

Energietechnik in Kraftwerken und Industrie

Dipl.-Ing. Karlheinz Albert (†)

Professor Dipl.- Ing. Ottomar Apelt

Dipl.-Ing. Gregor Bär

Univ.-Professor Dr.-Ing. Hans-Jürgen Koglin

2., korrigierte Auflage

Inhalt

1	Energiebereitstellung im Verbundnetz	33
1.1	Kraftwerkspark	34
1.2	Übertragungsnetze	41
1.3	Anschluß der Kraftwerke	43
1.3.1	Einspeisung in das Netz	43
1.3.2	Eigenbedarfsversorgung aus dem Netz	44
1.3.3	Synchronisierung	47
1.4	Literatur	48
2	Anforderungen an das Zusammenwirken von Kraftwerken und Netz	49
2.1	Einführung	49
2.2	Wirkleistungs- und Frequenzregelung im Normalbetrieb	49
2.3	Frequenzhaltung im Störfall	56
2.4	Statische Stabilität	60
2.5	Transiente Stabilität	61
2.6	Blindleistung und Spannungshaltung	63
2.7	Eigenbedarfsversorgung	64
2.8	Betrieb bei quasistationärer Spannungs- und Frequenzabweichung	65
2.9	Abfangsicherheit	67
2.10	Schiefast-Bedingungen	67
2.11	Literatur	69
3	Eigenbedarfssystem	71
3.1	Einleitung	71
3.1.1	Allgemeines	71
3.1.2	Anlagentypen	72
3.1.2.1	Kraftwerke allgemein	72
3.1.2.2	Konventionelle Wärmekraftwerke	72
3.1.2.3	Kernkraftwerke	73
3.1.2.4	Wasserkraftwerke	74
3.1.3	Größenordnung des elektrischen Eigenbedarfs	74
3.2	Aufgabenstellung für den elektrischen Eigenbedarf	75

3.2.1	Elektrisches Eigenbedarfssystem	75
3.2.2	Elektrische Eigenbedarfsverbraucher	76
3.2.3	Grundstruktur der Eigenbedarfsanlage	78
3.3	Grundsätzliche Anforderungen an das Eigenbedarfssystem	79
3.3.1	Errichtungsvoraussetzungen	79
3.3.2	Netzgegebenheiten	80
3.3.3	Verfahrenstechnische Abhängigkeiten	80
3.3.4	Rückwirkungen der Verbraucher	81
3.4	Grundschaltungen für die Eigenbedarfsversorgung	81
3.4.1	Sammelschienenschaltung	81
3.4.2	Blockschaltung	82
3.4.2.1	Blockschaltung ohne Generatorschalter	83
3.4.2.2	Blockschaltung mit Generatorschaltung	85
3.5	Auslegungsprinzip	86
3.5.1	Struktur des Eigenbedarfssystems	86
3.5.2	Auslegung der Eigenbedarfsanlage	88
3.5.3	Auswirkung und Reduzierung von Spannungseinbrüchen	88
3.5.3.1	Einfluß paralleler Verbraucher	89
3.5.3.2	Reduzierung von Spannungseinbrüchen am Verbraucher	90
3.5.4	Statische Spannungsänderungen	90
3.5.4.1	Verhalten der Synchronmaschine	91
3.5.4.2	Spannungsfälle	94
3.5.4.3	Netzspannungen bei Normalbetrieb	95
3.5.4.4	Spannungshaltung für den Eigenbedarf bei verschiedenen Betriebsweisen	95
3.5.4.5	Betriebsspannungen im Eigenbedarf	97
3.5.5	Spannungsebenen	97
3.5.6	Leistungsbilanz	101
3.5.6.1	Allgemeines	101
3.5.6.2	Ermittlung des Leistungsbedarfs	102
3.5.6.3	Zusammenfassung	106
3.6	Trenn- und Umschaltautomatiken	106
3.6.1	Kernkraftwerk	106
3.6.2	Industrieanlagen	109
3.7	Dynamisches Verhalten	111
3.7.1	Allgemeines	111
3.7.2	Asynchronmotoren	112
3.7.3	Motoranlauf aus dem Stillstand	114
3.7.4	Kurzschlüsse in der Eigenbedarfsanlage	116

3.7.5	Kurzschlüsse im Verbundnetz	118
3.7.6	Automatische Eigenbedarfsumschaltung	120
3.7.6.1	Sofortumschaltung	120
3.7.6.2	Schnellumschaltung	122
3.7.6.3	Restspannungsumschaltung	122
3.7.6.4	Langzeitumschaltung	123
3.7.7	Blockabschaltungen	123
3.7.7.1	Netzabschaltung	123
3.7.7.2	Generatorabschaltung	124
3.8	Netzformen	125
3.8.1	Netzformen in elektrischen Energieversorgungssystemen	125
3.8.1.1	Strahlennetze	125
3.8.1.2	Ringnetze	128
3.8.1.3	Maschennetze	128
3.8.2	Netzformen im Zusammenhang mit der Sternpunktbehandlung ...	128
3.8.2.1	Allgemeines	129
3.8.2.2	Mittelspannungsanlagen in Kraftwerken	131
3.8.2.3	Niederspannungsanlagen	132
3.9	Besondere Anlageneinrichtungen gegen Netzurückwirkungen	133
3.9.1	Allgemeines	133
3.9.2	Abhilfemaßnahmen am Verursacher	135
3.9.3	Abhilfemaßnahmen im Netz	135
3.9.3.1	Blindleistungskompensation	135
3.9.3.2	Filterkreise	137
3.9.4	Abhilfemaßnahmen am Gerät	137
3.10	Literatur	138
4	Notstromsystem	141
4.1	Aufgaben für den Schutz von Mensch und Anlagen	141
4.2	Prinzip der Notstromversorgung	142
4.3	Schaltungskonzepte für Industrieanlagen	144
4.3.1	Notstromsystem für Anlagen mit geringem Notstrombedarf	146
4.3.2	Notstromsystem für Anlagen mit großem Notstrombedarf	147
4.3.3	Notstromsystem großer Industriewerke	149
4.4	Schaltungskonzepte für konventionelle Kraftwerke	150
4.4.1	Notstromsystem für ein Industriekraftwerk mit Dampf-/Wärmeauskopplung	150
4.4.2	Notstromsystem für einen großen Steinkohlekraftwerksblock	151
4.4.3	Notstromsystem für ein Sammelschienenkraftwerk	152

4.5	Schaltungskonzepte für Kernkraftwerke	153
4.5.1	Festlegung der Notstromverbraucher	154
4.5.2	Schutz gegen innere Fehler	154
4.5.3	Schutz gegen äußere Einwirkungen	155
4.5.4	Redundanz und funktionale Unabhängigkeit	155
4.5.5	Notstrombetrieb	156
4.5.6	Prüfungen	156
4.5.7	Wiederholungsprüfungen	156
4.5.8	Qualitätssicherung	157
4.6	Bemessen des Notstromsystems	157
4.6.1	Erfassen der Verbrauchergruppen	157
4.6.2	Bemessen der Versorgungssysteme	158
4.6.2.1	400-V/230-V-Umformernetz	158
4.6.2.2	24-V-Gleichstromnetz	159
4.6.2.3	220-V-Gleichstromnetz	160
4.6.2.4	Dieselnetz	161
4.6.3	Zusammenschaltung der Versorgungssysteme	162
4.6.4	Räumliche Anordnung	164
4.6.5	Schutz, Steuerung und Überwachung	165
4.7	Bemessen der Komponenten des Notstromsystems	165
4.7.1	Notstromerzeugungsanlagen mit Dieselaggregaten	165
4.7.1.1	Leistungsbilanz	167
4.7.1.2	Auslegung des Notstromdieselaggregats	168
4.7.1.3	Hilfssysteme	174
4.7.1.4	Räumliche Anordnung	176
4.7.1.5	Schutz, Steuerung, Überwachung	176
4.7.2	Gleichstromanlagen mit Batterien und Gleichrichtern	182
4.7.2.1	Zusammenschaltung von Batterie und Gleichrichter	183
4.7.2.2	Leistungsbilanz	186
4.7.2.3	Auslegung der Komponenten	189
4.7.2.3.1	Auslegung der Batterie	189
4.7.2.3.2	Auslegung der Gleichrichtergeräte	192
4.7.2.3.3	Auslegung der DC-DC-Umrichter	195
4.7.2.4	Schutz, Steuerung und Überwachung	196
4.7.3	Notstromanlagen mit Gleichstrom-/Wechselstromumformern	197
4.7.3.1	Leistungsbilanz	198
4.7.3.2	Auslegung der Komponenten	199
4.7.3.2.1	Auslegung der rotierenden Umformer	199
4.7.3.2.2	Auslegung der statischen Wechselrichter	199

4.7.3.3	Schutz, Steuerung und Überwachung	201
4.8	Literatur	203
4.9	Normen, Regeln und Vorschriften	203
5	Disposition und Kabelverlegung	205
5.1	Disposition der Eigenbedarfskomponenten	205
5.1.1	Komponenten der Eigenbedarfssysteme	205
5.1.2	Grundsätzliche Kriterien für die Disposition	205
5.1.2.1	Raumbedarf der Eigenbedarfsanlagen	206
5.1.2.2	Systembedingte Kriterien	206
5.1.2.3	Wirtschaftliche Kriterien	207
5.1.2.4	Betriebliche Kriterien	207
5.1.2.5	Zentrale – dezentrale Aufstellung	207
5.1.2.6	Disposition in einem Kernkraftwerk	208
5.1.3	Planung der räumlichen Anordnung	210
5.1.3.1	Planungshinweise	211
5.1.3.2	Anforderungen an die bauliche Gestaltung	211
5.1.3.3	Anforderungen an die Anlagentechnik	212
5.1.4	Technische Anforderungen und Vorschriften	212
5.1.4.1	Normen	212
5.1.4.2	Räumliche Trennung aus Sicherheits- und Verfügbarkeitsgründen	212
5.1.4.3	Bauseitige Brandschutzmaßnahmen	213
5.1.4.4	Flucht- und Rettungswege	213
5.1.4.5	Auslegung gegen Erdbeben	213
5.1.5	Elektrische Komponenten des Eigenbedarfs	214
5.1.5.1	Transformatoren	214
5.1.5.2	Mittelspannungs-Schaltanlagen	216
5.1.5.3	Niederspannungs- Schaltanlagen	217
5.1.5.4	Batterien	219
5.1.5.5	Leittechnikschränke	219
5.1.5.6	Warte und Rechner	219
5.2	Kabelverlegung	220
5.2.1	Allgemeine Aufgaben/Anforderungen	220
5.2.2	Definition	220
5.2.2.1	Kabel	220
5.2.2.2	Kabeltrassen	221
5.2.3	Kriterien für die Verkabelung	222
5.2.3.1	Raumbedarf für die Verkabelung	223

5.2.3.2	Wirtschaftlichkeit	223
5.2.4	Kabelverlegung auf Kabelpritschen	224
5.2.4.1	Anordnung der Kabel	224
5.2.4.2	Belegung von Kabelpritschen	224
5.2.4.3	Abstände der Kabelpritschen	225
5.2.4.4	Biegeradien	226
5.2.4.5	Kabelbefestigung	226
5.2.5	Technische Anforderungen und Vorschriften	226
5.2.5.1	Räumliche Trennung aus Sicherheits- und Verfügbarkeitsgründen	226
5.2.5.2	Brandschutz	227
5.2.5.3	Feuerbeständige Schottungen von Kabeldurchbrüchen	228
5.2.6	Kabeltrassen	228
5.2.6.1	Kabelpritschen	228
5.2.6.2	Kabeltrassen im Gelände	229
5.2.7	Planung von Kabeltrassen	230
5.2.7.1	Planung in der Konzeptphase	231
5.2.7.2	Planung in der Entwurfsphase	231
5.2.7.3	Planung der Verkabelung	231
5.2.7.4	Planung in der Implementierungsphase	232
5.2.7.5	Anforderungen an die bauliche Gestaltung	232
5.3	Literatur	233
6	Blitzschutz mit Erdung und Überspannungsschutz	235
6.1	Schutzphilosophie	235
6.1.1	Schutzzonenkonzept	235
6.1.2	Erdungssystem	236
6.1.3	LEMP-Parameter	237
6.1.3.1	Blitzströme	237
6.1.3.2	Magnetisches Feld	240
6.2	Äußerer Blitzschutz	240
6.2.1	Fanganordnung	241
6.2.2	Ableitungen	242
6.2.3	Erdungsanlagen	243
6.3	Innerer Blitzschutz	243
6.3.1	Potentialausgleich an der Schnittstelle zwischen den Blitzschutzzonen 0 und 1	244
6.3.1.1	Potentialausgleichschiene	244
6.3.1.2	Potentialausgleichleitungen und Blitzstromableiter	245

6.3.2	Näherungen	247
6.3.3	Schirmung	248
6.3.3.1	Raumschirmung	248
6.3.3.2	Leitungsschirmung	250
6.4	Überspannungsschutz	253
6.4.1	Funktionspotentialausgleich	253
6.4.2	Behandlung von Schnittstellen	257
6.5	Zusätzliche Schutzmaßnahmen gegen SEMP, NEMP und ESD ...	259
6.5.1	SEMP	259
6.5.2	NEMP	259
6.5.3	ESD	261
6.6	Zusammenfassung	261
6.7	Literatur	261
7	Selektivschutz im Kraftwerk	263
7.1	Einführung	263
7.2	Allgemeine Anforderungen an den Selektivschutz	264
7.3	Besondere Anforderungen an den Generatorschutz	264
7.4	Usachen für die Gefährdung einer Maschine	265
7.4.1	Gefährdung einer Maschine vom Netz her	265
7.4.1.1	Kurzschluß	265
7.4.1.2	Schiefast (Unsymmetrie)	265
7.4.1.3	Fehlsynchronisation	266
7.4.1.4	Unterfrequenz	266
7.4.2	Fehler im Generator	266
7.4.2.1	Wicklungsschluß	267
7.4.2.2	Ständererdschluß	267
7.4.2.3	Windungsschluß	267
7.4.2.4	Läufererdschluß	268
7.4.3	Gefährdung der Antriebsmaschine bei Rückleistung	268
7.5	Netzanschluß und Schutzkonzept	268
7.6	Schutzeinrichtungen der Maschine	270
7.6.1	Überstromschutz im Generatorsternpunkt	270
7.6.2	Differentialschutz des Generators	270
7.6.3	Ständererdschlußschutz	271
7.6.3.1	Ständererdschlußschutz bei Blockschaltung mit etwa 90-%-Schutzbereich	271
7.6.3.2	Ständererdschlußschutz bei Blockschaltung mit 100-%-Schutzbereich.....	274

7.6.3.3	Ständererdschlußschutz bei Sammelschienenschaltungen	277
7.6.4	Windungsschlußschutz	278
7.6.5	Spannungssteigerungsschutz	279
7.6.6	Schieflastschutz	279
7.6.7	Untererregungsschutz	279
7.6.8	Frequenzrückgangsschutz	280
7.6.9	Polschlupfschutz	281
7.6.10	Läufererdschlußschutz	282
7.6.11	Läuferüberlastschutz	283
7.6.12	Rückleistungsschutz	283
7.6.13	Kraftwerkentkupplungsschutz	284
7.7	Schutz des Blocktransformators	284
7.7.1	Distanzschutz auf der Oberspannungsseite	284
7.7.2	Differentialschutz	286
7.7.3	Buchholz-Schutz	286
7.7.4	Erdschlußschutz auf der Oberspannungsseite des Blocktransformators	287
7.7.5	Erdschlußschutz auf der Unterspannungsseite des Blocktransformators	287
7.7.6	Überregungsschutz	287
7.7.7	Sonstige Schutz- und Überwachungseinrichtungen des Blocktransformators	288
7.8	Schutz von Eigenbedarfstransformatoren	288
7.8.1	Überstromzeitschutz auf der OS-Seite (Generatorseite)	288
7.8.2	Überstromzeitschutz auf der US-Seite (EB-Seite)	289
7.8.3	Differentialschutz	289
7.8.4	Buchholz-Schutz	289
7.9	Schutzsystem	289
7.9.1	Schutzeinrichtungen	289
7.9.2	Meßwandler	290
7.9.2.1	Stromwandler	290
7.9.2.2	Spannungswandler	292
7.9.3	Hilfsstromversorgung	292
7.9.4	Auslösematrix	293
7.9.5	Entregungseinrichtung	293
7.9.6	Auslösespulen der Leistungsschalter, Schließorgane, Umschalteneinrichtungen	294
7.9.7	Stationäre Prüfeinrichtungen	294
7.9.8	Verkabelung	295

7.9.9	Störgrößenaufzeichnung	295
7.10	Schutz der Eigenbedarfsanlagen	297
7.10.1	Hochspannungsanlagen	298
7.10.2	Niederspannungsanlagen	300
7.11	Schutz der Motoren	301
7.11.1	Hochspannungsmotoren	302
7.11.2	Niederspannungsmotoren	303
7.12	Literatur	303
8	Beleuchtungs- und Installationstechnik	307
8.1	Planung von Beleuchtungsanlagen	307
8.1.1	Anforderungen	307
8.1.2	Auswahl von Lichtquellen und Leuchten	308
8.1.2.1	Lampen und Leuchten für Innenräume	309
8.1.2.2	Lampen und Leuchten für Außenanlagen	311
8.1.3	Berechnung der Beleuchtung	312
8.2	Ausführung von Beleuchtungsanlagen	315
8.2.1	Anlagenräume	315
8.2.2	Werkstätten	316
8.2.3	Büroräume	316
8.2.4	Räume für Schaltanlagen und Elektronikschränke	316
8.2.5	Warten	317
8.2.6	Außenanlagen	317
8.3	Beleuchtungsanlagen und Netze	319
8.3.1	Normalbeleuchtung	320
8.3.2	Notbeleuchtung	320
8.3.2.1	Ersatzbeleuchtung	320
8.3.2.2	Sicherheitsbeleuchtung	321
8.4	Steckdosennetze	322
8.4.1	230-V-Wechselstrom-Steckdosen	322
8.4.2	Drehstrom/Wechselstrom-Steckdosenkombinationen	323
8.5	Stromversorgung für Großrevisionen	323
8.6	Normen	324
8.7	Literatur	324
9	Kommunikationstechnik und Anlagensicherung	325
9.1	Kommunikationsanlagen	326
9.1.1	Fernsprech-Nebenstellenanlage	327
9.1.2	Leitstands-Fernsprechanlage	332

9.1.3	Wechsel- und Gegensprechanlagen	334
9.1.4	Inbetriebsetzungs- und Wartungssprechverbindungen	334
9.1.5	Alarmanlage	335
9.1.6	Drahtlose Personensuchanlage	338
9.1.7	Betriebsfunkanlage	341
9.1.8	Hand-Sprechfunkgeräte	342
9.1.9	Verbindungen nach außen	344
9.2	Uhrenanlage	345
9.3	Brandmeldeanlagen	346
9.4	Fernsehanlagen	351
9.5	Anlagensicherung	363
9.6	Literatur	371
10	Elektrotechnische Komponenten	373
10.0	Wirkungsgrad elektrotechnischer Komponenten	373
10.0.1	Bedeutung des Wirkungsgrads	373
10.0.2	Komponenten-Wirkungsgrad	374
10.0.3	Wirtschaftlichkeit einer Wirkungsgradverbesserung	374
10.0.4	DCF-Methode zur Wirtschaftlichkeitsberechnung	375
10.0.5	Anwendung der DCF-Methode an einem Beispiel und kritische Wertung des Ergebnisses	377
10.0.6	Bewertung der Verlustleistung	378
10.0.7	Literatur	380
10.1	Synchrongenerator	383
10.1.1	Allgemeines	383
10.1.2	Bauarten und Kühlsysteme	385
10.1.2.1	Luftgekühlte Turbogeneratoren	385
10.1.2.2	Wasserstoffgekühlte Turbogeneratoren	386
10.1.2.3	Direkte Leiterkühlung mit Wasserstoff oder Wasser	388
10.1.3	Erregereinrichtungen und Spannungsregelung	394
10.1.3.1	Erregereinrichtungen	394
10.1.3.2	Spannungsregelung	397
10.1.4	Leistungsdiagramm	398
10.1.5	Spannungs-Frequenz-Diagramm (<i>U/f</i>)	399
10.1.6	Anforderungen an die Eigenbedarfsversorgung	399
10.1.7	Maschinentechnischer Generatorschutz	406
10.1.8	Montage, Demontage, Schnittstellen mit anderen Kraftwerkskomponenten	407
10.1.9	Literatur	410

10.2	Transformatoren	411
10.2.1	Blocktransformator	411
10.2.1.1	Ausführung, technische Daten	411
10.2.1.2	Grenzleistung und Transport	413
10.2.1.3	Einstellbarkeit der Übersetzung	413
10.2.1.4	Lautstärke, Geräuschbedämpfung	414
10.2.1.5	Isolationskoordination und Überspannungsschutz	415
10.2.1.6	Betriebsüberwachung	418
10.2.1.7	Zuverlässigkeit	420
10.2.2	Eigenbedarfstransformatoren	421
10.2.2.1	Anforderungen an den Eigenbedarfstransformator	421
10.2.2.2	Übersetzung, Kurzschlußspannung	422
10.2.2.3	Wicklungsaufbau und Ersatzschaltbild	422
10.2.2.4	Kurzschlußfestigkeit	425
10.2.3	Industrietransformatoren	426
10.2.3.1	Kennzeichen	426
10.2.3.2	Transformatoren im Stromrichterbetrieb	427
10.2.3.3	Schwer entflammbare Transformatoren	428
10.2.4	Literatur	429
10.3	Generatorableitungen	431
10.3.1	Übersicht, Aufgaben, Anforderungen	431
10.3.1.1	Bauformen	431
10.3.2	Auslegungskriterien	434
10.3.3	Konstruktiver Aufbau	435
10.3.3.1	Anschlußtechnik	436
10.3.3.2	Erdungs- und Kurzschließvorrichtung	437
10.3.3.3	Strom- und Spannungswandler	437
10.3.3.4	Druckhaltung	439
10.3.3.5	Verlustabführung (forcierte Kühlung)	439
10.3.3.6	Durchzugsbelüftung	440
10.3.3.7	Überspannungsschutz	440
10.3.4	Generatorschalter	441
10.3.4.1	SF ₆ -Generatorschalter	441
10.3.4.2	Druckluft-Generatorschalter	443
10.3.4.3	Nebeneinrichtungen	443
10.3.5	Erdungssystem	444
10.3.6	Verlustbewertung	445
10.3.7	Literatur	445

10.4	Schaltanlagen	447
10.4.1	Mittelspannungsanlagen	447
10.4.1.1	Konstruktiver Aufbau	447
10.4.1.2	Leistungsschalter	452
10.4.1.3	Überspannungen durch Stromabriß	453
10.4.1.4	Sekundäreinrichtungen	456
10.4.2	Niederspannungs-Schaltanlagen	456
10.4.3	Zukünftige Entwicklungen	459
10.4.4	Literatur	459
10.5	Motoren	461
10.5.1	Antriebsarten	461
10.5.2	Vorschriften, Normen	464
10.5.3	Typische Ausführungen von Drehstrommotoren	465
10.5.4	Kabelanschluß	469
10.5.5	Probleme des stationären Betriebs	470
10.5.5.1	Anforderungen an die elektrische Bemessung	470
10.5.5.2	Lagerungen, Kupplungen und Wellenführung	471
10.5.6	Wichtige Ausgleichsvorgänge, ihr Einfluß auf die Bauteilbemessung	474
10.5.7	Überwachungs- und Schutzeinrichtungen	478
10.5.8	Literatur	480
10.6	Armaturenantriebe	483
10.6.1	Einführung	483
10.6.2	Bauarten und Baureihen	483
10.6.2.1	Art der Abtriebsbewegung	483
10.6.2.2	Steuer- und Regelantriebe	484
10.6.3	Konstruktiver Aufbau	485
10.6.4	Zusammenwirken mit der Armatur	488
10.6.4.1	Abschaltversagen	488
10.6.4.2	Anfahrtsicherheit	490
10.6.4.3	Betriebliches Abschalten	490
10.6.5	Zusammenwirken mit der Leittechnik	492
10.6.5.1	Anlagenstruktur	492
10.6.5.2	Regelkreis	493
10.6.5.3	Versorgungsspannung	494
10.6.6	Stellantriebe für kerntechnische Anlagen.....	495
10.6.6.1	Auslegung nach KTA 3504	495
10.6.6.2	Typprüfung nach KTA 3504	495
10.6.7	Verwendete Formelzeichen	496

10.7	Magnetventile	499
10.7.1	Einführung	499
10.7.2	Magnetbauarten	499
10.7.2.1	Aufbau und Wirkungsweise	499
10.7.2.2	Wicklungen für hohe thermische Belastungen	
10.7.3	Ventilbauarten	
10.7.3.1	Magnetventil direktgesteuert	
10.7.3.2	Magnetisch betätigte pilotgesteuerte Ventile	
10.7.4	Auslegung	505
10.7.4.1	Statische Ansprechsicherheit	506
10.7.4.2	Dynamisches Ansprechverhalten	507
10.7.4.3	Versorgungsspannungen	508
10.7.5	Redundante Anordnungen von Magnetventilen	508
10.7.6	Regelwerke für Magnetventile	509
10.8	Kabel, Leitungen, Garnituren	511
10.8.1	Aufbauelemente für Kabel und Leitungen	511
10.8.1.1	Leiter	511
10.8.1.2	Isolierung	511
10.8.1.3	Mäntel und schützende Aufbauelemente	513
10.8.2	110-kV-Kabel	513
10.8.2.1	Kabelauswahl	513
10.8.2.2	VPE-isolierte 110-kV-Kabel	513
10.8.2.3	Hochspannungsgarnituren	514
10.8.3	Mittelspannungskabel	514
10.8.3.1	Kabel für Industrieanlagen	514
10.8.3.2	PVC-isolierte Kabel	515
10.8.3.3	VPE-isolierte Kabel	515
10.8.3.4	VDE-Bestimmungen	516
10.8.4	Niederspannungskabel	516
10.8.4.1	PVC-isolierte Kabel	516
10.8.4.2	VPE-isolierte Kabel	517
10.8.4.3	VDE-Bestimmungen	517
10.8.5	Leitungen	517
10.8.5.1	Starkstromleitungen für feste Verlegung	517
10.8.5.2	Starkstromleitungen für beweglichen Einsatz	518
10.8.6	Sonderkabel und -leitungen	518
10.8.6.1	Halogenfreie Kabel mit besonderen Eigenschaften im Brandfall ..	518
10.8.6.2	Halogenfreie Leitungen mit besonderen Eigenschaften im Brandfall	520

10.8.7	Kurzschlußfestigkeit	520
10.8.7.1	Thermische Kurzschlußbelastung	520
10.8.7.2	Mechanische Kurzschlußbelastung	520
10.8.8	Garnituren	521
10.8.8.1	Garnituren für den Mittelspannungsbereich	521
10.8.8.2	Steckverbindungen für den Mittelspannungsbereich	521
10.8.8.3	Garnituren für den Niederspannungsbereich	522
10.8.8.4	Schrumpfkappen, Schrumpfschläuche und Reparaturmanschetten	523
10.8.9	Literatur	523
11	Auslegungsberechnungen für Drehstromanlagen	525
11.1	Kurzschlußstromberechnung in Drehstromanlagen	528
11.1.1	Einführung	528
11.1.2	Begriffe	528
11.1.3	Ersatzspannungsquelle	530
11.1.4	Berechnung der Betriebsmittelimpedanzen	532
11.1.4.1	Netzeinspeisungen	532
11.1.4.2	Transformatoren	534
11.1.4.3	Generatoren	536
11.1.4.4	Motoren	538
11.1.4.5	Kabel	538
11.1.5	Berechnung der Kurzschlußströme in Kraftwerkseigen- bedarfsanlagen bei symmetrischen (dreipoligen) Fehlern	538
11.1.5.1	Anfangs-Kurzschlußwechselstrom	539
11.1.5.2	Stoßkurzschlußstrom	543
11.1.5.3	Ausschaltwechselstrom	544
11.1.6	Vereinfachte Kurzschlußstromberechnungen	547
11.1.6.1	Vereinfachte Kurzschlußstromberechnung unter Vernachlässigung der Wirkwiderstände	548
11.1.6.2	Abschätzung der Kurzschlußströme durch die Kurzschluß- spannung des Transformators bei Vernachlässigung der vorgeschaleten Impedanzen	548
11.1.6.3	Abschätzung der Kurzschlußströme mit Hilfe eines Diagramms ...	549
11.1.6.4	Beispiel einer vereinfachten Kurzschlußstromberechnung unter Vernachlässigung der Wirkwiderstände	550
11.2	Spannungsfallberechnung in Drehstromanlagen	557
11.2.1	Spannungsfall bei konstantem Strom	558
11.2.1.1	Spannungsfallberechnung bei bekannter Spannung und bekanntem Strom am Anfang einer Impedanz	558

11.2.1.2	Spannungsfallberechnung bei bekanntem induktiven Strom am Ende und bekannter Spannung am Anfang einer Impedanz	562
11.2.2	Spannungsfallberechnung bei spannungsabhängigen Strömen	565
11.2.2.1	Komplexe Spannungseinbruchberechnung	565
11.2.2.2	Überschlägige Spannungseinbruchberechnungen	568
11.2.3	Berechnungsbeispiele	569
11.2.3.1	Berechnung bei konstanten Strömen	571
11.2.3.2	Berechnung bei spannungsabhängigen Strömen	572
11.3	Bemessung der Drehstromanlagen	573
11.3.1	Grenzwerte der Betriebsmittel	573
11.3.2	Optimierungsberechnungen	575
11.4	Bemessung der Mittelspannungskabel	575
11.4.1	Zulässige Strombelastbarkeit	576
11.4.2	Kurzschlußstrombeanspruchung	577
11.4.3	Berechnungsbeispiel	580
11.5	Bemessung der Niederspannungskabel	581
11.5.1	Zulässige Strombelastbarkeit	581
11.5.2	Kurzschlußstrombeanspruchung	583
11.5.3	Abschaltbedingungen im TN-Netz	583
11.5.4	Spannungseinbruch beim Motoranlauf	584
11.5.5	Spannungsunterschied bei Betriebsstrom	584
11.5.6	Überschlägige Berechnungen	585
11.6	Verfügbarkeitsberechnungen	587
11.6.1	Begriffe	587
11.6.2	Vereinfachte Berechnungsverfahren	590
11.6.3	Ausfallraten und Reparaturzeiten	591
11.6.4	Berechnungsbeispiel	593
11.7	Literatur	596
12	Kurzschlußströme und Kurzschlußbeanspruchung in Gleichstromanlagen	599
12.1	Allgemeines	599
12.1.1	Einführung	599
12.1.2	Begriffe und Erläuterungen	600
12.1.3	Zeitverläufe der Kurzschlußströme und standardisierte Näherungsfunktionen	602
12.2	Ermittlung des separaten Kurzschlußstroms	606
12.2.1	Ersatzschaltplan	606
12.2.2	Widerstand und Induktivität von Leitungsabschnitten	607

12.2.3	Gleichrichter	609
12.2.3.1	Ersatzschaltplan und Kurzschlußparameter	609
12.2.3.2	Dauerkurzschlußstrom I_{kd} und Stoßkurzschlußstrom I_{pd}	610
12.2.3.3	Zeitpunkt t_{pd} für den Stoßkurzschlußstrom, Anstiegszeit- konstante τ_{id} und Abfallzeitkonstante τ_{2d}	612
12.2.4	Bleibatterie	612
12.2.4.1	Ersatzschaltplan und Kurzschlußparameter	612
12.2.4.2	Dauerkurzschlußstrom I_{kB} und Stoßkurzschlußstrom I_{pB}	614
12.2.4.3	Zeitpunkt t_{pB} des Stoßkurzschlußstroms, Anstiegszeit- konstante τ_{iB} und Abfallzeitkonstante τ_{2B}	614
12.2.5	Kondensator	615
12.2.5.1	Ersatzschaltplan und Kurzschlußparameter	615
12.2.5.2	Stoßkurzschlußstrom I_{pC} und dessen Zeitpunkt t_{pC}	616
12.2.5.3	Anstiegszeitkonstante τ_{iC} und Abfallzeitkonstante τ_{2C}	618
12.2.6	Gleichstrommotor	620
12.2.6.1	Ersatzschaltplan und Kurzschlußparameter	620
12.2.6.2	Dauerkurzschlußstrom I_{kM} und Stoßkurzschlußstrom i_{pM}	621
12.2.6.3	Zeitpunkt t_{pM} des Stoßkurzschlußstroms, Anstiegszeit- konstante τ_{iM} und Abfallzeitkonstante τ_{2M}	623
12.3	Ermittlung des gesamten Kurzschlußstroms	625
12.3.1	Korrekturfaktor für den separaten Kurzschlußstrom	625
12.3.2	Überlagerung der Teilkurzschlußströme an der Fehlerstelle F_2	628
12.4	Mechanische und thermische Beanspruchung	630
12.4.1	Mechanische Beanspruchung	630
12.4.2	Thermische Beanspruchung	632
12.5	Berechnungsbeispiel: 220-V-Gleichstromanlage eines Kraftwerks	633
12.5.1	Übersichtsplan und benötigte Daten	633
12.5.2	Ermittlung der separaten Kurzschlußströme	637
12.5.2.1	Kurzschlußstrom des Gleichrichters	637
12.5.2.2	Kurzschlußstrom der Batterie	640
12.5.2.3	Kurzschlußstrom des Kondensators	641
12.5.2.4	Kurzschlußstrom des Gleichstrommotors	643
12.5.3	Ermittlung des gesamten Kurzschlußstroms	644
12.5.3.1	Ermittlung der Korrekturfaktoren k_{id} , k_{iB} und k_{iC}	644
12.5.3.2	Teilkurzschlußstromverlauf	646
12.5.3.3	Gesamtkurzschlußstrom an der Fehlerstelle F	648
12.6	Formelzeichen	651

13	Instandhaltung	657
13.1	Instandhaltung elektrotechnischer Anlagen	657
13.1.1	Der Anlagenbegriff in der Instandhaltung	657
13.1.2	Technischer Fortschritt	658
13.2	Grundlagen der Instandhaltung	658
13.2.1	Gegenstand der Instandhaltung	659
13.2.2	Nutzung, Abnutzung und Abnutzungsvorrat	660
13.2.3	Arten der Instandhaltung	662
13.2.3.1	Wartung	663
13.2.3.2	Inspektion	664
13.2.3.3	Instandsetzung	665
13.2.3.4	Instandhaltungsstrategie und Revisionsmaßnahmen	665
13.2.3.5	Auflagen für Betrieb und Instandhaltung	667
13.3	Ausfallverhalten elektrotechnischer Anlagen	668
13.3.1	Zuverlässigkeit	670
13.3.2	Ausfallraten	670
13.4	Anforderung der Instandhaltung an Konzeption, Planung und Konstruktion	672
13.4.1	Vermeidung von Ausfällen und Schadenfolgen	673
13.4.2	Berücksichtigung der Einsatzbedingungen	674
13.5	Diagnostische Zustandsüberwachung	677
13.6	Beispiele zur Instandhaltung elektrischer Anlagen und Betriebsmittel	678
13.6.1	Generatoren	678
13.6.1.1	Revisionsarten	679
13.6.1.2	Revisionsintervalle	681
13.6.2	Motoren	682
13.6.3	Transformatoren	684
13.6.4	Schaltanlagen	685
13.6.5	Batterien und Ladegleichrichter	687
13.7	Literatur	688
13.7.1	Normen	688
13.7.2	Gesetze, Verordnungen, Richtlinien	689
13.7.3	VDE-Bestimmungen	689
13.7.4	Bücher, Zeitschriften	690
14	Beispiele ausgeführter Anlagen	693
14.1	Industriekraftwerk und industrielle Stromversorgung	693
14.1.1	Allgemeines	693

14.1.2	Verbrauch von Dampf und elektrischer Energie bei der Hüls AG Marl	694
14.1.3	Sichere Versorgung der industriellen Verbraucher mit elektrischer Energie	694
14.1.4	Sichere Versorgung der industriellen Verbraucher mit Dampf	698
14.1.5	Sichere Versorgung des elektrischen Kraftwerkseigenbedarfs	698
14.1.6	Literatur	700
14.2	Eigenbedarfsanlagen eines kombinierten Gas-/Dampf- turbinen-Heizkraftwerks	701
14.2.1	Beschreibung des Heizkraftwerks	701
14.2.2	Redundanz- und Verfügbarkeitsbetrachtungen	701
14.2.3	Allgemeiner Aufbau und Übersicht des elektrischen Eigenbedarfs	703
14.2.4	Beschreibung der Schaltanlagen	707
14.2.4.1	10-kV-Schaltanlage	707
14.2.4.2	Aufbau der 380-V-Niederspannungsschaltanlage	707
14.2.4.3	Gleich- und Notstromversorgung	710
14.2.5	Literatur	714
14.3	Eigenbedarfsanlagen – Kraftwerk Ibbenbüren	715
14.3.1	Einleitung	715
14.3.2	Energieableitung und Eigenbedarfsversorgung	715
14.3.3	Notstromversorgung	718
14.3.3.1	690-V-Notstromdieselanlage	718
14.3.3.2	400-V-/230-V-Wechselrichteranlage	719
14.3.3.3	Gleichstromanlagen	719
14.3.4	Räumliche Anordnung der Eigenbedarfsanlagen	720
14.3.5	Wichtige Komponenten	720
14.3.5.1	Eigenbedarfstransformator	720
14.3.5.2	Abfahrtransformator	722
14.3.5.3	10-kV-Ableitungen	722
14.3.5.4	10-kV-Schaltanlagen	722
14.3.5.5	Niederspannungsschaltanlagen	722
14.3.5.6	Hochspannungsmotoren	723
14.3.5.7	Niederspannungsmotoren	723
14.3.5.8	Notstromdieselaggregat	724
14.3.5.9	Gleichstromerzeugungsanlagen	724
14.3.5.10	Wechselrichter	726
14.3.5.11	Steuerung und Überwachung der Eigenbedarfsanlagen	726
14.3.5.12	Schutzeinrichtungen für die Komponenten der Eigenbedarfsanlage	726

14.4	Elektrische Ausrüstung des Kernkraftwerks Isar 2	729
14.4.1	Einleitung	729
14.4.2	Blockschaltung und Netzanschluß mit den Hauptkomponenten	731
14.4.2.1	Blockschutz	733
14.4.2.2	Synchronisierung	734
14.4.2.3	Spannungsregelung	734
14.4.3	Eigenbedarfsanlage	736
14.4.3.1	Eigenbedarfsumschaltung	737
14.4.4	Notstromanlagen	738
14.4.4.1	Notstromanlage 1	738
14.4.4.2	Notstromanlage 2	742
14.4.5	Auslegung der elektrischen Systeme und Komponenten für das Notstromsystem	742
14.4.5.1	Sicherstellung der betriebsgerechten Spannung und Frequenz	742
14.4.5.2	Motorauslegung	744
14.4.5.3	Auslegung der Abzweigkabel	746
14.5	Eigenbedarfsanlagen des Pumpspeicherkraftwerks Wehr	747
14.5.1	Allgemeines	747
14.5.2	Aufbau der Eigenbedarfsversorgung	749
14.5.3	Eigenbedarfssteuerung	753
14.5.4	Eigenbedarfsumschaltautomatik	754
14.5.5	Schaltanlagentechnik	755
14.5.6	Literatur	756
	Stichwortverzeichnis	757