

Inhaltsverzeichnis

Hinweise für die Benutzung des Buchs V

Vorwort..... VII

1	Energiebereitstellung im Verbundnetz.....	1
1.1	Energiebedarf gestern, heute und morgen.....	1
1.2	Möglichkeiten zur Deckung des zukünftigen Energiebedarfs	5
1.2.1	Verbraucherseitige Bedarfsreduktion.....	6
1.2.2	Effiziente und umweltschonende Stromerzeugung.....	9
1.2.2.1	Derzeitiger Kraftwerkspark.....	9
1.2.2.2	Wirkungsgrade der verschiedenen Kraftwerkstypen.....	11
1.2.2.2.1	Carnotisation Gap.....	13
1.2.2.2.2	Component Gap.....	16
1.2.2.2.3	Erzielbare elektrische Nettowirkungsgrade	17
1.2.2.3	Elektrische Energieerzeugung und Umweltbelastung.....	19
1.2.3	Erhöhung des Anteils an erneuerbaren Energieträgern.....	23
1.2.4	Beherrschung der fluktuierenden Einspeisung erneuerbarer Energieerzeugungsanlagen.....	28
1.2.5	Zukünftiger Kraftwerkspark.....	28
1.2.6	Ausblick.....	35
1.3	Elektrisches Energieversorgungssystem.....	35
1.3.1	Hierarchische Netzstruktur.....	36
1.3.2	Netzbetrieb	37
1.3.2.1	Normalbetrieb	37
1.3.2.2	Grenzbereichsbetrieb	41
1.3.2.3	Gestörter Netzbetrieb.....	42
1.3.3	Europäisches Verbundnetz.....	46
1.3.4	Elektroenergiemarkt und Systemführung	47
1.4	Literatur.....	49
2	Zusammenwirken von Kraftwerken und Netz.....	55
2.1	Einleitung	55
2.2	Wirkleistung und Frequenz	57
2.2.1	Dynamisches Frequenzverhalten und Regelmaßnahmen	57
2.2.2	Anforderungen an Primär- und Sekundärregelung	61
2.2.3	Maßnahmen zur Vorhaltung und Aktivierung von Primärregelleistung	62
2.2.3.1	Thermische Kraftwerksblöcke	63
2.2.3.2	(Pump-)Speicherkraftwerke	66
2.2.3.3	Gasturbinen und GuD-Kraftwerke.....	67
2.2.3.4	Kernkraftwerke	68
2.2.4	Betrieb bei quasistationärer Frequenzabweichung	69
2.3	Blindleistung und Spannung.....	70

2.3.1	Spannungsverhalten und generatorseitige Spannungsregelung	71
2.3.2	Anforderungen an die Spannungsregelung	72
2.4	Netzeinspeisung erneuerbarer Energien	73
2.5	Stabilität	74
2.5.1	Spannungsstabilität	74
2.5.2	Statische Stabilität	75
2.5.3	Transiente Stabilität	77
2.6	Netztrennung	80
2.6.1	Netztrennung eines Kraftwerksblocks	81
2.6.1.1	Netzabschaltung	81
2.6.1.2	Generatorabschaltung	83
2.6.2	Netztrennung von Industrieanlagen mit Eigenerzeugung	84
2.7	Aspekte des Transmission Codes	87
2.7.1	Elektrotechnische Aspekte	88
2.7.2	Leittechnische Aspekte	88
2.7.3	Verfahrenstechnische Aspekte	88
2.7.4	Beispiele für die im Netzanschlussvertrag zu detaillierenden Größen	89
2.7.5	Auswirkungen auf das Kraftwerk	90
2.8	Literatur	91
3	Eigenbedarfssystem	93
3.1	Anlagentypen	94
3.1.1	Direkte Energieumwandlung	94
3.1.2	Mechanische Energieumwandlung	97
3.1.2.1	Wasserkraftanlagen	97
3.1.2.2	Meerwasseranlagen	99
3.1.2.3	Windenergieanlagen	101
3.1.2.4	Druckluftspeicherkraftwerke und Entspannungsturbinen	103
3.1.3	Thermische Kraftwerke	105
3.1.4	Kraftwerke mit Verbrennungsmotor	110
3.2	Anforderungen an das elektrische Eigenbedarfssystem	112
3.2.1	Betriebsarten eines Kraftwerks	112
3.2.2	Sicherstellung der Eigenbedarfsversorgung	113
3.2.2.1	Normalnetz	114
3.2.2.2	Notstromnetz	114
3.2.3	Kategorien elektrischer Verbraucher	115
3.2.3.1	Motorische und nicht motorische Verbraucher	115
3.2.3.2	Prozessgebundene und Allgemeinverbraucher	116
3.2.4	Größenordnungen des elektrischen Eigenbedarfs	116
3.3	Prinzipien zur Umsetzung der Anforderungen	117
3.3.1	Strängigkeit und Fehlerkriterien	120
3.3.2	Netzgegebenheiten	121
3.3.3	Rückwirkungen von Verbrauchern und Netzen	122
3.3.3.1	Verbraucher	122
3.3.3.2	Netze	122
3.3.4	Leistungsbilanzen	123
3.3.5	Regelwerke	124
3.4	Grundsaltungen	125

3.4.1	Blockschaltung	125
3.4.2	Sammelschienenschaltung	127
3.4.3	Grundschtplan eines konventionellen Kohlekraftwerks	128
3.4.4	Grundschtplan einer GuD-Anlage	130
3.5	Spannungen und Frequenz	131
3.5.1	Übliche Spannungsebenen	131
3.5.2	Kriterien für die Wahl der Spannungsebenen	131
3.5.3	Leerlauf- und Betriebsspannungen	133
3.5.4	Statische Spannungsänderungen	135
3.5.4.1	Externe Netze	135
3.5.4.2	Innerhalb des Eigenbedarfssystems	136
3.5.5	Spannungseinbrüche	136
3.5.5.1	Einfluss paralleler Verbraucher	138
3.5.5.2	Reduzierung von Spannungseinbrüchen am Verbraucher	139
3.5.6	Kurzzeitige Spannungserhöhungen	141
3.5.7	Spannungshaltung bei verschiedenen Betriebsweisen	141
3.5.7.1	Betrieb mit Generator	141
3.5.7.2	Betrieb am Hauptnetzanschluss ohne Generator	142
3.5.7.3	Betrieb am Reservenetzanschluss	142
3.5.8	Frequenztoleranzen	142
3.6	Umschalteinrichtungen	142
3.6.1	Umschalteinrichtungen für Netze > 1 kV	143
3.6.1.1	Sofortumschaltung	144
3.6.1.2	Schnellumschaltung mit Phasenvergleich	145
3.6.1.3	Restspannungsumschaltung	147
3.6.1.4	Langzeitumschaltung	148
3.6.1.5	Zusatzfunktionen	149
3.6.2	Umschalteinrichtungen für Netze < 1 kV	149
3.6.2.1	Normalnetz	149
3.6.2.2	Unterbrechungsbehaftete Notstromnetze	150
3.6.2.3	Unterbrechungsfreie Notstromnetze	150
3.6.3	Beispiele für den Einsatz von Umschalteinrichtungen	152
3.6.3.1	Kraftwerke mit Blockschaltung und Reservenetzanschluss	152
3.6.3.2	Kraftwerke in der Industrie	153
3.7	Netzformen	155
3.7.1	Netzformen nach Art der Energieverteilung	155
3.7.1.1	Strahlennetz	155
3.7.1.2	Ringnetz	156
3.7.1.3	Maschennetz	156
3.7.2	Netzformen nach Art der Sternpunktbehandlung	157
3.7.2.1	Netz mit isoliertem Sternpunkt	158
3.7.2.2	Netze mit Erdschlusskompensation	159
3.7.2.3	Netz mit niederohmiger Sternpunkterdung	160
3.7.3	Ausführung in Eigenbedarfsnetzen	160
3.7.3.1	Netze mit Spannungen > 1 000 V	160
3.7.3.2	Netze mit Spannungen < 1 000 V	161
3.8	Verhalten bei Kurzschlüssen	162
3.8.1	Kurzschlüsse in der Eigenbedarfsanlage	162

3.8.2	Kurzschlüsse im Verbundnetz	164
3.9	Netzurückwirkungen	166
3.9.1	Oberschwingungen	166
3.9.2	Maßnahmen gegen Oberschwingungen	170
3.9.2.1	Maßnahmen am Verursacher	170
3.9.2.2	Maßnahmen im Netz	171
3.9.2.3	Abhilfemaßnahmen am Gerät	172
3.10	Weiterentwicklung von Eigenbedarfskonzepten	172
3.10.1	Maßnahmen für Kraftwerke mit hohen Verfügbarkeitsansprüchen	172
3.10.1.1	Möglichkeiten zur Kurzschlussstrombegrenzung	173
3.10.1.2	Konstruktive Einbindung der Kurzschlussstrombegrenzer	175
3.10.1.3	Druckbeanspruchung der elektrischen Betriebsräume	176
3.10.1.4	Aufstellung von Block- und Eigenbedarfstransformatoren	178
3.10.2	Zusätzliche Mittelspannungsebene und Transformator kombinationen	179
3.10.2.1	Zusätzliche Mittelspannungsebene bei leistungsstarken Blockanlagen	179
3.10.2.2	Kombinierter Maschinen- und Eigenbedarfstransformator	181
3.10.2.3	Anwendungen	182
3.11	Literatur	184
4	Notstromsystem	187
4.1	Aufgaben des Notstromsystems	187
4.2	Grundzüge des Notstromsystems	188
4.2.1	Struktur	189
4.2.2	Notstromverbraucher	190
4.2.3	Spannungsebenen	191
4.2.4	Verfügbarkeit	192
4.2.5	Unterlagerte Spannungsebenen des Gleichspannungsnetzes	194
4.2.6	Dezentrale Lastschwerpunkte	195
4.2.7	Erdung der Netze	196
4.3	Betriebsarten	197
4.3.1	Batteriegepufferte Gleichspannungsnetze	197
4.3.1.1	Bereitschaftsparallelbetrieb	197
4.3.1.2	Stark- und Ausgleichladung	198
4.3.1.3	Bereitschaftsparallelbetrieb mit Stamm- und Zusatzzellen	198
4.3.1.4	Bereitschaftsparallelbetrieb mit diodenbeschalteter Batterie	199
4.3.1.5	Umschaltbetrieb	199
4.3.2	Unterbrechungsfreie Wechselspannungsnetze	200
4.3.3	Unterbrechungsbehaftete Wechselspannungsnetze	200
4.4	Schaltungskonzepte für konventionelle Anlagen	201
4.4.1	Notstromsystem für Anlagen mit geringem Notstrombedarf	201
4.4.2	Notstromsystem für ein Industrie- bzw. Heizkraftwerk	202
4.4.3	Notstromsystem eines großen kohlegefeuerten Kraftwerksblocks	205
4.5	Schaltungskonzepte in Kernkraftwerken	208
4.5.1	Festlegung der Notstromverbraucher	208
4.5.2	Schutz gegen innere Fehler	209
4.5.3	Schutz gegen äußere Einwirkungen	210
4.5.4	Redundanz und funktionale Unabhängigkeit	210
4.5.5	Notstrombetrieb (gestörter Betrieb)	210

4.5.6	Prüfungen	211
4.5.7	Wiederholungsprüfungen.....	211
4.5.8	Qualitätssicherung	211
4.5.8.1	Alterungsmanagement	212
4.5.8.2	Instandhaltungsstrategien	213
4.6	Literatur.....	213
5	Disposition und Kabelverlegung	215
5.1	Disposition der Eigenbedarfskomponenten.....	215
5.1.1	Komponenten der Eigenbedarfssysteme.....	215
5.1.2	Grundsätzliche Kriterien für die Disposition.....	216
5.1.2.1	Raumbedarf der Eigenbedarfsanlagen	216
5.1.2.2	Systembedingte Kriterien	217
5.1.2.3	Wirtschaftliche Kriterien.....	217
5.1.2.4	Betriebliche Kriterien.....	218
5.1.2.5	Zentrale – dezentrale Aufstellung	218
5.1.2.6	Klassische Disposition eines Schaltanlagegebäudes in einem Großkraftwerk	219
5.1.3	Planung der räumlichen Anordnung	221
5.1.3.1	Planungshinweise.....	221
5.1.3.2	Anforderungen an die bauliche Gestaltung	222
5.1.3.3	Anforderungen an die Anlagentechnik	223
5.1.4	Technische Anforderungen und Vorschriften.....	223
5.1.4.1	Normen	223
5.1.4.2	Räumliche Trennung aus Sicherheits- und Verfügbarkeitsgründen.....	223
5.1.4.3	Bauseitige Brandschutzmaßnahmen	223
5.1.4.4	Flucht- und Rettungswege.....	224
5.1.4.5	Auslegung gegen Erdbeben	224
5.1.5	Elektrische Komponenten des Eigenbedarfs	224
5.1.5.1	Transformatoren	224
5.1.5.2	Mittelspannungsschaltanlagen	227
5.1.5.3	Niederspannungsschaltanlagen.....	228
5.1.5.4	Batterien	229
5.1.5.5	Leittechnikschränke	230
5.1.5.6	Warte und Rechner.....	230
5.2	Kabelverlegung	231
5.2.1	Allgemeine Aufgaben/Anforderungen	231
5.2.2	Definitionen	231
5.2.2.1	Kabel.....	231
5.2.2.2	Kabeltrassen	231
5.2.3	Kriterien für die Verkabelung	233
5.2.3.1	Raumbedarf für die Verkabelung	233
5.2.3.2	Wirtschaftlichkeit	234
5.2.4	Kabelverlegung auf Kabelpools.....	234
5.2.4.1	Anordnung der Kabel	234
5.2.4.2	Belegung von Kabelpools	235
5.2.4.3	Abstände der Kabelpools nach Spannungsebenen.....	235
5.2.4.4	Biegeradien.....	236

5.2.4.5	Kabelbefestigung.....	236
5.2.5	Technische Anforderungen und Vorschriften.....	236
5.2.5.1	Räumliche Trennung aus Sicherheits- und Verfügbarkeitsgründen.....	236
5.2.5.2	Brandschutz.....	236
5.2.5.3	Feuerbeständige Schottungen von Kabeldurchbrüchen.....	237
5.2.5.4	Kabelanlagen mit Funktionserhalt.....	237
5.2.6	Kabeltrassensysteme.....	238
5.2.6.1	Kabelpritschen, Steigetrasen im Innenraum.....	238
5.2.6.2	Kabeltrassen im Gelände.....	240
5.2.6.3	Kabeltragsysteme mit Funktionserhalt.....	241
5.2.7	Planung von Kabeltrassen.....	242
5.2.7.1	Konzeptplanung.....	243
5.2.7.2	Planung in der Entwurfsphase.....	243
5.2.7.3	Planung der Verkabelung.....	243
5.2.7.4	Ausführungsplanung.....	244
5.2.7.5	Anforderungen an die bauliche Gestaltung.....	244
5.3	Literatur.....	245
6	Blitzschutz, Erdung und Überspannungsschutz.....	247
6.1	Schutzphilosophie.....	247
6.1.1	Schutzzonenkonzept.....	247
6.1.2	Bewertung des Blitzrisikos.....	249
6.1.3	Blitzparameter und Blitzentladungen.....	252
6.2	EMV-orientiertes Blitzschutzkonzept.....	255
6.3	Äußerer Blitzschutz.....	258
6.3.1	Fangeinrichtung.....	258
6.3.2	Getrennte Fangeinrichtungen.....	259
6.3.3	Ableitungen.....	259
6.3.4	Isolierte Ableitungen.....	260
6.3.5	Elektrische Isolierung des äußeren Blitzschutzes – Trennungsabstand.....	262
6.4	Gebäude- oder Raumschirme.....	263
6.5	Erdungsanlagen.....	265
6.6	Potentialausgleichsnetzwerk.....	266
6.7	Innerer Blitzschutz – Überspannungsschutz.....	268
6.7.1	Schutzgeräte an der Schnittstelle LPZ 0 _A /1.....	269
6.7.2	Schutzgeräte an der Schnittstelle LPZ 1/2 und höher.....	271
6.8	Zusammenfassung.....	273
6.9	Literatur.....	273
7	Selektivschutz im Kraftwerk.....	275
7.1	Einführung.....	275
7.2	Allgemeine Anforderungen an den Selektivschutz.....	275
7.3	Besondere Anforderungen an den Generatorschutz.....	276
7.4	Ursachen für die Gefährdung rotierender Maschinen.....	276
7.4.1	Gefährdung einer rotierenden Maschine bei äußerem Fehler.....	277
7.4.1.1	Kurzschluss.....	277
7.4.1.2	Schieflast (Unsymmetrie).....	277
7.4.1.3	Fehlsynchronisation.....	277

7.4.1.4	Unter-/Überfrequenz	278
7.4.2	Gefährdung rotierender Maschinen bei inneren Fehlern.....	278
7.4.2.1	Wicklungsschluss	278
7.4.2.2	Ständererdschluss	279
7.4.2.3	Windungsschluss.....	280
7.4.2.4	Läufererdschluss	280
7.4.3	Gefährdung der Antriebsmaschine bei Rückleistung	280
7.5	Netzanschluss und Schutzkonzept.....	281
7.6	Schutzeinrichtungen des Generators.....	282
7.6.1	Überstromzeit- und Impedanzschutz.....	282
7.6.2	Differenzialschutz des Generators	283
7.6.3	Ständererdschlusschutz	284
7.6.3.1	Ständererdschlusschutz bei Blockschaltung mit etwa 90 %-Schutzbereich.	284
7.6.3.2	Ständererdschlusschutz bei Blockschaltung mit 100 %-Schutzbereich....	287
7.6.3.3	Ständererdschlusschutz bei Sammelschienenschaltungen	290
7.6.4	Windungsschlusschutz.....	291
7.6.5	Spannungssteigerungsschutz.....	291
7.6.6	Schiefastschutz	291
7.6.7	Untererregungsschutz	292
7.6.8	Frequenzrückgangsschutz, Frequenzsteigerungsschutz.....	292
7.6.9	Polschlupfschutz	293
7.6.10	Läufererdschlusschutz	294
7.6.11	Läuferüberlastschutz	295
7.6.12	Rückleistungsschutz	295
7.6.13	Kraftwerkentkupplungsschutz.....	296
7.7	Schutz des Blocktransformators	296
7.7.1	Distanzschutz auf der Oberspannungsseite.....	296
7.7.2	Differenzialschutz.....	298
7.7.3	Buchholz-Schutz.....	298
7.7.4	Erdschlusschutz auf der Oberspannungsseite des Blocktransformators	298
7.7.5	Erdschlusschutz auf der Unterspannungsseite des Blocktransformators....	299
7.7.6	Übererregungsschutz	299
7.7.7	Sonstige Schutz- und Überwachungseinrichtungen des Blocktransformators.....	300
7.8	Schutz von Eigenbedarfstransformatoren	300
7.8.1	Überstromzeitschutz auf der Oberspannungsseite (Generatorseite)	300
7.8.2	Überstromzeitschutz auf der Unterspannungsseite (Eigenbedarfsseite).....	300
7.8.3	Differenzialschutz.....	300
7.8.4	Buchholz-Schutz.....	300
7.9	Schutzsystem	300
7.9.1	Schutzeinrichtungen	301
7.9.2	Prüfung der Schutzsysteme	301
7.9.3	Wandler	302
7.9.3.1	Stromwandler.....	302
7.9.3.2	Spannungswandler.....	305
7.9.4	Hilfsstromversorgung	305
7.9.5	Auslösematrix	306
7.9.6	Entregelungseinrichtung	306

7.9.7	Auslösespulen der Leistungsschalter, Schließorgane, Umschalteneinrichtungen	308
7.9.8	Stationäre Prüfeinrichtungen	308
7.9.9	Verkabelung	309
7.9.10	Klemmen	309
7.9.11	Störgrößenaufzeichnung	310
7.9.12	Uhrzeitsynchronisierung digitaler Schutzsysteme	312
7.9.13	Kommunikationsschnittstellen	312
7.10	Schutz der Eigenbedarfsanlagen	314
7.10.1	Mittelspannungsanlagen	317
7.10.2	Niederspannungsanlagen	320
7.11	Schutz der Motoren	321
7.11.1	Hochspannungsmotoren	321
7.11.2	Niederspannungsmotoren	323
7.12	Literatur	323
8	Beleuchtungs- und Installationstechnik	325
8.1	Planung von Beleuchtungsanlagen	325
8.1.1	Anforderungen	325
8.1.2	Auswahl von Lichtquellen und Leuchten	327
8.1.2.1	Lampen und Leuchten für Innenräume	329
8.1.2.2	Lampen und Leuchten für Außenanlagen	331
8.1.3	Berechnung der Beleuchtung	332
8.2	Beleuchtungsarten	336
8.2.1	Normalbeleuchtung	336
8.2.2	Notbeleuchtung	336
8.2.2.1	Sicherheitsbeleuchtung	337
8.2.2.2	Ersatzbeleuchtung	338
8.3	Ausführung von Beleuchtungsanlagen	340
8.3.1	Allgemeine Hinweise zur Beleuchtungsinstallation	340
8.3.2	Anlagenräume	341
8.3.3	Werkstätten	341
8.3.4	Büroräume	342
8.3.5	Besprechungsräume	343
8.3.6	Räume für Schaltanlagen und Elektronikschränke	343
8.3.7	Warten	343
8.3.8	Außenanlagen	344
8.3.9	Anlagensicherungsbeleuchtung	345
8.3.10	Flughindernisbefeuern	346
8.4	Steckdosennetze	347
8.4.1	Steckdosen für 230-V-Wechselstrom	347
8.4.2	Drehstrom/Wechselstrom-Steckdosenkombinationen	348
8.5	Revisionsverteilungen	349
8.6	Literatur	350
8.6.1	Normen	350
8.6.2	Weiterführende Literatur	350

9	Kommunikationstechnik und Anlagensicherheit	353
9.1	Kommunikations- und Informationstechnik, Anlagensicherung	353
9.1.1	Netzwerke und Übertragungstechnik	354
9.1.2	Kommunikationsanlagen	359
9.1.2.1	Telekommunikationsanlage	360
9.1.2.2	Leitstandsfernsprechanlage	366
9.1.2.3	Wechsel- und Gegensprechanlagen	367
9.1.2.4	Inbetriebsetzungs- und Wartungssprechverbindungen	367
9.1.2.5	Alarmanlage	368
9.1.2.6	Drahtlose Personensuchanlage	370
9.1.2.7	Betriebsfunkanlage	373
9.1.2.8	Handsprechfunkgeräte	374
9.1.2.9	Mobiltelefone (GSM/UMTS-Netze)	375
9.1.2.10	Verbindungen nach außen	375
9.1.3	Uhrenanlage	376
9.1.4	Brandmeldeanlage	377
9.1.5	Videoanlage	382
9.1.6	Anlagensicherung	398
9.2	Steuerung und Überwachung der elektrotechnischen Komponenten	407
9.2.1	Steuerung und Überwachung des Eigenbedarfsnetzes	408
9.2.2	Steuerung und Überwachung der prozesstechnischen Abzweige	409
9.2.3	Ankopplung der Schaltanlagen nach IEC 61850	413
9.3	Funktionale Sicherheit – SIL-Ermittlung und -Einstufung nach Performance Level (PL)	415
9.3.1	Einführung	415
9.3.2	Gesetzliche Grundlagen	416
9.3.2.1	Druckgeräte- und Maschinenrichtlinie	417
9.3.2.2	Maschinenrichtlinie	418
9.3.2.3	Umweltrecht	419
9.3.2.4	Sonstige Anwendungsfälle	419
9.3.3	Management der funktionalen Sicherheit	419
9.3.3.1	Ansatz für den Performance Level	419
9.3.3.2	Ansatz für den Safety Integrity Level	419
9.3.4	Sicherheitslebenszyklus	422
9.3.4.1	Konzept und Festlegung des Umfangs	422
9.3.4.2	Gefahren- und Risikoanalyse	424
9.3.4.3	Festlegung der Sicherheitsanforderungen	425
9.3.5	Entwurf, Auslegung und Planung	426
9.3.6	Beispiele für SIL	426
9.3.6.1	Beispiel 1: Wasserrohrkessel nach DIN EN 12952-1 mit Öl- und Staubfeuerung	426
9.3.6.2	Beispiel 2: Großraumwasserkessel nach DIN EN 12953 mit Ölfeuerung	429
9.3.6.3	Beispiel 3: Hochdruckvorwärmer	429
9.3.6.4	Beispiel 4: Turbosatz bestehend aus Dampfturbine und Generator	431
9.4	Literatur	432
9.4.1	Weiterführende Literatur	433
9.4.2	Europäische Rechtsetzung	433
9.4.3	Deutsche Gesetzgebung	434

9.4.4	Technische Normen	434
10	Elektrotechnische Komponenten	437
10.1	Wirkungsgrad elektrotechnischer Komponenten.....	437
10.1.1	Bedeutung des Wirkungsgrads	437
10.1.2	Komponenten-Wirkungsgrad	438
10.1.3	Wirtschaftlichkeit einer Wirkungsgradverbesserung	438
10.1.4	DCF-Methode zur Wirtschaftlichkeitsberechnung.....	439
10.1.5	Anwendung der DCF-Methode an einem Beispiel.....	441
10.1.6	Bewertung der Verlustleistung	442
10.2	Synchrongenerator.....	444
10.2.1	Allgemeines	444
10.2.2	Bauarten und Kühlsysteme	445
10.2.2.1	Luftgekühlte Turbogeneratoren	445
10.2.2.2	Wasserstoffgekühlte Turbogeneratoren	446
10.2.2.3	Direkte Leiterkühlung mit Wasserstoff oder Wasser.....	448
10.2.2.4	Vierpolige Generatoren.....	451
10.2.2.5	Sicherheit wasserstoffgekühlter Generatoren	454
10.2.3	Erregereinrichtungen und Spannungsregelung	455
10.2.3.1	Erregereinrichtungen	455
10.2.3.2	Spannungsregelung	457
10.2.4	Kenngrößen und Kennlinien des Synchrongenerators.....	459
10.2.4.1	Kenngrößen	459
10.2.4.2	Kennlinien.....	462
10.2.5	Anforderungen an den Synchrongenerator.....	465
10.2.6	Anforderungen an die Eigenbedarfsversorgung	466
10.2.7	Maschinentechnischer Generatorschutz.....	469
10.2.8	Montage, Demontage, Schnittstellen mit anderen Kraftwerkskomponenten.....	470
10.3	Transformatoren	472
10.3.1	Maschinentransformator.....	472
10.3.1.1	Ausführung, technische Daten	472
10.3.1.2	Grenzleistung und Transport.....	474
10.3.1.3	Einstellbarkeit der Übersetzung	474
10.3.1.4	Lautstärke, Geräuschbedämpfung	475
10.3.1.5	Isolationskoordination und Überspannungsschutz	476
10.3.1.6	Betriebsüberwachung.....	478
10.3.1.7	Monitoringsysteme.....	480
10.3.1.8	Instandhaltung.....	481
10.3.1.9	Zuverlässigkeit.....	481
10.3.2	Eigenbedarfstransformatoren	482
10.3.2.1	Anforderungen an den Eigenbedarfstransformator	482
10.3.2.2	Übersetzung, Kurzschlussspannung.....	483
10.3.2.3	Wicklungsaufbau und Ersatzschaltbild.....	483
10.3.2.4	Kurzschlussfestigkeit	486
10.3.3	Industrietransformatoren	486
10.3.3.1	Kennzeichen	486
10.3.3.2	Transformatoren im Stromrichterbetrieb.....	487
10.3.3.3	Schwer entflammbare Transformatoren.....	488

10.4	Generatorableitungen und Generatorleistungsschalter	488
10.4.1	Generatorableitungen	488
10.4.1.1	Übersicht, Aufgaben, Anforderungen	488
10.4.1.2	Bauformen	490
10.4.1.3	Auslegungskriterien	491
10.4.1.4	Konstruktiver Aufbau	493
10.4.1.5	Anschlusstechnik	493
10.4.1.6	Erdungs- und Kurzschließvorrichtung (KSV)	495
10.4.1.7	Strom- und Spannungswandler	497
10.4.1.8	Druckhaltung	498
10.4.1.9	Verlustabführung (forcierte Kühlung)	498
10.4.1.10	Verlustreduzierte/optimierte Generatorableitung	500
10.4.1.11	Durchzugsbelüftung	501
10.4.1.12	Überspannungsschutz	501
10.4.2	Generatorleistungsschalersysteme	501
10.4.2.1	Einführung	501
10.4.2.2	Anwendungsbereich	503
10.4.2.3	Funktionsschema	504
10.4.2.4	Bemessungskriterien	504
10.4.2.4.1	Schaltanforderungen	504
10.4.2.4.2	Normen	505
10.4.2.4.3	Thermische Auslegung	505
10.4.2.4.4	Dielektrische Auslegung	506
10.4.2.4.5	Spezielle Anforderungen an Generatorleistungsschalter	506
10.4.2.4.6	Elektrodynamische Beanspruchung (Stoßkurzschlussstrom und Kurzzeitstrom)	509
10.4.2.5	Lebensdauer, Revisionskriterien	509
10.4.2.5.1	Elektrische Lebensdauer	509
10.4.2.5.2	Mechanische Lebensdauer	509
10.4.2.5.3	Zeitliche Lebensdauer	510
10.4.2.6	Aufbau und Funktion des Gesamtsystems	510
10.4.2.6.1	Generatorleistungsschalter	513
10.4.2.6.2	Kondensatoren	513
10.4.2.6.3	Trennschalter	514
10.4.2.6.4	Erdungsschalter	514
10.4.2.6.5	Kurzschließverbindung	514
10.4.2.6.6	Anfahrtschalter	514
10.4.2.6.7	Motorantriebe	515
10.4.2.6.8	Elektrische Komponenten	515
10.4.2.6.9	Steuerung	515
10.4.2.7	Zusammenfassung und Ausblick	515
10.5	Schaltanlagen	516
10.5.1	Mittelspannungsschaltanlagen	516
10.5.1.1	Konstruktiver Aufbau	516
10.5.1.2	Leistungsschalter	522
10.5.1.3	Überspannungen bei Schaltvorgängen	524
10.5.1.4	Sekundäreinrichtungen	525
10.5.2	Niederspannungsschaltanlagen	526

10.5.3	Ausblick	531
10.6	Motoren	531
10.6.1	Antriebsarten	531
10.6.1.1	Der Asynchron- und der Synchronmotor am Netz	531
10.6.1.2	Der Asynchronmotor und der Synchronmotor am Umrichter	535
10.6.2	Vorschriften, Normen	538
10.6.3	Typische Ausführungen von Drehstrommotoren	538
10.6.4	Kabelanschluss	542
10.6.5	Anforderungen des stationären Betriebs	545
10.6.5.1	Anforderungen an die thermische und elektrische Bemessung	545
10.6.5.2	Lagerung, Wellenstrang und Motorbefestigung	546
10.6.6	Anforderungen aus transienten Betriebseinflüssen	550
10.6.7	Wartungsintervalle, Überwachungs- und Schutzeinrichtungen	553
10.7	Stromrichter im Eigenbedarfsnetz	557
10.7.1	Einleitung	557
10.7.2	Grundsaltungen	557
10.7.2.1	Einteilung von Stromrichtern nach Aufgabe	557
10.7.2.2	Einteilung von Stromrichtern nach Erzeugung der Taktfrequenz	558
10.7.2.3	Netzgeführte Stromrichter	558
10.7.2.3.1	Wechselstromgleichrichtung	559
10.7.2.3.1.1	Brückenschaltung	559
10.7.2.3.1.2	Mittelpunktschaltung	560
10.7.2.3.1.3	Glättung mit Kondensatoren	560
10.7.2.3.2	Drehstromgleichrichtung	561
10.7.2.3.2.1	Mittelpunktschaltung	561
10.7.2.3.2.2	Brückenschaltung	563
10.7.2.3.2.3	Höherpulsige Schaltungen	564
10.7.2.3.2.4	Parallelschaltung von Stromrichtern	565
10.7.2.3.3	Gesteuerte Gleichrichtung	566
10.7.2.3.4	Netz- und lastgeführter Wechselrichter	568
10.7.2.3.5	Umkehrstromrichter	569
10.7.2.3.6	Sonderthemen netzgeführter Stromrichter	569
10.7.2.3.6.1	Kommutierung	569
10.7.2.3.6.2	Stromrichterrückwirkungen	570
10.7.2.3.6.3	Oberschwingungsbilanz	571
10.7.2.4	Zwischenkreislose Drehstromschaltungen	573
10.7.2.4.1	Direktumrichter	573
10.7.2.4.2	Drehstromsanftanlasser	574
10.7.2.5	Selbstgeführte Stromrichterschaltungen	575
10.7.2.5.1	Gleichstromabwärtssteller	576
10.7.2.5.2	Gleichstromaufwärtssteller	577
10.7.2.5.3	Vollbrücke	578
10.7.2.6	Selbstgeführte Wechselrichter	579
10.7.2.6.1	Pulswechselrichter	579
10.7.2.6.2	Aktive Gleichrichter	580
10.7.2.6.3	Aktive Filter	581
10.7.2.6.4	Multi-Level-Umrichter	582
10.7.3	Kühlung von Stromrichtern	585

10.7.4	Regelung von Stromrichtern	585
10.7.4.1	Grundlagen	585
10.7.4.2	Typische Reglerstruktur	586
10.7.4.3	Feldorientierte Regelung	588
10.7.5	Stromrichtersysteme und Lasten	590
10.7.5.1	Gleichstrommaschinen	590
10.7.5.1.1	Maschinenverhalten	590
10.7.5.2	Asynchronmaschinen	591
10.7.5.2.1	<i>U/f</i> -Regelung	591
10.7.5.2.2	Drehzahlregelung	593
10.7.5.2.3	Generatorischer Betrieb	593
10.7.5.2.4	Netzbelastung bei Betrieb von Motoren mit Frequenzumrichtern	594
10.7.5.2.5	Wicklungsbelastung von Motoren bei Pulswechselrichterbetrieb	595
10.7.5.3	Stromrichteromotor	597
10.7.5.4	Netzkupplungen	599
10.7.5.5	Untersynchrone Stromrichtererkaskade	599
10.8	Armaturenantriebe	601
10.8.1	Einleitung	601
10.8.2	Armaturen	601
10.8.2.1	Bauformen	601
10.8.2.2	Anforderungen an Stellantriebe	602
10.8.2.3	Momentenverlauf	603
10.8.2.4	Abtriebsformen	604
10.8.3	Antriebsarten	604
10.8.3.1	Bewegungsarten	604
10.8.3.2	Nutzungsarten	604
10.8.3.3	Antriebsenergie	605
10.8.4	Elektromotorische Stellantriebe	607
10.8.4.1	Aufbau	607
10.8.4.2	Energieversorgung	609
10.8.4.3	Signalaustausch	610
10.8.4.4	Auslegung	613
10.8.5	Magnetventile	614
10.8.5.1	Aufbau	614
10.8.5.2	Energieversorgung	614
10.8.5.3	Ansteuerung/Rückmeldung	614
10.8.6	Ausblick in die Zukunft	614
10.9	Kabel, Leitungen, Garnituren	615
10.9.1	Aufbauelemente für Kabel und Leitungen	615
10.9.1.1	Leiter	615
10.9.1.2	Isolierung	615
10.9.1.3	Mäntel und schützende Aufbauelemente	617
10.9.2	Hoch- und Höchstspannungskabel	617
10.9.2.1	Kabelauswahl	617
10.9.2.2	VPE-isolierte Hochspannungskabel	617
10.9.2.3	Hochspannungsgarnituren	618
10.9.2.4	Prüfanforderungen für Hoch- und Höchstspannungskabel	619
10.9.3	Mittelspannungskabel	619

10.9.3.1	PVC-isolierte Kabel	619
10.9.3.2	VPE-isolierte Kabel.....	620
10.9.3.3	VDE-Bestimmungen.....	620
10.9.4	Niederspannungskabel.....	620
10.9.4.1	PVC-isolierte Kabel	620
10.9.4.2	VPE-isolierte Kabel.....	621
10.9.4.3	VDE-Bestimmungen.....	621
10.9.5	Leitungen.....	621
10.9.5.1	Starkstromleitungen für feste Verlegung.....	621
10.9.5.2	Starkstromleitungen für beweglichen Einsatz	622
10.9.6	Sonderkabel und -leitungen	622
10.9.6.1	Halogenfreie Kabel mit besonderen Eigenschaften im Brandfall	622
10.9.6.2	Halogenfreie Kabel mit Mindestanforderungen an Isolations- und Funktionserhalt im Brandfall	623
10.9.6.3	Halogenfreie Leitungen mit besonderen Eigenschaften im Brandfall	624
10.9.7	Kurzschlussfestigkeit	624
10.9.7.1	Thermische Kurzschlussbelastung	624
10.9.7.2	Mechanische Kurzschlussbelastung.....	624
10.9.8	Garnituren.....	625
10.9.8.1	Garnituren für den Mittelspannungsbereich.....	625
10.9.8.2	Steckverbindungen für den Mittelspannungsbereich.....	625
10.9.8.3	Garnituren für den Niederspannungsbereich	627
10.9.8.4	Schrumpfkappen, Schrumpfschläuche und Reparaturmanschetten	627
10.10	Ortsfeste Batterien.....	627
10.10.1	Energiespeicher	627
10.10.2	Funktion einer Batterie	628
10.10.3	Einsatz/Verwendung	629
10.10.4	Auswahl einer geeigneten Batterie	630
10.10.5	Ausführung der Zellengefäße	632
10.10.5.1	Wartungsarme Batteriezellen.....	632
10.10.5.2	Verschlossene Batteriezellen	633
10.10.6	Nenngrößen für den Betrieb stationärer Batterien	633
10.10.6.1	Nennkapazität	633
10.10.6.2	m -stündige Kapazität K_m	634
10.10.6.3	Nennspannung.....	635
10.10.6.4	Gasungsspannung.....	636
10.10.6.5	Entladeschlussspannung.....	636
10.10.6.6	Entladestrom	636
10.10.6.7	Nennentladezeit.....	636
10.10.6.8	Nenntemperatur.....	636
10.10.6.9	Nennichte des Elektrolyten (Säuredichte)	638
10.10.6.10	Nennelektrolytstand.....	638
10.10.7	Brauchbarkeitsdauer.....	638
10.10.8	Laden der Batterie.....	639
10.10.8.1	Ladekennlinien	639
10.10.8.2	Erhaltungsladung	642
10.10.8.3	Starkladung	642
10.10.8.4	Ausgleichsladung	642

10.10.9	Ladekreisüberwachung	643
10.10.10	Entladen der Batterie	644
10.10.11	Innenwiderstand R_i und Kurzschlussstrom I_k	646
10.10.12	Ausblick	647
10.11	Gleich- und Wechselrichter, DC/DC-Wandler	648
10.11.1	Gleichrichter	648
10.11.1.1	Gleichrichterarten	649
10.11.1.2	Gleichrichterschaltungen	649
10.11.1.3	Aufbau eines Gleichrichters	650
10.11.1.4	Einsatz/Verwendung	653
10.11.2	Wechselrichter	654
10.11.2.1	Wechselrichterarten	654
10.11.2.2	Wechselrichterschaltungen	655
10.11.2.3	Aufbau eines Wechselrichters	657
10.11.2.4	Einsatz/Verwendung	659
10.11.3	DC/DC-Wandler	660
10.11.3.1	Arten von DC/DC-Wandlern	660
10.11.3.2	DC/DC-Wandler-Schaltungen	660
10.11.3.3	Aufbau eines DC/DC-Wandlers	661
10.11.3.4	Einsatz/Verwendung	663
10.12	Notstromdieselaggregate	664
10.12.1	Anwendungsgebiete	664
10.12.2	Aggregattypen	665
10.12.3	Betriebsarten	667
10.12.4	Hilfseinrichtungen	667
10.12.4.1	Anlassanlage	668
10.12.4.2	Start-Stopp-Automatik	668
10.12.4.3	Steuerung, Regelung und Überwachung	669
10.12.4.4	Kraftstoffanlage	670
10.12.4.5	Luftzufuhr, Ansaug- und Abgasanlage	670
10.12.4.6	Schmierölsystem	670
10.12.4.7	Kühlwassersystem	670
10.12.4.8	Aggregate- und Generatorschutz	671
10.12.4.9	Diesel-Unterverteilung	672
10.12.4.10	Räumliche Anordnung	673
10.12.4.11	Schalldämpfung	673
10.13	Literatur	674
10.13.1	Weiterführende Literatur	680
11	Auslegung und Berechnung von Drehstromanlagen	683
11.1	Kurzschlussstromberechnungen in Drehstromanlagen	685
11.1.1	Impedanzen der Betriebsmittel	687
11.1.2	Kurzschlussstromberechnungen, Verfahren der Ersatzspannungsquelle	703
11.1.3	Beispiel einer Kurzschlussstromberechnung	710
11.2	Wirkungen des Kurzschlussstroms	723
11.2.1	Thermische Wirkungen	723
11.2.2	Dynamische Wirkungen	735
11.2.3	Lichtbögen in Schaltanlagen	736

11.3	Berechnung von Spannungsfällen.....	739
11.3.1	Spannungsfall über Leitungen	740
11.3.2	Spannungsfall über Transformatoren	748
11.3.3	Belastungs- und Spannungsverhältnisse bei Kraftwerksblöcken	756
11.3.4	Spannungseinbruch bei Schaltvorgängen	778
11.4	Optimierung der Betriebsmittelauslegung	791
11.5	Das zeitliche Verhalten des Kurzschlussstroms bei generatornahen Kurzschlüssen.....	792
11.5.1	Generatornaher Kurzschluss am Beispiel eines 800-MW-Steinkohleblocks ..	794
11.5.2	Ausbleibende Nulldurchgänge im Kurzschlussstromverlauf	798
11.5.2.1	Einfluss von Betriebspunkt und Gleichstromzeitkonstante T_g auf den zeitlichen Verlauf des Kurzschlussstroms	799
11.5.2.2	Einfluss des Lichtbogenwiderstands	801
11.6	Bemessung der Mittelspannungskabel	802
11.6.1	Zulässige Strombelastbarkeit.....	802
11.6.2	Kurzschlussstrombeanspruchung.....	803
11.6.3	Berechnungsbeispiel.....	806
11.7	Bemessung der Niederspannungskabel.....	806
11.7.1	Zulässige Strombelastbarkeit.....	807
11.7.2	Kurzschlussstrombeanspruchung.....	808
11.7.3	Abschaltbedingungen im TN-Netz.....	809
11.7.4	Spannungseinbruch beim Motoranlauf	810
11.7.5	Spannungsunterschied bei Betriebsstrom	810
11.7.6	Überschlägige Berechnungen	810
11.7.7	Berechnungsbeispiele.....	812
11.7.7.1	Niederspannungsverbraucher	812
11.7.7.2	Niederspannungsmotor.....	813
11.8	Bemessung der Zusatzkapazitäten der Generatorableitung	814
11.8.1	Überspannung durch Erdschluss im Übertragungsnetz	814
11.8.2	Kapazitiv übertragene transiente Überspannungen	816
11.8.3	Induktiv übertragene transiente Überspannungen	817
11.9	Grundlagen der Selektivitätsberechnung.....	818
11.9.1	Schutzkonzept	818
11.9.2	Kriterien der Schutzeinstellung.....	819
11.9.3	Selektives Abschalten durch Zeitstaffelung	820
11.9.3.1	Selektivität zwischen Sicherungen	820
11.9.3.2	Selektivität zwischen unabhängigen Überstromrelais oder Primärauslösern und nachgeschalteten Niederspannungssicherungen.....	820
11.9.3.3	Selektivität zwischen unabhängigen Überstromsekundärrelais oder Primärauslösern.....	821
11.9.4	Selektives Abschalten durch Stromstaffelung	822
11.9.5	Nachweis der Selektivität.....	822
11.10	Oberschwingungen.....	823
11.10.1	Grundlagen.....	823
11.10.1.1	Analytische Betrachtung von Oberschwingungen	824
11.10.1.2	Kennwerte von überschwingungsbehafteten elektrischen Größen.....	827
11.10.1.3	Wirkung und Ausbreitung von Oberschwingungen in Netzen	828
11.10.2	Berechnung von Oberschwingungen.....	831

11.10.2.1	Rechenverfahren von Hand	833
11.10.2.2	Softwaretechnische Modellierung, Berechnung und Simulation	834
11.10.3	Oberschwingungen in Eigenbedarfsnetzen	836
11.10.3.1	Beispiel zur Oberschwingungskoordination in einem Eigenbedarfsnetz	837
11.10.3.2	Ableitung von Planungsgrundsätzen für Eigenbedarfsnetze	841
11.11	Notstromdieselaggregat	842
11.11.1	Generator	843
11.11.1.1	Bestimmende Merkmale der Generatorauslegung	843
11.11.1.2	Leistungsbilanz	844
11.11.1.3	Generatornennleistung	845
11.11.1.4	Schieflast	846
11.11.1.5	Nennspannung	846
11.11.1.6	Statische und dynamische Toleranzen	846
11.11.1.7	Kurzschlussströme, Reaktanzen, Zeitkonstanten	850
11.11.1.8	Berücksichtigung des Sternpunkts	851
11.11.2	Dieselmotor	852
11.11.2.1	Bestimmende Merkmale der Motorauslegung	853
11.11.2.2	Leistungsabgabe	853
11.11.2.3	Motornennleistung	854
11.11.2.4	Drehzahl und Drehzahlstellbereich	855
11.11.2.5	Kupplung	856
11.11.3	Sondermotoren	857
11.12	Literatur	857
12	Auslegung und Berechnung der unterbrechungsfreien Stromversorgung	861
12.1	Auslegung von Batterie, Gleich- und Wechselrichter	861
12.1.1	Auslegung der Batterie	861
12.1.1.1	Bestimmende Merkmale der Batterieauslegung	862
12.1.1.2	Ermittlung der zulässigen Verbraucherspannungen	863
12.1.1.3	Berücksichtigung des Spannungsfalls	863
12.1.1.4	Ermittlung der Zellenzahl einer Bleibatterie	865
12.1.1.5	Erstellen einer Leistungsbilanz	866
12.1.1.6	Bestimmung der Plattenzahl und Nennkapazität	866
12.1.2	Auslegung des Gleichrichters	870
12.1.2.1	Bestimmende Merkmale der Gleichrichterauslegung	870
12.1.2.2	Erstellen einer Leistungsbilanz	871
12.1.2.3	Bestimmung des Gleichrichternennstroms	871
12.1.2.4	Kurzschluss in einem Verbraucherabgang	872
12.1.3	Auslegung des Wechselrichters	873
12.1.3.1	Bestimmende Merkmale der Wechselrichterauslegung	873
12.1.3.2	Erstellen der Leistungsbilanz	874
12.1.3.3	Bestimmung der Wechselrichterleistung	874
12.1.3.4	Kurzschluss in einem Verbraucherabzweig	875
12.1.4	Kontrollrechnung	875
12.2	Kurzschlussströme und Kurzschlussbeanspruchung in Gleichstromanlagen.	876
12.2.1	Allgemeines	876
12.2.1.1	Einführung	876

12.2.1.2	Begriffe und Erläuterungen	878
12.2.1.3	Zeitverläufe der Kurzschlussströme und standardisierte Näherungsfunktionen	879
12.2.2	Ermittlung der Teilkurzschlussströme	883
12.2.2.1	Ersatzschaltplan	883
12.2.2.2	Resistanz und Induktivität von Leitungsabschnitten	884
12.2.2.3	Gleichrichter	885
12.2.2.3.1	Ersatzschaltplan und Kurzschlussparameter	885
12.2.2.3.2	Dauerkurzschlussstrom I_{kd} und Stoßkurzschlussstrom i_{pd}	887
12.2.2.3.3	Zeitpunkt t_{pd} für den Stoßkurzschlussstrom, Anstiegszeitkonstante τ_{1d} und Abfallzeitkonstante τ_{2d}	888
12.2.2.4	Bleibatterie	889
12.2.2.4.1	Ersatzschaltplan und Kurzschlussparameter	889
12.2.2.4.2	Dauerkurzschlussstrom I_{kB} und Stoßkurzschlussstrom i_{pB}	890
12.2.2.4.3	Zeitpunkt t_{pB} des Stoßkurzschlussstroms, Anstiegszeitkonstante τ_{1B} und Abfallzeitkonstante τ_{2B}	891
12.2.2.5	Kondensator	891
12.2.2.5.1	Ersatzschaltplan und Kurzschlussparameter	891
12.2.2.5.2	Stoßkurzschlussstrom i_{pC} und dessen Zeitpunkt t_{pC}	892
12.2.2.5.3	Anstiegszeitkonstante τ_{1C} und Abfallzeitkonstante τ_{2C}	894
12.2.2.6	Gleichstrommotor	896
12.2.2.6.1	Ersatzschaltplan und Kurzschlussparameter	896
12.2.2.6.2	Dauerkurzschlussstrom I_{kM} und Stoßkurzschlussstrom i_{pM}	896
12.2.2.6.3	Zeitpunkt t_{pM} des Stoßkurzschlussstroms, Anstiegszeitkonstante τ_{1M} und Abfallzeitkonstante τ_{2M}	898
12.2.3	Ermittlung des gesamten Kurzschlussstroms	901
12.2.3.1	Korrekturfaktor für den Teilkurzschlussstrom	901
12.2.3.2	Überlagerung der Teilkurzschlussströme an der Fehlerstelle F_2	903
12.2.4	Mechanische und thermische Beanspruchung	905
12.2.4.1	Mechanische Beanspruchung	905
12.2.4.2	Thermische Beanspruchung	906
12.2.5	Berechnungsbeispiel – 220-V-Gleichstromanlage eines Kraftwerks	908
12.2.5.1	Übersichtsschaltplan und benötigte Daten	908
12.2.5.2	Ermittlung der Teilkurzschlussströme	911
12.2.5.2.1	Kurzschlussstrom des Gleichrichters	911
12.2.5.2.2	Kurzschlussstrom der Batterie	914
12.2.5.2.3	Kurzschlussstrom des Kondensators	915
12.2.5.2.4	Kurzschlussstrom des Gleichstrommotors	916
12.2.5.3	Ermittlung des gesamten Kurzschlussstroms	918
12.2.5.3.1	Ermittlung der Korrekturfaktoren $k_{üd}$, $k_{üb}$ und $k_{üc}$	918
12.2.5.3.2	Teilkurzschlussstromverläufe	919
12.2.5.3.3	Gesamtkurzschlussstrom an der Fehlerstelle F	920
12.2.6	Formelzeichen	922
12.3	Literatur	926
13	Instandhaltung	929
13.1	Grundlagen der Instandhaltung elektrischer Anlagen	929
13.1.1	Instandhaltung heute	930

13.1.2	Der Begriff Anlage in der Instandhaltung	931
13.1.3	Grundbegriffe der Instandhaltung	931
13.1.4	Das Kraftwerk-Kennzeichensystem	933
13.1.5	RDS-PP – eine Weiterentwicklung des KKS-Systems	934
13.1.6	Die Arbeitssicherheit, ein Teil der Instandhaltung	934
13.1.7	Elektrofachpersonal für Betrieb und Instandhaltung	937
13.1.8	Zuverlässigkeit und Ausfallraten	939
13.2	Maßnahmen der Instandhaltung	941
13.2.1	Wartung	941
13.2.2	Inspektion	942
13.2.3	Instandsetzung	942
13.2.4	Zusammenspiel von Wartung, Inspektion und Instandsetzung	943
13.2.5	Instandhaltungsmanagement	944
13.2.6	Revisionen	946
13.3	Instandhaltungskonzepte und -strategien	947
13.3.1	Vorbeugende Instandhaltung	947
13.3.2	Schadensbezogene Instandhaltung	947
13.3.3	Zustandsorientierte Instandhaltung	948
13.3.4	Risikobasierte Instandhaltung	949
13.4	Entwicklung der Instandhaltung	951
13.4.1	Umsetzung neuer Methoden in der Instandhaltung	951
13.4.2	Darstellung der risikobasierten Instandhaltung anhand eines Musterkraftwerks	955
13.5	Anforderung der Instandhaltung bei Neubaukraftwerken	957
13.5.1	Anforderung der Instandhaltung an die Konzeption, Planung und Konstruktion bei Neubaukraftwerken	957
13.5.2	Frühzeitige Vermeidung von Ausfällen	958
13.5.3	Berücksichtigung der Einsatzbedingungen	961
13.5.4	Überwachungs- und Diagnoseeinrichtungen für das Instandhaltungsmanagement	964
13.6	Instandhaltung in der Praxis	968
13.6.1	Personeller Aufbau	968
13.6.2	Administrative Hilfsmittel für eine erfolgreiche Instandhaltung	969
13.6.3	Arbeitsmittel in der Instandhaltung	971
13.6.4	Praktische Instandhaltung der Anlagen	972
13.6.5	Zyklen der Instandsetzung und Revisionen	973
13.7	Beispiele zur Instandhaltung elektrischer Anlagen und Betriebsmittel	974
13.7.1	Generatoren	975
13.7.2	Antriebe	977
13.7.3	Transformatoren	978
13.7.4	Schaltanlagen	980
13.7.5	Batterien	982
13.7.6	Elektronische Leistungseinrichtungen	983
13.7.7	Schutz-, Mess-, Steuer-, Regeleinrichtungen	983
13.7.8	Gebäudetechnik und Wiederholungsprüfungen	984
13.7.9	Fazit und Ausblick	985
13.8	Vorschriften und Literatur	985
13.8.1	Literatur	989

14	Beispiele ausgeführter Anlagen	991
14.1	950-MW-Braunkohlekraftwerk Niederaußem Block K.	991
14.1.1	Einleitung	991
14.1.2	Energieableitung und Eigenbedarfsversorgung	992
14.1.3	Räumliche Anordnung der Eigenbedarfsanlagen	994
14.1.4	Grundzüge der Eigenbedarfsversorgung	996
14.1.5	Notstromversorgung	997
14.1.6	Leittechnisches Feldbuskonzept und Leistungsversorgung der Aktorik	1002
14.1.7	Hauptkomponenten der Eigenbedarfsanlage	1006
14.1.8	Ausblick	1012
14.2	Elektrische Ausrüstung des Kernkraftwerks Brokdorf	1012
14.2.1	Einleitung	1012
14.2.2	Blockschaltung und Netzanschluss mit den Hauptkomponenten	1015
14.2.2.1	Blockschutz	1018
14.2.2.2	Synchronisierung	1019
14.2.2.3	Spannungsregelung	1019
14.2.3	Eigenbedarfsanlage	1022
14.2.3.1	Eigenbedarfsumschaltung	1022
14.2.4	Notstromanlagen	1023
14.2.4.1	Notstromanlage 1	1023
14.2.4.2	Notstromanlage 2	1026
14.2.5	Auslegung der elektrischen Systeme und Komponenten für das Notstromsystem	1027
14.2.5.1	Sicherstellung der betriebsgerechten Spannung und Frequenz	1027
14.2.5.2	Motorauslegung	1029
14.2.5.3	Auslegung der Abzweigkabel	1029
14.3	Elektrische Einrichtungen im Verbundblock Heizkraftwerk 2	
	Altbach/Deizisau	1030
14.3.1	Einführung	1030
14.3.1.1	Standort Kraftwerk Altbach/Deizisau	1030
14.3.1.2	Allgemeine Beschreibung des Verbundblocks Heizkraftwerk 2	1031
14.3.1.3	Leittechnik HKW2	1033
14.3.2	Schaltanlagen	1033
14.3.2.1	Hochspannungsanlagen	1033
14.3.2.2	Mittelspannungsanlagen	1035
14.3.2.3	Niederspannungsanlagen	1037
14.3.2.4	Transformatoren	1039
14.3.3	Elektrische Maschinen und Verbraucher	1040
14.3.3.1	Generatoren	1040
14.3.3.2	Mittelspannungsantriebe	1041
14.3.3.3	Niederspannungsmotoren	1042
14.3.3.4	Regel- und Stellantriebe	1042
14.3.3.5	Umrichter	1043
14.3.3.6	Elektrofilter	1044
14.3.4	Notstromeinrichtungen	1044
14.3.4.1	Gleichspannungsanlagen	1044
14.3.4.2	Unterbrechungslose AC-Stromversorgung	1044
14.3.4.3	Notstromdieselaggregat	1045

14.3.5	Messen, Steuern, Regeln elektrischer Einrichtungen	1045
14.3.5.1	Schutz, Transientenrekorder und Synchronisierung.....	1045
14.3.5.2	Messungen	1046
14.3.5.3	Umschaltautomatiken, Spannungsregler, Unterspannungssteuerung	1046
14.3.6	Installations-, Gebäudetechnik und Kommunikation.....	1047
14.3.6.1	Erdung, Blitzschutz, Kabelwege und Verkabelung	1047
14.3.6.2	Licht- und Kraftinstallation	1048
14.3.6.3	Brandmeldeanlage	1048
14.3.6.4	Kommunikation.....	1048
14.3.7	Zusammenfassung	1049
14.4	Eigenbedarfsanlagen des Pumpspeicherkraftwerks Goldisthal	1049
14.4.1	Allgemeines	1049
14.4.2	Aufbau der Eigenbedarfsversorgung.....	1053
14.4.3	Steuerung des Eigenbedarfs.....	1056
14.4.4	Umschaltautomatiken im Eigenbedarfsnetz	1057
14.4.5	Schwarzanfahren	1058
14.4.6	Im Eigenbedarf eingesetzte Anlagentechnik.....	1058
14.5	Offshorewindpark Horns Rev 1 in Dänemark.....	1059
14.5.1	Einleitung	1059
14.5.2	Der Windpark.....	1061
14.5.3	Kommunikation und Datenübertragung	1062
14.5.4	Die 34-kV-Mittelspannungsverteilung	1064
14.5.5	Niederspannungsverteilung	1067
14.5.6	Wirk- und Blindleistungsregelung.....	1068
14.6	Bahnstromkraftwerke und -umrichter	1071
14.6.1	Einleitung – historische Entwicklung des $16^{2/3}$ -Hz-Bahnstromsystems ...	1071
14.6.2	Struktur des deutschen Bahnenergienetzes.....	1073
14.6.3	Bahnstromkraftwerke.....	1075
14.6.3.1	GuD-Kraftwerk Kirchmöser	1076
14.6.3.2	Pumpspeicherwerk Langenprozelten.....	1078
14.6.4	Rotierende Umformer.....	1079
14.6.4.1	Frequenzstarrer Betrieb.....	1079
14.6.4.2	Frequenzelastischer Betrieb am Beispiel Gemeinschaftskernkraftwerk Neckarwestheim (GKN)	1080
14.6.4.3	Sonstige frequenzelastische Umformer.....	1083
14.6.5	Statische Umrichter	1084
14.6.5.1	Brückenwechselrichter in Zweipunkt-GTO-Schaltungstechnik.....	1084
14.6.5.2	Wechselrichter in Dreipunkt-GTO-Schaltungstechnik	1087
14.6.5.3	Eigenbedarfsversorgung eines Groß-Bahnstromumrichters	1093
14.6.5.4	Regelung des Frequenzumrichters	1095
14.6.6	Besonderheiten des Netzschutzes bei Bahnstromnetzen	1098
14.6.6.1	Schutz im 110-kV-Übertragungsnetz	1098
14.6.6.2	Schutz im 15-kV-Oberleitungsnetz	1099
14.6.7	Stabilität der Bahnstromnetze bei Umrichterspeisung.....	1100
14.6.8	Systemvergleich $16^{2/3}$ -Hz- und 50-Hz-Bahnnetze.....	1102
14.7	Raffineriekraftwerk Leuna	1105
14.7.1	Energieerzeugung und -ableitung	1105
14.7.2	Eigenbedarfsversorgung	1107

14.7.2.1	Normalnetz	1108
14.7.2.2	Notstromnetze	1109
14.7.3	Auslegungsmerkmale.....	1109
14.7.3.1	110-kV-Schaltanlage	1109
14.7.3.2	Generatoren und Transformatoren.....	1110
14.7.3.3	Komponenten des Notstromnetzes.....	1111
14.7.3.4	Blockschutz.....	1111
14.7.3.5	Lastmanagementsystem/Insellogik	1111
14.7.4	Inselbetrieb	1112
14.8	Industrielle Stromversorgung im Chemiepark Marl	1113
14.8.1	Allgemeines	1113
14.8.2	Verbrauch und Erzeugungskapazität von Dampf und Strom.....	1114
14.8.3	Zuverlässige Stromversorgung der Verbraucher	1115
14.8.4	Zuverlässige Dampfversorgung	1119
14.8.5	Versorgung des elektrischen Kraftwerkseigenbedarfs.....	1121
14.8.6	Wirtschaftliche Versorgung eines Chemiestandorts	1121
14.9	Fernwärmenetz Hamburg	1123
14.9.1	Übersicht	1123
14.9.2	Drehzahlverstellung der Heizwasserpumpen.....	1124
14.9.3	Beispiele für die Ausführung von Eigenbedarfsanlagen in Fernwärmestationen des Hamburger Fernwärmenetzes.....	1128
14.9.3.1	Elektrische Versorgung	1128
14.9.3.2	10-kV-Pumpstation	1129
14.9.3.3	Wärmeumformwerke (WUW).....	1130
14.9.3.4	Wärmespeichersystem mit elektrischer Energieerzeugung und Netzanbindung über Kurzschlussstrombegrenzungsdrösselspule.....	1131
14.9.3.5	Wärmeumformwerk mit elektrischer Energieerzeugung und Netzanbindung über I_S -Begrenzer	1132
14.10	Literatur.....	1133
Die Herausgeber		1139
Die Autoren		1141
Stichwortverzeichnis		1151