

Inhaltsverzeichnis

1	Struktur der BEV	1
1.1	Das System „Elektrische Bahn“	1
1.2	Aufgaben und grundsätzlicher Aufbau der Bahnenergieversorgung	3
1.2.1	Allgemeine Bemerkungen	3
1.2.2	Bereitstellen und Übertragen der Bahnenergie	3
1.2.3	Verteilung der Bahnenergie	4
1.3	Energieversorgungssysteme	6
1.4	Bahnstromsysteme	7
1.4.1	Allgemeines	7
1.4.2	Gleichstrom-Bahnnetze	9
1.4.3	16,7-Hz-Wechselstrom-Bahnnetze	10
1.4.4	50-Hz-Wechselstrom-Bahnnetze	12
1.4.5	Interoperabilität	14
1.5	Literatur	15
2	Energie- und Leistungsbedarf elektrischer Bahnen	17
2.1	Grundlagen	17
2.2	Energiebedarfsermittlung	20
2.2.1	Allgemeines	20
2.2.2	Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit	21
2.2.3	Fahrt mit Beschleunigung	22
2.2.4	Spezifischer Energiebedarf für Nebenverbraucher, Heizung sowie Rangierarbeiten	23
2.2.5	Spezifischer Energieverbrauch ab Stromabnehmer Triebfahrzeug	24
2.2.6	Spezifischer Energiebedarf ab Unterwerk	24
2.2.7	Energiebedarf ab Unterwerk	24
2.3	Beschreibung der Bahnbelastung	25
2.3.1	Einflussfaktoren	26
2.3.2	Betriebsstatistische Verfahren	28
2.3.3	Stochastische Methoden	29
2.3.4	Simulationsverfahren	34
2.3.5	Analyseverfahren	37
2.4	Literatur	42
3	Bahnenergiebereitstellung	45
3.1	Grundsätzliche Bemerkungen	45
3.2	Bahnenergieversorgung Gleichstrom	47
3.2.1	Bahnenergieversorgung mit Gleichspannung durch Umformung	47
3.2.2	Bahnenergieversorgung mit Gleichspannung durch Gleichrichtung	48

3.3	Bahnenergieversorgung 16,7 Hz	49
3.3.1	Allgemeines	49
3.3.2	Einphasenleistung	50
3.3.3	Einphasensynchrongeneratoren	51
3.3.4	Zentrale Bahnenergieversorgung	57
3.3.4.1	Betriebsführung	57
3.3.4.2	Kraft- und Umformerwerke	61
3.3.5	Dezentrale Bahnenergieversorgung, Synchron-Synchron-Umformer	76
3.3.5.1	Grundlagen und Wirkungsweise von Synchron-Synchron-Umformern	76
3.3.5.2	Synchronisieren von Synchron-Synchron-Umformern	82
3.3.6	Umrichter in der Bahnenergieversorgung 16,7 Hz	86
3.3.7	Vergleich von zentraler und dezentraler Bahnenergieversorgung 16,7 Hz	89
3.4	Literatur	92
4	Bahnenergieübertragung	95
4.1	Bahnenergieübertragung in Drehstromnetzen	95
4.1.1	Aufgaben und Anforderungen	95
4.1.2	Nennspannung und Leistung	95
4.1.3	Ausführung	96
4.1.3.1	Überblick	96
4.1.3.2	Aufbau der Freileitungen	96
4.1.3.3	Aufbau der Hochspannungskabel	101
4.1.4	Koronastrahlung	103
4.1.5	Netzfehler	104
4.1.5.1	Einpolige Fehler	104
4.1.5.2	Mehrpole Fehler	105
4.1.6	Sternpunkt	105
4.1.7	Behandlung des Netzsternpunkts	106
4.2	Bahnenergieübertragung in zweipolig isolierten 16,7-Hz-Wechselstromnetzen	106
4.2.1	Aufgabe	106
4.2.2	Leistungsbetrachtung	108
4.2.2.1	Übertragbare Leistung	108
4.2.2.2	Übertragungsverluste	108
4.2.2.3	Leistungsgrenzen	109
4.2.3	Nenngrößen und Ausführungen	109
4.2.4	Netzmittelpunkt	113
4.2.4.1	Ideell	113
4.2.4.2	Real	113
4.2.5	Behandlung des Netzmittelpunkts und ihre Auswirkung auf einpolige Netz- fehler	114
4.2.5.1	Übersicht	114
4.2.5.2	Niederohmige Erdung des Netzmittelpunkts	115
4.2.5.3	Isolierung oder hochohmige Erdung des Netzmittelpunkts	115
4.2.5.4	Induktive Erdung des Netzmittelpunkts zur Erdschlusskompensation	116

4.2.6 Erdschluss, Dauererdschluss, Doppelerdschluss und Kurzschluss mit Erdberührung 118

4.2.7 Dauererdschluss in nicht niederohmig geerdeten Netzen 118

4.3 Literatur 119

5 Grundsätze der Bahnenergieverteilung 121

5.1 Übersicht 121

5.2 Aufbau der Schaltanlagen 121

5.3 Aufgaben der Schaltanlagen 122

5.3.1 Allgemeines 122

5.3.2 Verteilung auf der Energiebezugsseite 122

5.3.3 Umwandlung der zugeführten Energie in fahrleitungskonforme Energie 123

5.3.4 Einspeisung ins Fahrleitungsnetz und Verteilung 123

5.3.5 Zusammenschaltung des Fahrleitungsnetzes 123

5.3.6 Verbesserung der Spannungshaltung 124

5.4 Allgemeine Aussagen zu den erforderlichen Schaltanlagen 124

5.4.1 Funktion und Unterteilung der Schaltanlagen 124

5.4.2 Gestaltung der Schaltanlagen 124

5.4.2.1 Bauweisen 124

5.4.2.2 Isolation 126

5.4.3 Standortwahl 128

5.4.4 Bauliche Gestaltung 128

5.4.4.1 Gebäude 128

5.4.4.2 Außenanlagen 129

5.5 Auslegungskriterien für die elektrische Ausrüstung 129

5.5.1 Allgemeines 129

5.5.2 Spannungsbeanspruchung und Isolationsbemessung in den Schaltanlagen der Bahnenergieversorgung mit Fahrleitungsspannung 129

5.5.2.1 Einführung 129

5.5.2.2 Isolationskoordination durch Bemessungs-Isolationsspannungen 130

5.5.2.3 Isolationskoordination durch elektrische Mindestabstände 132

5.5.2.4 Berührungsschutz durch Schutzabstände 132

5.5.3 Beanspruchung durch Betriebs- und Kurzschlussströme 133

5.5.3.1 Thermische Beanspruchung 133

5.5.3.2 Dynamische Beanspruchung durch elektromagnetische Kräfte 134

5.5.3.3 Thermodynamische Beanspruchung 134

5.5.4 Beanspruchung durch die Umwelt 135

5.5.4.1 Einführung 135

5.5.4.2 Vorschriften 136

5.5.5 Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) 136

5.5.5.1 Überblick 136

5.5.5.2 Einwirkungen auf den Menschen 137

5.5.5.3 Einwirken auf elektrische Ausrüstungsteile 137

5.6 Steuer-, Überwachungs- und Hilfseinrichtungen 138

5.6.1 Betätigung und Steuerung 138

5.6.1.1	Begriffe und Funktionen	138
5.6.1.2	Besonderheiten	140
5.6.2	Steuereinrichtungen	140
5.6.2.1	Einführung	140
5.6.2.2	Gestaltung	141
5.6.3	Überwachungseinrichtungen	142
5.6.4	Hilfseinrichtungen	143
5.6.4.1	Eigenbedarfsversorgung	143
5.6.4.2	Zentrale Druckluftanlagen	144
5.6.4.3	Beleuchtung, Klimatisierung, Torsprech- und Schließenanlagen	144
5.6.4.4	Unterlagen, Geräte, Beschilderung, Werkzeuge und Hilfsmittel	144
5.7	Literatur	144
6	Energieverteilung bei Gleichstrombahnen	147
6.1	Allgemeines	147
6.1.1	Übersicht	147
6.1.2	Gebräuchliche Nennspannungen	148
6.2	Energiezuführung zu den Unterwerken	149
6.3	Gleichrichterunterwerke	150
6.3.1	Allgemeines	150
6.3.2	Mittelspannungsschaltanlagen	152
6.3.2.1	Funktion und Grundaufbau	152
6.3.2.2	Besonderheiten im Gleichrichterunterwerk	154
6.3.2.3	Mittelspannungsschaltanlantentypen	154
6.3.3	Gleichrichter- und Stromrichtertransformatoren	155
6.3.3.1	Allgemeines	155
6.3.3.2	Besonderheiten	155
6.3.3.3	Bauformen	156
6.3.3.4	Schutzeinrichtungen	156
6.3.4	Umrichter	156
6.3.4.1	Allgemeines	156
6.3.4.2	Diodengleichrichter	157
6.3.4.3	Steuerbare Gleichrichter	159
6.3.4.4	Wechselrichter	162
6.3.4.5	Umkehrstromrichter	163
6.3.5	Gleichspannungsschaltanlage	164
6.3.5.1	Allgemeines	164
6.3.5.2	Schaltzellen	164
6.3.5.3	Sammelschienenbauformen	167
6.3.5.4	Leistungsschalter	169
6.3.6	Hilfseinrichtungen	171
6.3.6.1	Allgemeines	171
6.3.6.2	Eigenbedarf	172
6.3.6.3	Überwachungs- und Steuereinrichtungen	173
6.3.6.4	Schutz- und Sicherheitseinrichtungen	174

6.3.7 Fernwirk- und Steuerungstechnik 177

6.3.8 Baukörper 178

6.4 Kuppelstellen und Außenschaltanlagen 181

6.4.1 Allgemeines 181

6.4.2 Kuppelstellen 181

6.4.3 Fahrleitungsschaltstellen 182

6.4.4 Sonstige Außenschaltanlagen 183

6.5 Energieversorgung von Betriebshöfen 184

6.5.1 Allgemeines 184

6.5.2 Mischbetrieb 184

6.5.3 Inselbetrieb 185

6.6 Außenkabelanlagen 185

6.6.1 Allgemeines 185

6.6.2 Einspeisekabel (Mittelspannung) 186

6.6.3 Lichtspeisekabel (Mittelspannung) 186

6.6.4 Bahnspeisekabel 187

6.6.5 Rückleiterkabel 187

6.6.6 Tunnelnotlichtkabel 188

6.6.7 Informationskabel 188

6.6.8 Niederspannungskabel 189

6.7 Energiespeichersysteme 189

6.7.1 Einsatzbereiche 189

6.7.2 Speichertechnologien 190

6.7.3 Stationäre Anwendungsfälle 191

6.8 Literatur 193

7 Energieverteilung bei Wechselstrombahnen 195

7.1 Systeme und deren Eigenschaften 195

7.1.1 Einführung 195

7.1.2 Einspannungssysteme 195

7.1.3 Zweispannungssysteme 196

7.1.4 Drehstromsysteme 200

7.1.5 Gebräuchliche Nennspannungen und Frequenzen 200

7.2 Spezielle Aufgaben der Schaltanlagen in der AC-Bahnenergieversorgung 201

7.3 Bauformen der Schaltanlagen 202

7.3.1 Unterscheidungsmerkmale und Bestandteile 202

7.3.2 Unterwerke 203

7.3.2.1 Knotenunterwerke 203

7.3.2.2 Zwischenunterwerke 207

7.3.3 Umarterwerke als Unterwerke 209

7.3.3.1 Funktionelle Besonderheiten 209

7.3.3.2 Dezentrale Umformerwerke 210

7.3.3.3 Dezentrale Umrichterwerke 212

7.3.4 Schaltposten 213

7.3.5 Kuppelstellen 213

7.3.6	Autotransformatorenstationen	215
7.4	Auslegung der Schaltanlagen	217
7.4.1	Leistung und Leistungsfaktor	217
7.4.2	Spannung	218
7.4.2.1	Berührungsschutz und Mindestabstände	218
7.4.2.2	Isolationskoordination	218
7.4.2.3	Wahl des Isolationspegels	219
7.4.3	Strom	221
7.4.4	Frequenz	221
7.4.5	Unsymmetrie – Reduzierung der Rückwirkungen auf Drehstromnetze	221
7.5	Gestaltung der Schaltanlagen	223
7.5.1	Bauweisen	223
7.5.1.1	Übersicht	223
7.5.1.2	Freiluftschaltanlagen	223
7.5.1.3	Innenraumschaltanlagen	227
7.5.2	Einheitsbauweisen der DB – Normschaltanlagen 16,7 Hz	230
7.5.2.1	Grundlagen	230
7.5.2.2	110-kV-16,7-Hz-Freiluftschaltanlagen	231
7.5.2.3	15-kV-16,7-Hz-Innenraumschaltanlagen	233
7.5.2.4	Eigenbedarfsversorgung	236
7.5.2.5	Stationsleittechnik	239
7.5.2.6	Gebäude und Tragwerke	243
7.6	Hauptkomponenten	244
7.6.1	Bahn-Haupttransformatoren	244
7.6.1.1	Allgemeines	244
7.6.1.2	Haupttransformatoren für Einspannungssysteme	251
7.6.1.3	Haupttransformatoren für Mehrspannungssysteme	251
7.6.1.4	Autotransformatoren	252
7.6.2	Leistungsschalter	253
7.6.2.1	Allgemeines	253
7.6.2.2	Leistungsschalter für Hoch- und Höchstspannung	262
7.6.2.3	Leistungsschalter für Mittelspannung	267
7.6.3	Lastschalter	271
7.6.4	Leistungstrennschalter, Lasttrennschalter und Trennschalter	272
7.6.4.1	Allgemeines	272
7.6.4.2	Übersicht und Definitionen	272
7.6.4.3	Trennschalter für Höchst- und Hochspannung	273
7.6.4.4	Mittelspannung	274
7.6.5	Erdungsschalter	276
7.6.6	Messwandler	276
7.6.6.1	Allgemeines	276
7.6.6.2	Auswahl der Spannungswandler	278
7.6.6.3	Auswahl der Stromwandler	279
7.6.6.4	Bauarten der Messwandler für Hoch- und Höchstspannungsanlagen	280
7.6.6.5	Ausführung der Messwandler in Mittel- und Niederspannungsanlagen	281

7.6.7	Steuereinrichtungen	282
7.6.7.1	Besonderheiten für AC-Anlagen	282
7.6.7.2	Beispiele ausgeführter Anlagen	282
7.7	Spezielle Komponenten	286
7.7.1	Kurzschlussstrom-Begrenzungseinrichtungen	286
7.7.2	Wiedereinschaltautomatik und Streckenprüfung	287
7.7.3	Fehlerortung	290
7.7.4	Kompensations- und Filteranlagen	292
7.7.4.1	Notwendigkeit	292
7.7.4.2	Ungeregelte Kompensationsanlagen	293
7.7.4.3	Geregelte Kompensationsanlagen	295
7.7.4.4	Filteranlagen	296
7.7.5	Längskondensatoren	297
7.7.6	Maßnahmen zur Minderung von Unsymmetrien im Drehstromnetz	299
7.7.6.1	Allgemeines	299
7.7.6.2	Mittelbare Maßnahmen	299
7.7.6.3	Unmittelbare Maßnahmen	301
7.8	Literatur	305
8	Energieversorgung von Magnetbahnsystemen	309
8.1	Entwicklungsstand der Magnetfahrtechnik weltweit	309
8.2	Magnetschnellbahn Transrapid	312
8.2.1	Entwicklungsschritte	312
8.2.2	Transrapid-Technologie	313
8.2.2.1	Gesamtsystem	313
8.2.2.2	Fahrzeuge	314
8.2.2.3	Antrieb	315
8.3	Anforderungen an die Bahnenergieversorgung	319
8.3.1	Verbraucherstruktur und Versorgungskonzept	319
8.3.2	Leistungs- und Energiebedarf	321
8.3.2.1	Überblick	321
8.3.2.2	Traktionsenergie	321
8.3.2.3	Nebenbedarf	326
8.3.2.4	Bordenergiebedarf der Fahrzeuge	327
8.3.3	Sicherheitsanforderungen	327
8.4	Aufbau der Energieversorgungsanlagen	328
8.4.1	Überblick	328
8.4.2	Hochspannungseinspeisung 110 kV / 20 kV	328
8.4.3	Eigenbedarfsversorgung 0,4 kV	330
8.4.4	Streckenversorgung 20 kV / 0,4 kV	331
8.4.5	Bordnetzeinspeisung 0,4 kV DC	331
8.4.6	Leittechnik	334
8.4.7	Antriebssystem	335
8.4.7.1	Eingangsschaltanlage	335
8.4.7.2	Umrichter	335

8.4.7.3	Ausgangsschaltanlage	336
8.4.7.4	Streckenkabel	336
8.4.7.5	Schaltstellen	337
8.4.7.6	Langstatorwicklung	338
8.5	Literatur	338
9	Netzleittechnik	339
9.1	Einführung und allgemeine Begriffe	339
9.1.1	Übersicht	339
9.1.2	Fernwirktechnik	340
9.1.2.1	Definition	340
9.1.2.2	Begriffe	340
9.1.3	Automatisierungstechnik	341
9.2	Hierarchieebenen und Funktionen	342
9.2.1	Hierarchieebenen	342
9.2.1.1	Überblick	342
9.2.1.2	Leitebenen	343
9.2.1.3	Hierarchieebenen der Netzleittechnik der DB	344
9.2.1.4	Hierarchieebenen der Netzleittechnik bei 50-/60-Hz-Bahnen	347
9.2.1.5	Hierarchieebenen der Netzleittechnik bei DC-Bahnen	347
9.2.2	Funktionen	347
9.2.2.1	Mensch-Maschine-Kommunikation	347
9.2.2.2	Netzleitebene	348
9.2.2.3	Stationsleitebene	349
9.2.2.4	Feldleitebene	350
9.3	Übertragungstechnik	350
9.3.1	Allgemeines	350
9.3.1.1	Einführung	350
9.3.1.2	Begriffe und Erläuterungen	350
9.3.2	Fernmeldetechnik	351
9.3.3	Fernwirktechnik	352
9.3.4	Anbindungskonzepte	352
9.3.4.1	Allgemeines	352
9.3.4.2	Realisierungsmöglichkeiten	352
9.3.5	Netzaufbau	353
9.3.5.1	Nutzung vorhandener Übertragungstechnik	353
9.3.5.2	Nutzung des Meldeanlagensystems MAS 90	354
9.3.6	Zukunftweisende Übertragungs- und Verbundsysteme	354
9.4	Literatur	354
10	Bahnenergiezuführung	357
10.1	Anforderungen und Vorgaben	357
10.2	Fahrleitungssysteme	360
10.2.1	Begriffe	360
10.2.2	Oberleitungen	362

10.2.2.1	Allgemeines	362
10.2.2.2	Drähte und Seile	362
10.2.2.3	Einfachoberleitungen	364
10.2.2.4	Hoch- und Flachkettenoberleitungen	365
10.2.3	Stromschienen	367
10.2.4	Stromschienenoberleitungen	368
10.3	Fahrleitungsschaltungen	368
10.3.1	Anforderungen	368
10.3.2	Speisearten	369
10.3.3	Fahrleitungsschaltungen im AC-Fernverkehr	369
10.3.4	Fahrleitungsschaltung bei Gleichstrom-Nahverkehrsbahnen	374
10.4	Bahnenergieleitungen	378
10.5	Oberleitungen	379
10.5.1	Aufbau	379
10.5.2	Gestaltung der Oberleitung	380
10.5.3	Nichtisolierende und isolierende Überlappungen	384
10.5.4	Elektrische Verbindungen	386
10.5.5	Elektrische Trennungen	386
10.5.6	Fahrleitungstrennschalter	387
10.5.7	Schutzstrecken und Phasentrennstellen	387
10.5.8	Systemübergänge	390
10.5.8.1	Einführung	390
10.5.8.2	Systemtrennstellen auf freien Strecken	390
10.5.8.3	Systemwechselbahnhöfe	391
10.5.9	Besonderheiten beim Betreiben von Oberleitungen	392
10.6	Stromschienen	393
10.6.1	Bauarten	393
10.6.2	Stromschienenarten	395
10.6.3	Stromschientrennstellen	397
10.7	Stromschienenoberleitung	397
10.8	Bahnstromrückleitungsanlagen	399
10.8.1	Einführung	399
10.8.2	Gleichstrombahnen	402
10.8.3	Wechselstrombahnen	402
10.8.3.1	Gestaltung der Bahnstromrückführung	402
10.8.3.2	Bänderer	402
10.8.3.3	Rückleitungs- und Erdseile	403
10.8.3.4	Boostertransformatoren	403
10.8.3.5	Autotransformatoren	404
10.8.3.6	Kombinierte Streckenspeisung mit Auto- und Boostertransformatoren	404
10.8.3.7	Rückleitung zwischen Gleis und Unterwerk	406
10.9	Bahnerdung	406
10.9.1	Allgemeines	406
10.9.2	Gleichstrombahnen	406
10.9.2.1	Offene Strecken	406

10.9.2.2	Tunnel	408
10.9.2.3	Erdseile bei Gleichstrombahnen	408
10.9.2.4	Werkstätten und Wagenhallen	409
10.9.3	Traktionsstromrückführung und Erdung bei AC-Bahnen der DB	410
10.9.3.1	Allgemeines	410
10.9.3.2	Gleisstromkreise – Traktionsstromrückleitung und Bahnerdung	410
10.9.4	Schienen- und Gleisverbinder	412
10.10	Leistungsübertragung von der Fahrleitung zum Stromabnehmer	414
10.10.1	Einführung	414
10.10.2	Simulation des Zusammenwirkens von Oberleitungen und Stromabnehmern	414
10.10.3	Messungen und Prüfungen	415
10.10.4	Grenzen der Leistungsübertragung	415
10.10.5	Vorgaben für das Zusammenwirken von Oberleitung und Stromabnehmer	416
10.11	Literatur	416
11	Spannungshaltung	421
11.1	Einleitung	421
11.1.1	Notwendigkeit der Spannungshaltung	421
11.1.2	Historische Entwicklung	422
11.1.3	Gegenwärtiger Stand	422
11.1.4	Einflussgrößen auf die Spannungshaltung	423
11.2	Impedanzen von konzentrierten Betriebsmitteln	423
11.2.1	Überblick	423
11.2.2	Quellimpedanz	424
11.2.3	Impedanz von Generatoren	425
11.2.4	Impedanz von Transformatoren	426
11.2.4.1	Allgemeines	426
11.2.4.2	Drehstromtransformatoren	426
11.2.4.3	Mehrwicklungstransformatoren	426
11.2.4.4	Einphasentransformatoren	427
11.2.5	Impedanz von Drosseln (Kurzschlussstrom-Begrenzungseinrichtungen)	428
11.2.6	Impedanz von Kondensatoren	428
11.3	Impedanz- und Kapazitätsbeläge von Freileitungen	429
11.4	Streckenimpedanz	429
11.4.1	Überblick	429
11.4.2	Grundlagen	429
11.4.2.1	Resistanzbelag	429
11.4.2.2	Reaktanzbelag	432
11.4.2.3	Impedanzbelag	434
11.4.3	Berechnung von Streckenimpedanzen	434
11.4.3.1	Einfluss der Stromverteilung auf die Streckenimpedanz	434
11.4.3.2	Einfluss der Frequenz auf die Resistanz	437
11.4.4	Praktische Werte für Streckenimpedanzen	437
11.4.4.1	Übersicht	437
11.4.4.2	Widerstandsbeläge bei Gleichstrombahnen	438

11.4.4.3 Streckenimpedanzen von Einphasenwechselstrombahnen 438

11.4.5 Ableitungsbelag Gleis-Erde 440

11.5 Spannungsfälle beim Fahren und Bremsen 443

11.5.1 Allgemeines 443

11.5.1.1 Einführung 443

11.5.1.2 Unterschiedliche Betriebsfälle 443

11.5.1.3 Leistungsverluste und Wirkungsgrad 447

11.5.2 Spannungsfälle und Leistungsverluste bei einseitiger Speisung 447

11.5.2.1 Ein Zug im Abschnitt 447

11.5.2.2 Mehrere Züge im Abschnitt 448

11.5.2.3 Berechnung mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsrechnung 450

11.5.3 Spannungsfälle und Leistungsverluste bei zweiseitiger Speisung 451

11.5.3.1 Ein Zug im Abschnitt 451

11.5.3.2 Mehrere Züge im Abschnitt 452

11.5.3.3 Berechnung mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsrechnung 453

11.5.4 Spannungsfälle und Leistungsverluste bei zweigleisigen Strecken mit Quer-
kupplungen 453

11.5.4.1 Allgemeines 453

11.5.4.2 Ein Zug in beiden parallelen Abschnitten 454

11.5.4.3 Mehrere Züge im Abschnitt 455

11.5.4.4 Berechnung mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsrechnung 457

11.5.5 Berechnung der Spannungsfälle und Leistungsverluste bei determinierter di-
gitaler Zugfahrtsimulation nach Fahrplan 459

11.5.6 Berechnung der Spannungsfälle und Leistungsverluste nach stochastischer
Methode 459

11.5.7 Über- und Unterschreitungsdauerkurven zur Bewertung von Spannungsnive-
aus in Bahnnetzen 462

11.5.8 Qualitätsindex der Spannung 465

11.5.8.1 Anlass und Definition 465

11.5.8.2 Werte 466

11.5.8.3 Benutzung des Qualitätsindex 466

11.6 Einfluss der Spannung auf das Betriebsverhalten elektrischen Triebfahrzeuge . . . 468

11.6.1 Einführung 468

11.6.1.1 Zugkraft-Geschwindigkeit-Kennlinie 468

11.6.1.2 Einflussgrößen 469

11.6.2 Zusammenhang von Zugkraft, Wirkleistung und Strom 470

11.6.2.1 Definitionen 470

11.6.2.2 Beispiele für unterschiedliche Fahrzeugtypen 470

11.7 Literatur 476

12 Kurzschluss in Bahnenergieanlagen 479

12.1 Grundlagen 479

12.2 Kurzschluss in Anlagen der Bahnenergiebereitstellung, -übertragung und -vertei-
lung 480

12.3 Kurzschluss im Fahrleitungsnetz 480

12.3.1	Häufigkeit und Ursachen	480
12.3.2	Wirkungen des Kurzschlussstroms	481
12.4	Kurzschluss auf dem Triebfahrzeug	483
12.4.1	Einführung	483
12.4.2	Selektive Abschaltung auf dem Triebfahrzeug	483
12.4.3	Schnelle Abschaltung in der Speisestelle	484
12.5	Berechnung des Kurzschlussstroms	484
12.5.1	Höhe des Kurzschlussstroms	484
12.5.2	Impedanzen der Kurzschlussbahn	484
12.5.2.1	Einführung	484
12.5.2.2	Einzelimpedanzen	485
12.5.2.3	Allgemeine Aussagen zur Streckenimpedanz	485
12.6	Besonderheiten bei Gleichstrombahnnetzen	486
12.6.1	Allgemeines	486
12.6.2	Kurzschluss in der Gleichspannungsschaltanlage	487
12.6.3	Kurzschluss in der Fahrleitungsanlage	488
12.6.4	Widerstände der Kurzschlussbahn	489
12.6.5	Abschaltung des Kurzschlussstroms	490
12.7	Besonderheiten bei Wechselstrombahnnetzen	491
12.7.1	Kurzschlussstrom und treibende Spannung	491
12.7.2	Verlauf des Kurzschlussstroms	492
12.7.2.1	Gleichstromglied	492
12.7.2.2	Stoßkurzschlussstrom	493
12.7.2.3	Dauerkurzschlussstrom und Kurzzeitstrom	493
12.7.3	Größe der Einzelimpedanzen	494
12.7.3.1	Impedanz der Erzeugereinheit	494
12.7.3.2	Impedanz der Übertragungsleitungen	495
12.7.3.3	Impedanz der Unterwerkstransformatoren	495
12.7.3.4	Impedanz von Kurzschlussstrom-Begrenzungseinrichtungen	496
12.7.3.5	Strombegrenzung durch Schaltlichtbogen	496
12.7.3.6	Streckenimpedanz	496
12.7.3.7	Übergangswiderstand an der Fehlerstelle	499
12.7.4	Ausschalten des Kurzschlussstroms, Lichtbogenarbeit und Kurzschlussdauer	499
12.7.5	Kurzschlussarbeit	504
12.8	Kurzschluss in Magnetbahnsystemen	506
12.8.1	Unterscheidung nach Kurzschlussort und Auswirkung	506
12.8.2	Kurzschluss im Energieversorgungssystem	507
12.8.2.1	Hochspannungseinspeisung 110 kV / 20 kV	507
12.8.2.2	Streckenperipherie und Eigenbedarf 20 kV / 0,4 kV	507
12.8.2.3	Gleichstromversorgung der Stromschienen	508
12.8.3	Kurzschluss im Antriebssystem	509
12.8.3.1	Überblick	509
12.8.3.2	Umrichternahe Kurzschluss	510
12.8.3.3	Kurzschluss in der Antriebsstrecke	511
12.9	Literatur	512

13 Thermisches Bemessen	515
13.1 Grundlagen	515
13.2 Betriebsstatistisches Verfahren	515
13.3 Stochastisches Verfahren	518
13.4 Zeitwichtung	519
13.5 Thermische Berechnungen	520
13.5.1 Grundlagen der thermischen Modellbildung	520
13.5.1.1 Wärmebilanz	520
13.5.1.2 Zugeführte Wärme	520
13.5.1.3 Grundlagen der Wärmeübertragung	521
13.5.1.4 Wärmespeicherung	525
13.5.2 Erwärmungsberechnung homogener Körper	525
13.5.3 Erwärmungsberechnung inhomogener Körper	526
13.5.4 Wärmenetzmethode	527
13.5.5 Thermische Modellierung von Betriebsmitteln	529
13.5.5.1 Oberleitungen/Freileitungen	529
13.5.5.2 Kabel	529
13.5.5.3 Transformator	530
13.5.5.4 Generator	532
13.6 Literatur	533
14 Schutz der Betriebsmittel	535
14.1 Allgemeines	535
14.1.1 Einführung	535
14.1.2 Wichtigste mögliche elektrische Störungsfälle in der Bahnenergieversorgung	535
14.1.3 Überblick	535
14.1.4 Begriffe	536
14.1.4.1 Haupt- und Reserveschutz	536
14.1.4.2 Selektivität und Schnelligkeit	538
14.1.4.3 Kurzschluss, Überlast und Überlastung	539
14.1.4.4 Kippunkt, Rückfall- und Halteverhältnis	539
14.1.4.5 Verfügbarkeit, Über- und Unterfunktion	539
14.2 Vorbeugende elektrische Schutzeinrichtungen	540
14.2.1 Übersicht	540
14.2.2 Überspannungsschutz	540
14.2.2.1 Blitzschutz	540
14.2.2.2 Überspannungsableiter	541
14.2.3 Schutzkondensatoren	541
14.2.4 Erdschlusskompensation	542
14.2.5 Kurzschlussstrombegrenzungs-drosseln	542
14.3 Auslösende elektrische Schutzeinrichtungen	542
14.3.1 Aufgabe	542
14.3.2 Messgrößen	543
14.3.3 Einstellung der Schutzeinrichtungen	543
14.3.4 Übersicht der Schutzmethoden	544

14.4	Konzeptionen für auslösende elektrische Schutzeinrichtungen	544
14.4.1	Einzelne Funktionen der Sekundärschutzeinrichtungen	544
14.4.1.1	Schutzfunktionen mit einer Messgröße	544
14.4.1.2	Schutzfunktionen mit mehreren Messgrößen	547
14.4.1.3	Hilfsfunktionen	550
14.4.2	Vergleichsschutzsysteme	552
14.4.2.1	Überblick	552
14.4.2.2	Messwerte-Vergleichsschutz	552
14.4.2.3	Unsymmetrieschutz	553
14.4.2.4	Kontaktstellungs-Vergleichsschutz	553
14.4.3	Zeitstaffelschutzsysteme	554
14.4.3.1	Überblick	554
14.4.3.2	Mehrstufiger Überstromzeitschutz	555
14.4.3.3	Gerichteter mehrstufiger Überstromzeitschutz	556
14.4.3.4	Distanzschutz	557
14.4.4	Generationen von Schutzeinrichtungen	560
14.4.5	Bauweisen von Schutzeinrichtungen	562
14.4.6	Prüfung der Schutzeinrichtungen	562
14.5	Mechanische Schutzeinrichtungen	563
14.6	Thermische Schutzeinrichtungen	563
14.7	Schutz für Transformatoren	564
14.7.1	Einführung	564
14.7.2	Schutzeinrichtungen für Trockentransformatoren	564
14.7.3	Schutzeinrichtungen für Öltransformatoren	566
14.7.3.1	Übersicht	566
14.7.3.2	Buchholzschutz	566
14.7.3.3	Differenzialschutz	566
14.7.3.4	Kesselschutz	568
14.7.3.5	Rückleistungsschutz	568
14.7.4	Schutzeinrichtungen für Autotransformatoren	569
14.8	Schutz für Bahnstromleitungen	569
14.8.1	Allgemeines	569
14.8.2	Übersicht	570
14.8.3	Fehlerarten	570
14.8.3.1	Einpolige Fehler	570
14.8.3.2	Mehrpole Fehler	571
14.8.4	Fehlererfassung durch Schutzrelais	571
14.8.4.1	Einführung	571
14.8.4.2	Schutz für Drehstromnetze	571
14.8.4.3	Schutz für Wechselstromnetze	572
14.8.4.4	Schutz von Hochspannungskabeln	575
14.9	Schutz für rotierende Maschinen	575
14.9.1	Allgemeines	575
14.9.2	Übersicht	576
14.9.3	Spezialthemen	579

- 14.9.3.1 Ständererdschlusschutz 579
- 14.9.3.2 Überwachung der Wicklungstemperaturen in den Läufern 580
- 14.9.3.3 Lagerstromüberwachung 581
- 14.10 Schutz für Stromrichter 582
 - 14.10.1 Übersicht 582
 - 14.10.2 Schutz für Gleichrichter 582
 - 14.10.2.1 Allgemeines 582
 - 14.10.2.2 Überspannungsschutz 582
 - 14.10.2.3 Überstromschutz 585
 - 14.10.3 Schutz für Umrichter 586
 - 14.10.3.1 Allgemeines 586
 - 14.10.3.2 Schutz der Anlagenteile 587
- 14.11 Fahrleitungsschutz 588
 - 14.11.1 Aufgaben und Anforderungen 588
 - 14.11.2 Funktionelle Anordnung von Schutzeinrichtungen 589
 - 14.11.3 Bestandteile und Gestaltung 591
 - 14.11.3.1 Fahrleitungsschutz in stationären Anlagen 591
 - 14.11.3.2 Schutzkoordination mit rückspeisefähigen Triebfahrzeugen 596
 - 14.11.3.3 Einstellen des Fahrleitungsschutzes 598
 - 14.11.4 Besonderheiten bei Gleichstrombahnen 598
 - 14.11.4.1 Elektrotechnische Parameter 598
 - 14.11.4.2 Schutzeinrichtungen gegen Kurzschluss- und Überlastungsströme 599
 - 14.11.5 Besonderheiten bei Wechselstrombahnen 604
 - 14.11.5.1 Elektrotechnische Parameter 604
 - 14.11.5.2 Schutzeinrichtungen gegen Kurzschluss- und Überlastungsströme 605
 - 14.11.6 Oberleitungsschutz beim Zweispannungssystem 611
- 14.12 Anlagenschutz 611
 - 14.12.1 Aufgaben und Anforderungen 611
 - 14.12.2 Bestandteile und Gestaltung 611
 - 14.12.3 Besonderheiten bei Gleichstrombahnen 612
 - 14.12.3.1 Übersicht 612
 - 14.12.3.2 Einzelheiten 612
 - 14.12.4 Besonderheiten bei Wechselstrombahnen 615
 - 14.12.4.1 Übersicht 615
 - 14.12.4.2 Einzelheiten 615
- 14.13 Literatur 618

15 Bahnrückstromführung, Erdung und elektromagnetische Verträglichkeit 623

- 15.1 Prinzipien der Rückstromführung bei Bahnen 623
- 15.2 Begriffe, Definitionen und Regelwerke 623
 - 15.2.1 Normen und Empfehlungen 623
 - 15.2.2 Rückleitung 625
 - 15.2.3 Erde und Erder 626
 - 15.2.4 Körper (eines elektrischen Betriebsmittels) 626
 - 15.2.5 Bahnerde 626

15.2.6	Oberleitungs- und Stromabnehmerbereich	627
15.2.7	Erdungsspannung und Schienenpotenzial	627
15.2.8	Berührungsspannung und abgreifbare Spannung	628
15.3	Rückstromführung bei elektrischen Bahnen	629
15.3.1	Allgemeine Regeln zur Gestaltung der Rückleitung	629
15.3.2	Rückleitung bei Gleichstrombahnen	631
15.3.2.1	Grundsätze	631
15.3.2.2	Schienenpotenzial von Gleichstrombahnen	632
15.3.2.3	Mechanismen der Streustromkorrosion bei Gleichstrombahnen	634
15.3.2.4	Blitzschutz bei Gleichstrombahnen	636
15.3.2.5	Maßnahmen gegen Streustromkorrosion	636
15.3.3	Rückleitung bei Wechselstrombahnen	639
15.3.3.1	Grundsätze	639
15.3.3.2	Typische Rückleitungssysteme von Wechselstrombahnen	639
15.3.3.3	Schienenpotenzial von Wechselstrombahnen	640
15.3.3.4	Vorgehensweise bei der Erdung von Wechselstrombahnen	643
15.3.4	Gegenseitige Annäherung von Gleich- und Wechselstrombahnen	644
15.3.4.1	Grundsätze	644
15.3.4.2	Beeinflussungen durch die Wechselstrombahn	645
15.3.4.3	Beeinflussung durch die Gleichstrombahn	647
15.4	Elektrische Sicherheit im Bahnbereich	648
15.4.1	Schutz gegen elektrischen Schlag	648
15.4.1.1	Grundsätze	648
15.4.1.2	Schutz gegen elektrischen Schlag bei direktem Berühren	649
15.4.1.3	Schutz gegen elektrischen Schlag bei indirektem Berühren	649
15.4.2	Elektrische Sicherheit und Erdung entlang der Strecke	652
15.4.2.1	Wechselstrombahnen	652
15.4.2.2	Gleichstrombahnen	654
15.5	Erdung von Bahnanlagen	655
15.5.1	Querschnittsfunktion der Erdung	655
15.5.2	Planung der Erdungsmaßnahmen	656
15.5.3	Erdspannung und Berührungsspannung	658
15.5.4	Elektrische Eigenschaften von Erdboden und Erdern	659
15.5.4.1	Messung des spezifischen Erdbodenwiderstands	660
15.5.4.2	Messung des Erdausbreitungswiderstands von Erdungsanlagen	661
15.5.4.3	Weitere Messungen bei Bau und Betrieb	663
15.6	Beeinflussung durch Bahnanlagen	664
15.6.1	Grundlagen	664
15.6.2	Beeinflussungsbereich	664
15.6.3	Folgen der Beeinflussung	665
15.6.4	Beeinflussende Größen	666
15.6.5	Beeinflussungsmechanismen in der Nähe von Fahrleitungsanlagen	667
15.6.5.1	Grundsätze	667
15.6.5.2	Ohmsche Beeinflussung	667
15.6.5.3	Induktive Beeinflussung	668

15.6.5.4 Beeinflussungsmodell von langgezogenen Leiteranordnungen mit gemeinsamer Erdrückleitung 669

15.6.5.5 Kapazitive Beeinflussung 674

15.7 Elektrische und magnetische Felder in der Bahnstromversorgung 676

15.7.1 Natürliche Felder 676

15.7.2 Technische Felder 677

15.7.2.1 Elektrisches Feld 677

15.7.2.2 Magnetisches Feld 677

15.7.3 Felder von Bahnanlagen 678

15.7.3.1 Anforderungen an die Planung der Anlagen 678

15.7.3.2 Gleichstrombahnen 678

15.7.3.3 Wechselstrombahnen 679

15.7.4 Messung von Magnetfeldern 682

15.7.5 Gerätebeeinflussungen durch magnetische Felder 682

15.7.6 Maßnahmen zur Magnetfeldreduktion 683

15.7.7 Stand der Normung und Gesetzgebung 683

15.8 Literatur 686

16 Elektrotechnische Anlagen im Bahnbereich 691

16.1 Allgemeines 691

16.2 Aus dem Drehstromnetz gespeiste Lasten 692

16.2.1 Allgemeines 692

16.2.2 Beleuchtungsanlagen 693

16.2.3 Weichenheizung 693

16.2.4 Zugvorheizanlagen 694

16.2.5 Fahrtreppen und Aufzüge 695

16.2.6 Brandmeldeanlagen 695

16.2.7 Zugsicherungstechnik 695

16.2.8 Betriebsleiteneinrichtungen, Informations- und Telekommunikationsanlagen . . 695

16.2.9 Fremdkunden 696

16.3 Aus dem Traktionsnetz gespeiste Lasten 696

16.3.1 Allgemeines 696

16.3.2 Weichenheizung 696

16.3.3 Weichensteuerung 696

16.3.4 Zugvorheizanlagen 696

16.3.5 Fahrdrähteisung 697

16.3.6 Schuppenprüfanlagen 700

16.4 Elektrische Anlagen in Tunnel 700

16.4.1 Allgemeines 700

16.4.2 Mittelspannungsversorgung 700

16.4.3 Transformatorstationen 702

16.4.4 Niederspannungsschaltanlagen 702

16.4.5 Beleuchtungsanlagen 703

16.4.6 Sicherheitsbeleuchtung/Notbeleuchtung 704

16.4.7 Klima-/Lüftungsanlagen 705

16.4.8	Hebeanlagen/Pumpen/Wehranlagen	705
16.4.9	Brandmeldeanlagen	706
16.5	Literatur	706

Anhang **707**

A Normen und Richtlinien **709**

A.1	Allgemeines	709
A.2	Europäische Richtlinien	709
A.3	IEC-Publikationen	709
A.4	Europäische Normen	710
A.5	UIC-Publikationen	712
A.6	Deutsche Normen	712

B Mehrfach verwendete Abkürzungen **715**

Stichwortverzeichnis **721**