.3.1	Ideale Stromverteilung	298
5.2.3.2	Reale Stromverteilung und Spannungsverlauf in Ein- und Mehrspannungsanlagen	299
5.2.4	Berechnung der Spannung am Stromabnehmer mittels Zugfahrtsimulation	302
5.2.5	Leistungsfähigkeit und Qualitätsindex	303
5.2.5.1	Anforderungen	303
5.2.5.2	Mittlere nutzbare Spannung	304
5.3	Elektrische Traktionslasten	306
5.3.1	Einführung	306
5.3.2	Zeitgewichtete Belastungsdauerlinie	307
5.3.3	Bahnen des allgemeinen Verkehrs	309
5.3.4	Hochgeschwindigkeits- und Hochleistungsbahnen	313
5.3.5	Zulässige Zugströme	314
5.3.6	Leistungsfaktor	314
5.3.7	Kurzschlusslasten	315
5.4	Fahrleitungsschaltungen	318

5.4.1	Grundlegende Anforderungen	318
5.4.2	Grundsaltungen	319
5.4.3	Fahrleitungsschaltungen bei AC-16,7-Hz-Bahnen	321
5.4.3.1	Entwicklung	321
5.4.3.2	Fahrleitungsschaltungen bei der Deutschen Bahn	321
5.4.3.3	In den Schaltplänen verwendete Bezeichnungen	324
5.4.3.4	Schaltungen europäischer 16,7-Hz-Bahnen	325
5.5	Eis an Oberleitungen	327
5.5.1	Eisansätze an Oberleitungen	327
5.5.2	Mechanische Methoden	328
5.5.3	Chemische Methoden	328
5.5.4	Elektrische Methoden	328
5.5.5	Kombination mehrerer Enteisungsmethoden	332
5.6	Literatur	333
6	Rückstromführung und Erdung	337
6.0	Symbole und deren Bedeutung	337
6.1	Einführung	338
6.2	Begriffe und Definitionen	339
6.2.1	Einführung	339
6.2.2	Rückleitung	339
6.2.3	Erde	340
6.2.4	Erder und Erdungsanlage	340
6.2.5	Spezifischer Erdwiderstand	340
6.2.6	Bauwerkserde	341
6.2.7	Schienenpotenzial und Gleis-Erde-Spannung	341
6.2.8	Berührungsspannung	341
6.2.9	Oberleitungs- und Stromabnehmerbereich	342
6.2.10	Verbindung mit der Rückleitung	342
6.2.11	Streustrom	343
6.3	Auslegungsprinzipien und Anforderungen	343
6.3.1	Prinzipien bei AC- und DC-Bahnen	343
6.3.2	Rückleitung von DC-Bahnen	345
6.3.3	Rückleitung von AC-Bahnen	345
6.3.4	Schutz gegen elektrischen Schlag als Personenschutz	346
6.3.5	Zulässige Berührungsspannungen	346
6.3.5.1	Anforderungen	346
6.3.5.2	Körperstrom, Körperspannung und Berührungsspannung	347
6.3.5.3	Messungen der Berührungsspannungen	349
6.3.6	Elektromagnetische Verträglichkeit EMV	350
6.3.7	Streustromkorrosion	350
6.3.8	Messungen zur Rückleitungsauslegung	351
6.4	Rückströme und Schienenpotenzial	352
6.4.1	Spezifischer Erdwiderstand und Leitfähigkeit	352
6.4.2	Erder in der Nähe von Bahnen	352
6.4.2.1	Ausbreitungswiderstand von Erdern und Masterdungen	352
6.4.2.2	Wirksamer Ableitbelag zwischen Gleisen und Erde	355
6.4.3	Gleis-Erde-Schleife	357
6.4.3.1	Allgemeines	357
6.4.3.2	Gleis-Erde-Schleife bei DC-Stromversorgungsanlagen	357
6.4.3.3	Gleis-Erde-Schleife bei AC-Bahnen	359
6.4.4	Schienenpotenziale	361

6.4.4.1	AC-Energieversorgungen	361
6.4.4.2	DC-Versorgungsanlagen	361
6.4.4.3	Schienenpotenzial im Betrieb	362
6.4.4.4	Gleis-Erde-Spannungen im Kurzschlussfall	366
6.4.4.5	Sonderfall Berührungsspannung bei Isolatorüberschlag im Baustellenbereich bei temporär fehlendem Gleis	368
6.5	DC-Stromversorgungsanlagen	370
6.5.1	Grundlagen	370
6.5.2	Personensicherheit	371
6.5.3	Streustromschutz	372
6.5.3.1	Elektrochemische Korrosion	372
6.5.3.2	Spannungs- und Stromverteilung	373
6.5.3.3	Vorgaben zum Schutz gegen Streustromwirkungen	375
6.5.3.4	Einfluss der Polarität	376
6.5.3.5	Streustromsammelnetze	377
6.5.4	Gesamterdungskonzept	377
6.5.4.1	Grundlegende Empfehlungen	377
6.5.4.2	Bahneigene Erdungsanlagen	378
6.5.4.3	Drehstromenergieversorgung	378
6.5.4.4	Traktionsunterwerke	379
6.5.4.5	Bahnhöfe für den Personenverkehr	379
6.5.4.6	Offene, ebenerdige Streckenabschnitte	379
6.5.4.7	Tunnel und Brückenbauwerke	380
6.5.4.8	Erdung bahnfremder Anlagen	382
6.5.4.9	Depot- und Werkstattbereiche	382
6.5.4.10	Signal- und Telekommunikationsanlagen	384
6.5.4.11	Blitz- und Überspannungsschutz	384
6.5.4.12	Bauvorgaben	385
6.5.5	Messungen und Prüfungen	385
6.5.5.1	Messungen für Nachweise	385
6.5.5.2	Messungen zu Wartungszwecken	385
6.5.6	Erdung und Rückleitung in ausgeführten Anlagen	386
6.5.6.1	Messungen des Erdausbreitungswiderstandes bei LRT-Ankaray in Ankara	386
6.5.6.2	Messung der Schienenisolierung bei der Tram ETN in Edinburgh	387
6.5.6.3	Messung der Schienenpotenziale bei der Tram ETN in Edinburgh	387
6.5.6.4	Messung des Potenzials zwischen Bauwerks- und Bezugs Erde bei der Tram ETN in Edinburgh	387
6.5.6.5	Spannungsbegrenzungseinrichtungen in den Bahnhöfen bei LRT-Ankaray	388
6.5.7	Wiederholungsmessungen	388
6.5.8	Schlussfolgerungen für Rückleitung und Erdung in DC-Anlagen	389
6.6	AC-Stromversorgungsanlagen	389
6.6.1	Grundlagen	389
6.6.2	Personensicherheit	391
6.6.3	Rückleitung	392
6.6.3.1	Rückleitung durch Schienen und in der Erde verlegte Leiter	392
6.6.3.2	Rückleiter	392
6.6.3.3	Autotransformatoren	394
6.6.3.4	Boostertransformatoren	394
6.6.4	Gestaltung der Rückleitung und Erdung	395
6.6.4.1	Grundlegende Empfehlungen	395
6.6.4.2	Unterwerke	396

6.6.4.3	Bahnhöfe	397
6.6.4.4	Freie Strecken zur ebenen Erde	397
6.6.4.5	Tunnelabschnitte	397
6.6.4.6	Viadukte	399
6.6.4.7	Depots und Werkstattbereiche	399
6.6.4.8	Signal- und Telekommunikationsanlagen	400
6.6.4.9	Bahnfremde Erdungsanlagen	400
6.6.4.10	Blitzschutz	401
6.6.4.11	Abstimmung mit Baumaßnahmen	401
6.6.4.12	Nachweise für die Erdung und Prüfungen durch Messungen	402
6.6.4.13	Verringerung der Gefahren durch Berührungsspannungen	402
6.6.5	Erdung und Vermaschung in Anlagen der DB	404
6.6.5.1	Ausführung der Rückleitung	404
6.6.5.2	Gleise mit nicht isolierten Schienen	405
6.6.5.3	Gleise mit einschieniger Isolierung	405
6.6.5.4	Gleise mit zweischieniger Isolierung	406
6.6.5.5	Gleise mit Tonfrequenzgleisstromkreisen	406
6.6.5.6	Anforderungen an die Gleis- und Schienenverbinder	407
6.6.5.7	Vermaschung zwischen der Rückleitung und den Stahlbewehrungen von Betonbauwerken und Schallschutzwänden	407
6.6.6	Erdung und Vermaschung der Hochgeschwindigkeitsstrecke Madrid–Sevilla	408
6.6.7	Messung des Schienenpotenzials bei Kurzschluss in einer Mehrspannungsanlage	410
6.6.8	Schlussfolgerungen für die Gestaltung der Rückleitung und Erdung bei AC-Anlagen	411
6.7	Parallelbetrieb von AC- und DC-Bahnen	411
6.7.1	Einführung	411
6.7.2	Bereiche der gegenseitigen Beeinflussung	413
6.7.3	Grenzwerte für Berührungsspannungen	413
6.7.4	Technische Anforderungen	413
6.8	Literatur	414
7	Thermische Bemessung	419
7.0	Symbole und deren Bedeutung	419
7.1	Einführung	421
7.2	Stromtragfähigkeit von Einfachleitern	422
7.2.1	Grundlegende Beziehungen der thermischen Modellbildung	422
7.2.1.1	Wärmeleistungsbilanz	422
7.2.1.2	Zugeführte Wärmeleistung	423
7.2.1.3	Wärmeübergang durch Strahlung	424
7.2.1.4	Wärmeübergang durch Konvektion	425
7.2.1.5	Ergänzende Betrachtungen zum Wärmeübergang durch Konvektion	426
7.2.2	Einfluss und Eigenschaften der Umgebungsbedingungen an Fahrleitungsanlagen	427
7.2.2.1	Umgebungstemperatur	427
7.2.2.2	Globalstrahlung	429
7.2.2.3	Windgeschwindigkeit	429
7.2.2.4	Gleichzeitigkeit von Umgebungsbedingungen	430
7.2.3	Lang anhaltende Betriebslasten	431
7.2.4	Kurzschlussstromtragfähigkeit	434
7.2.5	Veränderliche Betriebslasten	438
7.3	Stromschienen von Dritte-Schiene-Anlagen	444
7.3.1	Einführung	444
7.3.2	Stromschienen aus Stahl	446
7.3.3	Verbundstromschienen aus Aluminium und Edelstahl	448

7.4	Stromschienenoberleitung	450
7.5	Kettenwerke	453
7.6	Thermische Auslegung	457
7.6.1	Ausgangssituation	457
7.6.2	Auslegung nach dem höchsten Strom	458
7.6.3	Vergleich von Belastungs- und Tragfähigkeitskennlinien	458
7.6.3.1	Allgemeines	458
7.6.3.2	Bahnen des allgemeinen Verkehrs	459
7.6.3.3	Bahnstrecken für den Hochgeschwindigkeitsverkehr und anderen Taktverkehr	459
7.7	Erwärmungsberechnung inhomogener Komponenten und zugehöriger Leiteranordnungen	460
7.7.1	Einführung	460
7.7.2	Wärmenetzmethode	462
7.7.2.1	Grundlagen	462
7.7.2.2	Elemente der Wärmenetzmethode	462
7.7.2.3	Berechnung der Erwärmung eines Leiters	463
7.7.2.4	Modellierung einer Stromeinspeisung ins Kettenwerk	463
7.7.2.5	Modellierung des Kontakts zwischen Fahrdrabt und Schleifstück	465
7.7.3	Erwärmungsberechnung auf Basis Finite Elemente Methode	466
7.7.3.1	Einführung	466
7.7.3.2	Berechnung der Erwärmung von Hängerklemmen	466
7.7.3.3	Berechnung der Kurzzeitbelastbarkeit von Trennschaltern	468
7.7.3.4	Elektrisch stromführende Kontakte	468
7.8	Leitertemperatur und Fahrdrabteigenschaften	468
7.8.1	Einführung	468
7.8.2	Eigenschaften der Fahrdrabwerkstoffe	469
7.8.3	Auswirkungen der Temperatur auf die Festigkeit	470
7.8.4	Einfluss der Erwärmungsdauer auf die Zugfestigkeit	471
7.8.5	Fahrdrabterwärmung an Stellen erhöhten Verschleißes	472
7.8.6	Schnittstelle zwischen Fahrdrabt und Schleifstück	474
7.8.6.1	Allgemein	474
7.8.6.2	Anforderungen an Schleifstücke aus ihrer Strombelastung	475
7.8.6.3	Stillstandsströme	476
7.8.6.4	Stillstandsströme für Nachladung von batterieelektrischen Triebfahrzeugen	477
7.8.6.5	Abschmelzströme	482
7.9	Empfehlungen zum thermischen Überlastungsschutz	485
7.9.1	Allgemeines	485
7.9.2	Vergleichsrechnungen	486
7.9.2.1	Einfluss der Umgebungsbedingungen	486
7.9.2.2	Einfluss des vereinfachten Schutzmodells	487
7.9.2.3	Einfluss Fahrdrabverschleiß und Emissionsgrad	487
7.9.2.4	Schutz von Oberleitungskettenwerken	488
7.10	Folgen fehlerhafter thermischer Auslegung und Zusammenfassung	488
7.11	Literatur	489
8	Elektromagnetische Verträglichkeit EMV	493
8.0	Symbole und deren Bedeutung	493
8.1	Einführung	494
8.2	Gesetzliche Anforderungen der europäischen Union bezüglich EMV	495
8.3	Beeinflussungsmodell und Kopplungsmechanismen	496
8.4	Beeinflussung durch die elektrische Traktion	497
8.5	Kopplungsmechanismen	498
8.5.1	Galvanische Beeinflussung	498

8.5.2	Induktive Beeinflussung	498
8.5.2.1	Induktive Beeinflussung bei Betriebsfrequenz	498
8.5.2.2	Induktive Beeinflussung infolge von Oberschwingungen	504
8.5.3	Kapazitive Beeinflussung	506
8.5.4	Elektrostatische Entladung	510
8.6	Elektrische und magnetische Felder im Fahrleitungsbereich	510
8.6.1	Grundlagen	510
8.6.2	Wirkungen von Feldern auf Menschen	516
8.6.3	Auswirkungen der Felder auf technische Geräte	518
8.6.3.1	Allgemeine Auswirkungen	518
8.6.3.2	Aktive implantierte medizinische Geräte	519
8.6.3.3	Technische Anlagen	519
8.6.3.4	Elektrische Bahnen als Quelle von Funkstörpegeln	520
8.7	Schlussfolgerungen	520
8.8	Literatur	522
9	Fahrleitungsschutz und Fehlerortung	523
9.0	Symbole und deren Bedeutung	523
9.1	Einführung	524
9.2	Fahrleitungsschutz	524
9.2.1	Aufgaben, Anforderungen und Wirkungsweise	524
9.2.2	Ausführung und Komponenten	527
9.2.2.1	Überblick	527
9.2.2.2	Messwandler	528
9.2.2.3	Hochstrom- und Überstromzeitschutzstufen	528
9.2.2.4	Distanzschutz	529
9.2.2.5	Anfahrstromschutz und Stromanstiegsschutz	530
9.2.2.6	Überlastschutz	530
9.2.2.7	Phasen-Fehlkopplungsschutz im 50-Hz-Fahrleitungsnetz	531
9.2.2.8	Kesselschutz	532
9.2.2.9	Weitere Komponenten in digitalen Schutzeinrichtungen	533
9.2.3	Messgrößenanschaltung und -aufbereitung im AC-Schutzgerät	534
9.2.4	Messgrößenanschaltung und -aufbereitung im DC-Schutzgerät	535
9.3	Anforderungen an das Schutzkonzept nach EN 50633	536
9.3.1	Hintergrund	536
9.3.2	Anwendungsbereich	536
9.3.3	Schutzzuverlässigkeitsmethoden nach EN 50633	536
9.3.4	Notwendigkeit der Schnelligkeit des Schutzsystems	537
9.3.5	Notwendigkeit der Selektivität des Schutzsystems	537
9.4	Schutzkonzepte	537
9.4.1	Überblick	537
9.4.2	Beispiele für Schutzschemen nach EN 50633	538
9.4.3	Konzepte mit Schutzkommunikation	538
9.4.4	Reserveschutz	539
9.5	Fehlerortung	540
9.5.1	Allgemeines	540
9.5.2	Arten der Fehlerortung	540
9.5.2.1	Fehlerortung mittels Distanzschutzgerät	540
9.5.2.2	Fehlerortung mittels Kurzschlussmeldewandler	540
9.5.2.3	Fehlerortung mittels Kurzschlussortungsverfahren KOSys	541
9.5.2.4	Fehlerortung mittels Horstmann-Navigatoren	542
9.6	Schutzeinstellungen	543

9.6.1	Einführung	543
9.6.2	Beispiel 16,7-Hz-Fahrleitungsnetz	544
9.6.2.1	Schutzkonzept	544
9.6.2.2	Distanz- und Hochstromstufen	544
9.6.2.3	NOT-UMZ- und Reserveschutz	547
9.6.2.4	Überlastschutz	548
9.6.2.5	Abgewandelte Schutzeinstellungen bei Betrieb ohne Stickleitung	549
9.6.3	Beispiel 50-Hz-Fahrleitungsnetz mit Autotransformatoren	551
9.6.3.1	Allgemeines	551
9.6.3.2	Schutzkonzept	553
9.6.3.3	Distanz- und Hochstromstufen	554
9.6.3.4	Reserveschutz für die Distanzstufen im Unterwerk	558
9.6.3.5	Schaltversagerschutz	559
9.6.3.6	NOT-UMZ-Schutz und Überstromstufen	559
9.6.3.7	Überlastschutz	559
9.6.3.8	Fehlerortung	560
9.6.3.9	Kesselschutz Autotransformatoren	561
9.6.4	Fahrleitungsschutz im DC-Netz	562
9.6.5	Beispiel Phasen-Fehlkopplungsschutz im 50-Hz-Fahrleitungsnetz	562
9.6.6	Besonderheiten im einpolig gespeisten 16,7-Hz-Fahrleitungsnetz mit Autotransformatoren	563
9.7	Schutzsimulation	564
9.7.1	Allgemeines	564
9.7.2	Beispielnetz zur Schutzsimulation	564
9.8	Flaschenhalsschaltung im Fahrleitungsnetz der DB	566
9.9	Leitungsunterbrechungen und deren Wirkung	567
9.10	Kurzschluss tests	568
9.10.1	Einführung	568
9.10.2	Klassifizierung und Durchführung	568
9.11	Literatur	570
10	Stromabnehmer	571
10.0	Symbole und deren Bedeutung	571
10.1	Einführung	572
10.2	Geschichtliche Entwicklung interoperabler Stromabnehmer in Europa	573
10.3	Definitionen	577
10.4	Stromabnehmerbauweisen und -arten	579
10.5	Anforderungen an Stromabnehmer	581
10.6	Umsetzung und Bewertung der Anforderungen	584
10.7	Dachstromabnehmer	584
10.7.1	Aufbau des Stromabnehmers	584
10.7.2	Geometrie der Wippe	585
10.7.3	Funktionen des Dachstromabnehmers	587
10.7.4	Mechanische Beanspruchung	587
10.7.4.1	Kräfte am Stromabnehmer infolge Windanströmung	587
10.7.4.2	Kräfte am Stromabnehmer infolge Windanströmung und des Zusammenwirkens	590
10.7.4.3	Möglichkeiten zur Veränderung der vertikalen Kontaktkraft am Stromabnehmer	593
10.7.5	Bauteile und Materialien	597
10.7.5.1	Wippe	597
10.7.5.2	Schleifstück	598
10.7.5.3	Windleiteinrichtung	605
10.7.5.4	Hebe- und Senkeinrichtung	608
10.7.6	Prüfungen und Zulassungen	609

10.8	Seitenstromabnehmer bei Industriebahnen	609
10.9	Tiefenstromabnehmer im Nahverkehr	610
10.10	Elektrischer Betrieb mit einer oder mehreren Stromarten	611
10.11	Anwendungen	613
10.11.1	Dachstromabnehmer im Hochgeschwindigkeitsverkehr über 200 km/h	613
10.11.2	Dachstromabnehmer im konventionellen Verkehr bis 200 km/h	614
10.11.3	Dachstromabnehmer im Nahverkehr	617
10.11.4	Dachstromabnehmer für Sonderanwendungen	619
10.11.5	Dach- und Seitenstromabnehmer bei Industriebahnen	619
10.11.6	Tiefenstromabnehmer	621
10.12	Anordnung und Betrieb von Stromabnehmern im Fernverkehr	622
10.13	Anordnung und Betrieb von Stromabnehmern im Nahverkehr	625
10.14	Instandhaltung von Stromabnehmern	626
10.15	Literatur	628
11	Zusammenwirken von Stromabnehmer und Oberleitung	633
11.0	Symbole und deren Bedeutung	633
11.1	Einführung	636
11.2	Technische Grundlagen	636
11.2.1	Berechnung der Biegelinie mit einem Stromabnehmer an der Oberleitung	636
11.2.2	Wellengleichung und Wellenausbreitungsgeschwindigkeit	640
11.2.3	Verhalten des gespannten Fahrdrabtes beim Befahren	641
11.2.3.1	Berechnungsansatz	641
11.2.3.2	Vergleich zu bisherigen Berechnungsansätzen	645
11.2.3.3	Resonanz	645
11.2.4	Reflexion und Transmission von Wellen	647
11.2.4.1	Theorie	647
11.2.4.2	Kraftwirkungen von Transversalimpulsen an Massepunkten	648
11.2.4.3	Reflexionen an einem Hänger	650
11.2.4.4	Reflexionen im realen System	652
11.2.5	Doppler- und Verstärkungsfaktor	652
11.2.6	Schwingungsverhalten eines Kettenwerkes	654
11.2.6.1	Grundlagen	654
11.2.6.2	Eigenfrequenzen eines Kettenwerkes	655
11.2.6.3	Eigenmoden von Kettenwerken	655
11.2.6.4	Bestimmung der Bewegung mithilfe der Eigenmoden	657
11.2.7	Dynamische Kennwerte einiger Oberleitungsbauarten	658
11.3	Simulation des Zusammenwirkens von Oberleitung und Stromabnehmer	658
11.3.1	Aufgaben und Ziele	658
11.3.2	Stromabnehmernachbildung	660
11.3.3	Kettenwerksnachbildung	664
11.3.3.1	Grundlagen	664
11.3.3.2	Modellierung mit der Finite-Elemente-Methode	665
11.3.3.3	Analytische Lösung im Frequenzbereich	665
11.3.3.4	Methode der frequenzabhängigen finiten Elemente	665
11.3.3.5	Modellierung mit der d'Alembertschen Wellengleichung	666
11.3.4	Bestätigung der Simulationsverfahren	666
11.3.4.1	Einführung	666
11.3.4.2	Anforderungen an Simulationsverfahren	666
11.3.4.3	Bestätigung durch Vergleich mit dem Referenzmodell	669
11.3.4.4	Bestätigung mit gemessenen Werten aus Streckenfahrten	670
11.3.5	Simulation mit frequenzabhängigen finiten Elementen	670

11.3.5.1	Einführung	670
11.3.5.2	Herleitung der Saiten-Differentialgleichung für Oberleitungen	672
11.3.5.3	Bestimmen von Steifigkeits-, Massen- und Dämpfungsmatrix der Oberleitung	673
11.3.5.4	Einbindung von äußeren Lasten bei Oberleitungen	675
11.3.5.5	Vereinfachte Schwingungsdifferentialgleichung des Kettenwerks	675
11.3.5.6	Erweiterte Schwingungsdifferentialgleichung des Kettenwerks	676
11.3.5.7	Stromabnehmer	678
11.3.5.8	Lösen der Differentialgleichungen im Zeitbereich	678
11.3.6	Simulation mit handelsüblichen Finite-Elemente-Programmen	679
11.3.7	Simulation mit einem auf den Stromabnehmer zugeschnittenen Programm	682
11.4	Messungen und Prüfungen	683
11.4.1	Einführung	683
11.4.2	Anforderungen an das Zusammenwirken	684
11.4.2.1	Einführung	684
11.4.2.2	Statische Kontaktkraft	685
11.4.2.3	Mittlere Kontaktkraft	685
11.4.2.4	Mindest- und Höchstabstand zwischen aktiven Stromabnehmern	686
11.4.2.5	Dynamisches Verhalten und Stromabnahmegüte	688
11.4.2.6	Vertikale Höhe des Kontaktpunktes	689
11.4.2.7	Konformitätsbewertung des Oberleitungskettenwerkes	689
11.4.2.8	Kompatibilitätsbewertung eines Stromabnehmers	690
11.4.2.9	Bewertung der Oberleitung einer neuen Strecke	690
11.4.2.10	Bewertung eines Stromabnehmers auf neuen Triebfahrzeugen	691
11.4.2.11	Statistische Berechnungen und Simulationen	692
11.4.3	Messung der Fahrdrähtuhelage	692
11.4.4	Messung des Zusammenwirkens von Oberleitung und Stromabnehmer	692
11.4.4.1	Grundlagen	692
11.4.4.2	Anforderungen an die Messung der Kontaktkräfte	693
11.4.4.3	Anforderungen an die Messung des Fahrdrahtanhubes	694
11.4.4.4	Anforderungen an die Messung der Lichtbögen	694
11.4.4.5	Messgrößen zur Kontaktkraftmessung	695
11.4.4.6	Auswertung und Bewertung der Messergebnisse	698
11.4.5	Messung von Fahrdrahtanhub und dynamischer Elastizität	703
11.4.5.1	Messung des Fahrdrahtanhubes	703
11.4.5.2	Messung der dynamischen Elastizität	704
11.4.6	Beurteilung dynamischer Stromabnehmerkennwerte	704
11.5	Einfluss der Konstruktionsparameter	708
11.5.1	Einführung	708
11.5.2	Kriterien für die Gestaltung von Oberleitungen	708
11.5.2.1	Elastizität und Anhub	708
11.5.2.2	Dynamische Kriterien	712
11.5.3	Oberleitungsparameter	714
11.5.3.1	Leiterquerschnitte und Zugspannungen	714
11.5.3.2	Spannweiten und Systemhöhe	716
11.5.3.3	Vordurchhang und Beiseile	717
11.5.3.4	Einfluss der Überlappungen	719
11.5.3.5	Einfluss der Regulierungsgenauigkeit	721
11.5.4	Sensitivitätsanalyse von Oberleitungsparametern auf Basis der Bauart Re 200	722
11.5.4.1	Einführung	722
11.5.4.2	Basismodelle der Re 200	722
11.5.4.3	Einfluss der Fahrdrähtzugkraft	722

11.5.4.4	Einfluss des Fahrdrahtquerschnitts	724
11.5.4.5	Einfluss des Fahrdrahtquerschnitts bei konstanter Zugspannung	727
11.5.4.6	Einfluss der Tragseilzugkraft	729
11.5.4.7	Systemhöhe	730
11.5.4.8	Vordurchhang	731
11.5.4.9	Längsspannweiten und -sprünge	734
11.5.4.9.1	Einführung	734
11.5.4.9.2	Einfluss der Längsspannweite bei gleichzeitiger Änderung des Vordurchhanges	735
11.5.4.9.3	Einfluss der Längsspannweite ohne Veränderung des Vordurchhanges	736
11.5.4.9.4	Einfluss von Längsspannweitensprüngen mit Veränderung des Vordurchhanges	739
11.5.4.10	Y-Beiseile	741
11.5.4.10.1	Einführung	741
11.5.4.10.2	Beiseillänge des angelenkten Stützpunkts	741
11.5.4.10.3	Beiseilzugkraft des angelenkten Stützpunkts	742
11.5.4.10.4	Beiseillänge des umgelenkten Stützpunkts	744
11.5.4.10.5	Beiseilzugkraft des umgelenkten Stützpunkt	745
11.5.4.10.6	Vergleich mit und ohne Beiseil	747
11.5.4.10.7	Einfluss aus der Aufhängung des Stützrohres	748
11.5.4.11	Hängerteilung	749
11.5.4.12	Tragseilführung über dem Fahrdraht	750
11.5.4.13	Radialkräfte	750
11.5.4.14	Befahrgeschwindigkeit	753
11.5.4.15	Elastizität und Anhub	754
11.5.4.16	Überlappungen	757
11.5.4.16.1	Einführung	757
11.5.4.16.2	Dreifeldrige Überlappung – Grundlagen	757
11.5.4.16.3	Dreifeldrige Überlappung – parabelförmiger Hochzug zweiter Ordnung	762
11.5.4.16.4	Dreifeldrige Überlappung – Vergleich der Hochzugkennlinien	763
11.5.4.16.5	Dreifeldrige Überlappung – Einfluss der Befahrgeschwindigkeit	765
11.5.4.16.6	Fünffeldrige Überlappung – Grundlagen	766
11.5.4.16.7	Fünffeldrige Überlappung – Einfluss des Daches	766
11.5.4.16.8	Fünffeldrige Überlappung – Einfluss des Hochzuges am befahrenen Stützpunkt	767
11.5.4.17	Kettenwerksabsenkungen	769
11.5.4.17.1	Einführung	769
11.5.4.17.2	Einfluss der Neigungen und Neigungswechsel	770
11.5.4.17.3	Einfluss der Befahrgeschwindigkeit	772
11.5.4.18	Weiterentwicklungsoptionen der Re 200	773
11.5.4.18.1	Einführung	773
11.5.4.18.2	Vergleich	774
11.5.4.18.3	Befahreigenschaften bei 230 km/h	776
11.5.4.19	Zusammenfassung der Ergebnisse zur Sensibilitätsanalyse der Bauart Re 200	777
11.5.5	Bespannung von Weichen	777
11.5.5.1	Zielstellung	777
11.5.5.2	Grundlagen für die Untersuchung von Weichenbespannungen	778
11.5.5.2.1	Modellierung	778
11.5.5.2.2	Ablauf der Simulation von Weichenbefahrungen	779
11.5.5.2.3	Auswertung und Bewertung der Ergebnisse	780
11.5.5.3	Aufbau und Entwicklung der untersuchten Modelle	781
11.5.5.3.1	Eigenschaften der Regelbauarten	781
11.5.5.3.2	Anpassungen im Modell 1	781
11.5.5.3.3	Anpassungen im Modell 2	782

11.5.5.3.4	Anpassungen in Modell 3	783
11.5.5.4	Auswertung und Bewertung der Ergebnisse	783
11.5.5.4.1	Oberleitungsbauart als Einflussgröße	783
11.5.5.4.2	Weichenbespannungsmethode als Einflussgröße	784
11.5.5.4.3	Geschwindigkeit als Einflussgröße	786
11.5.5.4.4	Höhenregulierung Kreuzungsstab für Modell 1 als Einflussgröße	791
11.5.5.4.5	Oberleitungsbauart des ZG-Kettenwerks im Modell 3 als Einflussgröße	794
11.5.5.4.6	Gradient des Hochzugs des ZG-Fahrdraht für Modell 3 als Einflussgröße	795
11.5.5.4.7	Fahrdrahtlage im ZG für Modell 2 als Einflussgröße	796
11.5.5.4.8	X-Position der Wechselhänger als Einflussgröße	798
11.5.5.5	Fazit	798
11.5.5.6	Erkenntnisse aus weiteren Weichensimulationen	800
11.5.6	Befahrung von Streckentrennern	801
11.5.6.1	Einführung	801
11.5.6.2	Modellbildung	802
11.5.6.3	Validierung des Modells	803
11.5.6.4	Simulationsergebnisse	803
11.5.6.5	Auswertung und Diskussion der Ergebnisse	805
11.5.7	Schwingungstilger	807
11.5.7.1	Einführung	807
11.5.7.2	Schwingungstilger	808
11.5.7.3	Wirksamkeitsnachweis mit Hilfe von Simulationen	808
11.5.7.4	Validierung und Ausblick	811
11.6	Einfluss der Stromabnehmerausführung	811
11.6.1	Einführung	811
11.6.2	Konstruktionseigenschaften des Stromabnehmers	811
11.6.3	Weiterentwickelte Stromabnehmerbauarten	813
11.6.4	Fahren mit mehreren Stromabnehmern	814
11.6.4.1	Einführung	814
11.6.4.2	Beobachtungen aus Messungen	815
11.6.4.3	Systematische Untersuchung von Einflussfaktoren	816
11.7	Werkstoffe für Schleifstücke und Fahrdrähte	819
11.8	Beispiele für die Bewertung des Zusammenwirkens	820
11.8.1	Beurteilung von Oberleitungen nach TSI Energie	820
11.8.2	Bewertung der interoperablen Oberleitung EAC 350 in Spanien	820
11.8.3	Oberleitung für hohe Geschwindigkeiten in Österreich	821
11.8.4	Dynamisches Verhalten der Oberleitung Wuhan–Guangzhou, China	821
11.9	Schlussfolgerungen	821
11.9.1	Grenzen für die Leistungsübertragung Oberleitung/Stromabnehmer	821
11.9.2	Vorgaben für Oberleitungen aus dem Zusammenwirken	823
11.9.3	Vorgaben für die Stromabnehmer aus dem Zusammenwirken	824
11.9.4	Vorgaben für das Zusammenwirken	824
11.10	Literatur	825
12	Bauteile und Baugruppen	831
12.0	Symbole und deren Bedeutung	831
12.1	Gliederung der Oberleitungsanlagen	831
12.1.1	Struktur	831
12.1.2	Allgemeine Anforderungen	833
12.2	Schraubverbindungen	833
12.2.1	Verwendung von A2 und A4 Schraubverbindung	833
12.2.2	Chemische Vorgänge bei A2 und A4 Schraubverbindungen	834

12.2.3	Anziehdrehmomente	835
12.3	Oberleitungen	835
12.3.1	Quertrageinrichtungen	835
12.3.1.1	Aufgaben und Anforderungen	835
12.3.1.2	Rohrschwenkausleger	835
12.3.1.3	Ausleger über mehrere Gleise	845
12.3.1.4	Flexible Quertragwerke	846
12.3.1.5	Joche	849
12.3.1.6	Bogenabzug	850
12.3.1.7	Quertrageinrichtungen im Tunnel und unter Brücken	851
12.3.1.8	Elastische Stützpunkte	851
12.3.2	Längstragwerk	851
12.3.2.1	Aufgaben und Anforderungen	851
12.3.2.2	Fahrdrähte	853
12.3.2.3	Stahldrähte	856
12.3.2.4	Metallseile	856
12.3.2.5	Kunststoffseile	858
12.3.2.6	Klemmen	858
12.3.2.7	Hänger	862
12.3.2.8	Elektrische Verbinder	865
12.3.3	Nachspanneinrichtungen	865
12.3.3.1	Aufgaben und Anforderungen	865
12.3.3.2	Nachspanneinrichtungen mit Gegengewichten	865
12.3.3.3	Nachspanneinrichtungen ohne Gegengewichte	867
12.3.4	Trenneinrichtungen	868
12.3.4.1	Aufgaben und Anforderungen	868
12.3.4.2	Streckentrenner	870
12.3.4.3	Trenner mit neutralen Abschnitten	872
12.3.5	Oberleitungstrenn- und Erdungsschalter	873
12.3.5.1	Aufgabe und Anforderungen	873
12.3.5.2	Oberleitungstrennschalter für Wechselstrombahnen	875
12.3.5.3	Oberleitungstrennschalter für Gleichstrombahnen	876
12.3.5.4	Erdungsschalter	876
12.3.5.5	Schalterantriebe	876
12.3.6	Isolatoren	879
12.3.6.1	Aufgaben und Anforderungen	879
12.3.6.2	Isolierwerkstoffe	880
12.3.6.3	Ausführungsformen und Anwendungen	881
12.3.6.4	Elektrische und mechanische Bemessung	884
12.3.6.5	Auswahl und Anwendung	884
12.4	Stromschienenoberleitungen	884
12.4.1	Aufgaben und Anforderungen	884
12.4.2	Stützpunktbaugruppe	885
12.4.3	Stromschienenprofile	886
12.4.3.1	Verbundprofil	886
12.4.3.2	Einfachprofil	887
12.4.4	Mechanische Verbindungen und Bauteile	888
12.4.4.1	Stromschienenstöße	888
12.4.4.2	Sektionswechsel und Weichen	888
12.4.4.3	Dehnstoß	889
12.4.4.4	Festpunkt	890

12.4.5	Elektrische Verbindungen	890
12.4.5.1	Strombelastbarkeit	890
12.4.5.2	Einspeisungen	891
12.4.5.3	Stromverbinder zwischen Sektionen	891
12.4.5.4	Anschlüsse zum Erden und Kurzschließen	892
12.4.6	Trenneinrichtungen	892
12.4.6.1	Isolierender Sektionswechsel	892
12.4.6.2	Streckentrenner	892
12.4.7	Oberleitungsübergänge und Abdeckung	892
12.5	Dritte-Schiene-Anlagen	894
12.5.1	Aufgaben und Anforderungen	894
12.5.2	Stützpunkte	895
12.5.3	Stromschienenprofile und Schutzabdeckungen	896
12.5.4	Mechanische Verbindungen und Bauteile	898
12.5.4.1	Stromschienenstoß	898
12.5.4.2	Stromschienenauflauf, Sektionswechsel und Weichen	899
12.5.4.3	Dehnstoß	899
12.5.4.4	Festpunkt	900
12.5.5	Elektrische Verbindungen	900
12.5.5.1	Strombelastbarkeit	900
12.5.5.2	Einspeisung von Dritte-Schiene-Anlagen	900
12.5.5.3	Stromverbinder zwischen Stromschienen und Sektionen	901
12.5.6	Trennungen	901
12.5.7	Trennschalter und Antriebe	902
12.6	Prüfung von Bauteilen und Baugruppen	902
12.6.1	Einleitung	902
12.6.2	Klemmen, Armaturen und Verbindungsteile	903
12.6.2.1	Typprüfung	903
12.6.2.2	Stichprobenprüfung	905
12.6.2.3	Stückprüfung	907
12.6.3	Fahrdrähte und andere Leiter	907
12.6.4	Nachspanneinrichtungen	907
12.6.5	Hänger	908
12.6.6	Elektrische Verbindungen	909
12.6.7	Isolatoren	910
12.6.8	Streckentrenner	910
12.6.8.1	Typprüfung	910
12.6.8.2	Stichproben und -Stückprüfungen	911
12.6.9	Oberleitungstrennschalter und Antriebe	912
12.7	Literatur	912
13	Planung von Fahrleitungen	915
13.0	Symbole und deren Bedeutung	915
13.1	Begriffe	919
13.2	Bundesverkehrswegeplan und Planfeststellung	921
13.3	Ausschreibungsverfahren	922
13.4	Entwicklungs-, Planungs- und Errichtungsprozess	924
13.4.1	Projektphasen und deren Inhalte	924
13.4.2	Systementwurf	924
13.4.3	Basiskonstruktion	925
13.4.4	Planung	926
13.4.4.1	Grundlagen	926

13.4.4.2	Vorplanung	926
13.4.4.3	Entwurfsplanung	928
13.4.4.4	Ausführungsplanung	928
13.4.4.5	Qualitäts- und Planprüfung	928
13.4.4.6	Zeitplan für den Entwicklungs- und Planungsprozess	930
13.5	Grundlagen und Ausgangsdaten für die Planung	930
13.5.1	Allgemeines	930
13.5.2	Allgemeine Anforderungen und Kenndaten	930
13.5.3	Planungsdokumente in Abhängigkeit zur Streckenart	933
13.5.3.1	Elektrifizierung von Neubaustrecken	933
13.5.3.2	Elektrifizierung von Bestandsstrecken mit Gleisumbauabschnitten	934
13.5.3.3	Elektrifizierung von Strecken des Transeuropäischen Eisenbahnnetzes	934
13.5.3.4	Elektrifizierung von Nahverkehrsstrecken	935
13.6	Planungsdokumente	935
13.6.1	Grundlagen	935
13.6.2	Erläuterungsbericht	935
13.6.3	Lageplan	939
13.6.3.1	Ziele und Inhalte	939
13.6.3.2	Oberleitungssymbole	941
13.6.3.3	Gleise und Topografie	941
13.6.3.4	Längsspannweite	942
13.6.3.5	Fahrdrathöhe	943
13.6.3.6	Fahrdrachtseitenlage	945
13.6.3.7	Radiale Fahrdrachtverschiebung auf dem Stromabnehmer	947
13.6.3.8	Fahrdrachtseitenlage und Seitenhalterlänge	951
13.6.3.9	Tragseilhöhe und -seitenlage	952
13.6.3.10	Fahrleistungsstützpunkte und Mastpositionen	953
13.6.3.11	Einzelmasten	955
13.6.3.12	Flexible Quertragwerke	955
13.6.3.13	Mehrgleisausleger	956
13.6.3.14	Joche	956
13.6.3.15	Tunnelstützpunkte	956
13.6.3.16	Nachspannlängen auf offener Strecke und im Tunnel	957
13.6.3.17	Fahrdrathöhen- und seitenlage in Überlappungen	960
13.6.3.18	Isolatoren in Überlappungen	963
13.6.3.19	Örtliche Lage der Überlappungen	963
13.6.3.20	Vereinfachte isolierte Überlappung	965
13.6.3.21	Planung der Nachspanneinrichtungen	965
13.6.3.22	Schalter, Schaltergestänge und Schalterantrieb	969
13.6.3.23	Schaltpläne	972
13.6.3.24	Elektrische Verbindungen	973
13.6.3.25	Anordnung von Leitungen in Mehrspannungsanlagen	973
13.6.3.26	Rückstromführung und Bahnerdung	974
13.6.3.27	Ausführung von Lageplänen	975
13.6.4	Querprofile	976
13.6.4.1	Ziel und Inhalt	976
13.6.4.2	Mastarten	976
13.6.4.3	Mastbild	978
13.6.4.4	Oberleitungsschalter und Schalterleitungen	978
13.6.4.5	Einpassen des Mastes ins Querprofil und Ermittlung der Mastlänge	980
13.6.4.6	Auslegerberechnung	981

13.6.4.7	Mast- und Fundamentwahl	982
13.6.4.8	Quertragwerke	983
13.6.4.9	Joche	984
13.6.5	Längsprofile	984
13.6.5.1	Inhalt	984
13.6.5.2	Hängerberechnung und -anordnung	984
13.6.5.3	Kettenwerksabsenkungen	986
13.6.5.4	Kettenwerksanhebungen	987
13.6.6	Bahnenergieleitungen	987
13.6.6.1	Ziele	987
13.6.6.2	Zwischen- und Endverankerungen	987
13.6.6.3	Kreuzungen von BEL mit baulichen Anlagen	989
13.6.6.4	Mehrfachisolation	991
13.6.6.5	Seiltyp und Zugkraft	991
13.6.6.6	Aufhängung der BEL	992
13.6.6.7	Leitungsführungen an Masten	993
13.6.6.8	Übergänge vom Leiterseil zum Kabel und Kabellängen von BEL	995
13.6.6.9	Höhenplan für Bahnenergieleitungen	995
13.6.6.10	Abstandnachweise	996
13.6.7	Bahnstromleitungen	1001
13.6.8	Schaltschemata	1001
13.6.8.1	Grundlagen	1001
13.6.8.2	Streckenspeiseplan	1002
13.6.8.3	Schaltplan der Oberleitung	1003
13.6.8.4	Betriebs- und Kurzschlussstromdiagramm	1004
13.6.8.5	Bahnerdung von Schallschutzwänden	1005
13.6.8.6	Werkstätten und Behandlungsanlagen	1006
13.6.8.7	Schalteranordnung an Tunnelportalen	1007
13.7	Zwangspunkte für die Bespannung	1007
13.7.1	Allgemeines	1007
13.7.2	Bespannung von Weichen	1008
13.7.2.1	Bezeichnung und Darstellung von Weichen in Plänen	1008
13.7.2.2	Klemmenfreier Raum	1010
13.7.2.3	Anforderungen an Weichenbespannungen	1012
13.7.2.4	Prinzipien der Weichenbespannung	1014
13.7.2.5	Fahrdrathöhen im Weichenbereich	1016
13.7.2.6	Anordnung von Wechselhängern im Weichenbereich	1020
13.7.2.7	Profolfreiheit der Wippen	1020
13.7.2.8	Ablauf der Planung kreuzender Weichenbespannungen	1021
13.7.2.9	Planungsschritte tangentialer Weichenbespannungen	1022
13.7.2.10	Tangentiale Weichenbespannung als elektrische Trennung	1029
13.7.2.11	Maststandorte im Weichenbereich	1031
13.7.2.12	Abstände zwischen den Weichenanfängen bei Überleitungen und Abzweigen	1031
13.7.3	Oberleitungen unter Bauwerken	1032
13.7.3.1	Vorzugsvarianten	1032
13.7.3.2	Alternativen zur Führung von Fahrleitungen unter Bauwerken	1042
13.7.4	Oberleitungen über Bauwerken	1043
13.7.5	Oberleitungen an Bahnübergängen	1045
13.7.6	Bahnenergieleitungen an Bahnübergängen	1047
13.7.7	Bahnenergieleitungen über Straßen- und Fußgängerbrücken	1047
13.7.8	Anordnung von Trennstellen	1047

13.7.8.1	Anforderungen	1047
13.7.8.2	Elektrische Abstände	1048
13.7.8.3	Anordnung von Phasentrennstellen oder Schutzstrecken	1048
13.7.8.4	Systemtrennstellen zwischen unterschiedlichen Stromarten	1051
13.7.9	Sicht auf Signale der Nah- und Fernverkehrsbahnen	1052
13.7.10	Signale für die elektrische Traktion	1052
13.7.11	Kreuzungen von Leitungen	1052
13.7.12	Anordnung von Masten auf Bahnsteigen	1053
13.8	Planung von Stromschienenoberleitungen	1054
13.8.1	Grundlagen	1054
13.8.2	Fahrdraht	1055
13.8.3	Stromschienenprofil	1055
13.8.4	Durchhang der Stromschiene und Abstand der Stützpunkte	1056
13.8.5	Neigungen, Neigungswechsel und Seitenlage von Stromschienen	1056
13.8.6	Sektionslänge	1058
13.8.7	Überlappungen	1059
13.8.8	Festpunkt	1059
13.8.9	Weichenbespannung	1060
13.8.10	Übergänge zwischen starren Stromschienen und flexiblen Oberleitungen	1060
13.8.11	Kontaktkräfte	1063
13.8.12	Zugkräfte	1063
13.8.13	Stützpunkte	1064
13.8.14	Erdungsstützpunkte	1065
13.8.15	Vogelschutz	1065
13.8.16	Umgebungsbedingungen und Korrosionsschutz	1066
13.8.17	Toleranzen	1066
13.8.18	Vorteile und Nachteile von Stromschienenoberleitungen	1066
13.8.19	Anwendungen	1068
13.9	Maßnahmen zum Schutz gegen elektrischen Schlag	1068
13.9.1	Elektrische Mindestabstände zwischen Anlagenteilen	1068
13.9.2	Elektrische Mindestabstände zu Personen	1069
13.9.2.1	Grundlagen	1069
13.9.2.2	Schutz gegen direktes Berühren	1070
13.9.2.3	Schutz durch Abstand	1072
13.9.2.4	Methoden zur Bestimmung der Reichweite von Personen	1072
13.9.2.5	Schutz durch Hindernisse oder Schranken	1072
13.9.2.6	Anforderungen für elektrische Schutzhindernisse	1072
13.9.2.7	Schutz gegen indirektes Berühren	1078
13.10	Sichtbarkeit der Oberleitung	1079
13.11	Literatur	1079
14	Tragwerke	1087
14.0	Symbole und deren Bedeutung	1087
14.1	Quertrageinrichtungen und Seitenauszüge	1092
14.1.1	Quertrageinrichtungen	1092
14.1.2	Rohrschwenkausleger	1092
14.1.3	Ausleger über mehrere Gleise	1092
14.1.4	Flexible Quertragwerke	1093
14.1.5	Joche	1093
14.2	Maste	1094
14.2.1	Mastarten	1094
14.2.2	Ausführungen und Werkstoffe	1095

14.3	Einwirkungen auf Oberleitungsanlagen	1097
14.3.1	Einführung	1097
14.3.2	Einteilung der Einwirkungen	1098
14.3.3	Ständige Lasten	1098
14.3.4	Veränderliche Lasten	1099
14.3.4.1	Allgemeines	1099
14.3.4.2	Windlasten auf Leiter	1099
14.3.4.3	Windlasten auf Isolatoren und andere Leitungsarmaturen	1100
14.3.4.4	Windlasten auf Gitterfachwerke	1100
14.3.4.5	Windlasten auf Flachmaste und einstielige, lotrechte Beton- und Stahlvollwandmaste	1101
14.3.4.6	Eislasten	1101
14.3.4.7	Gleichzeitige Wirkung von Wind und Eis	1102
14.3.4.8	Temperatureinwirkungen	1103
14.3.5	Lasten aus Errichtung und Instandhaltung	1103
14.3.6	Ausnahmelasten	1103
14.3.7	Sonderlasten	1103
14.3.7.1	Erdbebenlasten	1103
14.3.7.2	Aerodynamische Lasten in Tunneln	1103
14.3.7.3	Weitere Sonderlasten	1104
14.4	Grundlagen der Bemessung auf der Basis von EN 50119	1104
14.4.1	Lastfälle	1104
14.4.2	Bemessungskonzept	1105
14.4.3	Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen	1106
14.4.4	Teilsicherheitsbeiwerte für Materialien	1107
14.5	Bemessung der Quertragwerke	1107
14.5.1	Einführung	1107
14.5.2	Ausleger	1107
14.5.2.1	Belastungen und Schnittkräfte	1107
14.5.2.2	Bemessung der Rohre eines Stahlauslegers nach EN 1993-1-1 im GZT	1109
14.5.2.3	Bemessung der Rohre eines Aluminiumauslegers nach EN 1999-1-1 im GZT	1110
14.5.2.4	Bemessung eines Auslegers aus GFK-Stäben oder GFK-Rohren im GZT	1111
14.5.2.5	Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	1114
14.5.3	Flexible Quertragwerke	1114
14.5.3.1	Einführung	1114
14.5.3.2	Belastungen, Schnittkräfte und Durchhang der Quertragseile	1114
14.5.3.3	Bestimmung der Mastlängen des Querfeldes	1116
14.5.3.4	Belastungen und Schnittkräfte der Richtseile	1116
14.5.3.5	Bemessung der Quertragseile und Richtseile	1117
14.5.4	Flachkettenverspannungen	1118
14.6	Bemessung der Maste	1119
14.6.1	Einführung	1119
14.6.2	Bestimmung der Mastlängen	1119
14.6.3	Belastungen, Schnittkräfte und -momente	1120
14.6.4	Bemessung der Tragwerkskomponenten	1121
14.6.4.1	Einführung	1121
14.6.4.2	Stahlgittermaste	1122
14.6.4.3	Rahmenflachmaste	1126
14.6.4.4	Maste aus Doppel-T-Trägern	1126
14.6.4.5	Stahlbetonmaste	1129
14.6.4.6	Gebrauchstauglichkeit	1130
14.6.4.7	Ermüdung	1132

14.7	Baugrund	1132
14.7.1	Einführung	1132
14.7.2	Gewachsener Boden	1133
14.7.2.1	Klassifizierung	1133
14.7.2.2	Nichtbindige, rollige Böden	1133
14.7.2.3	Bindige Böden	1133
14.7.2.4	Gemischtkörnige Böden	1133
14.7.2.5	Organische Böden	1134
14.7.3	Fels	1134
14.7.4	Geschütteter Boden	1134
14.7.5	Baugrunderkundung	1135
14.7.6	Gewinnung von Bodenproben	1135
14.7.6.1	Einführung	1135
14.7.6.2	Probebohrungen	1136
14.7.6.3	Sondierbohrungen	1136
14.7.7	Sondierungen	1136
14.7.7.1	Einführung	1136
14.7.7.2	Rammsonden nach EN ISO 22476-2	1137
14.7.7.3	Standard Penetration Test	1137
14.7.7.4	Beurteilung und Klassifizierung von Fels	1137
14.7.7.5	Betonangreifende Wässer und Böden	1138
14.7.8	Auswertung der Bodenerkundung; Bodenkennwerte	1139
14.7.9	Praktische Anwendungen	1140
14.8	Gründungen	1140
14.8.1	Grundlagen der Auslegung	1140
14.8.2	Blockgründungen mit tragenden Seitenflächen	1141
14.8.3	Blockgründungen mit Stufen	1145
14.8.4	Rammpfahlgründungen	1148
14.8.5	Gründungen für Mastanker	1151
14.9	Beispiel für Bemessung der Ausleger, Maste und Gründungen	1153
14.9.1	Oberleitungsdaten	1153
14.9.2	Lasten	1154
14.9.3	Bemessung des Mastes	1154
14.9.4	Bemessung des Auslegers	1157
14.9.5	Bemessung Gründung	1160
14.10	Literatur	1162
15	Ausführungen für besondere Anwendungen	1165
15.1	Einführung	1165
15.2	Instandhaltungswerke und -werkstätten	1165
15.3	Wehrkammertore zum Tunnelverschluss	1170
15.4	Systemtrennstellen	1170
15.4.1	Einführung und Anforderungen	1170
15.4.2	Systemtrennstellen auf freien Strecken	1171
15.4.3	Systemwechselbahnhöfe	1173
15.4.4	AC- und DC-Triebfahrzeuge auf denselben Gleisen	1174
15.5	Bewegliche Brücken	1175
15.5.1	Allgemeines	1175
15.5.2	Klappbrücken	1176
15.5.3	Drehbrücken	1178
15.5.4	Hubbrücken	1180
15.5.5	Elektrische Schaltungen und Signalisierung	1181

15.6	Niveaugleiche Kreuzungen von Bahnlinien unterschiedlicher Stromarten	1182
15.6.1	Kreuzungen zwischen Vollbahnen und Straßenbahnen	1182
15.6.2	Kreuzungen zwischen Straßenbahn- und Obusanlagen	1184
15.7	Niveaugleiche Straßenkreuzungen	1186
15.7.1	Ausführungen für alltägliche und überhöhte Straßentransporte	1186
15.7.2	Anordnung von Lücken in der Oberleitung	1187
15.7.3	Vorübergehender Anhub der Oberleitung durch elektrischen Antrieb	1187
15.7.4	Vorübergehender Anhub oder Entfernung der Oberleitungen mit manuellen Methoden	1190
15.8	Containerbahnhöfe, Lade- und Kontrollgleise, Grubenbahnen	1190
15.8.1	Schwenkbare Oberleitungen	1190
15.8.2	Schaltungen für Lade- und Kontrollgleise	1192
15.8.3	Schwenkstrassen und seitliche Oberleitungen	1193
15.9	Oberleitungen für Nutzfahrzeuge im Tagebau und auf Straßen	1193
15.9.1	Oberleitung für Kipper im Tagebau	1193
15.9.2	Oberleitung für Lastkraftwagen und Busse auf Verkehrsstrassen	1194
15.10	Fahrleitung in historischen Stadtzentren	1197
15.10.1	Oberleitungen mit architektonischer Gestaltung	1197
15.10.2	Ladestationen für Fahrzeuge mit Energiespeichern	1198
15.10.3	Bodenstromschiene	1199
15.11	Literatur	1200
16	Errichtung und Abnahme	1203
16.0	Symbole und deren Bedeutung	1203
16.1	Grundlagen	1204
16.1.1	Einführung	1204
16.1.2	Deutschland	1205
16.1.3	Österreich	1207
16.2	Bauablauf- und Terminplanung	1207
16.2.1	Einführung	1207
16.2.2	Einordnung der Bauablauf- und Terminplanung	1208
16.2.3	Terminplanung	1208
16.2.4	Formen des Bauablaufes	1210
16.2.5	Methode zur Planung des Bauablaufes	1211
16.2.6	Ablaufkontrolle im Rahmen der technischen Nachkalkulation	1214
16.2.7	Erhebung von Aufwandswerten	1216
16.2.8	Produktivitätsverluste	1217
16.3	Vorbereitende Maßnahmen	1218
16.3.1	Einführung	1218
16.3.2	Baugrunduntersuchungen	1220
16.3.3	Kampfmittelbeseitigung	1220
16.3.4	Anlage und Bezug der Baustelleneinrichtung sowie Anlieferung der Komponenten	1220
16.3.5	Einmessen der Fundamentstandorte	1221
16.3.6	Bodenuntersuchung (Suchschachtungen)	1223
16.4	Prozesse der Hauptbauphase	1224
16.4.1	Einleitung	1224
16.4.2	Herstellen der Gründungen	1226
16.4.2.1	Einleitung	1226
16.4.2.2	Tiefbau	1229
16.4.2.3	Ausbringung von Material	1230
16.4.2.4	Vorbereiten der Gründungen und Erdung	1232
16.4.2.5	Betonierung und Nacharbeiten	1234
16.4.2.6	Gründungen der ÖBB	1236

16.4.3	Ausrüsten, Stellen und Ausrichten der Oberleitungsmaste	1236
16.4.3.1	Einleitung	1236
16.4.3.2	Mastausrüstung mit Anbauteilen	1237
16.4.3.3	Maststellen und Ausrichten	1240
16.4.3.4	Mastsysteme der ÖBB	1245
16.4.3.5	Fazit	1246
16.4.4	Erdung	1246
16.4.5	Bahnenergieleiter -und Rückleiterzug	1249
16.4.5.1	Einführung	1249
16.4.5.2	Verlegung der Leiterseile über Seilwinde	1249
16.4.5.3	Verlegung der Leiterseile mit Hilfe von Hubschraubern	1252
16.4.5.4	Verlegung der Leiterseile mit Hilfe von Seilwinden	1252
16.4.5.5	Verlegung der Leiterseile ohne spezialisierte Geräte und Werkzeuge	1253
16.4.6	Montage der Quertrageinrichtungen	1253
16.4.6.1	Mehrgleisausleger, Joche und Querfelder	1253
16.4.6.2	Auslegerherstellung und -montage	1256
16.4.7	Kettenwerksmontage	1257
16.4.7.1	Einführung	1257
16.4.7.2	Montage von Festpunktseilen	1259
16.4.7.3	Verlegen von Tragseil und Fahrdraht	1260
16.4.7.3.1	Einleitung	1260
16.4.7.3.2	Mechanisierte Montage	1261
16.4.7.3.3	Einfluss der Montagetechnologie	1262
16.4.7.3.4	Einfluss der Schichtlängen und Sperrpausen	1263
16.4.7.4	Einmessen der Tragseillage	1264
16.4.7.5	(Y-Beiseil-) und Hängereinbau	1264
16.4.7.6	Regulierung der Oberleitung und Komponenteneinbau	1267
16.4.7.7	Sonderfälle	1268
16.4.8	Interne Qualitätsprüfung	1268
16.5	Erfahrungen zur Montage von Oberleitungen	1269
16.5.1	Hochgeschwindigkeitsoberleitungen	1269
16.5.1.1	Einführung	1269
16.5.1.2	Montage von Fahrdrähten	1269
16.5.2	Streckentrenner	1271
16.5.3	Weichenkettenwerke	1272
16.5.4	Kriechen von Fahrdraht und Tragseil	1274
16.5.5	Montagekonzepte	1277
16.6	Montage von Stromschienenanlagen	1278
16.7	Montage von Stromschienenoberleitungen	1280
16.8	Mittel zum Errichten	1283
16.8.1	Allgemeines	1283
16.8.2	Baumaschinen, Baugeräte und Sonderfahrzeuge	1283
16.8.2.1	Straßenfahrzeuge	1283
16.8.2.2	Schienenfahrzeuge	1285
16.8.2.3	Zweiwege-Fahrzeuge auf Basis von LKW-Fahrgestellen	1290
16.8.2.4	Zweiwege-Hubarbeitsbühnen	1295
16.8.2.5	Arbeitsbühnen und Plattformen für Schienenfahrzeuge	1295
16.8.2.6	Hubschrauber	1296
16.8.3	Baustellenausrüstung	1296
16.8.3.1	Kommunikationsmittel	1296
16.8.3.2	Signal- und Sicherheitsausrüstung	1296

16.8.3.3	Beleuchtungsmittel	1296
16.8.3.4	Leitern	1296
16.8.4	Arbeitsschutz	1297
16.8.4.1	Prüf- und Erdungsvorrichtungen für die Oberleitung	1297
16.8.4.2	Persönliche Schutzausrüstung	1298
16.8.5	Werkzeuge und Werkstattausrüstung	1298
16.8.5.1	Presswerkzeuge	1298
16.8.5.2	Spann- und Lastaufnahmemittel	1299
16.8.5.3	Werkstattausrüstung	1300
16.8.6	Messtechnik	1301
16.8.6.1	Einführung	1301
16.8.6.2	Messung der Mast- und Seitenhalterneigung	1301
16.8.6.3	Messung der Schichtdicke des Korrosionsschutzes	1302
16.8.6.4	Messung der Leiterzugkräfte	1302
16.8.6.5	Temperaturmessungen	1303
16.8.6.6	Messungen der Fahrdrähtlage	1304
16.9	Abnahme	1305
16.9.1	Allgemeines	1305
16.9.2	Aufgaben des Errichters und des Herstellers	1307
16.9.3	Aufgaben des Abnahmeingenieurs	1307
16.9.4	Vorbereitung des Abnahmeverfahrens	1308
16.9.5	Durchführung der Abnahme	1309
16.9.5.1	Allgemeines	1309
16.9.5.2	Fahrdrähtlagemessung	1310
16.9.5.3	Bauabnahmefahrt	1310
16.9.5.4	Dynamische Messfahrten	1311
16.9.5.5	Abnahmen interoperabler Strecken	1312
16.10	Inbetriebnahme	1314
16.10.1	Ablauf	1314
16.10.2	Verantwortlicher für die Inbetriebnahme	1314
16.10.3	Aufgaben der Benannten Stelle (NoBo)	1315
16.10.4	Aufgaben des Eisenbahn-Bundesamts	1315
16.11	TSI-Zertifizierung am Beispiel der Bauart Sicut SX in Dänemark	1316
16.11.1	Einführung	1316
16.11.2	Rechtliche Grundlagen	1316
16.11.3	Vertragliche Situation	1317
16.11.4	Zertifizierung der Interoperabilitätskomponente	1317
16.11.5	EG-Zertifizierung des Teilsystems	1317
16.11.6	Tests zur Inbetriebsetzung	1318
16.11.7	Messungen und Ergebnisse der Strecke Esbjerg–Lunderskov	1319
16.11.7.1	Allgemeines	1319
16.11.7.2	Befahrung	1319
16.11.7.3	EMV-Nachweise	1320
16.11.7.4	Messung der Berührungsspannungen	1321
16.11.7.5	Fazit	1321
16.11.8	Messungen und Ergebnisse der Strecke Kopenhagen–Ringsted	1321
16.11.8.1	Allgemeines	1321
16.11.8.2	Befahrung	1322
16.11.8.3	Betriebstest mit Ausfallszenarios	1324
16.11.8.4	Fazit	1324
16.11.9	Zusammenfassung	1324

16.12	Literatur	1326
17	Ausgeführte Anlagen	1331
17.0	Symbole und deren Bedeutung	1331
17.1	Arten der Bahnen und deren Fahrleitungen	1331
17.1.1	Fernverkehr	1331
17.1.2	Nahverkehr	1331
17.1.2.1	Verkehrsarten	1331
17.1.2.2	Regionalbahnen	1332
17.1.2.3	S-Bahnen	1332
17.1.2.4	Straßenbahnen	1332
17.1.2.5	Stadtbahnen	1333
17.1.2.6	U-Bahnen	1333
17.1.2.7	Obus-Anlagen	1334
17.1.3	Industriebahnen	1335
17.1.3.1	Schienengebundene Bahnen	1335
17.1.3.2	Elektrisch angetriebene Lastkraftwagen in Minen	1336
17.1.3.3	Elektrisch angetriebene Nutzfahrzeuge auf Autobahnen und Bundesstraßen	1336
17.2	Anlagen des konventionellen Fernverkehrs	1338
17.2.1	DC-1,5-kV-Oberleitung Sicat SD für ProRail in den Niederlanden	1338
17.2.2	AC-15-kV-16,7-Hz-Oberleitung Sicat S1.0 Flughafenlinie Köln/Bonn, Deutschland	1339
17.2.3	AC-15-kV-16,7-Hz-Tunnel-Bauart Re 200, Deutschland	1340
17.2.4	AC-25-kV-50-Hz-Oberleitung Sicat SA, Rumänien	1340
17.2.5	2AC-50/25-kV-50-Hz-Oberleitung Sicat SX, Dänemark	1343
17.3	Anlagen des Hochgeschwindigkeitsverkehrs	1344
17.3.1	AC-15-kV-16,7-Hz-Oberleitung Re 250 Köln–Düren, Deutschland	1344
17.3.2	2AC-30/15-kV-16,7-Hz-Oberleitung S25, Norwegen	1344
17.3.3	AC-15-kV-16,7-Hz-Oberleitung Re 250 im Lötschberg-Tunnel, Schweiz	1346
17.3.4	AC-15-kV-16,7-Hz-Oberleitung Typ 2.1, Österreich	1347
17.3.5	AC-15-kV-16,7-Hz-Oberleitung Sicat H, Deutschland	1348
17.3.6	AC-15-kV-16,7-Hz-Oberleitung Re 330, Deutschland	1348
17.3.7	2AC-30/15-kV-16,7-Hz-Oberleitung SYT 15/15, Schweden	1349
17.3.8	2AC-25-kV-50-Hz-Oberleitung Sicat H der Strecke HSL ZUID, Niederlande	1350
17.3.9	2AC-25-kV-50-Hz-Oberleitung C 350 Motilla–Valencia, Spanien	1351
17.3.10	AC 25 kV 50 Hz and DC 1,5 kV overhead contact lines of SNCF, Frankreich	1352
17.3.11	2AC-25-kV-50-Hz-Oberleitung R1-350r von TUC RAIL, Belgien	1354
17.3.12	2AC-25-kV-50-Hz-Oberleitung Sicat H Beijing–Tianjin, China	1359
17.3.13	2AC-50/25-kV-50/60-Hz-Oberleitungen der Shinkansen, Japan	1359
17.4	Regionalbahnen	1365
17.4.1	DC-0,6-kV-Oberleitung Gotha–Tabarz, Deutschland	1365
17.4.2	AC-15-kV-16,7-Hz-Oberleitung Re 100 Borna–Geithain, Deutschland	1367
17.4.3	AC-25-kV-50-Hz-Oberleitung Sicat SA, South Rail Link, Taiwan	1367
17.5	S-Bahnen mit Oberleitungen	1368
17.5.1	AC-25-kV-50-Hz-Oberleitung PTA in Perth, Australien	1368
17.5.2	AC-25-kV-50-Hz-Oberleitung DMRC in New Delhi, Indien	1371
17.5.3	AC-15-kV-16,7-Hz Oberleitung ÖBB 1.2 Wien–Schwechat, Österreich	1374
17.5.4	AC-15-kV-16,7-Hz-S-Bahn-Oberleitung der DB, Deutschland	1374
17.5.5	DC-1,5-kV-Oberleitung der RER in Paris, Frankreich	1375
17.5.6	DC-1,5-kV-Oberleitung Santo Domingo, Dominikanische Republik	1376
17.5.7	S-Bahnen und Metros mit Dritter Schiene	1377
17.5.7.1	DC-1,2-kV-Dritte-Schiene S-Bahn Hamburg, Deutschland	1377
17.5.7.2	DC-0,75-kV-Dritte-Schiene der S-Bahn Berlin, Deutschland	1378

17.6	Stadtbahnen mit Oberleitung	1379
17.6.1	DC-0,75-kV-Oberleitung Houston, USA	1379
17.6.2	DC-0,75-kV-Stromschienen-Oberleitung Calgary, Kanada	1380
17.6.3	DC-0,75-kV-Dritte-Schiene BTS Bangkok, Thailand	1380
17.7	Straßenbahnen	1381
17.7.1	DC-0,75-kV-Oberleitung der Straßenbahn in Nürnberg, Deutschland	1381
17.7.2	DC-0,60-kV-Oberleitung der Straßenbahn in Leipzig, Deutschland	1382
17.8	U-Bahnen	1384
17.8.1	DC-1,5-kV-Stromschienenoberleitungen Santo Domingo	1384
17.8.2	DC-0,75-kV-Dritte Schiene Nürnberg, Deutschland	1385
17.9	Obus-Anlagen	1387
17.9.1	DC-0,75-kV-Obus-Oberleitung Eberswalde, Deutschland	1387
17.10	Industriebahnen	1389
17.10.1	AC-6,6-kV-50-Hz-Oberleitung Hambach, Deutschland	1389
17.10.2	DC-2,4-kV-Fahrleitungen im LEAG-Tagebau, Brandenburg, Deutschland	1392
17.11	Literatur	1392
18	Betrieb und Instandhaltung	1395
18.0	Symbole und deren Bedeutung	1395
18.1	Betrieb	1397
18.1.1	Begriffe	1397
18.1.2	Elektrotechnische Verhaltensnormen und Richtlinien	1398
18.1.3	Allgemeine Grundsätze	1399
18.1.3.1	Einführung	1399
18.1.3.2	Sicherer Betrieb	1399
18.1.3.3	Elektrische Sicherheit bei Arbeiten	1399
18.1.3.4	Personal	1400
18.1.3.5	Organisation	1403
18.1.3.6	Kommunikation	1404
18.1.3.7	Arbeitsstelle	1404
18.1.3.8	Werkzeuge, Ausrüstungen, Schutz- und Hilfsmittel	1405
18.1.3.9	Schaltpläne und Unterlagen	1405
18.1.3.10	Schilder	1405
18.1.3.11	Maßnahmen für den Notfall	1405
18.1.4	Übliche Betriebsvorgänge und Arbeitsmethoden	1405
18.1.4.1	Übliche Betriebsvorgänge	1405
18.1.4.2	Anforderungen an Arbeitsmethoden	1406
18.1.4.3	Arbeiten im spannungsfreien Zustand	1407
18.1.4.4	Arbeiten in der Nähe unter Spannung stehender Teile	1409
18.1.4.5	Arbeiten unter Spannung	1412
18.1.5	Ausbildung und Unterweisung des Personals	1413
18.1.6	Aufgaben des Infrastrukturbetreibers für den Betrieb	1414
18.1.7	Schalten und Erden	1414
18.1.7.1	Einführung	1414
18.1.7.2	Einrichtung einer Arbeitsstelle	1414
18.1.7.3	Schalten	1416
18.1.7.4	Erden	1417
18.1.7.5	Wiedereinschaltbereitschaft und Einschalten	1417
18.1.7.6	Schaltleitstellen und Zentralschaltstellen	1418
18.1.8	Unregelmäßigkeiten und deren Erfassung	1419
18.1.9	Automatisierte Erdungsanlagen für Fahrleitungen	1419
18.1.9.1	Allgemeines	1419

18.1.9.2	Automatisierte Notfallerdung am Beispiel Deutschland	1420
18.1.9.3	Nicht automatisierte Notfallerdung in Tunneln in den Niederlanden	1422
18.2	Beanspruchung, Verschleiß und Alterung	1423
18.2.1	Einleitung	1423
18.2.2	Beanspruchungen, Lebenszyklus und technische Diagnostik	1423
18.2.2.1	Analyse von Beanspruchungen	1423
18.2.2.2	Einteilung der Bauteile	1425
18.2.2.3	Analyse des Lebenszyklus von Oberleitungen	1426
18.2.2.4	Rückschlüsse auf die Technische Diagnostik	1426
18.2.3	Betonmasten und -fundamente	1428
18.2.4	Stahlmasten, Ausleger und andere Trageinrichtungen	1430
18.2.4.1	Einführung	1430
18.2.4.2	Korrosionsschutz von Stahlteilen	1431
18.2.4.3	Ausleger	1432
18.2.5	Leitungen, Tragseile, Hänger und Stromverbinder	1434
18.2.5.1	Einführung	1434
18.2.5.2	Hänger	1437
18.2.5.3	Stromverbinder	1441
18.2.6	Fahrdrähte	1445
18.2.6.1	Einführung	1445
18.2.6.2	Mechanischer Verschleiß	1446
18.2.6.3	Elektrischer Verschleiß	1447
18.2.6.4	Zulässiger Verschleiß	1449
18.2.6.5	Berechnung des Fahrdrahtverschleißes	1450
18.2.6.6	Allgemeine Erfahrungen	1452
18.2.6.7	Erfahrungen bei DC-Anwendungen	1456
18.2.6.8	Erfahrungen mit Oberleitungen auf Hochgeschwindigkeitsstrecken	1461
18.2.6.9	Prüfstandsversuche	1465
18.2.6.10	Verschleiß abhängig von den Schleifstücken	1467
18.2.7	Isolatoren	1467
18.2.7.1	Allgemeines	1467
18.2.7.2	Porzellanisolatoren	1471
18.2.7.3	Gießharzisolatoren	1472
18.2.7.4	Verbundisolatoren	1472
18.2.7.5	Glasfaserverstärkter Kunststoff bei Auslegern	1474
18.2.8	Trennschalter und Schalterantriebe	1474
18.2.9	Streckentrenner	1476
18.2.9.1	Allgemeines	1476
18.2.9.2	Untersuchungen an Streckentrennern in DC-Nahverkehrsanlagen	1478
18.2.9.3	Fahrzeugstrombegrenzung an Zwangspunkten der Fahrleitung	1488
18.2.9.4	Kontaktgüte bei der Streckentrennerbefahrung in DC-Nahverkehrsanlagen	1490
18.2.9.5	Streckentrenner bei Stromschienenoberleitung	1493
18.2.10	Nachspannvorrichtungen	1493
18.2.10.1	Gewichtsbasierte Nachspannvorrichtungen mit Radspannern	1493
18.2.10.2	Gewichtsbasierte Nachspannvorrichtungen mit Rollenradspannern	1499
18.2.10.3	Radspanner mit Kettengetriebe	1499
18.2.10.4	Gewichtslose Nachspannvorrichtungen mit Federn	1500
18.2.10.5	Alternative Nachspannvorrichtungen	1502
18.2.10.6	Auswirkungen des Wirkungsgrades von Nachspanneinrichtungen auf die Fahrdrahtlage	1503
18.2.11	Rückstromführung, Potentialausgleich und Bahnerdung	1503
18.2.12	Stromschienenoberleitung	1504

18.2.13	Stromschienenanlagen als dritte oder vierte Schiene	1507
18.3	Instandhaltung	1508
18.3.1	Umfang	1508
18.3.2	Oberleitungsanlagen	1509
18.3.2.1	Einführung	1509
18.3.2.2	Zustandsprüfung	1510
18.3.2.3	Funktionsprüfungen	1511
18.3.2.4	Außerordentliche Prüfungen	1513
18.3.2.5	Vollinspektion	1514
18.3.2.6	Inspektionsplan	1515
18.3.2.7	Mängelbeseitigung durch Instandsetzung	1516
18.3.2.8	Teilerneuerung und Verbesserung	1516
18.3.2.9	Organisation der Instandhaltung	1517
18.3.2.10	Planung und Dokumentation der Instandhaltung	1520
18.3.2.11	Zeitbedarf und Nebenzeiten	1521
18.3.2.12	Instandhaltung auf stark frequentierten Strecken	1522
18.3.2.13	Instandhaltung bei der SBB	1523
18.3.2.14	Instandhaltung bei der ÖBB	1525
18.3.2.14.1	Einführung	1525
18.3.2.14.2	Instandhaltung von Oberleitungsanlagen	1525
18.3.2.14.3	Besichtigen	1527
18.3.2.14.4	Messfahrten	1528
18.3.2.14.5	Ordentliche Untersuchungen und außerordentliche Untersuchungen	1528
18.3.2.14.6	Anlagenzustandsbewertung und -zustandsnoten	1528
18.3.2.14.7	Entstörungen	1528
18.3.2.14.8	Kurzschlüsse in Oberleitungsanlagen	1530
18.3.2.14.9	Moderne Schienenhilfsfahrzeuge	1531
18.3.2.14.10	Zusammenfassung und Ausblick	1532
18.3.3	Stromschienenoberleitung	1533
18.3.4	Bodennahe Stromschienen	1533
18.3.5	Zuverlässigkeit & Statistik	1534
18.3.5.1	Bewertung der Zuverlässigkeit	1534
18.3.5.2	Zuverlässigkeitstheorie	1535
18.3.5.3	Verfügbarkeitstheorie	1537
18.3.5.4	Untersuchungen zur Störungsdauer	1539
18.3.5.5	Untersuchungen zu Ausfallraten und Verfügbarkeiten	1542
18.3.5.6	Statistische Erfassung und Auswertung von Störungen	1544
18.3.5.7	Statistische Erfassung und Auswertung von Kurzschlüssen im Fernverkehr	1547
18.3.5.8	Statistische Erfassung und Auswertung von Kurzschlüssen und Schutzauslösungen im Nahverkehr	1558
18.3.5.9	Zusammenfassung	1559
18.3.6	Diagnostik, Mess- und Diagnosemittel	1560
18.3.6.1	Grundlagen der Diagnostik	1560
18.3.6.2	Grundlagen der Mess- und Diagnosemittel	1560
18.3.6.3	Messungen der Fahrdrähtlage	1560
18.3.6.4	Verschleißmessung von Fahrdrähten	1562
18.3.6.5	Lichttraumprofil- und Gleisinfrasturkturmessung	1565
18.3.6.6	Kontaktlose Inspektion auf Basis von Messsystemen auf Seriefahrzeugen	1566
18.3.6.7	Anhubmessung	1567
18.3.6.8	Fahrleitungsüberwachung	1569
18.3.6.9	Messung der Fahrdrähtverschiebung durch Wind	1572

18.3.6.10	Überwachungsanlage für Stromabnehmer	1573
18.3.6.11	Überwachung des Schienenpotenzials in DC-Bahnstromanlagen	1579
18.3.6.12	Wärmebild-Kamera-Diagnose / Thermografie	1581
18.3.6.13	Kontaktkraftmessung	1585
18.3.6.14	Lichtbogenmessung	1591
18.3.6.15	Georeferenziertes Monitoring von Oberleitungen	1592
18.3.6.16	Einsatz von Drohnen	1594
18.3.6.17	Diagnose von Dritte-Schienen-Anlagen	1596
18.4	Rückbau und Erneuerung	1596
18.4.1	Einführung	1596
18.4.2	Rückbau	1598
18.4.3	Recyclinggerechtes Aufbereiten und Entsorgen	1598
18.5	Signale der elektrischen Zugförderung	1599
18.6	Lebenszyklus-Betrachtungen	1600
18.6.1	Einleitung	1600
18.6.2	Grundlagen der Lebenszykluskostenrechnung	1602
18.6.3	Modellierung der Lebenszykluskosten von Oberleitungsanlagen	1603
18.6.3.1	Lebenszyklusphasen einer Oberleitungsanlage	1603
18.6.3.2	Konzeption des LCC-Modells	1604
18.6.3.3	Module des LCC-Modells	1605
18.6.3.4	Eingangsdatenerzeugung mit Fokus auf die Schätzklausur	1605
18.6.3.5	Parameterfestlegung und Szenariowahl	1606
18.6.3.6	Ergebnisse des Variantenvergleiches Re 200 mit Sicut SX	1607
18.6.3.7	Einordnung der Ergebnisse	1612
18.6.3.8	Zusammenfassung	1612
18.6.4	Modellierung der Lebenszykluskosten auf Komponentenebene	1613
18.6.4.1	Einleitung	1613
18.6.4.2	Fahrdrähte	1613
18.6.4.3	Fahrdrahtverlegung	1614
18.6.4.4	Stromschienenoberleitung	1614
18.7	Literatur	1615
Anhang: Normen		1625
Stichwortverzeichnis		1631

1 Bahnenergieversorgung

1.0 Symbole und Abkürzungen

Symbol	Bezeichnung	Einheit
ADIF	Administrador de Infraestructuras Ferroviarias	–
AES	Automatisches Erdungssystem	–
AGP	Abzweiggebundene Prüfung	–
AT	Autotransformator	–
ATS	Autotransformatorenstationen	–
AWE	Automatische Wieder-Einschaltung	–
Bf	Bahnhof	–
BBS	Betriebssammelschiene	–
BUW	Blockunterwerk	–
DCF77	Deutscher Langwellensender bei Frankfurt mit der Trägerfrequenz 77,5 kHz	–
DZÜ	Digitale Zählerstandsübertragung	–
EL-Signale	Fahrleitungssignale am Gleis, die den elektrischen Betrieb regeln	–
FM	Feldmodul	–
FWM	Fernwirkmodul	–
Gkw	Gemeinschaftskraftwerk	–
GS	Synchrongenerator	–
GR	Gleichrichter	–
HSL	Hauptschaltleitung	–
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor (Bipolartransistor mit isolierter Gate-Elektrode)	–
KRITIS	Kritische Infrastrukturen gemäß §2 BSI-Gesetz	–
KS	Kurzschließer	–
Ks	Kuppelstelle	–
Kw	Kraftwerk	–
LCU	Local Control Unit (Lokale Steuereinheit)	–
L1 (2,3)	Außenleiter	–
M	Drehmoment	kNm
MMDC	Modular Multilevel Direct Converter (Multilevel-Direktumrichter)	–
MS	Synchronmotor	–
NF	Negativ Feeder (negativer Speiseleiter)	–
NSS	Nullschienenschrank	–
OL	Oberleitung	–
OLPA	Oberleitungs-Prüfautomatik	–
OLRA	Oberleitungs-Rückspannungsprüfautomatik	–
OLSP	Oberleitungs-Spannungsprüfung	–
OLWA	Oberleitungs-Wiedereinschaltautomatik	–
ÖBB	Österreichische Bundesbahn	–
P	Leistung	kW
PF	Positiv Feeder (positiver Speiseleiter)	–
PSG	Parallelschaltgerät	–
PSS	Prüfsammelschiene	–
PWR	Pulsleichrichter	–
RSS	Regelschutzstrecke	–
RSSA	Regelschutzstreckenautomatik	–
S''_K	Kurzschlussleistung des Drehstromnetzes	MVA

Symbol	Bezeichnung	Einheit
S_l	Traktionsleistung	MVA
SBB	Schweizerische Bundesbahnen	–
SBS	Schaltebefehlsstelle	–
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition (Überwachung, Steuerung und Datenerfassung)	–
SCD	Short-Circuiting Device (Kurzschließeinrichtung)	–
SLT	Stationsleittechnik	–
S_p	Schaltposten	–
S_w	Schaltwerk	–
U_i	inverse Spannung	kV
$U_{\max 1}$	höchste Dauerspannung	V
$U_{\max 2}$	höchste nicht permanente Spannung	V
$U_{\max 3}$	Überspannungsspitze	V
$U_{\min 1}$	niedrigste Dauerspannung	V
$U_{\min 2}$	niedrigste nicht permanente Spannung	V
U_n	Nennspannung	kV
U_w	Unterwerk, Umspannwerk	–
VPN	Virtual Privat Network	–
WAN	Wide Area Network	–
Zes	Zentralschaltstelle	–
di/dt	Anstiegsgeschwindigkeit des Stromes	A/s
dUfw	dezentrales Umformerwerk	–
dUrw	dezentrales Umrichterwerk	–
f	Frequenz	Hz
n	Drehzahl	1/s, 1/min
n_u	Vielfaches der Nennspannung	–
p	Polpaarzahl	–
u_U	Spannungsunsymmetrie	%
zUfw	Zentrales Umformerwerk	–
zUrw	Zentrales Umrichterwerk	–
4QS	Vierquadrantensteller	–

1.1 Aufgaben der Bahnenergieversorgung

Elektrische Bahnen haben die Aufgabe, Personen und Güter mit Hilfe elektrischer Energie wirtschaftlich und umweltfreundlich zu transportieren. Im Hochgeschwindigkeitsbereich und im städtischen Nahverkehr sind elektrisch angetriebene Züge praktisch alternativlos. Die *Bahnenergieversorgung* soll den zuverlässigen Bahnbetrieb mit *elektrischen Zügen* ermöglichen und umfasst dabei die Gesamtheit der ortsfesten Einrichtungen der elektrischen Traktion [1.1, 1.2]. Die Bahnenergieversorgung lässt sich in *Erzeugung, Übertragung und Verteilung der Bahnenergie* auf elektrische Triebfahrzeuge unterteilen. Die Speisung mobiler Verbraucher über Fahrleitungen stellt den wesentlichen Unterschied zum öffentlichen Stromversorgungsnetz dar. Die Bahnenergie wird entweder durch bahneigene Kraftwerke erzeugt oder vom öffentlichen Netz bezogen. Wird die Energie durch das öffentliche Netz bezogen, muss eine Umrichtung oder Umformung stattfinden. Die Verteilung dieser Energie findet in bahneigenen zentralen Netzen statt. Von dort wird die Energie über Unterwerke in die Fahrleitung gespeist. Weiter kann auch vom öffentlichen Netz die Energie über dezentrale Umformer- und Umrichterwerke direkt in die Fahrleitung gespeist werden. Dieses Buch behandelt vorwiegend die *Fahrleitungen*, die einen Teil der *Bahnenergieversorgung* und einen Oberbegriff für Oberleitungen, Dritte Schienen, Stromschienen-Oberleitungen und Sonderfahrleitungen darstellen.

Um die Anforderungen eines zuverlässigen elektrischen Betriebs zu erfüllen, müssen Fahrleitungen

- die für die Traktion erforderliche Leistung am Stromabnehmer der Triebfahrzeuge ununterbrochen bereitstellen,
- anfallende Bremsenergie aufnehmen,

- die Spannungsqualität an den Stromabnehmern der elektrischen Triebfahrzeuge entsprechend den Normvorgaben einhalten.

Die *Bahnbelastung* unterscheidet sich von der Belastung in öffentlichen Energieversorgungen, weil sie ortsveränderlich und sehr zeitabhängig ist.

1.2 Bahnstromarten

Der Begriff *Stromart* wird allgemein verwendet, um die verschiedenen Arten der elektrischen Energieversorgung für die Traktion zu unterscheiden. Die ersten elektrifizierten Bahnen verwendeten Gleichstrom für die Zugförderung (siehe Kapitel 3). Grund hierfür war die für Bahnantriebe günstige hyperbolische Zugkraft-Geschwindigkeits-Charakteristik des Reihenschlusskommutatormotors. Deswegen sind weltweit auch heute noch fast ein Drittel aller elektrischen Bahnen Gleichstrombahnen. Nachteil der Gleichstromspeisung sind die wegen der aufwändigen Transformierbarkeit niedrigen Nennspannungen und die daraus resultierenden großen Ströme zum Übertragen der erforderlichen Traktionsleistungen.

Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts begannen daher erste Versuche, die Vorteile des Reihenschlussmotors mit der Transformierbarkeit des Wechselstromes zu verknüpfen. Ziel war es, einen Reihenschlussmotor als Antriebsmaschine zu verwenden, der mit Einphasenwechselstrom der Landesnetzfrequenz, in Deutschland und in Mitteleuropa 50 Hz, gespeist werden sollte. Bedingt durch den damaligen technischen Entwicklungsstand ließen sich einige Probleme bei der Nutzung des 50-Hz-Einphasenwechselreihenschlussmotors wie

- enormer Kommutatorverschleiß des 50-Hz-Einphasenreihenschlussmotors durch eine transformatorische Spannung in der eingängigen Schleifenwicklung,
- hohe induktive Beeinflussungen der zur elektrischen Bahn parallel verlaufenden Leitungen,
- unvertretbar große Werte der Spannungsunsymmetrie im speisenden 50-Hz-Drehstromnetz durch die einphasige Entnahme der Bahnleistung

nicht ausräumen. Mannigfaltige Bemühungen führten deswegen in Deutschland und einigen Nachbarländern zu der Stromart *Einphasenwechselstrom* mit der Frequenz $50\text{ Hz}/3 = 16\frac{2}{3}\text{ Hz}$, wobei die Elektroenergie einphasig in einem eigenen Bahnnetz erzeugt und übertragen wurde. Drei deutsche Länder führten diese Bahnstromart 1912/1913 ein [1.1, 1.3], die auch später von den anderen deutschen Ländern übernommen wurde. Unabhängig davon führten Entwicklungen in Österreich, Schweiz, Norwegen und Schweden zum gleichen Ergebnis. Die 16-2/3-Hz-Einphasenwechselstromart hat sich auch für die Energieversorgung des elektrischen Hochgeschwindigkeits- und Hochleistungsverkehrs als besonders leistungsfähig und effektiv erwiesen, da sie zentral gespeiste Netze mit durchgeschalteten Oberleitungen ermöglicht. Im Jahr 2000 legten die österreichischen, die deutschen und die Schweizer Eisenbahnen die Sollfrequenz auf 16,7 Hz [1.4]–[1.6] fest. Seither verwenden einige Normen wie EN 50163 und EN 50388 diesen Wert zur Bezeichnung der Nennfrequenz. Daher

Tabelle 1.1: Nennspannungen und ihre betrieblichen Grenzen für elektrische Bahnen gemäß EN 50163.

Stromart	$U_{\min 2}$ V	$U_{\min 1}$ V	U_n V	$U_{\max 1}$ V	$U_{\max 2}$ V	$U_{\max 3}$ V
DC 600 V		400	600	720	800	–
DC 750 V		500	750	900	1 000	1 270
DC 1,5 kV		1 000	1 500	1 800	1 950	2 540
DC 3,0 kV		2 000	3 000	3 600	3 900	5 075
AC 15 kV 16,7 Hz	11 000	12 000	15 000	17 250	18 000	24 300
AC 25 kV 50 Hz	17 500	19 000	25 000	27 500	29 000	38 750

U_n Nennspannung

$U_{\min 1}$ niedrigste Dauerspannung

$U_{\min 2}$ niedrigste nicht-permanente Spannung, darf während maximal 2 min auftreten

$U_{\max 1}$ höchste Dauerspannung

$U_{\max 2}$ höchste nicht-permanente Spannung, darf während maximal 5 min auftreten

$U_{\max 3}$ Überspannungsspitze, die während maximal 20 ms auftreten darf und nach 1 s auf

$U_{\max 2}$ abgeklungen sein muss (siehe Bild 1.1)

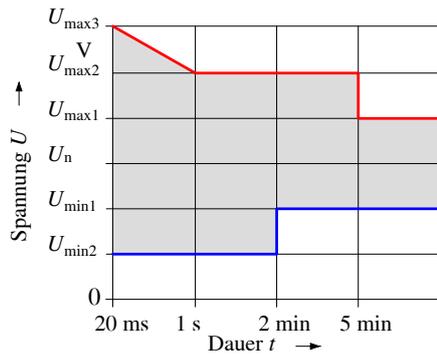


Bild 1.1: Minimale und maximale Werte der Spannung U entsprechend ihrer Dauer t nach EN 50163.

wird im Folgenden die Frequenz 16,7 Hz für die Bezeichnung der in Mittel- und Nordeuropa gebräuchlichen Stromart verwendet.

Erste Erfahrungen mit Bahnstrom AC 25 kV 50 Hz wurden in den vierziger Jahren bei der Höllentalbahn gewonnen [1.7] und führten dank des schnellen Fortschritts auf dem Gebiet der Leistungselektronik zur bevorzugten Nutzung dieser Stromart in Ländern, die mit der Elektrifizierung ihrer Bahnen später begannen. Bei Ländern mit Landesfrequenz 60 Hz gilt Entsprechendes.

Die am häufigsten verwendeten Stromarten sind:

- Gleichstrom mit 0,6 kV, 0,75 kV, 1,5 kV und 3 kV
- Wechselstrom 16,7 Hz mit 15 kV
- Wechselstrom 50 Hz mit 25 kV

Tabelle 1.1 zeigt die Nennspannungen zusammen mit ihren betrieblichen Grenzen. Unter Betriebsbedingungen dürfen die Spannungen an den Stromabnehmern zwischen $U_{\min 1}$ und $U_{\max 2}$ schwanken. Spannungen zwischen $U_{\min 1}$ und $U_{\min 2}$ dürfen nicht länger als zwei Minuten und Spannungen zwischen $U_{\max 1}$ und $U_{\max 2}$ nicht länger als fünf Minuten anstehen.

Bild 1.2 und Tabelle 1.2 zeigen Bahnstromarten der Fern- und Regionalbahnen der europäischen Länder.

Nach den in [1.9] veröffentlichten Statistiken wurden am Jahresende 2020 weltweit rund 380 000 km elektrisch betrieben, deren Streckenanteile der Tabelle 1.3 zu entnehmen sind.

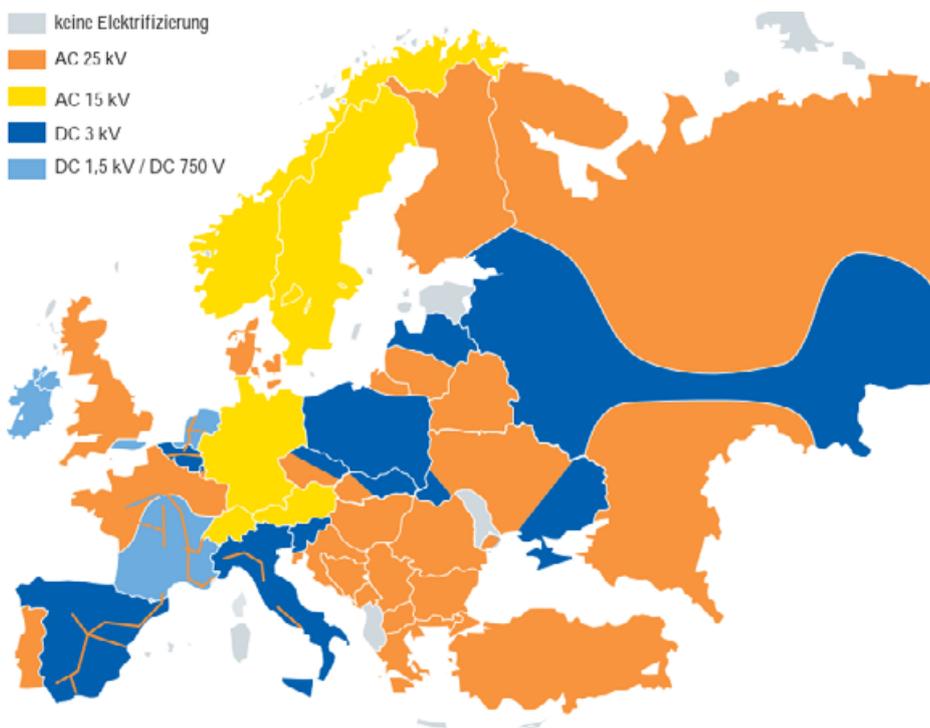


Bild 1.2: Übersicht über Bahnstromarten für Vollbahnen in Europa. In einzelnen Ländern sind Abweichungen möglich

Tabelle 1.2: Stromarten europäischer elektrischer Fern- und Regionalbahnen in Streckenkilometer.

Land	DC			AC			Gesamt	Quelle
	1,5 kV	3,0 kV	Andere	15 kV 16,7 Hz	25 kV 50 Hz	Andere		
Albanien	0	0	0	0	0	0	0	[1.9]
Aserbajdschan	0	1 238	0	0	0	0	1 238	[1.9]
Belgien	0	2 647	0	0	303	0	2 950	[1.8]
Bosnien-H.	0	0	0	0	306	0	306	[1.9]
Bulgarien	0	0	0	0	2 880	0	2 880	[1.9]
Dänemark	172	0	0	0	454	0	626	[1.9]
Deutschland	0	0	410	19 691	0	0	20 101	[1.9]
Estland	0	133	0	0	0	0	133	[1.9]
Finnland	0	0	0	0	3 172	0	3 172	[1.9]
Frankreich	5 863	0	63	59	9 698	0	15 683	[1.9]
Georgien	37	0	1 251	0	0	0	1 288	[1.9]
Griechenland	0	0	0	0	595	0	595	[1.9]
Großbritannien	19	0	2 014	0	3 345	0	5 378	[1.9]
Irland	49	0	0	0	0	0	49	[1.9]
Island	0	0	0	0	0	0	0	[1.9]
Italien	181	12 018	32	0	407	0	12 638	[1.9]
Kasachstan	0	0	0	0	4 056	0	4 056	[1.9]
Kroatien	0	0	0	0	985	0	985	[1.9]
Lettland	0	0	257	0	0	0	257	[1.9]
Litauen	0	0	0	0	122	0	122	[1.9]
Luxemburg	0	19	0	0	243	0	262	[1.9]
Mazedonien	0	0	0	0	223	0	223	[1.9]
Monaco	0	0	0	0	2	0	2	[1.8]
Montenegro	0	0	0	0	169	0	169	[1.9]
Niederlande	0	0	0	0	291	0	291	[1.8]
Nordmazedonien	0	0	0	0	315	0	315	[1.9]
Norwegen	0	0	0	2 700	0	0	2 700	[1.9]
Österreich	0	0	30	3 526	0	84	3 640	[1.9]
Polen	0	11 799	0	0	0	0	11 799	[1.9]
Portugal	25	0	0	0	1 411	0	1 436	[1.8]
Rumänien	0	0	0	0	4 030	0	4 030	[1.9]
Russland ¹⁾	0	18 800	0	0	21 500	0	40 300	[1.9]
Schweden	65	0	0	8 189	0	0	8 254	[1.9]
Schweiz	3 817	0	419	842	0	144	5 222	[1.9]
Serbien	0	0	0	0	1 196	0	1 196	[1.9]
Slowakei	42	807	6	2	759	0	1 616	[1.9]
Slowenien	0	1 006	0	0	0	0	1 006	[1.8]
Spanien	746	6 488	186	0	2 406	0	9 826	[1.9]
Tschechien	24	1 764	0	1	1 306	0	3 095	[1.8]
Türkei	0	0	0	0	1 928	0	1 928	[1.9]
Ukraine	0	4 930	0	0	4 320	0	9 250	[1.9]
Ungarn	0	0	0	0	3 060	0	2 858	[1.9]
Weißrussland	0	0	0	0	874	0	874	[1.9]

¹⁾ einschließlich asiatischer Teil von Russland

Sonstige Bahnstromarten sind DC 0,8 kV; DC 0,85 kV; DC 0,86; DC 0,90 kV; DC 1,0 kV; DC 1,125 kV; DC 1,2 kV; DC 1,25 kV; DC 1,35 kV und DC 3,3 kV, die weltweit 1,5 % Anteil an den elektrifizierten Strecken haben, und AC 11 kV 16,7 Hz; AC 6,5 kV 25 Hz; AC 20 kV 50 Hz; AC 50 kV 50 Hz; AC 20 kV 60 Hz und AC 25 kV 60 Hz, die weltweit 2,0 % Anteil an den elektrifizierten Strecken haben.

Nahverkehrsbahnen nutzen überwiegend DC 600 V, 750 V oder 1 500 V.

Die Systemauswahl und -auslegung von AC- oder DC-Bahnenergieanlagen erfordern umfassende Untersuchungen und Berechnungen auf Grundlage der Strecken-, Fahrzeug- und Betriebsdaten. Sie erstrecken sich auf die elektrische Dimensionierung der Unterwerke und Fahrleitungsanlagen mit:

- Vergleich der Systeme und Varianten
- wirtschaftlicher Auslegung der Anlagen
- Planen von Leistungsreserven für künftige Erweiterungen

Tabelle 1.3: Stromarten weltweiter elektrischer Fern- und Regionalbahnen in Streckenkilometer [1.9].

Kontinent		DC			AC			Gesamt
		1,5 kV	3,0 kV	Andere	15 kV 16,7 Hz	25 kV 50 Hz	Andere	
Europa ¹⁾	km	11 016	58 618	4 691	35 009	63 519	228	173 081
	%	6,4	33,9	2,7	20,2	36,7	0,1	100
Asien, Australien	km	17 368	370	524	0	168 228	5 667	192 158
	%	9,0	0,2	0,3	0,0	87,5	2,9	100
Amerika	km	116	2 085	505	0	275	790	3 771
	%	3,1	55,3	13,4	0,0	7,3	20,9	100
Afrika	km	62	7 148	0	0	3 716	861	11 787
	%	0,4	60,3	0,0	0,0	31,3	8,0	100
Welt	km	28 558	67 581	5 721	35 009	235 405	7 546	379 820
	%	7,5	17,8	1,5	9,2	62,0	2,0	100

¹⁾ einschließlich asiatischer Teil von Russland

- Berechnung des Energieverbrauchs
- Ermittlung der Errichtungskosten
- Untersuchung der Ausfallszenarien

Zur Auslegung von Bahnenergieanlagen lassen sich Simulationsprogramme wie Sitras Sidytrac verwenden [1.10]. Das Zusammenwirken von Bahnenergieanlage mit den Fahrzeugen kann im Prüf- und Validationscenter in Wegberg-Wildenrath (PCW) der Siemens Mobility GmbH verifiziert werden [1.11]. Dort stehen alle gängigen Bahnstromarten zur Verfügung.

1.3 Aufbau der Bahnenergieversorgung

1.3.1 Bereitstellung und Übertragung

Im Bild 1.3 ist der Aufbau für die Bahnenergieversorgung dargestellt. DC-Bahnen und AC-50-Hz-Einphasenwechselstrombahnen entnehmen die Bahnenergie dem Landesnetz; AC-15-kV-16,7-Hz-Bahnen erhalten die Bahnenergie aus

- eigenen Kraftwerken und Übertragung mit eigenen Netzen,
- dem öffentlichen Netz gespeisten zentralen Umformer- und Umrichterwerken, die in das bahneigene Übertragungsnetz einspeisen oder
- dem öffentlichen Netz gespeisten dezentralen Umformer- oder Umrichterwerken, die direkt das Fahrleitungsnetz speisen.

Wie aus Bild 1.3 hervorgeht, werden die Unterwerke der Gleichstrombahnen aus Drehstromnetzen mit Nennspannungen zwischen 10 kV und 66 kV gespeist. Gleichstromfernbahnen verwenden überwiegend die Nennspannungen 1,5 kV oder 3 kV. Die weit über hundert AC-110-kV-Teilnetze der öffentlichen Stromversorgung in Deutschland sind in der 110-kV-Ebene nicht miteinander verbunden. Diese Maßnahme begrenzt die Kurzschlussströme und vereinfacht den Schutz der Netze. Die übergeordneten 220-kV- oder 380-kV-Netze verbinden das mit 110 kV Nennspannung betriebene Netz. Daher sind alle 110-kV-Netze über die Verknüpfung mit dem Verbundnetz synchronisiert. Dies ist eine wesentliche Voraussetzung für den Parallelbetrieb der dezentralen Bahnenergieversorgung im Teilnetz der DB.

1.3.2 Verteilung und Zuführung

Die *Bahnenergieverteilung* dient der Umwandlung der Energie in geeignete Spannungen und Frequenzen für die elektrische Traktion und der Speisung der Fahrleitungen und der Zuführung zu den Verbrauchern. Nach Bild 1.4 lassen sich unterscheiden:

- *Bahnunspannwerke*, im Umgangssprachgebrauch häufig als *Unterwerke* (Uw) bezeichnet, die die Spannung des Übertragungsnetzes in die Nennspannung des Fahrleitungsnetzes umspannen und in die Fahrleitungen einspeisen.

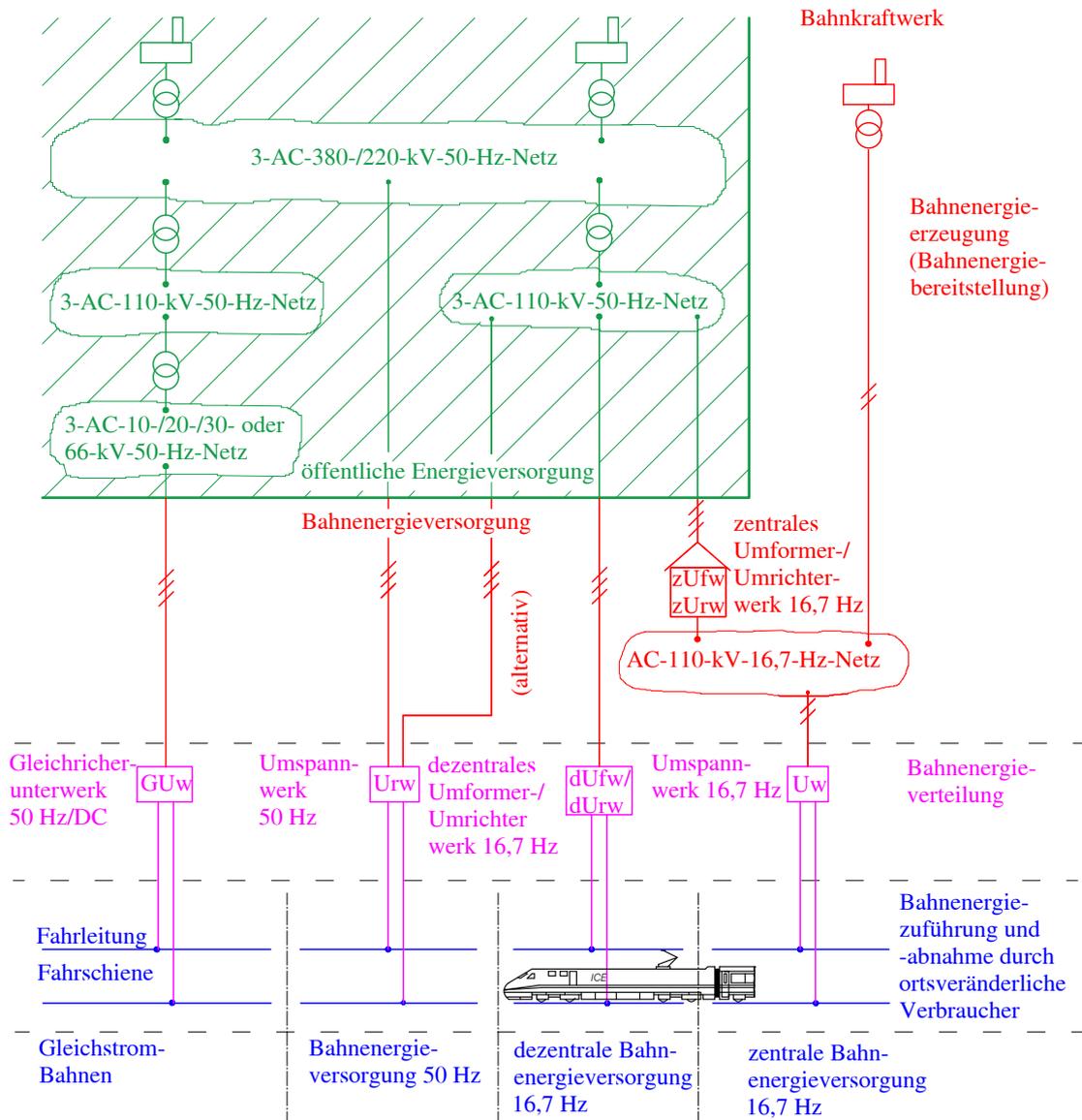


Bild 1.3: Aufbau der Bahnenergieversorgung [1.12].

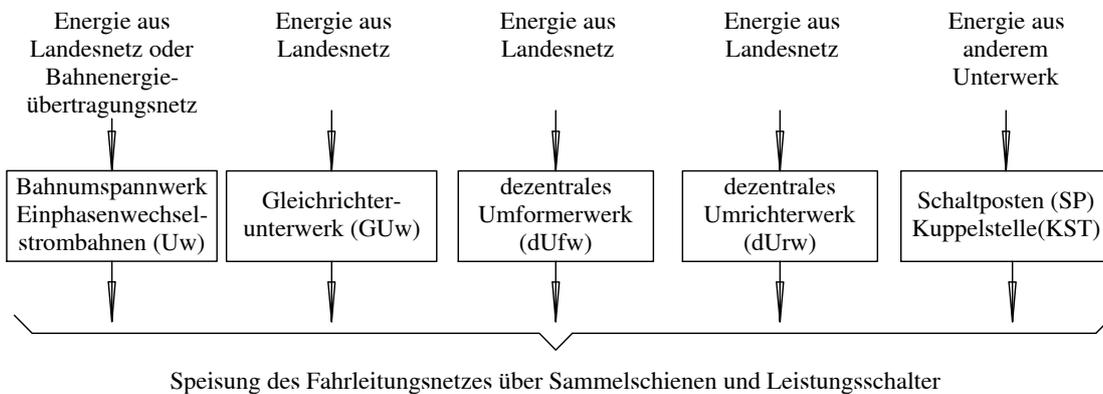


Bild 1.4: Einspeisungen für die Bahnenergieversorgung.

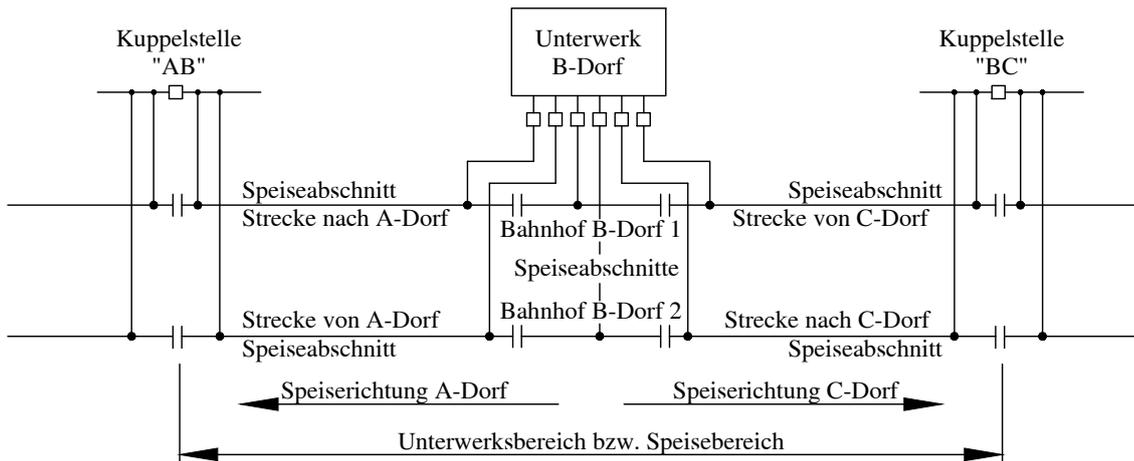


Bild 1.5: Energieversorgung eines dezentral gespeisten Unterwerksbereiches bei Vollbahnen.

- *Bahngleichrichterunterwerke* (GUw), die bei Gleichstrombahnen den Drehstrom des Landesnetzes in die Speisespannung des Fahrleitungsnetzes umspannen, gleichrichten und die Fahrleitungen speisen.
- *Dezentrale Umformerwerke* (dUfw), die die dreiphasige Energie des 50-Hz-Landesnetzes mit Hilfe rotierender Maschinen in einphasige Spannung des 16,7-Hz-Bahnnetzes umwandeln und auf die entsprechende Spannung des Oberleitungsnetzes umspannen,
- *Dezentrale, statische Umrichterwerke* (dUrw), die die gleiche Funktion wie dezentrale Umformerwerke haben, aber mit Komponenten der Leistungselektronik anstelle der rotierenden Maschinen ausgerüstet sind,
- Schaltposten und *Kuppelstellen* verwenden einen oder mehrere Leistungsschalter, um die Längs- und Querkupplung der Fahrleitungsabschnitte herzustellen und so die Spannungsfälle und Verluste im Fahrleitungsnetz zu verkleinern. Über die Fahrleitung verbinden sie Unterwerksabschnitte oder speisen abgehende Strecken einseitig. Dies ermöglicht den selektiven Schutz der Fahrleitung und die Rückleitung der erzeugten Bremsenergie in andere Streckenabschnitte mit Verbrauchern oder Unterwerken.

Bild 1.5 zeigt am Beispiel einer dezentral gespeisten Wechselstrombahn die Energieverteilung durch Unterwerke. Der Begriff *Speisebereich* bezeichnet dabei die Gesamtheit aller von einem Unterwerk im regulären Betrieb gespeisten Abschnitte. Ein *neutraler Abschnitt* ist ein Teil der Fahrleitungsanlage, der angrenzende Speiseabschnitte so trennt, dass sich diese nicht durch Stromabnehmer elektrischer Fahrzeuge überbrücken lassen. *Schaltabschnitte* und *Schaltgruppen* in den Unterwerksbereichen sind durch Streckentrennungen oder Streckentrenner elektrisch abtrennbar, die im Grundschtzustand durch Oberleitungsschalter überbrückt und beim Befahren mit dem Stromabnehmer der Triebfahrzeuge kurzzeitig verbunden sind.

1.4 Gleichstrombahnnetze

1.4.1 Allgemeines

Weltweit sind heute noch ungefähr ein Viertel aller elektrischen Vollbahnen *Gleichstrombahnen*. Von den im Nahverkehr verwendeten Nennspannungen bis DC 1,5kV sind die Spannungen 0,6kV und 0,75kV am meisten verbreitet. Dabei liegen die Abstände der Unterwerke bei 1,5 bis 6km. Bei Fernbahnen findet man DC 1,5kV und 3kV mit Unterwerksabständen bis 20km. Die Leistungen von Gleichstromunterwerken reichen bei Straßenbahnen bis 3 MW und bei Massentransportanlagen und Vollbahnen bis 20 MW.

Die aus dem Landesnetz kommende dreiphasige Spannung formt das *Gleichrichterunterwerk* in Gleichspannung der jeweiligen Nennspannung des Fahrleitungsnetzes um. Als Gleichrichter wurden früher sechspulsige und werden heute vorwiegend 12- und 24-pulsige Stromrichter verwendet.

Die einzelnen Speisebereiche der Gleichstrombahnen sind in der Fahrleitung durch Streckentrenner getrennt und über die Sammelschienen der Unterwerke durchgeschaltet. Die Schaltanlagen in Gleichrichterunterwerken sind fabrikfertige Einheiten, die meist für die Belastungsklasse VI nach EN 60146-1-3 bemessen sind. Aus

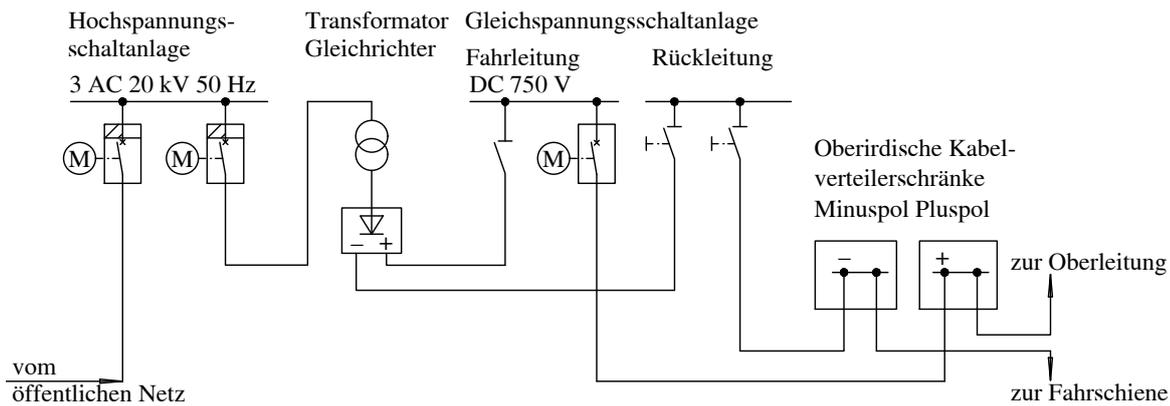


Bild 1.6: Aufbau eines Gleichstromunterwerks einer Straßenbahn.

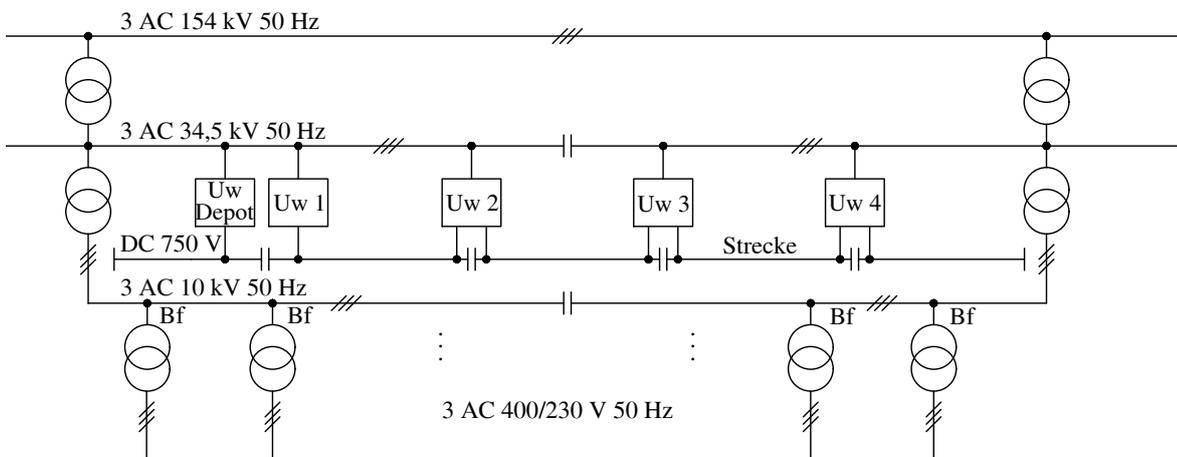


Bild 1.7: Strecken- und Bahnhofsspeisung für die Metro Ankaray in Ankara/Türkei.

Bild 1.6 ist der Aufbau eines Gleichstromunterwerkes einer Straßenbahn ersichtlich. Besondere Sorgfalt beim Errichten und Betreiben der Gleichstrombahnen ist der Triebstromrückführung zu widmen, um Gefährdungen durch Schienenpotenziale und die *Streustromkorrosion* zu vermeiden. Nähere Ausführungen hierzu finden sich im Abschnitt 6.5.

1.4.2 Metro Ankaray in Ankara

1.4.2.1 Streckenversorgung und Schaltung

Die Ankaray-Untergrundbahn in Ankara (Türkei) stellt ein typisches Beispiel für eine Speisung mit DC 0,75 kV dar. Die Strecke ist 9 km lang und hat elf Stationen. Die Fahrzeuge verkehren mit 120 s Zugfolge und *Seitenstromschienen* versorgen die Züge. Die Anfahrströme erreichen 3 000 A. Die installierte Traktionsleistung beträgt rund 1,2 MW pro km.

Die städtische Energieversorgung stellt mit zwei Speisestationen an beiden Streckenenden die elektrische Energie aus dem 154-kV-Netz bereit (Bild 1.7). Die Transformatoren 154/34 kV speisen den 34-kV-Mittelspannungsring zur Versorgung der Gleichrichterunterwerke und der Bahnhöfe über weitere Transformatoren und einen 10-kV-Mittelspannungsring.

Die vier 2,5-MW-Gleichrichterunterwerke stellen die Gleichspannung DC 750 V für die Hauptstrecke bereit. Der maximale Unterwerksabstand beträgt rund 2,8 km. Ein eigenes Gleichrichterunterwerk versorgt die Depot- und Instandhaltungsanlagen. Diese sind von der Hauptstrecke am Tunneleingang durch Isolation der Schienen sowie Lücken in den Stromschienen getrennt. Dadurch war es möglich, die Schienen im Depot mit der Schutzerde der Depot-Erdungsanlage zu verbinden.

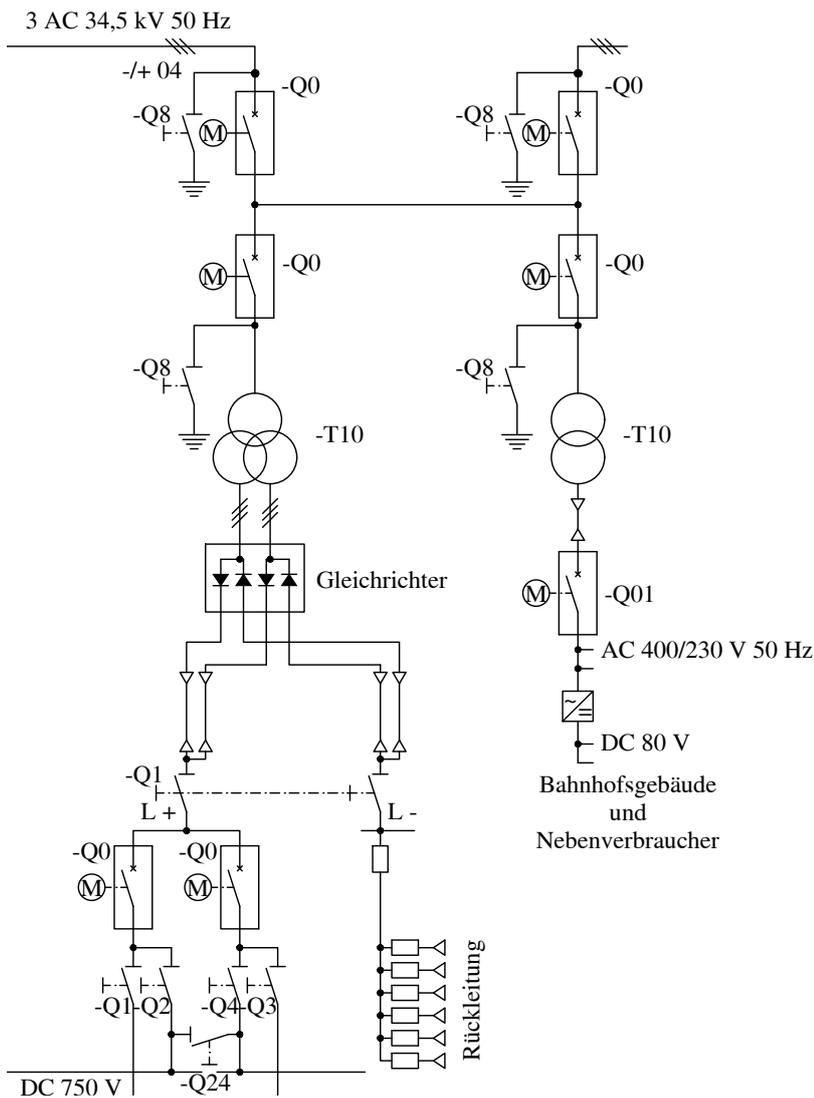


Bild 1.8: Übersichtsschaltplan eines Unterwerks der Untergrundbahn Ankaray.
 Q0 Leistungsschalter
 Q1 bis Q4, Q24 Trennschalter
 Q8 Erdungsschalter
 Q11 Sammelschienentrennschalter
 T10 Transformator

Die Fahrleitungen der Hauptstrecke sind zur Vermeidung von *Streuströmen* gegenüber der *Tunneleerdungsanlage* isoliert verlegt. Damit treten aufgrund der Bahnrückströme Längsspannungen in den Fahrleitungen auf, die ein erhöhtes Gleis-Erde-Potenzial und damit Potenzialdifferenzen zu den Bahnsteigen zur Folge haben. *Kurzschließer* vom Typ SCD (Short Circuiting Device) zwischen den Fahrleitungen und der Erdungsanlage vermeiden unzulässige Berührungsspannungen, die beim gleichzeitigen Anfahren mehrerer Fahrzeuge sonst nicht auszuschließen wären. Nach rund 10 Sekunden öffnen die Kurzschließer und reaktivieren die Überwachungsfunktion.

1.4.2.2 Unterwerke und Komponenten

Bild 1.8 zeigt den Übersichtsschaltplan eines Unterwerks für AC 34,5 kV/DC 750 V, das über eine Mittelspannungsschaltanlage an den 34-kV-Mittelspannungsring angeschlossen ist. Die Mittelspannungsschaltanlage umfasst zwei Leistungsschalter zur Durchverbindung des Kabelringes, die AC-Leistungsschalter für den Stromrichtertransformator und den Transformator für die Gebäudeversorgung des benachbarten Bahnhofs und die erforderlichen Messwerterfassungen. Der *Stromrichtertransformator* in Gießharzausführung besitzt zwei Sekundärwicklungen, die um 30° versetzte Spannungen liefern. An jede Sekundärwicklung ist ein *Diodengleichrichter* in *Drehstrom-Brückenschaltung* angeschlossen, so dass auf der Gleichstromseite eine zwölfpulsige Gleichspannung entsteht.

Die Oberleitung speist über zwei Streckenabzweige mit Gleichstromleistungs- und Trennschaltern in die Oberleitungen links und rechts des Unterwerks ein, wogegen der Minuspol über die Rückleitung mit den Gleisen

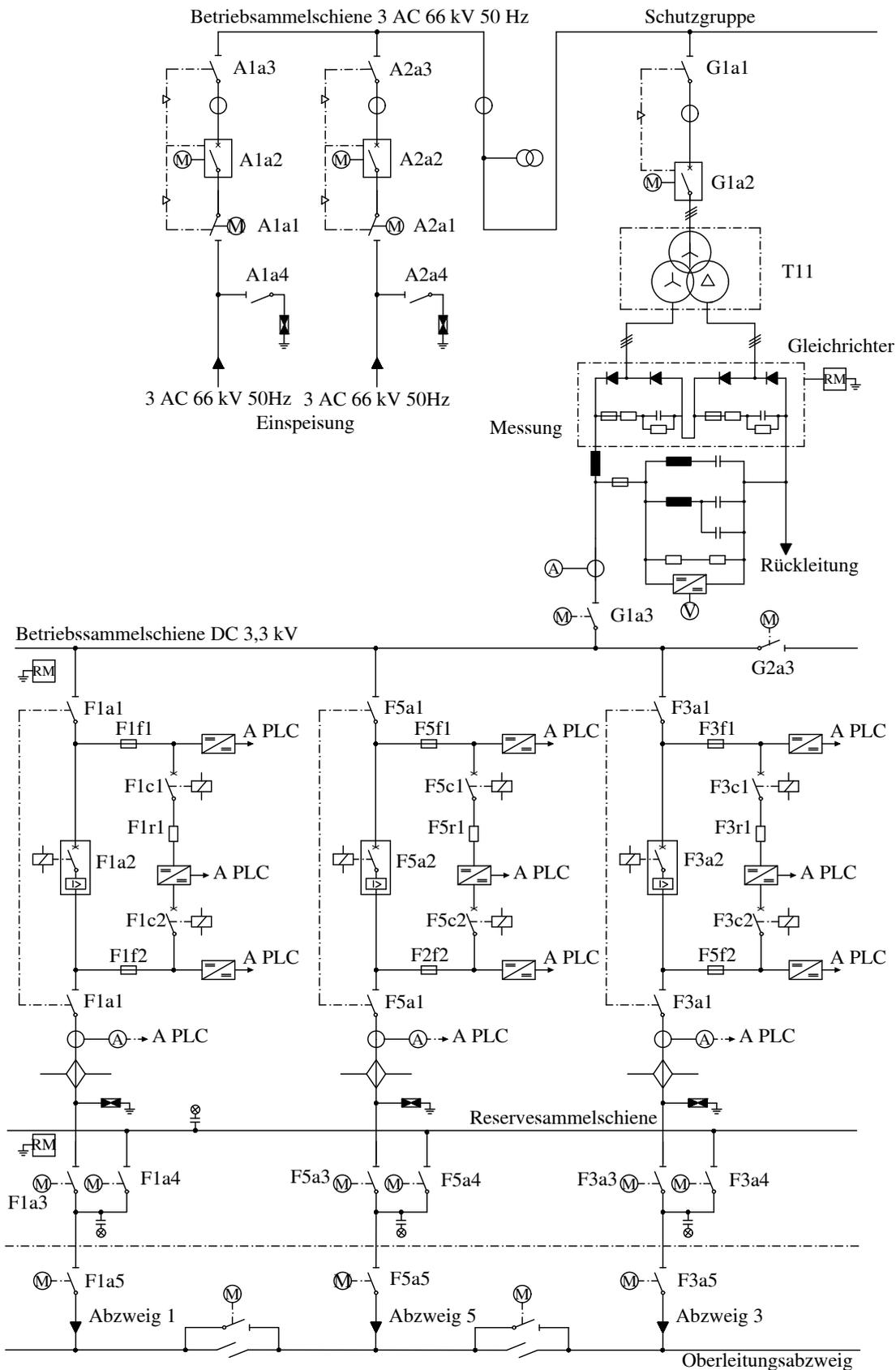


Bild 1.9: Übersichtsschaltplan für ein DC-3-kV-Unterwerk der ADIF.

verbunden ist. Eine Streckentrennung lässt sich in der Oberleitung vor dem Unterwerk für Instandhaltungszwecke oder Störfälle durch die Trennschalter Q24 überbrücken. Der Schutz erfasst Kurzschlüsse selektiv durch Messung der absoluten Stromwerte, des Anstiegs di/dt und der Sprunghöhe. *Gleichstromschnellschalter* mit *Löschkammern* schalten die Kurzschlussströme der Strecke nach der Auslösung durch den Streckenschutz ab.

1.4.3 Speisung mit DC 3,0 kV in Spanien

1.4.3.1 Einführung

Das Netz des Infrastrukturbetreibers ADIF in Spanien ist rund 16 000 km lang. Davon sind rund 10 000 km elektrifiziert. Die elektrifizierten Strecken mit der spanischen Spurweite 1 668 mm sind mit DC 3,0 kV ausgerüstet. Insgesamt umfasst dieses Netz rund 6 500 km, wovon rund 2 900 km der Strecken zweigleisig und 3 600 km eingleisig sind. 330 Unterwerke versorgen diese Strecken. Vierzehn Fernsteuerzentralen steuern den elektrischen Betrieb. Hochspannungsseitig sind die Unterwerke an das 50-Hz-Landesnetz mit Spannungen zwischen 15 kV und 66 kV angeschlossen.

1.4.3.2 Unterwerke

Bild 1.9 zeigt den Übersichtsschaltplan eines Gleichrichterunterwerkes zur Versorgung einer eingleisigen Strecke mit DC 3,0 kV. Das Unterwerk verfügt über

- zwei Einspeisungen,
- zwei Transformatorgleichrichtergruppen mit je 6,6 MVA Leistung, eine davon ist dargestellt,
- drei oder sechs Oberleitungsabzweige, je nach der Versorgung einer eingleisigen oder zweigleisigen Strecke,
- einen Transformator zur Speisung der Signaltechnik mit AC 50 Hz 2,2 kV und 25 kVA Leistung sowie einen Hilfstransformator, die im Bild nicht gezeigt sind.

Jede Einspeisung besitzt einen Leistungsschalter und speist auf die 66-kV-Sammelschiene. Die Messeinrichtung für die Leistung und Energie schließt sich an. Die Energieversorgungsunternehmen können über eine gemeinsame Übertragungseinheit den Energieverbrauch der Unterwerke überwachen. Diese Messeinrichtungen, erst nach der Liberalisierung der elektrischen Energieversorgung eingebaut, ermöglichen es der ADIF, günstigere Preise für die Energieversorgung zu erzielen.

Die Leistungstransformatoren T11 mit je 6,6 MVA haben einen Primärkreis und zwei Sekundärkreise. Ein Sekundärkreis ist jeweils in Sternschaltung und der andere in Dreieckschaltung angeschlossen, sodass ein Unterschied zwischen den Außenleitern von 60° erreicht wird. Jeder Sekundärkreis speist einen ungesteuerten, dreiphasigen Zweiwegebrückengleichrichter der Bauart Graetz mit der Ausgangsspannung DC 1,5 kV. Deren Reihenschaltung führt zur Ausgangsspannung DC 3,0 kV und zu einer zwölfpulsigen Gleichrichtung.

Zur Glättung des Ausgangsstroms ist am Pluspol des Gleichrichters eine Drossel mit rund 0,3 mH Induktivität angeschlossen. Zwischen dem positiven und negativen Pol der Gleichrichter sind zwei Oberschwingungsfilter mit den Frequenzen 600 bzw. 1 200 Hz angeordnet. Der Oberschwingungsfilter besteht aus einer Drossel und einem Kondensator.

Jeder Gleichrichterausgang ist über einen motorgetriebenen Trennschalter an einen Sammelschienenabschnitt angeschlossen. Die einzelnen Sammelschienenabschnitte lassen sich über Trennschalter verbinden. Im Normalbetrieb speist einer der Sammelschienenabschnitte die Streckenabschnitte links, der andere Sammelschienenabschnitt die rechts des Unterwerks über Oberleitungsabzweige mit Trenn- und Leistungsschaltern. Mit dieser Schaltung wird die Kurzschlussleistung begrenzt. Jeder Speiseabzweig verfügt über die erforderlichen Prüfeinrichtungen. Oberleitungstrennschalter zur Überbrückung der Streckentrennungen und die Reservesammelschiene ermöglichen Ersatzspeisungen für Instandhaltungs- und Störfälle.

1.4.3.3 Steuerung und Schutz

Ließen sich die Unterwerke bis 1992 über dezentrale Steuertafeln mit Relais und Tastern steuern, führte ab 1992 der Einbau von programmierbaren Steuerungen zunächst im Master-Slave-Betrieb zur weiteren Zentralisierung der *Steuerung der Unterwerke*.