

# Inhaltsverzeichnis

## Formelzeichen

XVIII

<b>1 Überblick über die geschichtliche Entwicklung der elektrischen Energieversorgung</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundzüge der elektrischen Energieerzeugung</b>	<b>5</b>
2.1 Stromerzeugung mit fossil befeuerten Kraftwerken . . . . .	5
2.1.1 Kohlebefeuerte Blockkraftwerke . . . . .	5
2.1.1.1 Dampfkraftwerksprozess in kohlebefeuchten Blockkraftwerken . . . . .	6
2.1.1.2 Aufbau kohlebefeuchter Blockkraftwerke . . . . .	10
2.1.1.3 Wärmeverbrauchskennlinie von Kondensationskraftwerken	16
2.1.2 Erdgasbefeuchte 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-/kohlebefeuchte 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 Parabolinnenkraftwerk . . . . .	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
<b>3</b>	<b>Aufbau von Energieversorgungsnetzen</b>	<b>72</b>
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

<b>4</b>	<b>Aufbau und Ersatzschaltbilder der Netzelemente</b>	<b>102</b>
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	Leiteseile . . . . .	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 Dreileitersystemen . . . . .	216
4.5.2.2	Kapazitätsbegriff bei Dreileitersystemen . . . . .	222
4.5.2.3	Ohmscher Widerstand bei Dreileitersystemen . . . . .	229
4.5.2.4	Ableitungswiderstand bei Dreileitersystemen . . . . .	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 Ober- schwingungen . . . . .	260
4.8.3.1	Modell eines Netzes mit Stromrichteranlagen . . . . .	261
4.8.3.2	Auswertung des Ersatzschaltbilds . . . . .	262
4.8.3.3	Netzzrückwirkungen . . . . .	263
4.8.4	Schnelle Blindleistungskompensation . . . . .	265
4.8.5	Leistungsflusssteuerung mit FACTS . . . . .	267
4.9	Drosselspulen . . . . .	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 Über- spannungsarten . . . . .	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 reprä- sentative 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 Netzschutz-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 Asynchronegeneratoren 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
<b>5</b>	<b>Auslegung von Netzen im Normalbetrieb</b>	<b>365</b>
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 eingepprägten Spannungsquelle und Lasten mit konstantem Strom . . . . .	382
5.7.1.3	Netze mit einer eingepprägten Spannungsquelle und Lasten mit konstanter Wirk- und Blindleistung . . . . .	382
5.7.1.4	Netze mit mehreren eingepprägten Spannungsquellen . . . . .	383
5.7.1.5	Netze mit Kraftwerkeinspeisungen . . . . .	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

<b>6</b>	<b>Dreipoliger Kurzschluss</b>	<b>393</b>
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
<b>7</b>	<b>Auslegung von Netzen gegen Kurzschlusswirkungen und Auslegung von Schaltern</b>	<b>436</b>
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 Kurzschlüssen auf das transiente Generator-drehzahl- verhalten . . . . .	457
7.5.1	Wichtige Netzparameter zur Gewährleistung der transienten Stabilität . . . . .	458
7.5.1.1	Modellierung einer Generator-netz-anbindung . . . . .	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
<b>8</b>	<b>Grundzüge der Betriebsführung und Planung von elektrischen Energieanlagen</b> . . . . .	<b>486</b>
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 Schaltleitung . . . . .	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
<b>9</b>	<b>Berechnung von unsymmetrisch gespeisten Drehstromnetzen mit symmetrischem Aufbau</b> . . . . .	<b>517</b>
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	Dreischenkeltransformatoren . . . . .	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
<b>10</b>	<b>Berechnung von Drehstromnetzen mit symmetrischen Betriebsmitteln und punktuellen unsymmetrischen Fehlern</b> . . . . .	<b>553</b>
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
<b>11</b>	<b>Sternpunktbehandlung in Energieversorgungsnetzen</b>	<b>583</b>
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 löschendem 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
<b>12</b>	<b>Wichtige Maßnahmen zum Schutz von Menschen und Tieren</b>	<b>618</b>
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
<b>13</b>	<b>Investitionsrechnung und Wirtschaftlichkeitsberechnung für elektrische Anlagen</b>	<b>642</b>
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
<b>Lösungen</b>		<b>668</b>
<b>Anhang</b>		<b>724</b>
	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
<b>Quellenverzeichnis</b>		<b>735</b>
<b>Verzeichnis wichtiger Normen und Richtlinien</b>		<b>736</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>742</b>
<b>Sachwortverzeichnis</b>		<b>750</b>