

2817 - 767 2

Klaus Heuck
Klaus-Dieter Dettmann

Elektrische Energieversorgung

**Erzeugung, Transport
und Verteilung elektrischer Energie
für Studium und Praxis**

5., vollständig überarbeitete Auflage

Unter Mitarbeit von Egon Reuter

Mit 566 Abbildungen, 28 Tabellen und
72 Aufgaben mit Lösungen



Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	XVII
1 Überblick über die geschichtliche Entwicklung der elektrischen Energieversorgung	1
2 Grundzüge der elektrischen Energieerzeugung	5
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	9
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	19
2.1.2.3 Blockheizkraftwerke	19
2.1.2.4 Brennstoffzellen	20
2.1.3 Erdgas-/kohlebefeuchte Anlagen	22
2.2 Stromerzeugung mit Wasserkraftwerken	22
2.2.1 Bauarten von Wasserturbinen	23
2.2.2 Bauarten von Wasserkraftwerken	24
2.3 Stromerzeugung mit Kernkraftwerken	25
2.4 Stromerzeugung aus regenerativen Energiequellen	27
2.4.1 Windenergieanlagen	27
2.4.2 Solarthermische Kraftwerke	29
2.4.3 Geothermische Kraftwerke	30
2.4.4 Gezeitenkraftwerke	30
2.4.5 Photovoltaische Anlagen	30
2.4.6 Strom aus Biomasse	32
2.4.7 Schlussfolgerungen	33
2.5 Kraftwerksregelung	33
2.5.1 Regelung von Wärmekraftwerken	33
2.5.1.1 Regelung eines Kraftwerks im Inselbetrieb	33
2.5.1.2 Regelung im Insel- und Verbundnetz	38
2.5.2 Regelung von Wasser- und Kernkraftwerken	42
2.6 Kraftwerkseinsatz	42
2.6.1 Verlauf der Netzlast	43
2.6.2 Deckung der Netzlast	43
2.7 Aufgaben	44

3	Aufbau von Energieversorgungsnetzen	46
3.1	Übertragungssysteme	47
3.1.1	Einphasige Systeme	47
3.1.2	Dreiphasige Systeme	47
3.1.3	HGÜ-Anlagen	50
3.2	Wichtige Strukturen von Drehstromnetzen	51
3.2.1	Niederspannungsnetze	52
3.2.2	Mittelspannungsnetze	54
3.2.3	Hoch- und Höchstspannungsnetze	56
3.3	Aufgaben	59
4	Aufbau und Ersatzschaltbilder der Netzelemente	60
4.1	Berechnung von Netzwerken mit induktiven Kopplungen	60
4.1.1	Analytische Beschreibung induktiver Kopplungen	60
4.1.2	Stationäre Beschreibung von Netzen mit induktiven Kopplungen	64
4.1.2.1	Veranschaulichung der manuellen Berechnungsmethode an einem Beispiel	65
4.1.2.2	Admittanzform von mehrtorigen Netzen	66
4.1.2.3	Impedanzform von mehrtorigen Netzen	68
4.1.3	Ausgleichsvorgänge in Netzen	70
4.1.3.1	Anwendung der Laplace-Transformation	70
4.1.3.2	Erläuterungen zu Eigenfrequenzspektren	72
4.1.4	Nichtlineare Induktivitäten	74
4.2	Transformatoren	77
4.2.1	Einphasige Zweiwicklungstransformatoren	77
4.2.1.1	Aufbau, Eigenfrequenzspektren und transientes Verhalten von einphasigen Zweiwicklungstransformatoren	78
4.2.1.2	Niederfrequentes Ersatzschaltbild eines einphasigen Zweiwicklungstransformators	87
4.2.1.3	Betriebsverhalten von Zweiwicklungstransformatoren im einphasigen Netzverband	92
4.2.2	Einphasige Dreiwicklungstransformatoren	94
4.2.3	Dreiphasige Transformatoren	98
4.2.3.1	Aufbau eines Drehstromtransformators mit zwei Wicklungen	98
4.2.3.2	Schaltungen	99
4.2.3.3	Übersetzung bei symmetrischem Betrieb	101
4.2.3.4	Ersatzschaltbild für den symmetrischen Betrieb	104
4.2.3.5	Betriebsverhalten von dreiphasigen Zweiwicklungstransformatoren im Netzverband	109
4.2.4	Spartransformatoren	111
4.2.4.1	Aufbau und Einsatz von Spartransformatoren	111
4.2.4.2	Ersatzschaltbild eines Spartransformators	112

4.2.5	Transformatoren mit einstellbarer Übersetzung	115
4.2.5.1	Erläuterung der direkten Spannungseinstellung	115
4.2.5.2	Erläuterung der indirekten Spannungseinstellung	118
4.2.5.3	Leistungsverhältnisse bei Umspannern mit einstellbaren Übersetzungen	120
4.3	Messwandler	123
4.3.1	Spannungswandler	123
4.3.2	Stromwandler	126
4.4	Synchronmaschinen	129
4.4.1	Grundsätzlicher Aufbau von Synchronmaschinen	129
4.4.2	Modellgleichungen einer Synchronmaschine	131
4.4.2.1	Qualitative Feldverhältnisse in einer Vollpolmaschine	131
4.4.2.2	Formulierung der Modellgleichungen	134
4.4.3	Betriebsverhalten von Synchronmaschinen	137
4.4.3.1	Ersatzschaltbild für den stationären Betrieb	137
4.4.3.2	Betriebseigenschaften von Synchronmaschinen in Energieversorgungsnetzen	141
4.4.3.3	Spannungsregelung von Synchronmaschinen	145
4.4.4	Verhalten von Synchronmaschinen bei einem dreipoligen Kurzschluss	147
4.4.4.1	Dreipoliger Klemmenkurzschluss bei einer verlustfreien, leerlaufenden Synchronmaschine mit Dauermagnetläufer	147
4.4.4.2	Dreipoliger Klemmenkurzschluss bei einer verlustfreien Vollpolmaschine mit Gleichstromerregung	150
4.4.4.3	Netzkurzschluss bei einer verlustbehafteten Vollpolmaschine mit Erreger- und Dämpferwicklung	157
4.5	Freileitungen	164
4.5.1	Aufbau von Freileitungen	164
4.5.1.1	Masten	164
4.5.1.2	Leiterseile	166
4.5.1.3	Erdseile	168
4.5.1.4	Isolatoren	169
4.5.2	Ersatzschaltbilder von Drehstromfreileitungen für den symmetrischen Betrieb	170
4.5.2.1	Induktivitätsbegriff bei Dreileitersystemen	171
4.5.2.2	Kapazitätsbegriff bei Dreileitersystemen	177
4.5.2.3	Ohmscher Widerstand bei Dreileitersystemen	183
4.5.2.4	Ableitungswiderstand bei Dreileitersystemen	184
4.5.3	Betriebsverhalten von symmetrisch aufgebauten Drehstromfreileitungen bei symmetrischem Betrieb	185
4.5.3.1	Natürlicher Betrieb	186
4.5.3.2	Übernatürlicher Betrieb	186
4.5.3.3	Unternatürlicher Betrieb	187
4.5.3.4	Betriebsverhalten verlustbehafteter Freileitungen	188
4.5.4	Transientes Verhalten von Freileitungen im symmetrischen Betrieb	189

4.6	Kabel	192
4.6.1	Aufbau von Kabeln	193
4.6.1.1	Kunststoffkabel	193
4.6.1.2	Massekabel	196
4.6.1.3	Ölkabel	197
4.6.1.4	Gaskabel	198
4.6.1.5	Zulässige Betriebsströme von Kabeln	199
4.6.1.6	Bezeichnungen von Normkabeln	200
4.6.1.7	Garnituren von Kabeln	201
4.6.2	Ersatzschaltbild und Betriebsverhalten von Drehstromkabeln	203
4.7	Lasten	206
4.7.1	Motorische Lasten	206
4.7.2	Mischlasten	207
4.7.3	Leistungsverhalten von Lasten im Netzbetrieb	208
4.8	Leistungskondensatoren	210
4.8.1	Aufbau von Leistungskondensatoren	210
4.8.2	Grundsätzliche Erläuterungen zur Blindleistungskompensation	211
4.8.3	Blindleistungskompensation bei Netzen mit parasitären Oberschwingungen	213
4.8.3.1	Modell eines Netzes mit Stromrichteranlagen	214
4.8.3.2	Auswertung des Ersatzschaltbilds	214
4.8.3.3	Netzurückwirkungen	216
4.9	Drosselspulen	218
4.10	Schalter	220
4.10.1	Eigenschaften idealer und realer Schalter	221
4.10.2	Aufbau und Wirkungsweise von Schaltern	222
4.10.2.1	Leistungsschalter	222
4.10.2.2	Trennschalter	225
4.10.2.3	Lastschalter	227
4.11	Schaltanlagen	228
4.11.1	Schaltungen von Schaltanlagen	228
4.11.2	Bauweise von Schaltanlagen	234
4.11.2.1	Konventionelle Freiluftschaltanlagen	234
4.11.2.2	Gasisolierte metallgekapselte Schaltanlagen	238
4.11.2.3	Konventionelle Zellenbauweise	243
4.11.3	Berücksichtigung von Schaltanlagen in Ersatzschaltbildern	246
4.11.4	Leittechnik in Schaltanlagen	246
4.12	Isolationskoordination und Schutz von Betriebsmitteln vor unzulässigen Überspannungen	249
4.12.1	Beanspruchungen von Betriebsmitteln durch verschiedene Überspannungsarten	249
4.12.1.1	Zeitweilige Überspannungen	249
4.12.1.2	Transiente Überspannungen	250

4.12.2	Festlegung des Isoliervermögens von Betriebsmitteln mithilfe von genormten Bemessungsspannungen	256
4.12.2.1	Durchschlagskennlinien von Spitze-Platte-Anordnungen	256
4.12.2.2	Kennzeichnung der Durchschlagskennlinien durch repräsentative Überspannungen	257
4.12.2.3	Festlegung von Isolationspegeln	259
4.12.2.4	Isoliervermögen weiterer Anordnungen	260
4.12.3	Überspannungsableiter und Blitzschutzeinrichtungen	261
4.12.3.1	Ventilableiter	262
4.12.3.2	Metalloxidableiter	265
4.12.3.3	Blitzschutzeinrichtungen	268
4.13	Schutz der Betriebsmittel vor unzulässigen Strombeanspruchungen	269
4.13.1	Sicherungen und I_s -Begrenzer	269
4.13.1.1	HH-Sicherungen	269
4.13.1.2	NH-Sicherungen	272
4.13.1.3	I_s -Begrenzer	274
4.13.2	Schutzsysteme für Betriebsmittel	274
4.13.2.1	Vergleichsprinzip	275
4.13.2.2	Überstromprinzip	276
4.13.2.3	Distanzprinzip	278
4.13.2.4	Weitere Netzschutz-Prinzipien	279
4.13.2.5	Technische Umsetzung der Schutzprinzipien	279
4.14	Aufgaben	280
5	Auslegung von Netzen im Normalbetrieb	290
5.1	Bemessungskriterien für Netzanlagen im Normalbetrieb	290
5.2	Einseitig gespeiste Leitung ohne Verzweigungen	291
5.3	Einseitig gespeiste Leitung mit Verzweigungen	296
5.4	Zweiseitig gespeiste Leitung	297
5.5	Vermaschtes Netz	301
5.6	Nachbildung von Teilnetzen	302
5.7	Lastflussberechnung in Energieversorgungsnetzen	304
5.7.1	Lastflussberechnung mithilfe der Stromsummen	304
5.7.1.1	Netze mit Stromeinprägungen	305
5.7.1.2	Netze mit einer eingepprägten Spannungsquelle und Lasten mit konstantem Strom	306
5.7.1.3	Netze mit einer eingepprägten Spannungsquelle und Lasten mit konstanter Wirk- und Blindleistung	307
5.7.1.4	Netze mit mehreren eingepprägten Spannungsquellen	307
5.7.1.5	Netze mit Kraftwerkseinspeisungen	308
5.7.2	Lastflussberechnung mithilfe der Leistungssummen	309
5.7.3	Lastflussberechnung in Netzen mit mehreren Spannungsebenen	312
5.8	Aufgaben	313

6	Dreipoliger Kurzschluss	316
6.1	Generatorferner dreipoliger Kurzschluss	317
6.1.1	Berechnung des Kurzschlussstromverlaufs in unverzweigten Netzen mit einer Netzeinspeisung	317
6.1.1.1	Berechnung des stationären Kurzschlusswechselstroms	317
6.1.1.2	Berechnung des Einschwingvorgangs	319
6.1.2	Berechnung der Kurzschlussströme in verzweigten Netzanlagen mit mehreren Netzeinspeisungen	322
6.1.2.1	Modellierung und Lösungsmethodik von verzweigten Netzanlagen	322
6.1.2.2	Berechnung der stationären Kurzschlussströme mit dem Verfahren der Ersatzspannungsquelle	324
6.1.2.3	Berechnung des Einschwingvorgangs bei dem Verfahren mit der Ersatzspannungsquelle	326
6.1.2.4	Veranschaulichung der Kurzschlussstromberechnung bei verzweigten Netzen an einem Beispiel	331
6.1.2.5	Einfluss der Netzkapazitäten und Mischlasten auf die Kurzschlussströme	335
6.2	Generatornahe Kurzschlüsse	337
6.2.1	Modell eines verlustlosen, mehrfach gespeisten Netzes mit einem generatornahen Kurzschluss	337
6.2.2	Berechnung des Anfangskurzschlusswechselstroms bei generatornahen Kurzschlüssen	341
6.2.3	Berechnung des Stoßkurzschlussstroms für generatornahe Fehler	344
6.2.4	Berechnung des Kurzschlussausschaltstroms	347
6.2.5	Berücksichtigung von Netzkapazitäten, Mischlasten und motorischen Verbrauchern bei generatornahen Kurzschlüssen	350
6.3	Aufgaben	352
7	Auslegung von Netzen gegen Kurzschlusswirkungen und Auslegung von Schaltern	356
7.1	Lichtbogenkurzschlüsse in Anlagen	356
7.2	Mechanische Kurzschlussfestigkeit	359
7.2.1	Auslegung von linienförmigen, biegesteifen Leitern	360
7.2.1.1	Berechnung der Stromkräfte	360
7.2.1.2	Dimensionierung der Leiterschienen	362
7.2.1.3	Stromkräfte bei gekrümmten und gekapselten Leiterschienen	364
7.2.2	Auslegung von Leiterschienen mit großen Querschnittsabmessungen	365
7.2.3	Auslegung von Stützern	368
7.2.4	Auslegung von Leiterseilen und Kabeln	369
7.3	Thermische Kurzschlussfestigkeit	369
7.3.1	Berechnung der Wärmebeanspruchung	369
7.3.2	Festlegung des zulässigen Kurzzeitstroms	371
7.4	Maßnahmen zur Beeinflussung der Kurzschlussleistung	374

7.5	Auswirkungen von Kurzschlüssen auf das transiente Generator-drehzahlverhalten	377
7.5.1	Wichtige Netzparameter zur Gewährleistung der transienten Stabilität	377
7.5.2	Drehzahlverhalten der Generatoren in einem kurzschlussbehafteten Netz mit mehrfacher Generatoreinspeisung	383
7.6	Auslegung von Schaltern	385
7.6.1	Einschwingspannungen nach einem Schalter-Klemmenkurzschluss in einphasigen Netzen	387
7.6.2	Bewertung der Einschwingspannungen	391
7.6.3	Abstandskurzschluss in einphasigen Netzen	393
7.6.4	Auslegung von Leistungsschaltern in Drehstromnetzen	396
7.6.5	Schaltvorgänge ohne Kurzschluss	397
7.7	Aufgaben	399
8	Grundzüge der Betriebsführung und Planung von Netzen	401
8.1	Betriebsführung von Netzen	401
8.1.1	Datenbasis zur Zustandsbeschreibung des Netzes	401
8.1.2	Rechnerführung durch den Bedienplatz Schaltleitung	403
8.1.3	Rechnerführung durch den Bedienplatz Lastverteilung	404
8.1.4	Rechnerführung im gestörten Netzbetrieb	406
8.2	Gesichtspunkte zur Planung von Netzen	407
8.2.1	Planung von Niederspannungsnetzen	407
8.2.2	Ausbauplanung von Mittelspannungsnetzen	410
8.2.3	Ausbauplanung von Hoch- und Höchstspannungsnetzen	411
8.3	Aufgaben	413
9	Berechnung von unsymmetrisch gespeisten Drehstromnetzen mit symmetrischem Aufbau	418
9.1	Methode der symmetrischen Komponenten	418
9.2	Anwendung der symmetrischen Komponenten auf unsymmetrisch betriebene Drehstromnetze	420
9.3	Impedanzen wichtiger Betriebsmittel im Mit- und Gegensystem der symmetrischen Komponenten	426
9.4	Impedanzen wichtiger Betriebsmittel im Nullsystem der symmetrischen Komponenten	428
9.4.1	Nullimpedanz einer Freileitung ohne Erdseil	429
9.4.1.1	Ohmscher Widerstand einer nullspannungsgespeisten Freileitung	429
9.4.1.2	Induktivität einer nullspannungsgespeisten Freileitung	432
9.4.1.3	Kapazitäten einer nullspannungsgespeisten Freileitung	433
9.4.2	Nullimpedanz einer Freileitung mit Erdseil	434
9.4.3	Nullimpedanz einer Doppelleitung	436
9.4.4	Nullimpedanz von Kabeln	437

9.4.5	Nullimpedanz von Transformatoren	439
9.4.5.1	Dreischenkeltransformatoren	440
9.4.5.2	Fünfschenkeltransformatoren	446
9.4.6	Nullimpedanz von Synchronmaschinen	447
9.5	Veranschaulichung des Berechnungsverfahrens an einem Beispiel	447
9.6	Aufgaben	452
10	Berechnung von Drehstromnetzen mit symmetrischen Betriebsmitteln und punktuellen unsymmetrischen Fehlern	453
10.1	Beschreibung häufiger unsymmetrischer Fehler	453
10.2	Erläuterung des Berechnungsverfahrens	454
10.3	Anwendung des Berechnungsverfahrens auf verschiedene Fehlerarten	459
10.3.1	Erdschluss mit Übergangswiderstand	459
10.3.2	Zweipoliger Kurzschluss mit und ohne Erdberührung	461
10.3.2.1	Zweipoliger Kurzschluss ohne Übergangswiderstände	461
10.3.2.2	Zweipoliger Kurzschluss mit Übergangswiderständen	463
10.3.3	Einpolige Leiterunterbrechung	466
10.3.4	Unsymmetrische Mehrfachfehler	468
10.4	Ausgleichsvorgänge bei unsymmetrischen Fehlern	471
10.4.1	Transiente Komponentenersatzschaltbilder für unsymmetrische generatorferne Fehler	471
10.4.2	Transiente Komponentenersatzschaltbilder für unsymmetrische generatornahe Fehler	475
10.4.3	Numerische Auswertung der transienten Komponentenersatzschaltbilder	476
10.4.4	Näherungsverfahren zur Bestimmung des Stoßkurzschlussstroms bei ein- und zweipoligen Kurzschlüssen	478
10.5	Aufgaben	478
11	Sternpunktbehandlung in Energieversorgungsnetzen	481
11.1	Einfluss der Sternpunktbehandlung auf das stationäre Netzverhalten bei einpoligen Erdschlüssen	481
11.1.1	Netze mit isolierten Sternpunkten	481
11.1.2	Netze mit Erdschlusskompensation	485
11.1.3	Netze mit niederohmiger Sternpunkterdung	491
11.2	Einfluss der Sternpunktbehandlung auf das transiente Netzverhalten bei einpoligen Erdschlüssen	495
11.2.1	Transiente Überspannungen durch Dauererdschlüsse	495
11.2.2	Erdschlüsse mit selbstständig löschendem Lichtbogen	498
11.3	Einfluss der Sternpunktbehandlung auf Ferroresonanzerscheinungen	501
11.3.1	Erläuterung des Ferroresonanzeffekts	501
11.3.2	Ferroresonanzgefährdete Anlagenkonfigurationen	505
11.4	Aufgaben	510

12 Wichtige Maßnahmen zum Schutz von Menschen und Tieren	514
12.1 Berührungsschutz in Netzen mit Nennspannungen über 1 kV	514
12.1.1 Zulässige Körperströme und Berührungsspannungen	514
12.1.2 Direkter und indirekter Berührungsschutz	516
12.2 Berührungsspannungen bei Erdern	518
12.3 Berechnung von Erdungsspannungen bei unsymmetrischen Fehlern	521
12.4 Wichtige Auslegungskriterien für Erdungsanlagen	527
12.4.1 Auslegungskriterien für Netze mit isolierten Sternpunkten oder mit Erdschlusskompensation	527
12.4.2 Auslegungskriterien für Netze mit niederohmiger Sternpunkt- erdung	528
12.5 Indirekter Berührungsschutz in Niederspannungsnetzen	528
12.6 Aufgaben	532
13 Investitionsrechnung und Wirtschaftlichkeitsberechnung für Netzanlagen	536
13.1 Struktur der Kosten	536
13.1.1 Kostenarten	536
13.1.1.1 Kapitalkosten	536
13.1.1.2 Betriebskosten	538
13.1.1.3 Sonstige Kosten	540
13.1.2 Fixe und variable Kosten	540
13.1.3 Einzel- und Gemeinkosten	540
13.2 Gestaltung der Strompreise	542
13.2.1 Grundstruktur der Stromverträge	543
13.2.2 Stromverträge mit Niederspannungskunden	544
13.2.3 Stromverträge mit Mittelspannungskunden	545
13.2.4 Stromverträge mit Großkunden	545
13.2.5 Stromverträge zwischen EVU	546
13.3 Aufbereitung der Lastverläufe	548
13.4 Investitionsrechnung für Netzanlagen	549
13.4.1 Kostenvergleich	550
13.4.1.1 Zulässigkeit eines Kostenvergleichs	550
13.4.1.2 Statischer Kostenvergleich für die Ersatzinvestition eines Umspanners	551
13.4.1.3 Dynamischer Kostenvergleich für die Ersatzinvestition eines Umspanners	553
13.4.1.4 Kostenvergleich bei einer Rationalisierungsinvestition	554
13.4.2 Methoden zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit	555
13.4.2.1 Kapitalwertmethode	555
13.4.2.2 Methode des internen Zinsfußes	556
13.4.2.3 Annuitätenmethode	557
13.4.2.4 Dynamische Amortisationsdauer	557
13.4.3 Investitionsentscheidung	558
13.5 Aufgaben	558

Lösungen	560
Anhang	613
Quellenverzeichnis	620
Verzeichnis der zitierten VDE-Bestimmungen	620
Literaturverzeichnis	622
Sachwortverzeichnis	629