



2.4.9	Speichertechnologien in der Energieversorgung . . . . .	56
2.4.9.1	Pumpspeicherwerke . . . . .	56
2.4.9.2	Druckluftspeicher . . . . .	57
2.4.9.3	Schwungmassenspeicher (Schwungrad) . . . . .	57
2.4.9.4	Wärmespeicher . . . . .	58
2.4.9.5	Batteriespeicher . . . . .	58
2.4.9.6	Wasserstoffspeicher . . . . .	59
2.4.9.7	Kondensatorspeicher . . . . .	60
2.4.9.8	Supraleitende Magnetspeicher . . . . .	60
2.4.10	Schlussfolgerungen . . . . .	60
2.5	Kraftwerksregelung . . . . .	62
2.5.1	Regelung von Wärmekraftwerken . . . . .	62
2.5.1.1	Regelung eines Kraftwerks im Inselbetrieb . . . . .	62
2.5.1.2	Regelung im Insel- und Verbundnetz . . . . .	67
2.5.2	Regelung von Wasser- und Kernkraftwerken . . . . .	71
2.6	Kraftwerkseinsatz . . . . .	72
2.6.1	Verlauf der Netzlast . . . . .	72
2.6.2	Deckung der Netzlast . . . . .	73
2.7	Aufgaben . . . . .	74
<b>3</b>	<b>Aufbau von Energieversorgungsnetzen</b>	<b>76</b>
3.1	Übertragungssysteme . . . . .	77
3.1.1	Einphasige Systeme . . . . .	77
3.1.2	Dreiphasige Systeme . . . . .	77
3.1.3	HGÜ-Anlagen . . . . .	80
3.2	Wichtige Strukturen von Drehstromnetzen . . . . .	81
3.2.1	Niederspannungsnetze . . . . .	82
3.2.2	Mittelspannungsnetze . . . . .	84
3.2.3	Hoch- und Höchstspannungsnetze . . . . .	86
3.3	Netzstrukturen von Windparks . . . . .	89
3.4	Aufbau und Funktion von Bordnetzen . . . . .	90
3.4.1	Bordnetz von Kraftfahrzeugen . . . . .	90
3.4.1.1	Bauweise und Funktion von Klauenpolgeneratoren . . . . .	91
3.4.1.2	Spannungsregelung und Gleichrichtung des erzeugten Drehstroms . . . . .	92
3.4.1.3	Netzgestaltung bei Kraftfahrzeugen . . . . .	94
3.4.2	Bordnetz von Flugzeugen . . . . .	95
3.4.2.1	Stromerzeugung bei Flugzeugen . . . . .	95
3.4.2.2	Netzgestaltung bei Flugzeugen . . . . .	96
3.4.3	Bordnetz von Schiffen . . . . .	98
3.4.3.1	Stromerzeugung bei Schiffen . . . . .	99
3.4.3.2	Netzgestaltung bei Schiffen . . . . .	101
3.4.4	Weitere Bordnetze . . . . .	103
3.5	Aufgaben . . . . .	105

<b>4</b>	<b>Aufbau und Ersatzschaltbilder der Netzelemente</b>	<b>106</b>
4.1	Berechnung von Netzwerken mit induktiven Kopplungen . . . . .	106
4.1.1	Analytische Beschreibung induktiver Kopplungen . . . . .	106
4.1.2	Stationäre Beschreibung von Netzen mit induktiven Kopplungen . . . . .	110
4.1.2.1	Veranschaulichung der manuellen Berechnungsmethode an einem Beispiel . . . . .	111
4.1.2.2	Admittanzform von mehrtorigen Netzen . . . . .	112
4.1.2.3	Impedanzform von mehrtorigen Netzen . . . . .	114
4.1.3	Ausgleichsvorgänge in Netzen . . . . .	116
4.1.3.1	Anwendung der Laplace-Transformation . . . . .	116
4.1.3.2	Erläuterungen zu Eigenfrequenzspektren . . . . .	118
4.1.4	Nichtlineare Induktivitäten . . . . .	120
4.2	Leistungstransformatoren . . . . .	123
4.2.1	Einphasige Zweiwicklungstransformatoren . . . . .	123
4.2.1.1	Aufbau, Eigenfrequenzspektren und transientes Verhalten von einphasigen Zweiwicklungstransformatoren . . . . .	124
4.2.1.2	Niederfrequentes Ersatzschaltbild eines einphasigen Zwei- wicklungstransformators . . . . .	133
4.2.1.3	Betriebsverhalten von Zweiwicklungstransformatoren im einphasigen Netzverband . . . . .	138
4.2.2	Einphasige Dreiwicklungstransformatoren . . . . .	140
4.2.3	Dreiphasige Leistungstransformatoren . . . . .	144
4.2.3.1	Aufbau eines Drehstromtransformators mit zwei Wick- lungen . . . . .	144
4.2.3.2	Schaltungen . . . . .	145
4.2.3.3	Übersetzung bei symmetrischem Betrieb . . . . .	147
4.2.3.4	Ersatzschaltbild für den symmetrischen Betrieb . . . . .	150
4.2.3.5	Betriebsverhalten von dreiphasigen Zweiwicklungstrans- formatoren im Netzverband . . . . .	157
4.2.4	Spartransformatoren . . . . .	159
4.2.4.1	Aufbau und Einsatz von Spartransformatoren . . . . .	159
4.2.4.2	Ersatzschaltbild eines Spartransformators . . . . .	160
4.2.5	Transformatoren mit einstellbarer Übersetzung . . . . .	162
4.2.5.1	Erläuterung der direkten Spannungseinstellung . . . . .	163
4.2.5.2	Erläuterung der indirekten Spannungseinstellung . . . . .	165
4.2.5.3	Leistungsverhältnisse bei Umspannern mit einstellbaren Übersetzungen . . . . .	167
4.3	Messwandler . . . . .	170
4.3.1	Spannungswandler . . . . .	171
4.3.1.1	Induktive Spannungswandler . . . . .	171
4.3.1.2	Kapazitive Spannungswandler . . . . .	174
4.3.2	Stromwandler . . . . .	175
4.4	Synchronmaschinen . . . . .	178
4.4.1	Grundsätzlicher Aufbau von Synchronmaschinen . . . . .	178
4.4.2	Modellgleichungen einer Synchronmaschine . . . . .	180
4.4.2.1	Qualitative Feldverhältnisse in einer Vollpolmaschine . . . . .	181
4.4.2.2	Formulierung der Modellgleichungen . . . . .	183

4.4.3	Betriebsverhalten von Synchronmaschinen . . . . .	186
4.4.3.1	Ersatzschaltbild für den stationären Betrieb . . . . .	186
4.4.3.2	Betriebseigenschaften von Synchronmaschinen in Energieversorgungsnetzen . . . . .	190
4.4.3.3	Spannungsregelung von Synchronmaschinen . . . . .	194
4.4.4	Verhalten von Synchronmaschinen bei einem dreipoligen Kurzschluss . . . . .	196
4.4.4.1	Dreipoliger Klemmenkurzschluss bei einer verlustfreien, leerlaufenden Synchronmaschine mit Dauermagnetläufer .	196
4.4.4.2	Dreipoliger Klemmenkurzschluss bei einer verlustfreien Vollpolmaschine mit Gleichstromerregung . . . . .	199
4.4.4.3	Netzkurzschluss bei einer verlustbehafteten Vollpolmaschine mit Erreger- und Dämpferwicklung . . . . .	206
4.5	Freileitungen . . . . .	213
4.5.1	Aufbau von Freileitungen . . . . .	213
4.5.1.1	Masten . . . . .	213
4.5.1.2	Leitenseile . . . . .	215
4.5.1.3	Erdseile . . . . .	217
4.5.1.4	Isolatoren . . . . .	218
4.5.2	Ersatzschaltbilder von Drehstromfreileitungen für den symmetrischen Betrieb . . . . .	219
4.5.2.1	Induktivitätsbegriff bei Dreileitersystemen . . . . .	220
4.5.2.2	Kapazitätsbegriff bei Dreileitersystemen . . . . .	226
4.5.2.3	Ohmscher Widerstand bei Dreileitersystemen . . . . .	233
4.5.2.4	Ableitungswiderstand bei Dreileitersystemen . . . . .	233
4.5.3	Betriebsverhalten von symmetrisch aufgebauten Drehstromfreileitungen bei symmetrischem Betrieb . . . . .	235
4.5.3.1	Natürlicher Betrieb . . . . .	235
4.5.3.2	Übernatürlicher Betrieb . . . . .	237
4.5.3.3	Unternatürlicher Betrieb . . . . .	237
4.5.3.4	Betriebsverhalten verlustbehafteter Freileitungen . . . . .	238
4.5.4	Transientes Verhalten von Freileitungen im symmetrischen Betrieb	240
4.6	Kabel . . . . .	243
4.6.1	Aufbau von Kabeln . . . . .	244
4.6.1.1	Kunststoffkabel . . . . .	244
4.6.1.2	Massekabel . . . . .	247
4.6.1.3	Ölkabel . . . . .	248
4.6.1.4	Gaskabel . . . . .	248
4.6.2	Zulässige Betriebsströme von Kabeln . . . . .	249
4.6.3	Bezeichnungen von Normkabeln . . . . .	250
4.6.4	Garnituren von Kabeln . . . . .	252
4.6.5	Ersatzschaltbild und Betriebsverhalten von Drehstromkabeln . . . . .	254
4.7	Lasten . . . . .	257
4.7.1	Motorische Lasten . . . . .	257
4.7.2	Mischlasten . . . . .	258
4.7.3	Leistungsverhalten von Lasten im Netzbetrieb . . . . .	259
4.8	Leistungskondensatoren . . . . .	261
4.8.1	Aufbau von Leistungskondensatoren . . . . .	261

4.8.2	Grundsätzliche Erläuterungen zur Blindleistungskompensation . . .	262
4.8.3	Blindleistungskompensation bei Netzen mit parasitären Ober- schwingungen . . . . .	264
4.8.3.1	Modell eines Netzes mit Stromrichteranlagen . . . . .	265
4.8.3.2	Auswertung des Ersatzschaltbilds . . . . .	266
4.8.3.3	Netzurückwirkungen . . . . .	267
4.8.4	Schnelle Blindleistungskompensation . . . . .	269
4.8.5	Leistungsflusssteuerung mit FACTS . . . . .	271
4.9	Drosselspulen . . . . .	274
4.10	Schalter . . . . .	277
4.10.1	Eigenschaften idealer und realer Schalter . . . . .	277
4.10.2	Aufbau und Wirkungsweise von Schaltern . . . . .	278
4.10.2.1	Leistungsschalter . . . . .	279
4.10.2.2	Trennschalter . . . . .	282
4.10.2.3	Lastschalter . . . . .	284
4.11	Schaltanlagen . . . . .	285
4.11.1	Schaltungen von Schaltanlagen . . . . .	285
4.11.2	Bauweise von Schaltanlagen . . . . .	291
4.11.2.1	Konventionelle Freiluftschaltanlagen . . . . .	291
4.11.2.2	Gasisolierte metallgekapselte Schaltanlagen . . . . .	295
4.11.2.3	Konventionelle Zellenbauweise . . . . .	301
4.11.3	Berücksichtigung von Schaltanlagen in Ersatzschaltbildern . . . . .	303
4.11.4	Leittechnik in Schaltanlagen . . . . .	304
4.11.4.1	Aufgaben der Leitebenen . . . . .	304
4.11.4.2	Kommunikation der Leitebenen . . . . .	306
4.11.4.3	Kommunikation über Rundsteuerung . . . . .	307
4.12	Isolationskoordination und Schutz von Betriebsmitteln vor unzulässigen Überspannungen . . . . .	308
4.12.1	Beanspruchungen von Betriebsmitteln durch verschiedene Über- spannungsarten . . . . .	308
4.12.1.1	Zeitweilige Überspannungen . . . . .	308
4.12.1.2	Transiente Überspannungen . . . . .	309
4.12.2	Festlegung des Isoliervermögens von Betriebsmitteln mithilfe von genormten Bemessungsspannungen . . . . .	315
4.12.2.1	Durchschlagskennlinien von Spitze-Platte-Anordnungen . . . . .	315
4.12.2.2	Kennzeichnung der Durchschlagskennlinien durch reprä- sentative Überspannungen . . . . .	316
4.12.2.3	Festlegung von Isolationspegeln . . . . .	318
4.12.2.4	Isoliervermögen weiterer Anordnungen . . . . .	319
4.12.3	Überspannungsableiter und Blitzschutzeinrichtungen . . . . .	321
4.12.3.1	Ventilableiter . . . . .	321
4.12.3.2	Metalloxidableiter . . . . .	324
4.12.3.3	Blitzschutzeinrichtungen . . . . .	327
4.13	Schutz der Betriebsmittel vor unzulässigen Strombeanspruchungen . . . . .	328
4.13.1	Sicherungen und $I_s$ -Begrenzer . . . . .	328
4.13.1.1	HH-Sicherungen . . . . .	328
4.13.1.2	NH-Sicherungen . . . . .	331
4.13.1.3	$I_s$ -Begrenzer . . . . .	333

4.13.2	Schutzsysteme für Betriebsmittel . . . . .	334
4.13.2.1	Vergleichsprinzip . . . . .	334
4.13.2.2	Überstromprinzip . . . . .	335
4.13.2.3	Distanzprinzip . . . . .	337
4.13.2.4	Weitere Netzschutz-Prinzipien . . . . .	339
4.13.2.5	Technische Umsetzung der Schutzprinzipien . . . . .	339
4.14	Netzanbindung von Windenergieanlagen . . . . .	340
4.14.1	Stationäres Ersatzschaltbild einer Netzanbindung von Windenergieanlagen . . . . .	340
4.14.2	Generatoren und leistungselektronische Einrichtungen für die Netzanbindung . . . . .	342
4.14.2.1	Netzkopplung von Generatoren . . . . .	342
4.14.2.2	Betriebsverhalten von doppelt gespeisten Asynchronegeneratoren in Windenergieanlagen . . . . .	344
4.14.2.3	Leistungselektronische Einrichtungen in Windenergieanlagen . . . . .	348
4.14.2.4	Funktionsweise selbstgeführter Wechselrichter . . . . .	351
4.14.2.5	Typische Anwendungen von selbstgeführten Wechselrichtern in Windenergieanlagen . . . . .	353
4.14.3	Netzanbindung von Windparks . . . . .	355
4.14.3.1	Spannungsebenen in Windparks . . . . .	355
4.14.3.2	Technisch optimierte Netzanbindung von Windparks . . . . .	356
4.14.3.3	Transiente Simulation von Windparks . . . . .	357
4.15	Ersatzschaltungen von Photovoltaikanlagen . . . . .	358
4.15.1	Eindiodenmodell . . . . .	358
4.15.2	Modellbildung für Solarmodule . . . . .	360
4.16	Aufgaben . . . . .	361
<b>5</b>	<b>Auslegung von Netzen im Normalbetrieb</b>	<b>370</b>
5.1	Kriterien für zulässige thermische Dauerbelastung und Spannungshaltung	370
5.2	Einseitig gespeiste Leitung ohne Verzweigungen . . . . .	371
5.3	Einseitig gespeiste Leitung mit Verzweigungen . . . . .	376
5.4	Zweiseitig gespeiste Leitung . . . . .	377
5.5	Vermaschtes Netz . . . . .	381
5.6	Nachbildung von Teilnetzen . . . . .	382
5.7	Lastflussberechnung in Energieversorgungsnetzen . . . . .	384
5.7.1	Lastflussberechnung mithilfe der Stromsummen . . . . .	385
5.7.1.1	Netze mit Stromeinprägungen . . . . .	385
5.7.1.2	Netze mit einer eingepprägten Spannungsquelle und Lasten mit konstantem Strom . . . . .	387
5.7.1.3	Netze mit einer eingepprägten Spannungsquelle und Lasten mit konstanter Wirk- und Blindleistung . . . . .	387
5.7.1.4	Netze mit mehreren eingepprägten Spannungsquellen . . . . .	388
5.7.1.5	Netze mit Kraftwerkseinspeisungen . . . . .	389
5.7.2	Lastflussberechnung mithilfe der Leistungssummen . . . . .	389
5.7.3	Lastflussberechnung in Netzen mit mehreren Spannungsebenen . . . . .	393
5.7.4	Berechnung von Eigenwerten aus der stationären Knotenadmittanzmatrix . . . . .	394
5.8	Aufgaben . . . . .	395

<b>6 Dreipoliger Kurzschluss</b>	<b>398</b>
6.1 Generatorferner dreipoliger Kurzschluss	399
6.1.1 Berechnung des Kurzschlussstromverlaufs in unverzweigten Netzen mit einer Netzeinspeisung	399
6.1.1.1 Berechnung des stationären Kurzschlusswechselstroms	399
6.1.1.2 Berechnung des Einschwingvorgangs	401
6.1.2 Berechnung der Kurzschlussströme in verzweigten Netzanlagen mit mehreren Netzeinspeisungen	404
6.1.2.1 Modellierung und Lösungsmethodik von verzweigten Netzanlagen	404
6.1.2.2 Berechnung der stationären Kurzschlussströme mit dem Verfahren der Ersatzspannungsquelle	406
6.1.2.3 Berechnung des Einschwingvorgangs bei dem Verfahren mit der Ersatzspannungsquelle	408
6.1.2.4 Veranschaulichung der Kurzschlussstromberechnung bei verzweigten Netzen an einem Beispiel	413
6.1.2.5 Einfluss der Netzkapazitäten und Mischlasten auf die Kurzschlussströme	417
6.2 Generatornaher dreipoliger Kurzschluss	419
6.2.1 Modell eines verlustlosen, mehrfach gespeisten Netzes mit einem generatornahen Kurzschluss	419
6.2.2 Berechnung des Anfangskurzschlusswechselstroms bei generatornahen Kurzschlüssen	423
6.2.3 Berechnung des Stoßkurzschlussstroms für generatornahe Fehler	425
6.2.4 Berechnung des Kurzschlussausschaltstroms	429
6.2.5 Berücksichtigung von Netzkapazitäten, Mischlasten, motorischen Verbrauchern und Windenergieanlagen bei generatornahen Kurzschlüssen	432
6.3 Kurzschluss in Bordnetzen	433
6.3.1 Kraftfahrzeuge	433
6.3.2 Flugzeuge	434
6.3.3 Schiffe	434
6.4 Aufgaben	437
<b>7 Auslegung von Netzen gegen Kurzschlusswirkungen und Auslegung von Schaltern</b>	<b>441</b>
7.1 Lichtbogenkurzschlüsse in Anlagen	441
7.2 Mechanische Kurzschlussfestigkeit	444
7.2.1 Auslegung von linienförmigen, biegesteifen Leitern	445
7.2.1.1 Berechnung der Stromkräfte	445
7.2.1.2 Dimensionierung der Leiterschienen	447
7.2.1.3 Stromkräfte bei gekrümmten und gekapselten Leiterschienen	449
7.2.2 Auslegung von Leiterschienen mit großen Querschnittsabmessungen	450
7.2.3 Auslegung von Stützern	453
7.2.4 Auslegung von Leiterseilen und Kabeln	454

7.3	Thermische Kurzschlussfestigkeit . . . . .	454
7.3.1	Berechnung der Wärmebeanspruchung . . . . .	454
7.3.2	Festlegung des zulässigen Kurzzeitstroms . . . . .	457
7.4	Maßnahmen zur Beeinflussung der Kurzschlussleistung . . . . .	459
7.5	Auswirkungen von Kurzschlüssen auf das transiente Generator-drehzahl- verhalten . . . . .	462
7.5.1	Wichtige Netzparameter zur Gewährleistung der transienten Stabilität . . . . .	463
7.5.1.1	Modellierung einer Generatornetzanbindung . . . . .	463
7.5.1.2	Diskussion der Modellgleichung . . . . .	468
7.5.1.3	Interpretation verschiedener Fehlersituationen mit dem Flächenkriterium . . . . .	468
7.5.1.4	Fehler in einer unterlagerten Spannungsebene . . . . .	469
7.5.1.5	Fehler im Höchstspannungsnetz . . . . .	470
7.5.1.6	Fehler mit Ausschaltung . . . . .	472
7.5.2	Drehzahlverhalten der Generatoren in einem kurzschlussbehafteten Netz mit mehrfacher Generatoreinspeisung . . . . .	472
7.6	Auslegung von Schaltern . . . . .	475
7.6.1	Einschwingspannungen nach einem Schalter-Klemmenkurzschluss in einphasigen Netzen . . . . .	477
7.6.2	Bewertung der Einschwingspannungen . . . . .	481
7.6.3	Abstandskurzschluss in einphasigen Netzen . . . . .	483
7.6.4	Auslegung von Leistungsschaltern in Drehstromnetzen . . . . .	486
7.6.5	Schaltvorgänge ohne Kurzschluss . . . . .	487
7.7	Aufgaben . . . . .	489
<b>8</b>	<b>Grundzüge der Betriebsführung und Planung von elektrischen Energieanlagen</b>	<b>491</b>
8.1	Betriebsführung von Netzanlagen . . . . .	491
8.1.1	Organisation des Strommarktes . . . . .	491
8.1.1.1	Organisation des Strommarktes vor der Deregulierung . . . . .	491
8.1.1.2	Organisation des Strommarktes nach der Deregulierung . . . . .	492
8.1.2	Betriebsführung von Übertragungsnetzen . . . . .	498
8.1.2.1	Datenbasis und Aufgabenspektrum des Netzrechners . . . . .	498
8.1.2.2	Offline-Netzführung mit dem Netzrechner . . . . .	500
8.1.2.3	Online-Netzführungsrechnung . . . . .	505
8.1.2.4	Fahrplanmanagement . . . . .	506
8.1.3	Betriebsführung von Verteilungsnetzen . . . . .	507
8.1.3.1	Datenbasis und Aufgabenspektrum der Schaltleitung . . . . .	507
8.1.3.2	Führung von Verteilungsnetzen . . . . .	508
8.2	Gesichtspunkte zur Planung von Netzen . . . . .	509
8.2.1	Planung von Niederspannungsnetzen . . . . .	509
8.2.2	Ausbauplanung von Mittelspannungsnetzen . . . . .	512
8.2.3	Ausbauplanung von Hoch- und Höchstspannungsnetzen . . . . .	513
8.3	Netzintegration und Systemdienstleistungen von Erzeugungsanlagen . . . . .	515
8.3.1	Wichtige Vorschriften und Richtlinien . . . . .	516

8.3.2	Anforderungen beim Anschluss an ein Netz . . . . .	517
8.3.2.1	Wirkleistungsabgabe und Frequenzhaltung . . . . .	517
8.3.2.2	Blindleistungsbereitstellung und Spannungshaltung . . . . .	519
8.3.2.3	Verhalten bei Spannungseinbrüchen . . . . .	521
8.3.2.4	Besondere Anschlussbedingungen für Erzeugungsanlagen mit regenerativen Energien in Übertragungsnetzen . . . . .	523
8.3.2.5	Systemdienstleistungen von Windenergieanlagen . . . . .	525
8.3.2.6	Anforderungen an die Spannungsqualität . . . . .	529
8.4	Aufgaben . . . . .	530
<b>9</b>	<b>Berechnung von unsymmetrisch gespeisten Drehstromnetzen mit symmetrischem Aufbau</b>	<b>534</b>
9.1	Methode der symmetrischen Komponenten . . . . .	534
9.2	Anwendung der symmetrischen Komponenten auf unsymmetrisch betrie- bene Drehstromnetze . . . . .	537
9.3	Impedanzen wichtiger Betriebsmittel im Mit- und Gegensystem der sym- metrischen Komponenten . . . . .	542
9.4	Impedanzen wichtiger Betriebsmittel im Nullsystem der symmetrischen Komponenten . . . . .	544
9.4.1	Nullimpedanz einer Freileitung ohne Erdseil . . . . .	545
9.4.1.1	Ohmscher Widerstand einer nullspannungsgespeisten Frei- leitung . . . . .	546
9.4.1.2	Induktivität einer nullspannungsgespeisten Freileitung . . . . .	548
9.4.1.3	Kapazitäten einer nullspannungsgespeisten Freileitung . . . . .	550
9.4.2	Nullimpedanz einer Freileitung mit Erdseil . . . . .	550
9.4.3	Nullimpedanz einer Doppelleitung . . . . .	552
9.4.4	Nullimpedanz von Kabeln . . . . .	554
9.4.5	Nullimpedanz von Transformatoren . . . . .	556
9.4.5.1	Dreischenkeltransformatoren . . . . .	556
9.4.5.2	Fünfschenkeltransformatoren . . . . .	563
9.4.6	Nullimpedanz von Synchronmaschinen . . . . .	564
9.5	Veranschaulichung des Berechnungsverfahrens an einem Beispiel . . . . .	564
9.6	Aufgaben . . . . .	569
<b>10</b>	<b>Berechnung von Drehstromnetzen mit symmetrischen Betriebs- mitteln und punktuellen unsymmetrischen Fehlern</b>	<b>570</b>
10.1	Beschreibung häufiger unsymmetrischer Fehler . . . . .	570
10.2	Erläuterung des Berechnungsverfahrens . . . . .	571
10.3	Anwendung des Berechnungsverfahrens auf verschiedene Fehlerarten . . . . .	577
10.3.1	Erdschluss mit Übergangswiderstand . . . . .	577
10.3.2	Zweipoliger Kurzschluss mit und ohne Erdberührung . . . . .	578
10.3.2.1	Zweipoliger Kurzschluss ohne Übergangswiderstände . . . . .	578
10.3.2.2	Zweipoliger Kurzschluss mit Übergangswiderständen . . . . .	581
10.3.3	Einpolige Leiterunterbrechung . . . . .	583
10.3.4	Unsymmetrische Mehrfachfehler . . . . .	586

10.4	Ausgleichsvorgänge bei unsymmetrischen Fehlern . . . . .	589
10.4.1	Transiente Komponentenersatzschaltbilder für unsymmetrische generatorferne Fehler . . . . .	589
10.4.2	Transiente Komponentenersatzschaltbilder für unsymmetrische generatorsnahe Fehler . . . . .	593
10.4.3	Numerische Auswertung der transienten Komponentenersatzschalt- bilder . . . . .	594
10.4.4	Näherungsverfahren zur Bestimmung des Stoßkurzschlussstroms bei ein- und zweipoligen Kurzschlüssen . . . . .	597
10.5	Aufgaben . . . . .	597
<b>11</b>	<b>Sternpunktbehandlung in Energieversorgungsnetzen</b>	<b>600</b>
11.1	Einfluss der Sternpunktbehandlung auf das stationäre Netzverhalten bei einpoligen Erdschlüssen . . . . .	600
11.1.1	Netze mit isolierten Sternpunkten . . . . .	600
11.1.2	Netze mit Erdschlusskompensation . . . . .	604
11.1.3	Netze mit niederohmiger Sternpunkterdung . . . . .	610
11.1.4	Veranschaulichung der Spannungsverhältnisse durch Zeigerdiagram- me . . . . .	614
11.2	Einfluss der Sternpunktbehandlung auf das transiente Netzverhalten bei einpoligen Erdschlüssen . . . . .	616
11.2.1	Transiente Überspannungen durch Dauererdschlüsse . . . . .	616
11.2.2	Erdschlüsse mit selbstständig löschendem Lichtbogen . . . . .	619
11.3	Einfluss der Sternpunktbehandlung auf Ferroresonanzerscheinungen . . .	622
11.3.1	Erläuterung des Ferroresonanzeffekts . . . . .	622
11.3.2	Ferroresonanzgefährdete Anlagenkonfigurationen . . . . .	626
11.4	Aufgaben . . . . .	632
<b>12</b>	<b>Wichtige Maßnahmen zum Schutz von Menschen und Tieren</b>	<b>635</b>
12.1	Berührungsschutz in Netzen mit Nennspannungen größer als 1 kV . . . . .	635
12.1.1	Zulässige Körperströme und Berührungsspannungen . . . . .	635
12.1.2	Direkter und indirekter Berührungsschutz . . . . .	637
12.2	Berührungsspannungen bei Erdern . . . . .	639
12.3	Berechnung von Erdungsspannungen bei unsymmetrischen Fehlern . . . .	643
12.4	Wichtige Auslegungskriterien für Erdungsanlagen . . . . .	650
12.4.1	Auslegungskriterien für Netze mit isolierten Sternpunkten oder mit Erdschlusskompensation . . . . .	650
12.4.2	Auslegungskriterien für Netze mit niederohmiger Sternpunkt- erdung . . . . .	651
12.5	Indirekter Berührungsschutz in Niederspannungsnetzen . . . . .	651
12.6	Aufgaben . . . . .	656
<b>13</b>	<b>Investitionsrechnung und Wirtschaftlichkeitsberechnung für elektrische Anlagen</b>	<b>659</b>
13.1	Struktur der Kosten . . . . .	659
13.1.1	Kostenarten . . . . .	659
13.1.1.1	Kapitalkosten . . . . .	659
13.1.1.2	Betriebskosten . . . . .	661

- 13.1.1.3 Sonstige Kosten . . . . . 663
- 13.1.1.4 Ausgaben, Einnahmen, operatives Betriebsergebnis . . . 663
- 13.1.2 Fixe und variable Kosten . . . . . 663
- 13.1.3 Einzel- und Gemeinkosten . . . . . 664
- 13.2 Gestaltung der Strompreise . . . . . 666
  - 13.2.1 Grundstruktur der Preise bzw. Entgelte . . . . . 667
  - 13.2.2 Preisgestaltung der Netzbetreiber . . . . . 668
  - 13.2.3 Preisgestaltung der Stromhändler . . . . . 670
  - 13.2.4 Strombezugsverträge mit Niederspannungsnetzkunden . . . . . 670
  - 13.2.5 Strombezugsverträge mit Mittelspannungsnetzkunden . . . . . 671
  - 13.2.6 Strombezugsverträge mit Großkunden . . . . . 672
- 13.3 Aufbereitung der Lastverläufe . . . . . 673
- 13.4 Investitionsrechnung für Netzanlagen . . . . . 675
  - 13.4.1 Kostenvergleich . . . . . 675
    - 13.4.1.1 Zulässigkeit eines Kostenvergleichs . . . . . 675
    - 13.4.1.2 Statischer Kostenvergleich einer Ersatzinvestition für einen Umspanner . . . . . 676
    - 13.4.1.3 Dynamischer Kostenvergleich einer Ersatzinvestition für einen Umspanner . . . . . 678
    - 13.4.1.4 Kostenvergleich bei einer Rationalisierungsinvestition . . 680
  - 13.4.2 Methoden zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit . . . . . 680
    - 13.4.2.1 Kapitalwertmethode . . . . . 681
    - 13.4.2.2 Methode des internen Zinsfußes . . . . . 682
    - 13.4.2.3 Annuitätenmethode . . . . . 682
    - 13.4.2.4 Dynamische Amortisationsdauer . . . . . 683
  - 13.4.3 Investitionsentscheidung . . . . . 683
- 13.5 Aufgaben . . . . . 684

**Lösungen** **686**

**Anhang** **742**

- Richtwerte für Freileitungen . . . . . 742
- Richtwerte für Kabel . . . . . 744
- Zulässige Betriebsströme für Stromschienen aus Aluminium . . . . . 745
- Kennlinien für NH-Sicherungen zum Motorschutz . . . . . 745
- Übersichtsschaltpläne realer Energieversorgungsnetze . . . . . 746
- Richtwerte für Kosten . . . . . 749
- Elektrischer Wirkungsgrad wichtiger Kraftwerksarten . . . . . 750
- Struktur eines Sondervertrags mit Mengenzonung . . . . . 750
- Beispiele für Netzentgelte von Energieversorgungsunternehmen . . . . . 751
- Wichtige Laplace-Transformierte . . . . . 753

**Quellenverzeichnis** **754**

**Verzeichnis wichtiger Normen und Richtlinien** **755**

**Literaturverzeichnis** **762**

**Sachwortverzeichnis** **771**