Inhalt

Danksagung und Vorwort zur dritten Auflage	5
Vorwort zur ersten Auflage	7
Vorwort zur zweiten Auflage	8
1 Allgemeines zur Energie- und Elektrizitätsversorgung	19
1.1 Gesamtenergiebedarf, Begriffe	19
1.2 Energieverbrauch und Energieerzeugung einzelner Länder	20
1.3 Energiebedarf Deutschlands	24
1.4 Bedeutung „erneuerbarer“ Energiequellen	28
1.5 Energieerzeugung und Kraftwerkstypen	28
1.6 Tages-, Monats- und Jahresbelastungskurven	34
1.7 Kostenanteile	37
1.8 Lernzielfragen	40
1.9 Übung 1 zum Kapitel 1: Belastungskurven und Gestehungskosten elektrischer Energie	41
1.10 Übung 2 zum Kapitel 1: Belastungskurven und Gestehungskosten elektrischer Energie	42
2 Netze, Kraftwerke	43
2.1 Entwicklung der Übertragungsnetze	43
2.2 UCTE-Verbundnetz	44
2.3 Engpassleistung	51
2.4 Auswirkungen der Liberalisierung	52
2.5 Standorte und Netzanbindung von Kraftwerken	57
2.6 Empfohlene Spannungsebenen	58
2.7 Netzformen	60
2.8 Lernzielfragen	66
3 Größen, Begriffe, Berechnungsverfahren, symmetrische Komponenten	69
3.1 Zählpeile und Zählpeilsysteme	69
3.2 Symmetrische Komponenten	70
3.2.1 Herleitung der Transformation	70
3.2.2 Physikalische Interpretation	75
3.2.3 Grafische Darstellung	77
3.2.4 Messung der Impedanzen des O12-Systems	77

3.3	Anwendung der symmetrischen Komponenten	82
3.4	Netzreduktion	85
3.5	Allgemeines zu Einheiten und Größen	89
3.6	Begriffe	89
3.7	Einheitensysteme	91
3.8	Physikalische, relative und semirelative Einheitensysteme für Netzrechnungen	91
3.9	Berechnung im %/MVA-System und im Ohm-System	93
3.10	Lernzielfragen	97
3.11	Übung 1 zum Kapitel 3: Symmetrische Komponenten und Fehlerfälle	99
3.12	Übung 2 zum Kapitel 3: Unsymmetrien durch Fehlerfälle	99
3.13	Übung 3 zum Kapitel 3: Berechnung von Betriebsmitteln	100
4	Berechnung der Kurzschlussströme	101
4.1	Allgemeines, Fehlerarten	101
4.2	Berechnungsverfahren	103
4.3	Berechnung der Kurzschlussströme	104
4.3.1	Allgemeines	104
4.3.2	Korrekturfaktor bei Anwendung des %/MVA-Systems	105
4.3.3	Impedanzkorrekturfaktoren	106
4.3.4	Berechnung der Kurzschlussstromparameter nach VDE 0102	108
4.3.4.1	Anfangskurzschlusswechselstrom I_k''	108
4.3.4.2	Stoßkurzschlussstrom i_p	109
4.3.4.3	Stoßkurzschlussstrom im vermaschten Netz	111
4.3.4.4	Symmetrischer Ausschaltwechselstrom	113
4.3.4.5	Dauerkurzschlussstrom	114
4.4	Einfluss von Motoren	116
4.5	Kleinste Kurzschlussströme	118
4.6	Doppelerdkurzschluss und Teilkurzschlussströme über Erde	119
4.7	Lernzielfragen	123
4.8	Übung 1 zum Kapitel 4: Berechnung dreipoliger Kurzschlüsse, generatornah	124
4.9	Übung 2 zum Kapitel 4: Berechnung einpoliger Kurzschlüsse	125
4.10	Übung 3 zum Kapitel 4: Stoßkurzschlussstromberechnung	126
4.11	Übung 4 zum Kapitel 4: Stoßkurzschlussstromberechnung im vermaschten Netz	127

5	Auswirkungen von Kurzschlussströmen und Kurzschlussstrombegrenzung	131
5.1	Allgemeines	131
5.2	Thermische Kurzschlussstromfestigkeit	132
5.2.1	Auslegung der Leiter	132
5.2.2	Auslegung von Kabelschirmen	138
5.3	Mechanische Kurzschlussfestigkeit	139
5.4	Weitere Auswirkungen	141
5.5	Kurzschlussstrombegrenzung	142
5.6	I_s -Begrenzer	143
5.7	Lernzielfragen	146
5.8	Übung 1 zum Kapitel 5: Thermische Kurzschlussfestigkeit	147
5.9	Übung 2 zum Kapitel 5: Mechanische Kurzschlussfestigkeit	148
6	Elektrische Energieerzeugung, Verbundbetrieb	151
6.1	Synchrongeneratoren	151
6.2	Asynchrongeneratoren	154
6.3	Andere Arten elektrischer Energieerzeugung	157
6.4	Betriebsverhalten der Synchronmaschine, Stabilität	158
6.5	Regelung der Synchronmaschine	159
6.6	Verbundbetrieb	162
6.6.1	Allgemeines	162
6.6.2	Primärregelung	164
6.6.3	Sekundärregelung	166
6.6.4	Tertiärregelung	168
6.6.5	Regelung der Synchronzeit	168
6.6.6	Lastabwurf-Strategien	168
6.7	Lernzielfragen	169
6.8	Übung zum Kapitel 6: Regelung in der Energieversorgung	170
7	Transformatoren	173
7.1	Einsatz und Entwicklung von Transformatoren	173
7.2	Aufbau der Transformatoren	175
7.3	Induktionsgesetz	179
7.3.1	Allgemeines	179
7.3.2	Streuungsfreier Transformator	180
7.4	Ersatzschaltplan des Transformators im Mitsystem	182
7.4.1	Wechselstromtransformator	182
7.4.2	Spannungsänderung bei Belastung	185
7.4.3	Messung der Größen des Ersatzschaltplans	185
7.4.4	Dreiwicklungstransformator	188

7.5	Schaltgruppen und Schaltungen	190
7.6	Nullsystem und Sternpunktbelastbarkeit	193
7.6.1	Messung der Nullimpedanz	193
7.6.2	Sternpunktbelastbarkeit	196
7.7	Typische Kennwerte von Transformatoren	197
7.8	Spartransformatoren	198
7.9	Wicklungen und Stufenschalter	199
7.10	Rushströme	203
7.11	Lernzielfragen	203
7.12	Übung 1 zum Kapitel 7: Parallelschalten von Transformatoren	205
7.13	Übung 2 zum Kapitel 7: Spannungsfall eines Transformators	206
8	Freileitungen	209
8.1	Allgemeines	209
8.2	Leiteseile	210
8.3	Strombelastbarkeit	213
8.4	Abstände und Durchhangberechnung	214
8.5	Kennwerte von Freileitungen	218
8.6	Lernzielfragen	223
8.7	Übung zum Kapitel 8: Berechnung der Kennwerte einer Freileitung	224
9	Kabel	227
9.1	Allgemeines	227
9.2	Alphanumerische Kennzeichnung	229
9.3	Ausführungsformen	231
9.3.1	Niederspannungskabel	231
9.3.2	Mittelspannungskabel (3,6/6 kV bis 18/30 kV)	231
9.3.3	Hochspannungskabel (≥ 110 kV)	233
9.4	Elektrische Kenndaten	235
9.5	Verluste und Strombelastbarkeit	237
9.5.1	Wärmeersatzschaltbild	237
9.5.2	Belastbarkeit nach DIN VDE 0276-1000:1995-06	239
9.5.3	Berechnung der Belastbarkeit	243
9.6	Lernzielfragen	247
9.7	Übung 1 zum Kapitel 9: Belastbarkeit von Kabeltrassen nach DIN VDE 0276-1000	248
9.8	Übung 2 zum Kapitel 9: Verluste und Belastbarkeit einer Kabelverbindung	249

10	Schaltanlagen	251
10.1	Allgemeines	251
10.2	Schalter	251
10.3	Anordnungen in Schaltanlagen	252
10.4	Abzweige in Schaltanlagen	254
10.5	Stromwandler	257
10.6	Spannungswandler	260
10.7	Nicht konventionelle Wandler	261
10.8	Lernzielfragen	262
11	Sternpunktbehandlung und Erdung	265
11.1	Allgemeines	265
11.2	Niederohmige Sternpunkterdung	267
11.3	Strombegrenzende Sternpunkterdung	270
11.4	Netz mit isoliertem Sternpunkt (freier Sternpunkt)	271
11.5	Netz mit Erdschlusskompensation	275
11.6	Kombinierte Verfahren der Sternpunktbehandlung	283
11.7	Wirkreststromkompensation	284
11.7.1	Grenzen der Erdschlusskompensation	284
11.7.2	Verfahren der Reststromkompensation	285
11.8	Erdungen in Hochspannungsnetzen	290
11.9	Lernzielfragen	293
11.10	Übung 1 zum Kapitel 11: Sternpunktbehandlung und Erdschluss	295
11.11	Übung 2 zum Kapitel 11: Berechnung der Verlagerungsspannung bei einpoligem Kurzschluss	295
11.12	Übung 3 zum Kapitel 11: Begrenzung einpoliger Kurzschlussströme durch Sternpunkterdungsimpedanz	296
12	Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ)	299
12.1	Allgemeines; DHÜ – HGÜ	299
12.2	Stromrichterstationen	303
12.3	HGÜ-Freileitungen und -kabel	306
12.4	Elektroden	308
12.5	Kostenbetrachtungen	309
13	Spannungsqualität – Netzzrückwirkungen	311
13.1	Elektromagnetische Verträglichkeit	311
13.2	Klassifizierung von Netzzrückwirkungen und deren Auswirkungen	315
13.2.1	Arten der Netzzrückwirkungen	315

13.2.2	Auswirkungen von Oberschwingungen und Zwischenharmonische	317
13.2.3	Auswirkungen von Spannungsschwankungen und Spannungsänderungen	318
13.2.4	Auswirkungen von Spannungsunsymmetrien	319
13.3	Oberschwingungen und Zwischenharmonische	319
13.3.1	Mathematische Grundlagen für die Betrachtung von Oberschwingungen	319
13.3.2	Entstehung von Oberschwingungen durch nicht-lineare Kennlinien	320
13.3.3	Entstehung durch leistungselektronische Betriebsmittel	322
13.3.4	Zwischenharmonische	328
13.3.5	Leistungsbetrachtungen und Definitionen nach DIN 40110	332
13.3.6	Oberschwingungen und symmetrische Komponenten	336
13.4	Spannungsschwankungen, Spannungsänderungen	338
13.5	Flicker	340
13.5.1	Allgemeines	340
13.5.2	Überschlägige Flickerberechnung für definierte Spannungsänderungen	342
13.5.3	Flickerberechnung für stochastische Signale	350
13.6	Spannungsunsymmetrien	350
13.7	Kommutierungseinbrüche	352
13.8	Bewertung von NetZRückwirkungen	354
13.8.1	Allgemeines	354
13.8.2	Ermittlung der Netzimpedanz zur Beurteilung von NetZRückwirkungen	356
13.8.3	Bewertung von Oberschwingungen	358
13.8.3.1	Verträglichkeitspegel von Oberschwingungen	358
13.8.3.2	Grenzwerte für Oberschwingungsströme von Geräten mit einem Nennstrom $I \leq 16$ A	360
13.8.3.3	Grenzwerte für Oberschwingungsströme von Geräten mit einem Nennstrom 16 A $< I \leq 75$ A	362
13.8.3.4	Bewertung von Oberschwingungen	365
13.8.4	Bewertung von Zwischenharmonischen	372
13.8.5	Bewertung von Spannungsunsymmetrien	375
13.8.6	Bewertung von Spannungsschwankungen und Flicker	376
13.8.7	Bewertung von Kommutierungseinbrüchen	379
13.9	Normung	381
13.9.1	Allgemeines	381
13.9.2	DIN EN 50160	385
13.10	Kondensatoren in überschwingungshaltigen Netzen	388
13.11	Lernzielfragen	393

13.12	Übung 1 zum Kapitel 13: Blindleistungskompensation und Oberschwingungen	394
13.13	Übung 2 zum Kapitel 13: Spannungsschwankungen	396
13.14	Übung 3 zum Kapitel 13: Bewertung von Oberschwingungen	397
13.15	Übung 4 zum Kapitel 13: Flickerbewertung	398
14	Auswirkungen elektromagnetischer Felder auf den Menschen .	401
14.1	Einführung	401
14.2	Natürliche Felder	402
14.3	Größenordnungen elektromagnetischer Felder	403
14.4	Wirkungsmechanismen elektromagnetischer Felder	404
14.5	Grenzwertfestlegungen	405
14.6	Lernzielfragen	410
15	Schutz gegen elektrischen Schlag	411
15.1	Allgemeines	411
15.2	Körperströme	412
15.3	Körperimpedanz und Berührungsspannung	414
15.4	Entstehung von Berührungsspannungen	415
15.5	Niederspannungsnetzformen	418
15.6	Schutzmaßnahmen – Schutzvorkehrungen	422
15.6.1	Allgemeine Anforderungen	422
15.6.2	Automatische Abschaltung der Stromversorgung	424
15.6.3	Doppelte oder verstärkte Isolierung	425
15.6.4	Schutztrennung	425
15.6.5	Schutz durch Kleinspannung mittels SELV oder PELV	425
15.6.6	Zusätzlicher Schutz	426
15.7	Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen (RCD)	427
15.7.1	Allgemeines	427
15.7.2	Allstromsensitive Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen (RCD Typ B)	429
15.8	Lernzielfragen	431
15.9	Übung zum Kapitel 15: Falsche Erdung in einem TN-S-Netz	431
16	Netzanschluss von Erzeugungsanlagen erneuerbarer Energiequellen	433
16.1	Allgemeines	433
16.2	Anschlussbedingungen	435
16.3	Kurzschlussströme und Schutzeinrichtungen	437
16.4	Blindleistungskompensation	437
16.5	Zuschaltbedingungen und Spannungsänderung	438

16.6	Sonstige Netzurückwirkungen	440
16.7	Dynamische Netzstützung	442
16.8	Lernzielfragen	443
17	Normen, Vorschriften und Bestimmungen	445
17.1	Allgemeines	445
17.2	Deutsche und internationale Normung	446
17.3	Rechtliche Relevanz von Normen	447
18	Lösungen der Übungsaufgaben	453
18.1	Lösung der Übung 1 von Kapitel 1: Belastungskurven und Gestehungskosten elektrischer Energie ...	453
18.2	Lösung der Übung 2 von Kapitel 1: Barwert und Gestehungskosten elektrischer Energie	454
18.3	Lösung der Übung 1 von Kapitel 3: Symmetrische Komponenten und Fehlerfälle	455
18.4	Lösung der Übung 2 von Kapitel 3: Unsymmetrien durch Fehlerfälle	457
18.5	Lösung der Übung 3 von Kapitel 3: Berechnung von Betriebsmitteln	459
18.6	Lösung der Übung 1 von Kapitel 4: Berechnung dreipoliger Kurzschlüsse, generatornah	460
18.7	Lösung der Übung 2 von Kapitel 4: Berechnung einpoliger Kurzschlüsse	462
18.8	Lösung der Übung 3 von Kapitel 4: Stoßkurzschlussstromberechnung	464
18.9	Lösung der Übung 4 von Kapitel 4: Stoßkurzschlussstromberechnung im vermaschten Netz	466
18.10	Lösung der Übung 1 von Kapitel 5: Thermische Kurzschlussfestigkeit	467
18.11	Lösung der Übung 2 von Kapitel 5: Mechanische Kurzschlussfestigkeit	469
18.12	Lösung der Übung von Kapitel 6: Regelung in der Energieversorgung	470
18.13	Lösung der Übung 1 von Kapitel 7: Parallelschalten von Transformatoren	472
18.14	Lösung der Übung 2 von Kapitel 7: Spannungsfall eines Transformators	473
18.15	Lösung der Übung von Kapitel 8: Berechnung der Kennwerte einer Freileitung	474
18.16	Lösung der Übung 1 von Kapitel 9: Belastbarkeit von Kabeltrassen nach DIN VDE 0276–1000	476

18.17	Lösung der Übung 2 von Kapitel 9: Verluste und Belastbarkeit einer Kabelverbindung	477
18.18	Lösung der Übung 1 von Kapitel 11: Sternpunktbehandlung und Erdschluss	478
18.19	Lösung der Übung 2 von Kapitel 11: Berechnung der Verlagerungsspannung bei einpoligem Kurzschluss	479
18.20	Lösung der Übung 3 von Kapitel 11: Begrenzung einpoliger Kurzschlussströme durch Sternpunktterdungsimpedanz	480
18.21	Lösung der Übung 1 von Kapitel 13: Blindleistungskompensation und Oberschwingungen	481
18.22	Lösung der Übung 2 von Kapitel 13: Spannungsschwankungen	482
18.23	Lösung der Übung 3 von Kapitel 13: Bewertung von Oberschwingungen	483
18.24	Lösung der Übung 4 von Kapitel 13: Flicker und Unsymmetrie	484
18.25	Lösung der Übung von Kapitel 15: Falsche Erdung in einem TN-S-Netz	485
19	Formelzeichen und Indizes	487
19.1	Formelzeichen	487
19.2	Indizes, tiefgestellt	491
19.3	Indizes, hochgestellt	495
19.4	Kennzeichnungen am Beispiel U	495
19.5	Reihenfolge der Indizes	495
20	Hinweise zur beiliegenden CD-ROM	497
21	Literatur	499
	Stichwortverzeichnis	513