

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	XVIII
1 Überblick über die geschichtliche Entwicklung der elektrischen Energieversorgung	1
2 Grundzüge der elektrischen Energieerzeugung	5
2.1 Stromerzeugung mit fossil befeuerten Kraftwerken	5
2.1.1 Kohlebefeuerte Blockkraftwerke	5
2.1.1.1 Dampfkraftwerksprozess in kohlebefeuerten Blockkraftwerken	6
2.1.1.2 Aufbau kohlebefeueter Blockkraftwerke	10
2.1.1.3 Wärmeverbrauchskennlinie von Kondensationskraftwerken	16
2.1.2 Erdgasbefeuerte Kraftwerke	17
2.1.2.1 Gasturbinen-Kraftwerke	17
2.1.2.2 Gas-und-Dampf-Kraftwerke	18
2.1.2.3 Blockheizkraftwerke	19
2.1.2.4 Brennstoffzellen	20
2.1.3 Erdgas-/kohlebefeuerte Anlagen	21
2.2 Stromerzeugung mit Wasserkraftwerken	22
2.2.1 Bauarten von Wasserturbinen	23
2.2.2 Bauarten von Wasserkraftwerken	23
2.3 Stromerzeugung mit Kernkraftwerken	24
2.4 Stromerzeugung aus regenerativen Energiequellen	27
2.4.1 Windenergieanlagen	28
2.4.1.1 Grundlagen der Windkraftausnutzung	28
2.4.1.2 Konstruktive Ausführung und Größenentwicklung	29
2.4.1.3 Charakteristik der Energielieferung	32
2.4.1.4 Drehzahlregelung und Leistungsbegrenzung	32
2.4.1.5 Leistungskurven von WEA	37
2.4.1.6 Offshore-Windenergieanlagen	38
2.4.2 Solarthermische Kraftwerke	40
2.4.2.1 Parabolrinnenkraftwerk	40
2.4.2.2 Turmkraftwerk	41
2.4.2.3 Dish-Stirling-System	42
2.4.2.4 Aufwindkraftwerk	42
2.4.3 Biomassekraftwerke	43
2.4.4 Geothermische Kraftwerke	43
2.4.5 Gezeitenkraftwerke	45
2.4.6 Wellenkraftwerke	45
2.4.7 Strömungskraftwerke	46
2.4.8 Photovoltaische Anlagen	47
2.4.8.1 Aufbau und Betriebsverhalten	47
2.4.8.2 Wechselrichterkonzepte	50
2.4.8.3 Anlagenkonzepte	51

2.4.9	Speichertechnologien in der Energieversorgung	52
2.4.9.1	Pumpspeicherwerke	52
2.4.9.2	Druckluftspeicher	53
2.4.9.3	Schwungmassenspeicher (Schwungrad)	53
2.4.9.4	Wärmespeicher	54
2.4.9.5	Batteriespeicher	54
2.4.9.6	Wasserstoffspeicher	55
2.4.9.7	Kondensatorspeicher	56
2.4.9.8	Supraleitende Magnetspeicher	56
2.4.10	Schlussfolgerungen	56
2.5	Kraftwerksregelung	58
2.5.1	Regelung von Wärmekraftwerken	58
2.5.1.1	Regelung eines Kraftwerks im Inselbetrieb	58
2.5.1.2	Regelung im Insel- und Verbundnetz	63
2.5.2	Regelung von Wasser- und Kernkraftwerken	67
2.6	Kraftwerkseinsatz	67
2.6.1	Verlauf der Netzlast	68
2.6.2	Deckung der Netzlast	68
2.7	Aufgaben	69
3	Aufbau von Energieversorgungsnetzen	72
3.1	Übertragungssysteme	73
3.1.1	Einphasige Systeme	73
3.1.2	Dreiphasige Systeme	73
3.1.3	HGÜ-Anlagen	76
3.2	Wichtige Strukturen von Drehstromnetzen	77
3.2.1	Niederspannungsnetze	78
3.2.2	Mittelspannungsnetze	80
3.2.3	Hoch- und Höchstspannungsnetze	82
3.3	Netzstrukturen von Windparks	85
3.4	Aufbau und Funktion von Bordnetzen	86
3.4.1	Bordnetz von Kraftfahrzeugen	86
3.4.1.1	Bauweise und Funktion von Klauenpolgeneratoren	87
3.4.1.2	Spannungsregelung und Gleichrichtung des erzeugten Drehstroms	89
3.4.1.3	Netzgestaltung bei Kraftfahrzeugen	90
3.4.2	Bordnetz von Flugzeugen	91
3.4.2.1	Stromerzeugung bei Flugzeugen	91
3.4.2.2	Netzgestaltung bei Flugzeugen	92
3.4.3	Bordnetz von Schiffen	94
3.4.3.1	Stromerzeugung bei Schiffen	94
3.4.3.2	Netzgestaltung bei Schiffen	97
3.4.4	Weitere Bordnetze	99
3.5	Aufgaben	100

4 Aufbau und Ersatzschaltbilder der Netzelemente	102
4.1 Berechnung von Netzwerken mit induktiven Kopplungen	102
4.1.1 Analytische Beschreibung induktiver Kopplungen	102
4.1.2 Stationäre Beschreibung von Netzen mit induktiven Kopplungen .	106
4.1.2.1 Veranschaulichung der manuellen Berechnungsmethode an einem Beispiel	107
4.1.2.2 Admittanzform von mehrtorigen Netzen	108
4.1.2.3 Impedanzform von mehrtorigen Netzen	110
4.1.3 Ausgleichsvorgänge in Netzen	112
4.1.3.1 Anwendung der Laplace-Transformation	112
4.1.3.2 Erläuterungen zu Eigenfrequenzspektren	114
4.1.4 Nichtlineare Induktivitäten	116
4.2 Leistungstransformatoren	119
4.2.1 Einphasige Zweiwicklungstransformatoren	119
4.2.1.1 Aufbau, Eigenfrequenzspektren und transientes Verhalten von einphasigen Zweiwicklungstransformatoren	120
4.2.1.2 Niederfrequentes Ersatzschaltbild eines einphasigen Zwei- wicklungstransformators	129
4.2.1.3 Betriebsverhalten von Zweiwicklungstransformatoren im einphasigen Netzverband	134
4.2.2 Einphasige Dreiwicklungstransformatoren	136
4.2.3 Dreiphasige Leistungstransformatoren	140
4.2.3.1 Aufbau eines Drehstromtransformators mit zwei Wick- lungen	140
4.2.3.2 Schaltungen	141
4.2.3.3 Übersetzung bei symmetrischem Betrieb	143
4.2.3.4 Ersatzschaltbild für den symmetrischen Betrieb	146
4.2.3.5 Betriebsverhalten von dreiphasigen Zweiwicklungstrans- formatoren im Netzverband	153
4.2.4 Spartransformatoren	155
4.2.4.1 Aufbau und Einsatz von Spartransformatoren	155
4.2.4.2 Ersatzschaltbild eines Spartransformators	156
4.2.5 Transformatoren mit einstellbarer Übersetzung	158
4.2.5.1 Erläuterung der direkten Spannungseinstellung	159
4.2.5.2 Erläuterung der indirekten Spannungseinstellung	161
4.2.5.3 Leistungsverhältnisse bei Umspannern mit einstellbaren Übersetzungen	163
4.3 Messwandler	166
4.3.1 Spannungswandler	167
4.3.1.1 Induktive Spannungswandler	167
4.3.1.2 Kapazitive Spannungswandler	170
4.3.2 Stromwandler	171
4.4 Synchronmaschinen	174
4.4.1 Grundsätzlicher Aufbau von Synchronmaschinen	174
4.4.2 Modellgleichungen einer Synchronmaschine	176
4.4.2.1 Qualitative Feldverhältnisse in einer Vollpolmaschine . .	177
4.4.2.2 Formulierung der Modellgleichungen	179

4.4.3	Betriebsverhalten von Synchronmaschinen	182
4.4.3.1	Ersatzschaltbild für den stationären Betrieb	182
4.4.3.2	Betriebseigenschaften von Synchronmaschinen in Energieversorgungsnetzen	186
4.4.3.3	Spannungsregelung von Synchronmaschinen	190
4.4.4	Verhalten von Synchronmaschinen bei einem dreipoligen Kurzschluss	192
4.4.4.1	Dreipoliger Klemmenkurzschluss bei einer verlustfreien, leerlaufenden Synchronmaschine mit Dauermagnetläufer .	192
4.4.4.2	Dreipoliger Klemmenkurzschluss bei einer verlustfreien Vollpolmaschine mit Gleichstromerregung	195
4.4.4.3	Netzkurzschluss bei einer verlustbehafteten Vollpolmaschine mit Erreger- und Dämpferwicklung	202
4.5	Freileitungen	209
4.5.1	Aufbau von Freileitungen	209
4.5.1.1	Masten	209
4.5.1.2	Leiterseile	211
4.5.1.3	Erdseile	213
4.5.1.4	Isolatoren	214
4.5.2	Ersatzschaltbilder von Drehstromfreileitungen für den symmetrischen Betrieb	215
4.5.2.1	Induktivitätsbegriff bei Dreileiterystemen	216
4.5.2.2	Kapazitätsbegriff bei Dreileiterystemen	222
4.5.2.3	Ohmscher Widerstand bei Dreileiterystemen	229
4.5.2.4	Ableitungswiderstand bei Dreileiterystemen	229
4.5.3	Betriebsverhalten von symmetrisch aufgebauten Drehstromfreileitungen bei symmetrischem Betrieb	231
4.5.3.1	Natürlicher Betrieb	231
4.5.3.2	Übernatürlicher Betrieb	233
4.5.3.3	Unternatürlicher Betrieb	233
4.5.3.4	Betriebsverhalten verlustbehafteter Freileitungen	234
4.5.4	Transientes Verhalten von Freileitungen im symmetrischen Betrieb	236
4.6	Kabel	239
4.6.1	Aufbau von Kabeln	240
4.6.1.1	Kunststoffkabel	240
4.6.1.2	Massekabel	243
4.6.1.3	Ölkabel	244
4.6.1.4	Gaskabel	244
4.6.2	Zulässige Betriebsströme von Kabeln	245
4.6.3	Bezeichnungen von Normkabeln	246
4.6.4	Garnituren von Kabeln	248
4.6.5	Ersatzschaltbild und Betriebsverhalten von Drehstromkabeln	250
4.7	Lasten	253
4.7.1	Motorische Lasten	253
4.7.2	Mischlasten	254
4.7.3	Leistungsverhalten von Lasten im Netzbetrieb	255
4.8	Leistungskondensatoren	257
4.8.1	Aufbau von Leistungskondensatoren	257

4.8.2	Grundsätzliche Erläuterungen zur Blindleistungskompensation	258
4.8.3	Blindleistungskompensation bei Netzen mit parasitären Oberschwingungen	260
4.8.3.1	Modell eines Netzes mit Stromrichteranlagen	261
4.8.3.2	Auswertung des Ersatzschaltbilds	262
4.8.3.3	Netzrückwirkungen	263
4.8.4	Schnelle Blindleistungskompensation	265
4.8.5	Leistungsflusssteuerung mit FACTS	267
4.9	Drosselpulen	270
4.10	Schalter	273
4.10.1	Eigenschaften idealer und realer Schalter	273
4.10.2	Aufbau und Wirkungsweise von Schaltern	274
4.10.2.1	Leistungsschalter	275
4.10.2.2	Trennschalter	278
4.10.2.3	Lastschalter	280
4.11	Schaltanlagen	281
4.11.1	Schaltungen von Schaltanlagen	281
4.11.2	Bauweise von Schaltanlagen	287
4.11.2.1	Konventionelle Freiluftschaltanlagen	287
4.11.2.2	Gasisolierte metallgekapselte Schaltanlagen	291
4.11.2.3	Konventionelle Zellenbauweise	297
4.11.3	Berücksichtigung von Schaltanlagen in Ersatzschaltbildern	299
4.11.4	Leittechnik in Schaltanlagen	300
4.11.4.1	Aufgaben der Leitebenen	300
4.11.4.2	Kommunikation der Leitebenen	302
4.11.4.3	Kommunikation über Rundsteuerung	303
4.12	Isolationskoordination und Schutz von Betriebsmitteln vor unzulässigen Überspannungen	304
4.12.1	Beanspruchungen von Betriebsmitteln durch verschiedene Überspannungsarten	304
4.12.1.1	Zeitweilige Überspannungen	304
4.12.1.2	Transiente Überspannungen	305
4.12.2	Festlegung des Isoliervermögens von Betriebsmitteln mithilfe von genormten Bemessungsspannungen	311
4.12.2.1	Durchschlagskennlinien von Spitze-Platte-Anordnungen .	311
4.12.2.2	Kennzeichnung der Durchschlagskennlinien durch repräsentative Überspannungen	312
4.12.2.3	Festlegung von Isolationspegeln	314
4.12.2.4	Isoliervermögen weiterer Anordnungen	315
4.12.3	Überspannungsableiter und Blitzschutzeinrichtungen	317
4.12.3.1	Ventilableiter	317
4.12.3.2	Metalloxidableiter	320
4.12.3.3	Blitzschutzeinrichtungen	323
4.13	Schutz der Betriebsmittel vor unzulässigen Strombeanspruchungen	324
4.13.1	Sicherungen und I_s -Begrenzer	324
4.13.1.1	HH-Sicherungen	324
4.13.1.2	NH-Sicherungen	327
4.13.1.3	I_s -Begrenzer	329

4.13.2	Schutzsysteme für Betriebsmittel	330
4.13.2.1	Vergleichsprinzip	330
4.13.2.2	Überstromprinzip	331
4.13.2.3	Distanzprinzip	333
4.13.2.4	Weitere Netzschatz-Prinzipien	335
4.13.2.5	Technische Umsetzung der Schutzprinzipien	335
4.14	Netzanbindung von Windenergieanlagen	336
4.14.1	Stationäres Ersatzschaltbild einer Netzanbindung von Windenergieanlagen	336
4.14.2	Generatoren und leistungselektronische Einrichtungen für die Netzanbindung	338
4.14.2.1	Netzkopplung von Generatoren	338
4.14.2.2	Betriebsverhalten von doppelt gespeisten Asynchrongeneratoren in WEA	340
4.14.2.3	Leistungselektronische Einrichtungen in WEA	344
4.14.2.4	Funktionsweise selbstgeführter Wechselrichter	347
4.14.2.5	Typische Anwendungen von selbstgeführten Wechselrichtern in WEA	349
4.14.3	Netzanbindung von Windparks	351
4.14.3.1	Spannungsebenen in Windparks	351
4.14.3.2	Transiente Simulation von Windparks	352
4.15	Ersatzschaltungen von Photovoltaikanlagen	353
4.15.1	Eindiodenmodell	353
4.15.2	Modellbildung für Solarmodule	355
4.16	Aufgaben	356
5	Auslegung von Netzen im Normalbetrieb	365
5.1	Kriterien für zulässige thermische Dauerbelastung und Spannungshaltung	365
5.2	Einseitig gespeiste Leitung ohne Verzweigungen	366
5.3	Einseitig gespeiste Leitung mit Verzweigungen	371
5.4	Zweiseitig gespeiste Leitung	372
5.5	Vermaschtes Netz	376
5.6	Nachbildung von Teilnetzen	377
5.7	Lastflussberechnung in Energieversorgungsnetzen	379
5.7.1	Lastflussberechnung mithilfe der Stromsummen	380
5.7.1.1	Netze mit Stromeinprägungen	380
5.7.1.2	Netze mit einer eingeprägten Spannungsquelle und Lasten mit konstantem Strom	382
5.7.1.3	Netze mit einer eingeprägten Spannungsquelle und Lasten mit konstanter Wirk- und Blindleistung	382
5.7.1.4	Netze mit mehreren eingeprägten Spannungsquellen	383
5.7.1.5	Netze mit Kraftwerkseinspeisungen	384
5.7.2	Lastflussberechnung mithilfe der Leistungssummen	384
5.7.3	Lastflussberechnung in Netzen mit mehreren Spannungsebenen	388
5.7.4	Berechnung von Eigenwerten aus der stationären Knotenadmittanzmatrix	389
5.8	Aufgaben	390

6 Dreipoliger Kurzschluss	393
6.1 Generatorferner dreipoliger Kurzschluss	394
6.1.1 Berechnung des Kurzschlussstromverlaufs in unverzweigten Netzen mit einer Netzeinspeisung	394
6.1.1.1 Berechnung des stationären Kurzschlusswechselstroms . .	394
6.1.1.2 Berechnung des Einschwingvorgangs	396
6.1.2 Berechnung der Kurzschlussströme in verzweigten Netzanlagen mit mehreren Netzeinspeisungen	399
6.1.2.1 Modellierung und Lösungsmethodik von verzweigten Netzanlagen	399
6.1.2.2 Berechnung der stationären Kurzschlussströme mit dem Verfahren der Ersatzspannungsquelle	401
6.1.2.3 Berechnung des Einschwingvorgangs bei dem Verfahren mit der Ersatzspannungsquelle	403
6.1.2.4 Veranschaulichung der Kurzschlussstromberechnung bei verzweigten Netzen an einem Beispiel	408
6.1.2.5 Einfluss der Netzkapazitäten und Mischlasten auf die Kurzschlussströme	412
6.2 Generatornaher dreipoliger Kurzschluss	414
6.2.1 Modell eines verlustlosen, mehrfach gespeisten Netzes mit einem generatornahen Kurzschluss	414
6.2.2 Berechnung des Anfangskurzschlusswechselstroms bei generatornahen Kurzschlüssen	418
6.2.3 Berechnung des Stoßkurzschlussstroms für generatornahe Fehler .	420
6.2.4 Berechnung des Kurzschlussausschaltstroms	424
6.2.5 Berücksichtigung von Netzkapazitäten, Mischlasten, motorischen Verbrauchern und Windenergieanlagen bei generatornahen Kurzschlüssen	427
6.3 Kurzschluss in Bordnetzen	428
6.3.1 Kraftfahrzeuge	428
6.3.2 Flugzeuge	429
6.3.3 Schiffe	429
6.4 Aufgaben	432
7 Auslegung von Netzen gegen Kurzschlusswirkungen und Auslegung von Schaltern	436
7.1 Lichtbogenkurzschlüsse in Anlagen	436
7.2 Mechanische Kurzschlussfestigkeit	439
7.2.1 Auslegung von linienförmigen, biegesteifen Leitern	440
7.2.1.1 Berechnung der Stromkräfte	440
7.2.1.2 Dimensionierung der Leiterschienen	442
7.2.1.3 Stromkräfte bei gekrümmten und gekapselten Leiterschienen	444
7.2.2 Auslegung von Leiterschienen mit großen Querschnittsabmessungen	445
7.2.3 Auslegung von Stützern	448
7.2.4 Auslegung von Leiterseilen und Kabeln	449

7.3	Thermische Kurzschlussfestigkeit	449
7.3.1	Berechnung der Wärmebeanspruchung	449
7.3.2	Festlegung des zulässigen Kurzzeitstroms	452
7.4	Maßnahmen zur Beeinflussung der Kurzschlussleistung	454
7.5	Auswirkungen von Kurzschlägen auf das transiente Generatordrehzahlverhalten	457
7.5.1	Wichtige Netzparameter zur Gewährleistung der transienten Stabilität	458
7.5.1.1	Modellierung einer Generatorennetzanbindung	458
7.5.1.2	Diskussion der Modellgleichung	463
7.5.1.3	Interpretation verschiedener Fehlersituationen mit dem Flächenkriterium	463
7.5.1.4	Fehler in einer unterlagerten Spannungsebene	464
7.5.1.5	Fehler im Höchstspannungsnetz	465
7.5.1.6	Fehler mit Ausschaltung	467
7.5.2	Drehzahlverhalten der Generatoren in einem kurzschlussbehafteten Netz mit mehrfacher Generatoreinspeisung	467
7.6	Auslegung von Schaltern	470
7.6.1	Einschwingspannungen nach einem Schalter-Klemmenkurzschluss in einphasigen Netzen	472
7.6.2	Bewertung der Einschwingspannungen	476
7.6.3	Abstandskurzschluss in einphasigen Netzen	478
7.6.4	Auslegung von Leistungsschaltern in Drehstromnetzen	481
7.6.5	Schaltvorgänge ohne Kurzschluss	482
7.7	Aufgaben	484
8	Grundzüge der Betriebsführung und Planung von elektrischen Energieanlagen	486
8.1	Betriebsführung von Netzanlagen	486
8.1.1	Organisation des Strommarktes	486
8.1.1.1	Organisation des Strommarktes vor der Deregulierung	486
8.1.1.2	Organisation des Strommarktes nach der Deregulierung	487
8.1.2	Betriebsführung von Übertragungsnetzen	492
8.1.2.1	Datenbasis und Aufgabenspektrum des Netzrechners	492
8.1.2.2	Offline-Netzführung mit dem Netzrechner	494
8.1.2.3	Online-Netzführungsrechnung	498
8.1.2.4	Fahrplanmanagement	499
8.1.3	Betriebsführung von Verteilungsnetzen	500
8.1.3.1	Datenbasis und Aufgabenspektrum der Schalteleitung	500
8.1.3.2	Führung von Verteilungsnetzen	501
8.2	Gesichtspunkte zur Planung von Netzen	502
8.2.1	Planung von Niederspannungsnetzen	502
8.2.2	Ausbauplanung von Mittelspannungsnetzen	504
8.2.3	Ausbauplanung von Hoch- und Höchstspannungsnetzen	505
8.3	Netzintegration und Systemdienstleistungen von Windenergieanlagen	508

8.4	Netzseitiges Verhalten von Erzeugungseinheiten und Spannungsqualität	509
8.4.1	Überblick	509
8.4.2	Richtlinien nach VDEW und FGW	509
8.4.3	Spannungsqualität nach EN 50160	510
8.4.4	Richtlinien der Übertragungsnetzbetreiber	512
8.4.4.1	E.ON-Richtlinien	512
8.4.4.2	VDN-Richtlinie für EEG-Erzeugungsanlagen	513
8.5	Aufgaben	513
9	Berechnung von unsymmetrisch gespeisten Drehstromnetzen mit symmetrischem Aufbau	517
9.1	Methode der symmetrischen Komponenten	517
9.2	Anwendung der symmetrischen Komponenten auf unsymmetrisch betriebene Drehstromnetze	520
9.3	Impedanzen wichtiger Betriebsmittel im Mit- und Gegensystem der symmetrischen Komponenten	525
9.4	Impedanzen wichtiger Betriebsmittel im Nullsystem der symmetrischen Komponenten	527
9.4.1	Nullimpedanz einer Freileitung ohne Erdseil	528
9.4.1.1	Ohmscher Widerstand einer nullspannungsgespeisten Freileitung	529
9.4.1.2	Induktivität einer nullspannungsgespeisten Freileitung	531
9.4.1.3	Kapazitäten einer nullspannungsgespeisten Freileitung	533
9.4.2	Nullimpedanz einer Freileitung mit Erdseil	533
9.4.3	Nullimpedanz einer Doppelleitung	535
9.4.4	Nullimpedanz von Kabeln	537
9.4.5	Nullimpedanz von Transformatoren	539
9.4.5.1	Dreischinkeltransformatoren	539
9.4.5.2	Fünfschenkeltransformatoren	546
9.4.6	Nullimpedanz von Synchronmaschinen	547
9.5	Veranschaulichung des Berechnungsverfahrens an einem Beispiel	547
9.6	Aufgaben	552
10	Berechnung von Drehstromnetzen mit symmetrischen Betriebsmitteln und punktuellen unsymmetrischen Fehlern	553
10.1	Beschreibung häufiger unsymmetrischer Fehler	553
10.2	Erläuterung des Berechnungsverfahrens	554
10.3	Anwendung des Berechnungsverfahrens auf verschiedene Fehlerarten	560
10.3.1	Erdschluss mit Übergangswiderstand	560
10.3.2	Zweipoliger Kurzschluss mit und ohne Erdberührung	561
10.3.2.1	Zweipoliger Kurzschluss ohne Übergangswiderstände	561
10.3.2.2	Zweipoliger Kurzschluss mit Übergangswiderständen	564
10.3.3	Einpolige Leiterunterbrechung	566
10.3.4	Unsymmetrische Mehrfachfehler	569
10.4	Ausgleichsvorgänge bei unsymmetrischen Fehlern	572
10.4.1	Transiente Komponentenersatzschaltbilder für unsymmetrische generatorferne Fehler	572
10.4.2	Transiente Komponentenersatzschaltbilder für unsymmetrische generatornahe Fehler	576

10.4.3 Numerische Auswertung der transienten Komponentenersatzschaltbilder	577
10.4.4 Näherungsverfahren zur Bestimmung des Stoßkurzschlussstroms bei ein- und zweipoligen Kurzschlüssen	580
10.5 Aufgaben	580
11 Sternpunktbehandlung in Energieversorgungsnetzen	583
11.1 Einfluss der Sternpunktbehandlung auf das stationäre Netzverhalten bei einpoligen Erdschlüssen	583
11.1.1 Netze mit isolierten Sternpunkten	583
11.1.2 Netze mit Erdschlusskompensation	587
11.1.3 Netze mit niederohmiger Sternpunktterdung	593
11.1.4 Veranschaulichung der Spannungsverhältnisse durch Zeigerdiagramme	597
11.2 Einfluss der Sternpunktbehandlung auf das transiente Netzverhalten bei einpoligen Erdschlüssen	599
11.2.1 Transiente Überspannungen durch Dauererdschlüsse	599
11.2.2 Erdschlüsse mit selbstständig löschen dem Lichtbogen	602
11.3 Einfluss der Sternpunktbehandlung auf Ferroresonanzerscheinungen	605
11.3.1 Erläuterung des Ferroresonanzeffekts	605
11.3.2 Ferroresonanzgefährdete Anlagenkonfigurationen	609
11.4 Aufgaben	615
12 Wichtige Maßnahmen zum Schutz von Menschen und Tieren	618
12.1 Berührungsschutz in Netzen mit Nennspannungen größer als 1 kV	618
12.1.1 Zulässige Körperströme und Berührungsspannungen	618
12.1.2 Direkter und indirekter Berührungsschutz	620
12.2 Berührungsspannungen bei Erdern	622
12.3 Berechnung von Erdungsspannungen bei unsymmetrischen Fehlern	626
12.4 Wichtige Auslegungskriterien für Erdungsanlagen	633
12.4.1 Auslegungskriterien für Netze mit isolierten Sternpunkten oder mit Erdschlusskompensation	633
12.4.2 Auslegungskriterien für Netze mit niederohmiger Sternpunktterdung	634
12.5 Indirekter Berührungsschutz in Niederspannungsnetzen	634
12.6 Aufgaben	639
13 Investitionsrechnung und Wirtschaftlichkeitsberechnung für elektrische Anlagen	642
13.1 Struktur der Kosten	642
13.1.1 Kostenarten	642
13.1.1.1 Kapitalkosten	642
13.1.1.2 Betriebskosten	644
13.1.1.3 Sonstige Kosten	646
13.1.1.4 Ausgaben, Einnahmen, operatives Betriebsergebnis	646
13.1.2 Fixe und variable Kosten	646
13.1.3 Einzel- und Gemeinkosten	647

13.2 Gestaltung der Strompreise	649
13.2.1 Grundstruktur der Preise bzw. Entgelte	650
13.2.2 Preisgestaltung der Netzbetreiber	651
13.2.3 Preisgestaltung der Stromhändler	652
13.2.4 Strombezugsverträge mit Niederspannungsnetzkunden	652
13.2.5 Strombezugsverträge mit Mittelspannungsnetzkunden	653
13.2.6 Strombezugsverträge mit Großkunden	654
13.3 Aufbereitung der Lastverläufe	655
13.4 Investitionsrechnung für Netzanlagen	656
13.4.1 Kostenvergleich	656
13.4.1.1 Zulässigkeit eines Kostenvergleichs	657
13.4.1.2 Statischer Kostenvergleich einer Ersatzinvestition für einen Umspanner	657
13.4.1.3 Dynamischer Kostenvergleich einer Ersatzinvestition für einen Umspanner	660
13.4.1.4 Kostenvergleich bei einer Rationalisierungsinvestition . .	661
13.4.2 Methoden zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit	662
13.4.2.1 Kapitalwertmethode	662
13.4.2.2 Methode des internen Zinsfußes	663
13.4.2.3 Annuitätenmethode	664
13.4.2.4 Dynamische Amortisationsdauer	664
13.4.3 Investitionsentscheidung	665
13.5 Aufgaben	665
Lösungen	668
Anhang	724
Richtwerte für Freileitungen	724
Richtwerte für Kabel	726
Zulässige Betriebsströme für Stromschienen aus Aluminium	727
Kennlinien für NH-Sicherungen zum Motorschutz	727
Übersichtsschaltpläne realer Energieversorgungsnetze	728
Richtwerte für Kosten	731
Elektrischer Wirkungsgrad wichtiger Kraftwerksarten	732
Beispiel für Strompreise	732
Beispiele für Netzentgelte von Energieversorgungsunternehmen	733
Wichtige Laplace-Transformierte	734
Quellenverzeichnis	735
Verzeichnis wichtiger Normen und Richtlinien	736
Literaturverzeichnis	742
Sachwortverzeichnis	750