

Inhaltsverzeichnis

1	Elektrische Energieversorgungsnetze	1
1.1	Aufgabe elektrischer Energieversorgungsnetze	1
1.2	Öffentliche Energieversorgungsnetze	2
1.2.1	Höchstspannungsebene	3
1.2.2	Hochspannungsebene	8
1.2.3	Mittelspannungsebene	9
1.2.4	Niederspannungsebene	10
1.3	Nichtöffentliche Energieversorgungsnetze	11
1.3.1	Industriernetze	11
1.3.2	Bahnstromnetz	12
1.3.3	Offshore-Windparks und Netzanbindung	13
1.4	Innovative und zukünftige Netze	16
1.4.1	Smart Grids	16
1.4.2	Overlaynetze	17
1.4.3	Weltstromnetz	19
1.5	Zeitbereiche der Netzbetriebsführung und der Netzplanung	21
1.6	Netzbetriebsführung	22
1.6.1	Aufgabe der Netzbetriebsführung	22
1.6.2	Überwachung der Netzsicherheit	23
1.6.3	Definition des Systemzustands	24
1.6.3.1	Netzzustand	24
1.6.3.2	Smart Grid Ampelkonzept	26
1.7	Netzplanung	27
1.8	Netzzustandsbewertung	30
1.8.1	Bewertungskriterien	30
1.8.1.1	Einhaltung der Wirkleistungsbilanz	30
1.8.1.2	Einhaltung von Spannungsgrenzen	30
1.8.1.3	Einhaltung von Stromgrenzen	31

1.8.1.4	Einhaltung von Grenzwerten der Parallelschaltgeräte	32
1.8.1.5	Einhaltung der maximalen Einspeiseleistung an einer Sammelschiene	33
1.8.2	Simulation von Ausfällen	33
1.8.2.1	Betriebsmittelausfälle	35
1.8.2.1.1	Das $(N - 1)$ -Kriterium	35
1.8.2.1.2	Unabhängige Mehrfachfehler und Common-Mode-Fehler	37
1.8.2.1.3	Beurteilungskriterien bei Sammelschienenfehlern	38
1.8.2.2	Einspeisungs- oder Laständerungen	38
1.8.2.3	Probabilistische Zuverlässigkeit	39
1.8.3	Simulation von Kurzschlüssen	41
1.8.4	Bestimmung der transienten Stabilität	44
1.8.5	Maßnahmen zur Einhaltung der Bewertungskriterien	45
1.9	Netzmodelle, Rechnertechnik, Netzberechnungsverfahren	46
1.9.1	Netzberechnung	46
1.9.2	Netzmodelle und Netzberechnung mit einfachen Hilfsmitteln	46
1.9.3	Entwicklung der Rechnertechnik	48
1.9.4	Netzberechnungsverfahren	52
	Literatur	56
2	Berechnung elektrischer Energieversorgungsnetze	61
2.1	Mathematisches Modell des Netzes	61
2.1.1	Begriffsbestimmungen	61
2.1.1.1	Spannung	61
2.1.1.2	Strom	62
2.1.1.3	Leistung	62
2.1.1.4	Widerstand	62
2.1.2	Vereinbarungen	63
2.1.3	Elementare Netzumwandlungen	66
2.1.4	Modellabgrenzung	71
2.1.5	Knotenelemente	73
2.1.5.1	Sammelschienen	73
2.1.5.2	Lasten	78
2.1.5.3	Einspeisungen	81
2.1.5.3.1	Einspeisungen mit konstanter Leistung	81
2.1.5.3.2	Einspeisungen mit variabler Leistung	82
2.1.5.4	Querkompensationseinrichtungen	84

2.1.6	Zweigelemente	85
2.1.6.1	Bezeichnung und Kenndaten	85
2.1.6.2	Leitungen	85
2.1.6.2.1	Freileitungen	85
2.1.6.2.2	Kabel	86
2.1.6.2.3	Topologievarianten von Leitungen	87
2.1.6.3	Transformatoren	88
2.1.6.3.1	Transformatoren mit festem Übersetzungsverhältnis	89
2.1.6.3.2	Transformatoren mit stellbarem Übersetzungsverhältnis	92
2.1.6.3.3	Parallelschaltung von Transformatoren	98
2.1.6.3.4	Dreiwicklungstransformatoren	99
2.1.6.4	Serienkompensationselemente	102
2.1.6.5	Sammelschienenkupplungen	104
2.1.6.6	Ersatzweige	105
2.1.7	Netzformen	105
2.1.7.1	Strahlennetze	106
2.1.7.2	Ringnetze	108
2.1.7.3	Maschennetze	109
2.2	Grundbegriffe und wichtige Regeln zur Matrizenrechnung	110
2.2.1	Definitionen	110
2.2.2	Rechenregeln für Vektoren und Matrizen	118
2.2.3	Falk'sches Schema	120
2.2.4	Lösbarkeit linearer Gleichungssysteme	121
2.3	Lösung linearer und nichtlinearer Gleichungssysteme	122
2.3.1	Einführung	122
2.3.2	Netzwerkanalyse	123
2.3.3	Direkte Verfahren zur Lösung linearer Gleichungssysteme	125
2.3.3.1	Gauß'scher Algorithmus zur Lösung linearer Gleichungssysteme	126
2.3.3.2	Dreiecksfaktorisierung nach Banachiewicz	129
2.3.3.3	Symmetrische Dreieckszerlegung nach Cholesky	132
2.3.3.4	Gauß-Jordan-Eliminationsverfahren	133
2.3.3.5	Bi-Faktorisierung	134
2.3.3.5.1	Aufbau des Gleichungssystems	134
2.3.3.5.2	Faktorisierung	135
2.3.3.5.3	Berechnung des Lösungsvektors	135

	2.3.3.5.4	Bestimmung der vollständigen Inversen	135
	2.3.3.5.5	Berechnung der spärlichen Inversen	136
2.3.4		Iterative Verfahren zur Lösung linearer Gleichungssysteme	137
	2.3.4.1	Jacobi-Verfahren	137
	2.3.4.2	Gauß-Seidel-Verfahren	139
2.3.5		Woodbury-Formel zur Lösung einer modifizierten Koeffizientenmatrix	139
2.3.6		Newton-Verfahren für nichtlineare Gleichungssysteme	143
2.4		Anforderungen an Verfahren zur Berechnung von Energieversorgungssystemen	145
	2.4.1	Rechenzeitanforderungen	145
	2.4.2	Eigenschaften der zu lösenden Gleichungssysteme	146
	2.4.2.1	Eigenschaften der Admittanzmatrix	146
	2.4.2.1.1	Besetzungsstruktur	146
	2.4.2.1.2	Knotengrad	152
	2.4.2.2	Beispiele realer Netztopologien	153
	2.4.2.3	Topologische Interpretation der Gauß'schen Elimination	155
	2.4.2.4	Abspeichern von schwach besetzten Matrizen	158
	2.4.2.5	Komprimierte Zeilenspeicherung für symmetrische Matrizen	162
	2.4.2.6	Gauß'sche Elimination einer gedrängt gespeicherten Matrix	165
	2.4.3	Optimale Eliminationsreihenfolge	167
	2.4.3.1	Problemstellung	167
	2.4.3.2	Verfahren zur Bestimmung einer günstigen Eliminationsreihenfolge	172
	2.4.3.3	Beispiele für eine quasioptimale Eliminationsreihenfolge	175
	2.4.3.4	Band- und Blockmatrizen	177
	2.4.4	Hinweise für eine effiziente Realisierung von Netzberechnungsverfahren	182
2.5		Netzberechnung mit bezogenen Größen	184
		Literatur	185
3		Leistungsflussberechnung	187
	3.1	Aufgabenstellung	187
	3.2	Lineares Leistungsflussproblem	188

3.3	Nichtlineares Leistungsflussproblem	191
3.3.1	Aufteilung der komplexen Systemgleichung in zwei reelle Gleichungssysteme	193
3.3.2	Aufstellen des linearisierten Gleichungssystems nach Newton-Raphson	194
3.3.3	Berechnung der Elemente der Jacobi-Matrix	197
3.3.4	Behandlung besonderer Knoten	200
3.3.5	Ablauf der Leistungsflussrechnung	203
3.3.6	Berechnung der Leistungsflüsse auf den Zweigen und der Netzverluste	204
3.3.7	Simulation von Ausfallvarianten und Lastganglinien	208
3.3.7.1	Ausfallvarianten	208
3.3.7.2	Lastganglinie.	210
3.3.8	Nachbildung von Regeleigenschaften	210
3.3.8.1	Allgemeines	210
3.3.8.2	Automatische Stufung von Transformatoren	211
3.3.8.2.1	Regelung des Spannungsbetrages.	211
3.3.8.2.2	Regelung des Wirkleistungsflusses über den Transformator.	215
3.3.8.3	Wirkleistungsregelung	219
3.3.8.3.1	Regelvorgänge in elektrischen Energieversorgungssystemen	219
3.3.8.3.2	Leistungsbilanzierung bei der Leistungsflussrechnung.	222
3.3.8.3.3	Nachbildung der Primärregelung	223
3.3.8.3.4	Nachbildung der Sekundärregelung	226
3.3.8.3.5	Erweiterung des Leistungsflussverfahrens.	228
3.3.8.3.6	Ausfallsimulationsrechnung	235
3.3.8.4	Überwachung und Einhaltung von Blindleistungsgrenzen von Generatoren.	236
3.3.8.5	Beherrschung von Teilnetzbildungen und Bilanzierung der Teilnetze	236
3.3.9	Nachbildung von FACTS	237
3.3.10	Leistungsflussberechnung in hybriden Drehstrom-Gleichstrom-Systemen	242
3.3.10.1	Hybride Drehstrom-Gleichstrom-Systeme	242
3.3.10.2	Stationäres Modell der Konverterstationen.	243
3.3.10.3	Punkt-zu-Punkt-Gleichstromübertragungen	244
3.3.10.3.1	Systemdarstellung.	244
3.3.10.3.2	Regelungsmodi	244

	3.3.10.3.3	Gleichungssystem	245
	3.3.10.3.4	Ableitungen	246
	3.3.10.4	Multi-Terminal-Übertragungen und Gleichstromnetze	248
	3.3.10.4.1	Systemdarstellung	248
	3.3.10.4.2	Regelungsmodi	249
	3.3.10.4.3	Gleichstromnetz	249
	3.3.10.4.4	Gleichungssystem	249
	3.3.10.4.5	Ableitungen	250
	3.3.11	Dreiphasiger Leistungsfluss	251
	3.3.12	Eigenschaften des Newton-Raphson-Verfahrens	255
	3.3.12.1	Konvergenzeigenschaften des Newton-Raphson-Verfahrens	255
	3.3.12.2	Konvergenzprobleme und Modellierungsgrenzen beim Newton-Raphson-Verfahren	257
	3.3.13	Analyse von Leistungsflussergebnissen	259
3.4		Sensitivitätsanalyse des Leistungsflusses	261
	3.4.1	Aufgabe der Sensitivitätsanalyse	261
	3.4.2	Grundlagen der Sensitivitätsrechnung	262
	3.4.3	Sensitivitätsanalyse in elektrischen Netzen	264
	3.4.4	Rechentechnische Vorgehensweise	266
3.5		Schnelle, entkoppelte Leistungsflussrechnung	267
	3.5.1	Begründung	267
	3.5.2	Vereinfachende Annahmen	267
	3.5.3	Koeffizienten der Funktionalmatrix	270
	3.5.4	Beseitigung der Knotenspannungsabhängigkeit	272
	3.5.5	Ablauf des Iterationsverfahrens	275
3.6		Genäherte Leistungsflussberechnungsverfahren	279
	3.6.1	Anwendung genäherter Leistungsflussberechnungsverfahren	279
	3.6.2	Genäherte Wirkleistungsflussberechnung	281
	3.6.3	Stromiterationsverfahren	282
	3.6.4	Maximalflussalgorithmus	284
	3.6.4.1	Allgemeine Eigenschaften des Verfahrens	284
	3.6.4.2	Grundfall- und Variantenberechnung mit dem Maximalflussverfahren	287
	3.6.4.3	Prinzip der Leistungsverteilung mit dem Maximalflussverfahren	287
	3.6.4.4	Leistungsverteilung bei Last- oder Topologievarianten	291
	3.6.4.5	Erweiterung des Maximalflussalgorithmus'	292
	3.6.5	Verbindungskontrolle	293

3.7	Leistungsflussberechnung in Gleichstromnetzen	295
3.8	Leistungsflussverfahren für einfache Netzstrukturen und für lange Leitungen	298
3.8.1	Berechnung besonderer Netzstrukturen	298
3.8.2	Berechnung langer Hochspannungsleitungen	298
3.8.2.1	Vollständige Leitungsgleichungen	298
3.8.2.2	Leitungsgleichungen für verlustlose Leitungen	301
3.8.3	Berechnung von Drehstromleitungen mit Ersatzschaltbildern	302
3.8.3.1	Das exakte Π -Ersatzschaltbild	302
3.8.3.2	Vereinfachtes Ersatzschaltbild	304
3.8.3.3	Ersatzschaltbilder für verschiedene Spannungsebenen	306
3.8.4	Berechnung in Mittel- und Niederspannungsnetzen	307
3.8.5	Vereinfachte Berechnungen in Niederspannungsnetzen	314
3.8.5.1	Variante I: Einseitig gespeiste Leitung	315
3.8.5.2	Variante II: Zweiseitig gespeiste Leitung	319
3.8.6	Berechnung bei unsymmetrischer Belastung	323
	Literatur	325
4	Netzzustandserkennung	329
4.1	Theorie der Netzzustandserkennung	329
4.1.1	Aufgabenstellung	329
4.1.1.1	Messung aller Knotenleistungen und eines Spannungsbetrages	330
4.1.1.2	Messung aller Zustandsvariablen	331
4.1.1.3	Messung einer Vielzahl verschiedener Größen im Netz	331
4.1.2	Messabweichung	332
4.1.3	Messunsicherheit	335
4.1.4	Modell der State Estimation	335
4.1.5	Voraussetzungen der State Estimation	338
4.1.6	Lineare State Estimation	339
4.1.7	Nichtlineare State Estimation	345
4.1.8	Statistische Eigenschaften der Verfahrensgrößen	347
4.2	Anwendung der State Estimation auf elektrische Energieversorgungsnetze	349
4.2.1	Aufstellen und Lösen des Gleichungssystems	350
4.2.1.1	Schritt 1: Aufstellen des nichtlinearen Gleichungssystems der wahren Werte	350
4.2.1.2	Schritt 2: Linearisierung des Ausgangsgleichungssystems und Aufstellen der Jacobi-Matrix	352

4.2.1.3	Schritt 3: Berechnung der Matrizenprodukte im Gleichungssystem zur Berechnung des Schätzvektors	355
4.2.1.4	Schritt 4: Iterative Lösung des Gleichungssystems	356
4.2.2	Rechentechische Behandlung des zu lösenden Gleichungssystems.	357
4.2.3	Pseudomessungen	363
4.2.3.1	Pseudomessung als Messung mit hoher Genauigkeit	365
4.2.3.2	Pseudomessung als Gleichheitsnebenbedingung	366
4.2.4	Ersatzmesswerte.	366
4.2.5	Rechenzeitverkürzende Maßnahmen	368
4.3	Behandlung grob falscher Informationen	368
4.3.1	Entdeckung grob falscher Informationen.	369
4.3.2	Identifizierung und Lokalisierung grob falscher Informationen	371
4.3.3	Eliminierung oder Korrektur grob falscher Informationen	373
4.4	Beobachtbarkeit des Netzes	373
4.5	Simulation State Estimation.	377
4.5.1	Simulation der Messwerte	378
4.5.2	Statistische Kennwerte zur Beurteilung der Estimationsergebnisse	379
4.5.2.1	Globale Beurteilung der Estimationsergebnisse	380
4.5.2.2	Beurteilung der Zweigflüsse	381
4.5.2.3	Beurteilung der Spannungen.	382
4.5.2.4	Beurteilung der Einspeisungen und Lasten.	382
4.5.2.5	Beurteilung aller Messungen	383
4.5.2.6	Mittelwertbildung über mehrere Simulationsrechnungen und repräsentativer Fall	383
4.6	Estimation in Mittel- und Niederspannungsnetzen	384
4.6.1	Ausweitung der Messinformationen	385
4.6.2	Modifizierte Estimationsverfahren.	386
	Literatur.	388
5	Berechnung von Fehlern in elektrischen Anlagen	391
5.1	Fehlerfälle	391
5.2	Kurzschlussberechnung	398
5.3	Symmetrische Fehler	399
5.3.1	Dreipoliger Kurzschluss.	399
5.3.1.1	Generatorferner Kurzschluss.	399
5.3.1.2	Generatornaher Kurzschluss	405

5.3.2	Kurzschlussstromberechnung nach DIN VDE 0102	407
5.3.3	Impedanzkorrekturfaktoren	411
5.3.3.1	Impedanzkorrekturfaktoren für Transformatoren	411
5.3.3.2	Impedanzkorrekturfaktoren für Generatoren	412
5.3.3.3	Impedanzkorrekturfaktoren für Kraftwerksblöcke	412
5.3.4	Berechnung des Anfangskurzschlusswechselstroms	413
5.3.5	Überlagerungsverfahren.	416
5.3.5.1	Erstes Teilsystem des Überlagerungsverfahrens	417
5.3.5.2	Zweites Teilsystem des Überlagerungsverfahrens	417
5.3.5.3	Anwendung des Überlagerungsverfahrens auf ein Fünf-Knoten-Netz.	419
5.3.6	Nachbildung parallel geschalteter Transformatoren	421
5.3.7	Weitere Kenngrößen der Kurzschlussstromberechnung	421
5.3.7.1	Stoßkurzschlussstrom	422
5.3.7.2	Ausschaltwechselstrom.	424
5.3.7.3	Dauerkurzschlussstrom.	428
5.3.8	Takahashi-Verfahren	429
5.4	Unsymmetrische Fehler	435
5.4.1	Unsymmetrische Netzzustände	435
5.4.2	Theorie der Transformation in symmetrische Komponenten.	437
5.4.2.1	Grundlagen der Komponentenerlegung	437
5.4.2.2	Symmetrische Komponenten	438
5.4.2.2.1	Ableitung der Komponentenersatzschaltungen	438
5.4.2.2.2	Transformationsvorschriften.	441
5.4.2.2.3	Impedanzen im Null-, Mit- und Gegensystem	443
5.4.2.2.4	Bestimmung der Null-, Mit- und Gegenimpedanzen durch Messung	446
5.4.3	Komponentendarstellung von Netzelementen	448
5.4.3.1	Freileitungen	448
5.4.3.2	Kabel.	451
5.4.3.3	Transformatoren	452
5.4.3.3.1	Yy0-Schaltung mit beidseitig starr geerdetem Sternpunkt.	454
5.4.3.3.2	Yy0-Schaltung mit einem starr geerdeten Sternpunkt	456

	5.4.3.3.3	Yz5-Schaltung mit einem starr geerdeten Sternpunkt	457
	5.4.3.3.4	Yd5-Schaltung mit starr geerdetem Sternpunkt	458
	5.4.3.3.5	Transformator mit Sternpunkterdung über Impedanz.	458
	5.4.3.4	Generatoren.	461
	5.4.3.5	Ersatznetze	462
5.4.4		Berechnung unsymmetrischer Fehlerfälle	464
	5.4.4.1	Rechenmodell zur Behandlung unsymmetrischer Fehlerfälle.	464
	5.4.4.2	Sternpunktbehandlung von Netzen	465
	5.4.4.2.1	Netze mit isoliertem Sternpunkt	466
	5.4.4.2.2	Netze mit induktiver Sternpunkterdung	469
	5.4.4.2.3	Netze mit niederohmiger Sternpunkterdung	471
	5.4.4.3	Unsymmetrische Kurzschlüsse	472
	5.4.4.3.1	Zweipoliger Kurzschluss ohne Erdberührung	473
	5.4.4.3.2	Zweipoliger Kurzschluss mit Erdberührung	477
	5.4.4.3.3	Einpoliger Erdschluss bzw. Erdkurzschluss	480
	5.4.4.4	Leiterunterbrechungen	483
	5.4.4.4.1	Modellierung von Leiterunterbrechungen	483
	5.4.4.4.2	Einpolige Unterbrechung	486
	5.4.4.4.3	Zweipolige Unterbrechung	489
	5.4.4.5	Berücksichtigung von Impedanzen an der Fehlerstelle	491
	5.4.4.5.1	Einpoliger Kurzschluss mit Impedanz an der Fehlerstelle	491
	5.4.4.5.2	Zweipoliger Kurzschluss mit Impedanz an der Fehlerstelle	493
5.5		Berechnung symmetrischer Fehlerfälle mit symmetrischen Komponenten	494
5.6		Kurzschlussstromberechnung mit dem %/MVA-System.	496
		Literatur.	496

6	Bestimmung der transienten Stabilität	499
6.1	Stabiler Netzbetrieb	499
6.2	Transiente Stabilität	500
6.3	Ersatzkriterium zur Bewertung der transienten Stabilität	503
	Literatur.	508
7	Ersatzdarstellung nicht überwachter Nachbarnetze	509
7.1	Aufgabe von Ersatznetzen	509
7.2	Ersatznetz für Leistungsflussberechnungen	511
7.2.1	Anforderungen an die Ersatznetzdarstellung	511
7.2.2	Darstellung des aktiven und passiven Verhaltens.	513
7.3	Ward-Modell	514
7.3.1	Beschreibung des Verfahrens nach Ward	514
7.3.2	Größe der Längsimpedanzen der Ersatzzweige	519
7.3.3	Bestimmung der inneren Transferimpedanz	521
7.3.4	Datenbasis zur Ersatznetzberechnung	522
7.3.5	Fehler des Ersatznetzmodells bei Ausfallsimulationsrechnungen.	523
7.3.6	Erweiterungen des Modells	524
7.3.6.1	Im Fremdnetz verbleibende Knoten	524
7.3.6.2	Ersatznetzmodell zur verbesserten Darstellung des Blindleistungsverhaltens	525
7.3.7	Darstellung des Regelverhaltens der Primärregler im Nachbarnetz	530
7.3.7.1	Simulation von Kraftwerksausfällen.	530
7.3.7.2	Berechnung von Ersatzleistungszahlen an den Kuppelknoten	530
7.3.8	Gesamtersatznetz für Leistungsflussberechnungen	532
7.4	Ersatznetz für Kurzschlussrechnungen	532
7.5	REI-Modell	535
	Literatur.	539
8	Optimierung und Korrektur des Netzzustandes	541
8.1	Überblick	541
8.2	Korrektives Schalten	542
8.2.1	Aufgabenstellung	542
8.2.2	Verfahren zum korrektiven Schalten	545
8.3	Optimal Power Flow	545
8.4	Blindleistungs-Spannungsoptimierung	550
8.4.1	Aufgabenstellung der Blindleistungs-Spannungsoptimierung	550

8.4.2	Steuermöglichkeiten für Blindleistungen	551
8.4.2.1	Generatoren	551
8.4.2.2	Netzkuppltransformatoren	552
8.4.2.3	Kompensationseinrichtungen	552
8.4.2.4	Zusammenfassung der Steuermöglichkeiten	552
8.4.3	Formulierung und Auswahl der Zielfunktion	553
8.4.4	Mathematische Formulierung des Optimierungsproblems	555
8.4.5	Mögliche Lösungsverfahren für die Blindleistungs-Spannungsoptimierung	556
8.4.6	Blindleistungs-Spannungsoptimierung mit Quadratischer Programmierung	557
8.4.6.1	Optimierungsmodell der Quadratischen Programmierung	557
8.4.6.2	Entwicklung der Zielfunktion	558
8.4.6.2.1	Darstellung der Zielfunktion	558
8.4.6.2.2	Ableitungen der Verlustleistung	560
8.4.6.2.3	Ableitungen der Vierpolparameter	562
8.4.6.2.4	Bestimmung der Verlustleistungsänderung	563
8.4.6.3	Formulierungen von Nebenbedingungen	566
8.4.6.3.1	Nebenbedingungen	566
8.4.6.3.2	Spannungsnebenbedingungen	566
8.4.6.3.3	Blindleistungsnebenbedingungen	567
8.4.6.3.4	Stromnebenbedingungen	567
8.4.6.3.5	Transformation auf die Normalform	569
8.5	Netzengpassmanagementverfahren	571
8.5.1	Aufgabenstellung	571
8.5.2	Mathematische Modellbildung für ein engpassfreies Netz	572
8.5.2.1	Restriktionen mit Rampenfunktion	573
8.5.2.2	Restriktionen mit Sprungfunktion	575
8.5.2.3	Zielfunktion für ein engpassfreies Netz	576
8.5.3	Netzbezogene Maßnahmen	576
8.5.3.1	Beschreibung der netzbezogenen Maßnahmen zur Engpassbeseitigung	576
8.5.3.2	Beschreibung der Ausbaumaßnahmen als potenzielle Topologie	577
8.5.3.3	Modellierung der netzbezogenen Maßnahmen und der Ausbaumaßnahmen	577
8.5.3.3.1	Kontinuierliche Entscheidungsvariablen	577

	8.5.3.3.2	Diskrete Entscheidungsvariablen	578
	8.5.3.3.3	Bewertung der netzbezogenen Maßnahmen und der Ausbaumaßnahmen	580
	8.5.4	Marktbezogene Maßnahmen	582
	8.5.5	Formulierung des Engpassmanagements als gestufte Optimierungsaufgabe	583
	8.5.6	Grundlagen des Optimierungsverfahrens	583
8.6		Probabilistische Leistungsflussrechnung	587
	8.6.1	Aufgabenstellung	587
	8.6.2	Probabilistische Leistungsflussrechnung mit Monte-Carlo-Simulation	588
	8.6.3	Weitere Verfahren der probabilistischen Leistungsflussrechnung	589
		Literatur	590
9		Bestimmung der Übertragungskapazität	593
	9.1	Kopplung von Übertragungsnetzen	593
	9.2	Kenngrößen zur Übertragungskapazität	594
	9.3	Berechnung der Übertragungskapazität	597
	9.3.1	Zeithorizonte	597
	9.3.2	Berechnungsalgorithmus	598
	9.3.2.1	Entso-E-Methode	598
	9.3.2.2	Berechnung der möglichen zusätzlichen Erzeugerwirkleistung	601
	9.3.2.3	Methode der proportionalen Wirkleistungsauslastung der Erzeuger	602
	9.3.2.4	Methode der proportionalen Wirkleistungsreserve der Erzeuger	603
	9.3.2.5	Methode der Prioritätsvergabe	604
		Literatur	605
10		Expertensysteme	607
	10.1	Einsatz von Expertensystemen	607
	10.2	Expertensysteme in der Energieversorgung	609
	10.3	Architektur eines Expertensystemen	611
	10.4	Arten von Wissen	614
	10.5	Wissensverarbeitung in Expertensystemen	615
	10.5.1	Wissensspeicherung	615
	10.5.2	Wissensverarbeitung	620
	10.5.3	Konfidenzfaktor	622

10.6	Beispiel eines Expertensystems zur Netzzustandskorrektur	624
10.6.1	Aufgabestellung	624
10.6.2	Auswahl topologisch geeigneter Maßnahmen	625
	Literatur	629
11	Datenmodelle und Testnetze	631
11.1	Einführung	631
11.2	Datenmodelle für Offline-Planungsrechnungen	632
11.2.1	Anforderungen an das Datenmodell	632
11.2.1.1	Datenumfang	632
11.2.1.2	Datenorganisation	632
11.2.1.3	Variantenhaltung	634
11.2.1.4	Datentausch	634
11.2.1.5	Eigenschaften	634
11.2.1.6	Verwaltung von Netzen	635
11.2.2	Dateibasierte Datenformate	635
11.2.3	Datenbankbasierte Datenformate	636
11.2.3.1	Datenbanken	636
11.2.3.1.1	Aufgaben von Datenbanken und Datenbank-Management-Systemen . . .	636
11.2.3.1.2	Datensichten	637
11.2.3.1.3	Aufbau relationaler Datenbanken	637
11.2.3.2	Datenbankformate	638
11.2.3.2.1	MS Access	638
11.2.3.2.2	Common Information Model	638
11.2.3.2.3	Common Grid Model Exchange Standard	639
11.3	Datenmodelle in Online-Leitsystemen	639
11.4	Testdatensätze	640
	Literatur	652
12	Netzberechnungsprogramme	655
	Stichwortverzeichnis	659