

Klaus Heuck | Klaus-Dieter Dettmann | Detlef Schulz

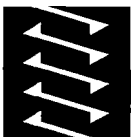
Elektrische Energieversorgung

Erzeugung, Übertragung und Verteilung
elektrischer Energie für Studium und Praxis

Mit 540 Abbildungen

8., überarbeitete und aktualisierte Auflage

STUDIUM



VIEWEG+
TEUBNER

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen

XVIII

1 Überblick über die geschichtliche Entwicklung der elektrischen Energieversorgung	1
2 Grundzüge der elektrischen Energieerzeugung	6
2.1 Stromerzeugung mit fossil befeuerten Kraftwerken	6
2.1.1 Kohlebefeuerte Blockkraftwerke	7
2.1.1.1 Dampfkraftwerksprozess in kohlebefeuchten Blockkraftwerken	7
2.1.1.2 Aufbau kohlebefeuchter Blockkraftwerke	10
2.1.1.3 Wärmeverbrauchskennlinie von Kondensationskraftwerken	18
2.1.2 Erdgasbefeuchte Kraftwerke	19
2.1.2.1 Gasturbinen-Kraftwerke	19
2.1.2.2 Gas-und-Dampf-Kraftwerke	20
2.1.2.3 Blockheizkraftwerke	21
2.1.2.4 Brennstoffzellen	22
2.1.3 Erdgas-/kohlebefeuchte Anlagen	24
2.2 Stromerzeugung mit Wasserkraftwerken	24
2.2.1 Bauarten von Wasserturbinen	25
2.2.2 Bauarten von Wasserkraftwerken	26
2.3 Stromerzeugung mit Kernkraftwerken	27
2.4 Stromerzeugung aus regenerativen Energiequellen	29
2.4.1 Windenergieanlagen	30
2.4.1.1 Grundlagen der Windkraftausnutzung	30
2.4.1.2 Konstruktive Ausführung und Größenentwicklung	32
2.4.1.3 Charakteristik der Energielieferung	35
2.4.1.4 Drehzahlregelung und Leistungsbegrenzung	36
2.4.1.5 Leistungskurven von WEA	40
2.4.1.6 Offshore- Windenergieanlagen	40
2.4.2 Solarthermische Kraftwerke	43
2.4.2.1 Parabolrinnenkraftwerk	43
2.4.2.2 Turmkraftwerk	44
2.4.2.3 Dish-Stirling-System	45
2.4.2.4 Aufwindkraftwerk	45
2.4.3 Biomassekraftwerke	46
2.4.4 Geothermische Kraftwerke	47
2.4.5 Gezeitenkraftwerke	48
2.4.6 Wellenkraftwerke	49
2.4.7 Strömungskraftwerke	50
2.4.8 Photovoltaische Anlagen	51
2.4.8.1 Auftau und Betriebsverhalten	51
2.4.8.2 Wechselrichterkonzepte	54
2.4.8.3 Anlagenkonzepte	55

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
3	Aufbau von Energieversorgungsnetzen	76
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

4	Aufbau und Ersatzschaltbilder der Netzelemente	106
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 Zwei Wicklungstransformatoren	123
4.2.1.1	Aufbau, Eigenfrequenzspektren und transientes Verhalten von einphasigen Zweiwicklungstransformatoren	124
4.2.1.2	Niederfrequentes Ersatzschaltbild eines einphasigen Zweiwicklungstransformators	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 Wicklungen	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 Zweiwicklungstransformatoren 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 Dauernagnetläufer.	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	Netzrückwirkungen	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
5	Auslegung von Netzen im Normalbetrieb	370
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 Kraftwerksemspeisungen	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

6	Dreipoliger Kurzschluss	398
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
7	Auslegung von Netzen gegen Kurzschlusswirkungen und Auslegung von Schaltern	441
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 Stützen	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

8	Grundzüge der Betriebsführung und Planung von elektrischen Energieanlagen	491
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
9	Berechnung von unsymmetrisch gespeisten Drehstromnetzen mit symmetrischem Aufbau	534
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 Freilei- tung	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
10	Berechnung von Drehstromnetzen mit symmetrischen Betriebs- mitteln und punktuellen unsymmetrischen Fehlern	570
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
11	Sternpunktbehandlung in Energieversorgungsnetzen	600
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 Sternpunktterdung	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
12	Wichtige Maßnahmen zum Schutz von Menschen und Tieren	635
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- terdung.	651
12.5	Indirekter Berührungsschutz in Niederspannungsnetzen.	651
12.6	Aufgaben.	656
13	Investitionsrechnung und Wirtschaftlichkeitsberechnung für elektrische Anlagen	659
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 Niederspannungskunden	670
13.2.5	Strombezugsverträge mit Mittelspannungskunden	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**