

Inhaltsverzeichnis

1. Elektrische Energie und Lebensstandard	1
2. Elektroenergiesysteme, Verbundsysteme	9
2.1 Evolution der öffentlichen Stromversorgung	9
2.1.1 Liberalisierung des Strommarkts	12
2.1.2 Energiewende	16
2.2 Elektroenergiesysteme	25
2.3 Verbundsysteme	31
3. Energieressourcen – Energieverbrauch	39
3.1 Erzeugung und Verbrauch elektrischer Energie	39
3.2 Primärenergieressourcen	43
3.2.1 Erschöpfliche Ressourcen und ihr Verbrauch	45
3.2.2 Unerschöpfliche Ressourcen	51
3.2.3 Energieflussrate, Leistung eines Energieflusses	54
3.3 Klimawandel	56
3.4 Energieeffizienz	58
4. Stromerzeugung in Wärmekraftwerken	61
4.1 Thermodynamische Grundbegriffe	63
4.1.1 Dampfgehalt	64
4.1.2 Entropie, T(S)-Diagramm	65
4.1.3 Carnot-Prozess und thermischer Wirkungsgrad	67
4.1.4 Arbeitsfluid Wasser/Dampf im T(s)-Diagramm	69
4.1.5 Enthalpie, h(s)-Diagramm	71
4.2 Dampfkraftwerksprozess	74
4.2.1 Wärmeschaltbild, T(s)-Diagramm und Wirkungsgrad	74
4.2.2 Maßnahmen zur Erhöhung des Wirkungsgrads	76
4.2.2.1 Zwischenüberhitzung	77
4.2.2.2 Regenerative Speisewasservorwärmung	77
4.2.2.3 Kühlmitteltemperatur	78
4.2.2.4 Gesamtwirkungsgrad eines Kraftwerks	79
4.2.3 Exergetischer Wirkungsgrad	82
4.3 Dampfkraftwerkkomponenten	83
4.3.1 Dampferzeuger	83
4.3.1.1 Dampferzeugerbauarten	83
4.3.1.2 Feuerungen	87
4.3.1.3 Leistungsregelung bei Dampferzeugern	88
4.3.1.4 Rauchgasreinigung	90
4.3.2 Dampfturbinen	93

4.3.2.1	Bauarten	93
4.3.2.2	Leistungsregelung von Dampfturbinen	97
4.3.3	Kondensator, Kühleinrichtungen	100
4.3.3.1	Kondensator	100
4.3.3.2	Kühlarten	101
4.3.3.3	Abwärmenutzung	102
4.4	Leistungsregelung in Dampfkraftwerken	103
4.4.1	Festdruckbetrieb	103
4.4.2	Gleitdruckbetrieb	104
4.4.3	Modifizierter Gleitdruckbetrieb	105
4.4.4	Vergleichende Betrachtung	105
4.5	Gasturbinenkraftwerke	106
4.6	Kombinierte Gas- und Dampfkraftwerke (GuD)	110
4.7	Kraft-Wärme-Kopplung	113
4.7.1	Kraft-Wärme-Kopplung in der Industrie	113
4.7.2	Kraft-Wärme-Kopplung in der öffentlichen Stromversorgung	114
5.	Stromerzeugung in Kernkraftwerken	119
5.1	Kernenergie	121
5.1.1	Kernfusion	122
5.1.2	Kernfission (Kernspaltung)	123
5.1.3	Nachzerfallswärme	132
5.1.4	Brennstoffkreislauf	134
5.2	Druckwasserreaktoren (DWR)	137
5.3	Siedewasserreaktoren (SWR)	139
5.4	Gasgekühlte Reaktoren	141
5.5	Brutreaktoren	143
5.6	Kernkraftwerke der Generation IV	144
5.7	Leistungsregelung von Kernreaktoren	145
5.7.1	Leistungsregelung von Druckwasserreaktoren	147
5.7.2	Leistungsregelung von Siedewasserreaktoren	148
5.7.3	Leistungsregelung von gasgeköhlten Reaktoren	149
5.7.4	Leistungsregelung von natriumgeköhlten Reaktoren	149
5.7.5	Bereitstellung von Regelenergie durch Kernkraftwerke	150
5.7.6	Stilllegung und Rückbau von Kernkraftwerken	151
6.	Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien	153
6.1	Wasserkraftwerke	154
6.1.1	Laufwasserkraftwerke	155
6.1.2	Speicherkraftwerke	155
6.1.3	Pumpspeicherkraftwerke	157
6.1.4	Gezeitenkraftwerke	158
6.1.5	Turbinentypen	159
6.1.5.1	Kaplan-Turbine	160
6.1.5.2	Francis-Turbine	160
6.1.5.3	Pelton-Turbine	161
6.1.6	Leistungsregelung	162
6.2	Windkraftanlagen	164
6.2.1	Mechanische Leistung	164

6.2.2	Generatorkonzepte	165
6.2.3	Leistungsregelung von Windturbinen	167
6.2.4	Einbindung von Windkraftanlagen in die Netze der öffentlichen Stromversorgung	168
6.2.5	Stand der Technik und Ausblick	169
6.3	Solarenergieanlagen	172
6.3.1	Direkte Nutzung der Solarenergie	174
6.3.1.1	Photovoltaik-Anlagen	174
6.3.1.2	Solarthermische Anlagen	179
6.4	Biomasse - Kraftwerke	183
6.5	Geothermische Stromerzeugung	184
6.6	Brennstoffzellen	186
6.7	Virtuelle Kraftwerke	188
6.8	Speicher elektrischer Energie	189
6.8.1	Kurzzeitspeicher	190
6.8.1.1	Pumpspeicherkraftwerke	190
6.8.1.2	Druckgasspeicher-Kraftwerke	191
6.8.1.3	Wiederaufladbare Batterien	192
6.8.1.4	Superkondensatoren	197
6.8.1.5	Wasserstofftechnologie	197
6.8.1.6	Wärmespeicher/Power to Heat (PtH, P2H)	199
6.8.1.7	Schwungradspeicher	199
6.8.1.8	Supraleitende magnetische Energiespeicher	199
6.8.1.9	Sektorenkopplung	200
6.8.2	Langzeitspeicher	200
6.8.2.1	Power to Gas (PtG, P2G)	201
6.8.2.2	Innereuropäische Kooperation	201
6.8.3	Backup-Versorgung	201
7.	Kraftwerkleittechnik	205
7.1	Leittechnik-Funktionen	206
7.2	Verfahrens- und leittechnische Struktur eines Kraftwerkprozesses	207
7.3	Prozessleitsysteme	209
7.3.1	Verbindungsprogrammierte Prozessleitsysteme	209
7.3.2	Speicherprogrammierbare Prozessleitsysteme	210
7.3.3	Prozessleitsysteme mit Feldbus	217
7.3.4	Energiemanagementsysteme	218
7.3.4.1	Prozessnahe Anwendungen	218
7.3.4.2	Betriebliche Anwendungen	219
7.3.4.3	Business Anwendungen	219
7.3.4.4	Fernwartung	220
7.4	Prozessvisualisierung	220
7.5	Energiemanagementsysteme der Generation IV	222
7.6	Digitales Kraftwerk, Kraftwerk 4.0	224
7.7	IT-Sicherheit	224

8. Umwandlung mechanischer Energie mittels Synchrongeneratoren	227
8.1 Vollpol- und Schenkelpolgeneratoren	228
8.2 Wirkungsweise von Synchrongeneratoren	230
8.2.1 Der Synchrongenerator im Leerlauf	230
8.2.2 Der Synchrongenerator bei Belastung	234
8.2.3 Einfluss der Sättigung	238
8.2.4 Dämpferwicklung	239
8.3 Besonderheiten der Schenkelpolmaschine	240
8.4 Leistungsgleichungen der Synchronmaschine	242
8.5 Stationäre Betriebszustände	243
8.6 Phasenschieberbetrieb	244
8.7 Belastungsgrenzen des Synchrongenerators	246
8.8 Sternpunktbehandlung bei Synchrongeneratoren	249
8.9 Erregungsverfahren für Synchrongeneratoren	251
8.9.1 Gleichstromerregemaschinen	251
8.9.2 Drehstromerregemaschinen	252
8.9.3 Statische Erregereinrichtungen	253
8.9.4 Dynamisches Verhalten von Erregereinrichtungen	253
8.10 Der Synchrongenerator im Kurzschluss	254
8.10.1 Generatorferner Kurzschluss	255
8.10.2 Generatornaher Kurzschluss	259
8.11 Mathematische Modelle für Synchrongeneratoren	263
8.11.1 Dreiphasiges Modell eines Synchrongenerators mit Vollpolläufer im stationären Betrieb	264
8.11.2 Einphasiges Modell eines Synchrongenerators mit Vollpolläufer im stationären Betrieb	266
8.11.3 Ermittlung der Mit-, Gegen- und Nullimpedanz eines Synchrongenerators	272
8.11.4 Die $dq0$ -Transformation	275
8.11.4.1 Mathematische Vorgehensweise	277
8.11.4.2 Elektrische Leistung und Drehmoment	285
8.11.4.3 Kopplung des Generatormodells mit dem Elektroenergiesystem	286
8.12 Virtueller Synchrongenerator	288
9. Bereitstellung elektrischer Energie auf verschiedenen Spannungsebenen	291
9.1 Wirkungsweise und Ersatzschaltbild von Transformatoren	293
9.2 Kurzschlussersatzschaltbild	301
9.2.1 Ersatzschaltbilder mit umgerechneten Größen	301
9.2.2 Messung der Kurzschlussimpedanz	303
9.2.3 Berechnung der Kurzschlussimpedanz	305
9.2.4 Zeigerdiagramme des Kurzschlussersatzschaltbilds	306
9.2.5 Kurzschlussersatzschaltbild für Dreiwicklungstransformatoren	306
9.3 Kaskadierte und parallel geschaltete Transformatoren	307
9.3.1 Kaskadierte Transformatoren	307
9.3.2 Parallelbetrieb von Transformatoren	309
9.4 Spartransformatoren	310
9.5 Drehstromtransformatoren	311
9.5.1 Kernbauformen	311

9.5.2	Schaltgruppen	312
9.5.2.1	Schaltgruppe Yy0	315
9.5.2.2	Schaltgruppe Dy5	318
9.5.2.3	Schaltgruppe Yd5	319
9.5.2.4	Schaltgruppe Yz5	319
9.5.3	Mit-, Gegen- und Nullimpedanz von Drehstromtransformatoren ...	320
9.5.3.1	Mitimpedanz von Drehstromtransformatoren	320
9.5.3.2	Nullimpedanz von Drehstromtransformatoren	321
9.6	Regeltransformatoren	326
9.6.1	Längsregler	326
9.6.1.1	Unter Last schaltbare Transformatoren	326
9.6.1.2	Längsregler mit Zusatztransformatoren	328
9.6.2	Querregler	329
9.6.3	Schrägregler	331
9.7	Zeitlicher Verlauf des Magnetisierungsstroms	331
9.8	Einschaltstoßstrom leerlaufender Transformatoren	332
10.	Transport und Übertragung elektrischer Energie	337
10.1	Hochspannungs-Drehstrom-Übertragung, HDÜ	337
10.1.1	Transportnetze	338
10.1.2	Hochspannungsnetze	340
10.1.3	Höhe der Netzspannung	340
10.1.3.1	Übertragungsverluste	340
10.1.3.2	Übertragungskapazität	341
10.2	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung, HGÜ	343
10.2.1	Netzgeführte HGÜ mit Thyristoren	343
10.2.2	Selbstgeführte HGÜ mit IGBT-Leistungshalbleitern	346
10.2.3	HGÜ-Leistungsschalter	347
10.3	Betriebsverhalten von Leitungen	348
10.3.1	Elektrisch lange und kurze Leitungen	348
10.3.2	Mathematisches Modell elektrisch langer Leitungen	351
10.3.3	Verlustlose Leitung	355
10.3.3.1	Ausgewählte betriebliche Spezialfälle	355
10.3.3.2	Leerlauf am Leitungsende	356
10.3.3.3	Kurzschluss am Leitungsende	357
10.3.3.4	Belastung mit dem Wellenwiderstand	358
10.3.4	Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm einer elektrisch langen Leitung	361
10.3.5	Betriebsverhalten elektrisch kurzer Leitungen	364
10.3.5.1	Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm	364
10.3.5.2	Längs- und Querspannungsabfall	365
10.4	Blindleistungskompensation in Hochspannungsnetzen	367
10.4.1	Kompensation induktiver Blindleistung	367
10.4.1.1	Parallel-Kompensation	367
10.4.1.2	Reihen-Kompensation	369
10.4.2	Kompensation kapazitiver Blindleistung	370
10.5	FACTS (Flexible AC-Transmission Systems)	371
10.5.1	Klassifizierung von FACTS-Betriebsmitteln	372
10.5.2	Parallel geschaltete FACTS-Regler	373
10.5.2.1	Thyristor-Controlled Reactor, TCR	374

10.5.2.2	Thyristor-Switched Capacitor, TSC	375
10.5.2.3	Static VA _r Compensator, SVC	375
10.5.2.4	STATCOM	376
10.5.3	Seriengeschaltete FACTS-Betriebsmittel	378
10.5.3.1	Thyristor-Controlled Series Capacitor, TCSC	378
10.5.3.2	Static Synchronous Series-Compensator, SSSC	379
10.5.4	Kombinierte FACTS-Regler	380
10.5.4.1	Unified Power-Flow Controller, UPFC	380
10.5.4.2	Dynamic Power-Flow Controller, DFC	381
10.5.4.3	FACTS HGÜ-Kupplungen	381
10.5.5	FACTS-Regelung	382
10.6	Betriebsimpedanzen von Mehrleitersystemen	383
10.6.1	Berechnung von Betriebsimpedanzen in Längsrichtung	383
10.6.1.1	Carson-Formel	386
10.6.1.2	Tabellenbücher	387
10.6.1.3	Messung der Impedanzen	387
10.6.2	Berechnung der Betriebskapazitäten	389
11.	Verteilung elektrischer Energie vor der Energiewende	395
11.1	Netztopologien klassischer Verteilnetze	396
11.1.1	Strahlennetze	396
11.1.2	Ringnetze	397
11.1.3	Maschennetze	397
11.2	110 kV-Verteilnetze	398
11.3	Mittelspannungsnetze	400
11.3.1	Mittelspannungs-Ortsnetze	401
11.3.2	Mittelspannungs-Industrienetze	404
11.3.3	Mittelspannungsnetze in Großgebäuden bzw. Gebäudekomplexen ..	406
11.3.4	Eigenbedarfsnetze	408
11.4	Niederspannungsnetze	410
11.4.1	Niederspannungs-Ortsnetze	410
11.4.2	Niederspannungs-Industrienetze	411
11.4.3	Großgebäudenetze	413
11.5	Blindstromkompensation in Mittel- und Niederspannungsnetzen	414
11.5.1	Netze mit geringem Stromrichteranteil	416
11.5.2	Netze mit hohem Stromrichteranteil	417
12.	Smart Grids	419
12.1	Smart Metering und intelligente MessSysteme iMSys	421
12.2	Wie funktionieren die Rechnernetze der Smart Grids?	427
12.2.1	Was sind Rechnernetze, Protokolle?	427
12.2.2	iMSys-Rechnernetze	432
12.2.3	LoRaWAN-Netze	433
12.2.4	PLC-Rechnernetze	434
12.3	Kommunikationswege in Smart Grids	436
12.4	Parallele Entwicklungen im Rahmen der Digitalisierung	438
12.4.1	IoT-Rechnernetze	438
12.4.2	Digitalisierte Betriebsmittel bei den Netzbetreibern	439
12.4.3	Innovative, digitalisierte Systeme bei den Stromkunden	440

12.4.3.1	Intelligentes Leistungsspitzen-Management bei RLM-Strom-	440
	kunden	
12.4.3.2	Energie-Managementsysteme vom Typ HEMS	441
12.4.3.3	Smart Home Systems	443
12.5	Smart Homes	444
12.6	Smart Cities	445
12.7	Ladestationen für die Elektromobilität	446
12.8	Mini-, Micro-, und Nano Grids, Zellulare Netze	447
12.9	Smarte Gleichstromnetze	449
12.9.1	Gleichstromleitungen in der öffentlichen Stromversorgung	449
12.9.2	Gleichstromnetze in der Fabrik	449
12.9.3	Gleichstromnetze in Wohn- und Bürogebäuden, sonstige Anwen-	
	dungen	451
13.	Sternpunktbehandlung	455
13.1	Netze mit isolierten Sternpunkten – OSPE	456
13.2	Netze mit Erdschlusskompensation – RESPE	460
13.3	Netze mit niederohmig geerdetem Sternpunkt – NOSPE	463
13.4	Netze mit starr geerdeten Sternpunkten	463
13.5	Sternpunktbehandlung mit symmetrischen Komponenten	464
13.6	Sternpunktbehandlung in Niederspannungsnetzen	466
13.6.1	TN-Netze	467
13.6.2	TT-Netze	468
13.6.3	I-Netze	469
13.7	Erdschlussmanagement	469
13.7.1	Erdschlusserfassung	470
13.7.2	Stationäre Erdschlussortungsverfahren	470
13.7.2.1	Ampèremetrische Methode	471
13.7.2.2	Wattmetrische Methode für isolierte Netze, $\sin \varphi$ -Verfahren	471
13.7.2.3	Wattmetrische Methode für kompensierte bzw. gelöschte	
	Netze, $\cos \varphi$ -Verfahren	471
13.7.2.4	Wattmetrische Methode mit Wattreststromerhöhung	472
13.7.2.5	Kurzzeitige, niederohmige Phasenerdung <i>KNOPE</i>	472
13.7.2.6	Oberschwingungsverfahren	473
13.7.2.7	Pulsortungsverfahren	473
13.7.3	Transiente Ortungsverfahren	473
13.7.3.1	Erdschlusswischerrelais	473
13.7.3.2	Zeitbereichsreflektometrie Verfahren	474
14.	Schaltanlagen	479
14.1	Schaltgeräte	480
14.1.1	Sicherungen	482
14.1.2	Lastschalter	486
14.1.3	Leistungsschalter	487
14.1.4	Trennschalter	491
14.1.5	Kurzschlussstrombegrenzer	492
14.1.6	Schaltgeräteübersicht	495
14.2	Niederspannungsschaltanlagen	496
14.2.1	Niederspannungsschaltanlagen im Wohn-Installationsbereich	496

14.2.2	Niederspannungsschaltanlagen bis 630 A	498
14.2.3	Niederspannungsschaltanlagen über 630 A	499
14.3	Mittelspannungsschaltanlagen	501
14.3.1	Mittelspannungsschaltanlagen der Primärverteilung	504
14.3.2	Mittelspannungsschaltanlagen der Sekundärverteilung	506
14.4	Hochspannungsschaltanlagen	508
14.4.1	Freiluftschaltanlagen	508
14.4.2	Gekapselte Hochspannungsschaltanlagen für Innenraumaufstellung	510
14.4.3	Topologie von Hochspannungsschaltanlagen	512
14.5	Umspannstationen	516
14.6	Anforderungen an Schaltanlagen	519
15.	Netzschutz	521
15.1	Schutztechnik-Grundlagen	521
15.2	Schutzgerätetechnik	525
15.3	Schutzprinzipien und -kriterien	527
15.3.1	Überstromschutz	527
15.3.1.1	Abhängiges Maximalstrom-Zeitrelais (AMZ-Relais)	528
15.3.1.2	Unabhängiges Maximalstrom-Zeitrelais (UMZ-Relais) ...	528
15.3.1.3	UMZ-Schutz mit Richtungskriterium	530
15.3.2	Distanzschutz	531
15.3.3	Vergleichsschutz	534
15.3.3.1	Messgrößenvergleichsschutz	534
15.3.3.2	Phasenvergleichsschutz	536
15.3.3.3	Signalvergleichsschutz	536
15.3.4	Erdschlussmeldung	536
15.4	Schutztechnik aus Sicht einzelner Betriebsmittel	537
15.4.1	Leitungsschutz	537
15.4.1.1	Strahlennetze	537
15.4.1.2	Ringleitungen und Maschennetze	538
15.4.2	Transformatorschutz	538
15.4.2.1	Transformatordifferenzialschutz	538
15.4.2.2	Buchholzrelais	539
15.4.3	Generatorschutz	540
15.4.4	Blockschutz	540
15.4.5	Sammelschienenenschutz	542
15.4.6	Schaltanlagenenschutz	543
15.5	Schutzkoordination	544
15.5.1	Stromstaffelung im Strahlennetz	544
15.5.2	Zeitstaffelung im Strahlennetz	545
15.5.3	Schutzkoordination in Ring- und Maschennetzen mit UMZ-Schutz ..	546
15.5.4	Zeitstaffelung mit Distanzrelais	547
15.6	ANSI Schutz Codes	548
15.7	Schutz in Niederspannungsnetzen	549
15.7.1	Nullung (TN-Netze)	551
15.7.2	Schutzerdung (TT-Netze)	553
15.7.3	Schutzleitungssystem (IT-Netze)	554
15.7.4	Fehlerstrom-(FI)-Schutzschaltung	555
15.7.5	Fehlervolt-(FU)-Schutzschaltung	555

15.7.6	Schutztrennung	556
15.7.7	Schutzisolierung	557
15.8	Wide Area Monitoring Systeme	557
16.	Frequenz- und Spannungsregelung	561
16.1	Frequenzregelung	565
16.1.1	Alleinbetrieb	565
16.1.2	Parallelbetrieb	567
16.1.3	Netzfrequenzregler	571
16.1.4	Verbundbetrieb	572
16.1.5	Dynamisches Verhalten der Frequenzregelung	575
16.1.6	Netzregelverbund (NRV)	580
16.2	Spannungsregelung	581
16.2.1	Spannungsqualität	581
16.2.2	Spannungsregelung in Übertragungs- und Transportnetzen	581
16.2.3	Stellglieder der Spannungs-/Blindleistungsregelung	582
16.2.4	Spannungs-/Blindleistungsoptimierung	583
16.3	Begrenzungsregelungen	584
17.	Netzleittechnik	587
17.1	Netzleitstellen	590
17.1.1	SCADA-Funktionen	590
17.1.2	Höherwertige Entscheidungs- und Optimierungsfunktionen HEO ..	592
17.1.3	Rechnerstruktur und Datenbanksystem	593
17.1.4	Schnittstellen zu anderen Systemen	595
17.2	Stationsleittechnik	596
17.3	Feldleittechnik	598
17.4	Fernwirktechnik	598
17.5	Tonfrequenz- und Funkrundsteuerung	599
17.5.1	Tonfrequenzrundsteuerung	600
17.5.2	Funkrundsteuerung	601
17.6	Smart Grid Netzführung	602
17.7	Cyber Security in Netzen	602
18.	Netzbetrieb	605
18.1	Netzführung in Transportnetzen	606
18.1.1	Transportnetzführung in der klassischen Stromversorgung, so ge- nannte Lastverteilung	608
18.1.1.1	Lastprognose	608
18.1.1.2	Lastverteilung	613
18.1.1.3	Kraftwerksauswahl, Order of Merit	615
18.1.1.4	Netzführung in der Schaltwarte	617
18.1.2	Transportnetzführung im liberalisierten Strommarkt, so genannte Systemführung	618
18.1.3	Flexibilitätsoptionen in den Übertragungs- und Hochspannungsnet- zen	623
18.1.4	Netzreserve, Kapazitätsreserve und Sicherheitsbereitschaft	624
18.1.5	EMS-Funktionen	626
18.2	Netzführung in Verteilnetzen	628

18.2.1	Flexibilitätsoptionen	630
18.2.1.1	Erzeugungsmanagement	630
18.2.1.2	Lastmanagement	631
18.2.1.3	Kooperation Übertragungsnetz-/Verteilnetzbetrieb	634
18.2.1.4	Blockchain Technologie	635
18.3	Netzbereitstellung	637
19.	Berechnung von Netzen und Leitungen im stationären Betrieb	641
19.1	Leistungsflussrechnung	641
19.1.1	Mathematisches Netzmodell mit Admittanzmatrix	642
19.1.1.1	Vierleiternetze (Netze mit Sternpunktleiter)	645
19.1.1.2	Dreileiter-Drehstromnetze	647
19.1.2	Hybridmatrix $\underline{H}$	648
19.1.3	Impedanzmatrix	650
19.1.4	Berechnung der Knotenspannungen und Leitungsströme bei vorgegebenen Lastströmen	651
19.1.5	Berechnung der Knotenspannungen bei vorgegebenen Knotenleistungen	652
19.1.6	Behandlung unterschiedlicher Netzknoten	654
19.2	Varianten der Leistungsflussrechnung	655
19.2.1	Schnelle Leistungsflussrechnung	655
19.2.2	Optimale Leistungsflussrechnung	656
19.2.3	Probabilistische Leistungsflussrechnung	657
19.3	Manuelle Berechnung von Leitungsströmen in kleinen Netzen	657
19.3.1	Die an einem Ende belastete Leitung	658
19.3.2	Die mehrfach belastete Leitung	660
19.3.3	Die beidseitig gespeiste Leitung, gleiche Versorgungsspannung	662
19.3.4	Die beidseitig gespeiste Leitung bei unterschiedlichen Versorgungsspannungen	663
19.3.5	Vereinfachungen in der Berechnung	663
19.3.6	Berechnung der Stromverteilung in Netzen	664
19.3.6.1	Strahlennetze	664
19.3.6.2	Ringnetze	665
19.3.6.3	Maschennetze	665
20.	Kurzschlussstromberechnung	671
20.1	Begriffswelt und Methodik der Kurzschlussstromberechnung	672
20.1.1	Berechnung des Anfangs-Kurzschlusswechselstroms I''_k	673
20.1.2	Berechnung aus I''_k abgeleiteter Kurzschlussstromgrößen	674
20.1.2.1	Stoßkurzschlussstrom i_p	674
20.1.2.2	Ausschaltwechselstrom I_b	674
20.1.2.3	Dauerkurzschlussstrom I_k	674
20.1.2.4	Thermisch wirksamer Kurzschlussstrom I_{th}	675
20.2	Der symmetrische Kurzschluss	675
20.2.1	Berechnung von I''_k bei einfacher Generatorspeisung	676
20.2.2	Berechnung von I''_k bei Netzeinspeisung	680
20.2.3	Berechnung von I''_k bei mehrfacher Einspeisung	683
20.2.3.1	Das Verfahren der Ersatzspannungsquelle	683
20.2.3.2	Rechenbeispiel zum Verfahren der Ersatzspannungsquelle	684

20.3	Unsymmetrische Fehler	689
20.3.1	Berechnungsformeln für unsymmetrische Fehler	691
20.3.2	Berechnungsbeispiel „Unsymmetrische Kurzschlussströme“	692
20.3.2.1	Aufstellen der Ersatzschaltbilder des Mit-, Gegen- und Nullsystems	692
20.3.3	Berechnung der Mit- und Gegenimpedanzen	692
20.3.4	Berechnung der Nullimpedanzen	693
20.3.5	Berechnung der finalen Impedanzen Z_+ , Z_- und Z_0	693
20.3.5.1	Einpoliger Kurzschluss	694
20.3.5.2	Zweipoliger Kurzschluss ohne Erdberührung	694
20.3.5.3	Zweipoliger Kurzschluss mit Erdberührung	695
20.4	Kurzschlussimpedanzen elektrischer Betriebsmittel	695
20.4.1	Generatoren	696
20.4.2	Netzeinspeisung	697
20.4.3	Transformatoren	697
20.4.4	Kraftwerksblöcke	698
20.4.5	Windkraft- und PV-Anlagen	699
20.4.6	Freileitungen und Kabel	699
20.4.7	Motoren	699
20.4.8	Sonstige Betriebsmittel	700
20.4.9	Übersicht der Betriebsmittelimpedanzen	700
20.5	Kurzschlussstromberechnung mit bezogenen Größen	701
20.5.1	Das per-unit-Verfahren	701
20.5.2	Das %/MVA-Verfahren	702
20.6	Digitale Kurzschlussstromberechnung	704
20.6.1	Berechnung des Anfangs-Kurzschlusswechselstroms I_k'' aus der Knotenadmittanzmatrix	704
21.	Stabilität von Elektroenergiesystemen	707
21.1	Polradwinkelstabilität	708
21.1.1	Leistungs-/Polradwinkelkurve	709
21.1.2	Bewegungsgleichung eines Synchrongenerators	710
21.1.3	Kleinsignalstabilität	713
21.1.3.1	Grafische Untersuchung der Kleinsignalstabilität	714
21.1.3.2	Untersuchung der Kleinsignalstabilität mit Übertragungsfunktionen	716
21.1.3.3	Methode der Zustandsvariablen	717
21.1.4	Großsignalstabilität	718
21.1.4.1	Numerische Integration des Bewegungsdifferentialgleichungssystems	718
21.1.4.2	Großsignalstabilität mit der Methode der Zustandsvariablen	720
21.1.4.3	Ljapunov-Verfahren	721
21.2	Spannungsstabilität	727
21.3	Netzzusammenbrüche	730
21.4	Resiliente Netze	735

22. Wirtschaftliche Aspekte in Elektroenergiesystemen	737
22.1 Versorgungsqualität	737
22.2 Strommarktliberalisierung	739
22.3 Netzzugang im deutschen Strommarkt	742
22.4 Stromhandel	743
22.4.1 Großhandelsmärkte	745
22.4.2 Regelleistungsmärkte	745
22.4.3 Strommarkt 2.0	746
22.4.4 CO ₂ -Emissionsrechtehandel	747
22.4.5 Energy Trading	748
22.5 Bilanzkreise und Bilanzierungsgebiete	749
22.6 Stromkosten und Strompreise	753
22.6.1 Kalkulation der Stromkosten	754
22.6.1.1 Stromerzeugungskosten	754
22.6.1.2 Ermittlung von Netznutzungsentgelten	756
22.6.2 Kalkulation der Strompreise	758
22.6.3 Negative Strompreise	760
22.6.4 Stromausfallkosten	760
22.7 Methoden zur Investitionsrechnung	762
22.8 Asset Management	763

Anhang

A. Rechnen mit komplexen Größen	771
A.1 Komplexe Wechselstromrechnung	771
A.2 Komplexe Darstellung von Reaktanzen und Impedanzen	773
A.3 Zählfeilsysteme	776
A.4 Zeigerdiagramme	778
A.5 Wechselstromleistung	782
A.6 Blindleistungskompensation und Blindleistungslieferung	785
A.6.1 Blindleistungskompensation	787
A.6.2 Erzeugung und Lieferung von Blindleistung	789
A.7 Wechselstromleistung bei nichtsinusförmigen Spannungen und Strömen	792
A.8 Ergänzende Bemerkungen zu elektrischer Energie und Leistung	793
B. Rechnen in Drehstromsystemen	797
B.1 Begriffe und Größen in Drehstromsystemen	797
B.1.1 Spannungen und Ströme in Drehstromnetzen	797
B.1.2 Spannungen und Ströme von Drehstromerzeugern und -verbrauchern	798
B.2 Drehstromleistung elektrischer Betriebsmittel	800
B.2.1 Drehstromverbraucher am Drehstromnetz	801
B.2.2 Stern-Dreieck-Anlaufschaltung	802
C. Rechnen mit bezogenen Größen	805
C.1 Referenzgrößen	806
C.1.1 Bezogene Spannungen	806
C.1.2 Bezogene Leistungen	807
C.1.3 Bezogene Ströme	807
C.1.4 Bezogene Impedanzen	808

C.2 Rechnen mit pu-Größen	809
D. Grundbegriffe magnetischer Wechselfelder	815
D.1 Induktionsgesetz, induzierte und selbstinduzierte Spannung	815
D.1.1 Induzierte Spannung	815
D.1.2 Selbstinduzierte Spannung	817
D.2 Windungsfluss, Spulenfluss und Flussverkettung einer Wicklung	818
D.3 Magnetische Streuung ($X = X_h + X_\sigma$)	820
E. Unsymmetrische Kurzschlussströme	823
E.1 Die Methode der symmetrischen Komponenten	823
E.2 Berechnungsformeln für unsymmetrische Kurzschlussströme	826
E.2.1 Berechnungsformel für einpolige Kurzschlussströme	826
E.2.2 Berechnungsformel für zweipolige Kurzschlüsse ohne Erdberührung	828
E.3 Berechnungsformel für zweipolige Kurzschlüsse mit Erdberührung	830
F. Geräte Funktions-Codes nach ANSI C 37.2 (Auszug)	833
G. Lösung linearer und nichtlinearer Gleichungssysteme	835
G.1 Direkte Verfahren	835
G.1.1 Gauß'sches Eliminationsverfahren	835
G.1.2 Gauß-Jordan-Algorithmus	838
G.1.3 Dreiecksfaktorisierung	839
G.1.4 Optimal geordnete Dreiecksfaktorisierung	841
G.2 Iterationsverfahren	842
G.2.1 Stromiterationsverfahren	842
G.2.1.1 Jacobi-Verfahren (Gesamtschrittverfahren)	842
G.2.1.2 Gauß-Seidel-Verfahren (Einzelschrittverfahren)	843
G.2.1.3 Newton-Raphson-Verfahren	844
H. Methode der Zustandsvariablen	847
I. IEEE Code of Ethics	851