

**Berechnung  
elektrischer Verbundnetze**

# Berechnung elektrischer Verbundnetze

Mathematische Grundlagen  
und technische Anwendungen

Von

**Dr.-Ing. Hans Edelman**

Privatdozent an der Technischen Hochschule in Darmstadt  
und Mitarbeiter der Siemens-Schuckert-Werke AG,  
Erlangen

Mit 79 Abbildungen



**Springer-Verlag**  
Berlin / Göttingen / Heidelberg  
1963

ISBN 978-3-642-47403-3

ISBN 978-3-642-47401-9 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-642-47401-9

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten

Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es auch nicht gestattet,

dieses Buch oder Teile daraus auf photomechanischem Wege

(Photokopie, Mikrokopie) oder auf andere Art zu vervielfältigen

© by Springer-Verlag OHG., Berlin/Göttingen/Heidelberg 1963

**Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1963**

Library of Congress Catalog Card Number 63-18348

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buche berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften

**Dem Andenken meiner Mutter gewidmet**

## Vorwort

Während in den letzten Jahren auf dem Gebiet der *elektrischen Nachrichtentechnik* zahlreiche Bücher über *Netzwerktheorie* (insbesondere auch über Netzwerksynthese) erschienen sind, ist es meines Wissens bisher noch nicht unternommen worden, eine moderne Darstellung des gegenwärtigen Standes der *Netzwerktheorie der Energieübertragungstechnik* zu geben. Das vorliegende Buch soll diesem Mangel abhelfen. Durch das Aufkommen und die fortschreitende *Verbesserung der Netzmodelle* wie auch durch das *Aufkommen der elektronischen Rechenautomaten* ist die Theorie der Verbundnetze erheblich gefördert worden. Zwar ist vieles auf diesem Gebiet noch im Fluß, insbesondere in den Anwendungen. Seit Jahren sind die USA auf diesem Gebiet führend. Fast jedes Heft der Trans. A. I. E. E. part III (jetzt I. E. E. E.), Power Apparatus and Systems, enthält mehrere Arbeiten, doch sind in den letzten Jahren auch aus europäischen Ländern wertvolle Beiträge geliefert worden.

In früheren Jahren galt die Beschäftigung mit der „*Berechnung elektrischer Verbundnetze*“ als eine Angelegenheit für wenige Spezialisten, zumal die Berechnung auf Tischrechenmaschinen im allgemeinen hoffnungslos langwierig und somit auch kostspielig war. Dies wurde schlagartig mit dem Aufkommen der elektronischen programmgesteuerten Rechenmaschinen anders. Eine entsprechende Unterweisung für Ingenieure und Mathematiker war dringend notwendig. Bereits 1955 im kleinen Kreise und 1956 im größeren Kreise hielt der Verfasser im Hinblick auf die kommende Entwicklung *Vortragsreihen vor Ingenieuren der Siemens-Schuckertwerke*, um hauptsächlich die Anwendungen der *Matrizenrechnung in der Netzwerktheorie* bekannt zu machen. Damals lag allerdings das Schwergewicht noch mehr auf der *analogen Behandlung der Netzfragen auf einem Netzmodell*. Insbesondere wurde in dieser Zeit der Behandlung von Unsymmetrieproblemen durch die Methode der *symmetrischen und  $\alpha\beta$ -Komponenten* noch ein breiterer Raum gewidmet. Die Theorie der symmetrischen und  $\alpha\beta$ -Komponenten habe ich übrigens auch damals schon in normierter Darstellung wiedergegeben, und zwar aus zweierlei Gründen: Einmal fügen sich die normierten Komponenten

zwangloser in die Transformations- und Eigenwerttheorie ein und zum anderen hat man mit den normierten Komponenten wegen der Leistungsinvarianz einen leichteren Zugang zur Theorie der Übertragungsmatrizen. Inzwischen darf man wohl annehmen, daß diese Theorie den Ingenieuren der Energieübertragungstechnik Allgemeingut geworden sind. Seit Sommersemester 1961 halte ich über das Gesamtgebiet der *Theorie elektrischer Netze* auch eine zweisemestrige *Vorlesung* an der *Technischen Hochschule Darmstadt*.

Da das Buch nicht zu umfangreich werden sollte, mußte ich mich auf das Notwendigste beschränken. Aus diesem Grund wird dem Leser dringend ans Herz gelegt, alle Rechnungen im Text nachzurechnen und die wenigen Übungsaufgaben zu lösen. Auch sollte man nicht sparen sich selbst Figuren aufzuzeichnen. Für weitere Detailfragen möchte ich auf die im Anhang gegebene Literatur hinweisen. Insbesondere hat der Verfasser in mehreren Veröffentlichungen manche dieser Fragen eingehender behandelt. Auf viele Grundtatsachen, die im Grundlagenunterricht behandelt werden und in zahlreichen anderen Büchern ausführlich dargestellt sind, konnte ich nicht näher eingehen. Im Buch selbst mußte auch vieles ausgeklammert werden. Grundsätzlich wurde nur die *Theorie der stationären Wechselströme* (Gleichströme sind als Sonderfall herein enthalten) in linearen Netzen behandelt. Solange die Frequenzabhängigkeit formelmäßig mitgeführt wird, leistet die *Fouriertransformation* den Übergang auf *nichtsinusförmige Vorgänge* (z. B. Schaltvorgänge). Das ist formal recht einfach gesagt, doch gibt es in der Praxis mancherlei zu bedenken, insbesondere, wenn auch Nichtlinearitäten (wie Lichtbogen-, Ableiterkennlinien) eine Rolle spielen. Es wird daher angebracht sein, diesem Thema eine eigene Darstellung zu widmen. Ein anderer Problemkreis, der im Anwendungsteil ausgeklammert werden mußte, ist die *digitale Berechnung von Kurzschlußströmen*. Die Berechnung von Kurzschlußströmen bietet, da es ein lineares Problem ist, keine besondere Problematik. Alle theoretischen Mittel sind im Buch bereitgestellt. Man wird allerdings hier keine  $\alpha\beta 0$ -Komponenten anwenden, denn erstens hätte man dann gegenüber den symmetrischen Komponenten doppelt soviel treibende Spannungen in Rechnung zu stellen, 2. wären die Kopplungsbedingungen im allgemeinen komplizierter. Andererseits bieten die komplexen Übersetzungsverhältnisse der Kopplungen bei Simultanverfahren rechnerisch keine Schwierigkeiten. Die Aufstellung eines Programms zur Berechnung von Kurzschlußströmen infolge unsymmetrischer Fehler ist vor allem ein organisatorisches Problem. Über die praktischen Bedürfnisse bringen die Bücher von R. ROEPER und G. FUNK alles Wissenswerte. Im Teil C: *Anwendungen* wurde keine Vollständigkeit angestrebt. Hier wurden nur einige wichtige Beispiele dargestellt. So wurden dort nur die nicht-

trivialen Probleme behandelt, und zwar solche, die zugleich auch *nicht-linear* sind. In einer späteren Auflage wird man der fortschreitenden Entwicklung Rechnung tragend die *Anwendungen* in einem *gesonderten Band* ausführlicher darstellen können.

Eine wichtige Grundlage jeder Netzwerktheorie ist die *Theorie der Graphen* (Streckenkomplexe). Da Verbundnetze normalerweise recht kompliziert sind und sehr verschiedenartige Strukturen aufweisen, ist es wichtig, die Grundlagen der Graphentheorie zu kennen. Das *Aufstellen von Gleichungen* und *Eliminationsprozesse* können erheblich *vereinfacht* und übersichtlicher betrachtet werden, wenn die Grundlagen dieser Theorie bekannt sind. Seit Erscheinen des klassischen Werkes von DÉNES KÖNIG im Jahre 1936 sind in den letzten Jahren einige Bücher veröffentlicht worden, die der neuesten Entwicklung Rechnung tragen. Hier sind vor allem neben den Büchern von BERGE und ORE die Bücher von SESHU und REED und von KIM und CHIEN zu nennen, die den Bedürfnissen der elektrischen Netzwerktheorie Rechnung tragen. Viele Arbeiten erscheinen auch laufend in den Transactions of the IRE (jetzt IEEE) on Circuit Theory und im Journal of the Franklin Institute.

In mehreren Problemen der Energieübertragungstechnik werden Fragen studiert, in denen Energieein- und -ausgänge betrachtet werden. Diese Energieeingänge (-ausgänge) können zwei- oder mehrpolig sein. Im Fall mit mehreren Polen wird man zweckmäßigerweise von einer Gruppe von Porten sprechen.<sup>1</sup> Jedem Port sei ein Strom und eine Spannung zugeordnet. So wird also aus der klassischen „Vierpoltheorie“ eine Zweipoltheorie. Die Bezeichnung Vierpol ist im allgemeinen nicht einmal gerechtfertigt, da die betrachteten Netzsysteme oft nur Dreipole sind. Andererseits wäre es zur vollständigen Beschreibung eines Vierpols richtiger ihn als 3-Port zu beschreiben, da 4 Pole sowohl drei unabhängige Spannungen als auch drei unabhängige Ströme zulassen.

Zum besseren Verständnis wurden im Anhang die Grundtatsachen über Matrizen und Determinanten zusammengestellt. Dieses Kapitel ist nicht als Lehrbuch, sondern nur als Nachschlagwerk gedacht. Tabellarisch zusammengestellte Ersatzschaltungen der Matrizen für einige einfache 2-Porte, ferner auch Ersatzschaltungen für Kurzschlüsse, Unterbrechungen und Lasten in symmetrischen und  $\alpha\beta 0$ -Komponenten sollen die Lösungen von Netzaufgaben erleichtern.

Zum Schluß habe ich die angenehme Pflicht allen jenen zu danken, die mich bei der Abfassung des Buches unterstützten.

---

<sup>1</sup> Port (engl.) = Hafen, Pforte; dieser englische Ausdruck ist in der Netzwerktheorie als Ausdruck für Energieeingänge (-ausgänge) seit längerer Zeit gebräuchlich. W. KLEIN benutzt hierfür „Tor“.

Wohllollende Förderung fand ich vor allem durch Herrn Direktor Dr.-Ing. E. h. H. WILHELMS, der sich dafür einsetzte, daß dieses Buch beim Springer-Verlag erscheinen konnte. Ferner habe ich den Herren Direktoren der Technischen Stammabteilung Stromverteilung der Siemens-Schuckertwerke AG., Erlangen, Herrn Dipl.-Ing. KURT REISKE und Herrn Dipl.-Ing. MAX SCHMID zu danken, die dieses Buch wohlwollend gefördert haben.

Beim Lesen der Korrekturen unterstützten mich die Herren Dr.-Ing. H. BAUER (SSW), Prof. rer. nat. W. ENGL (T. H. Aachen), Dr.-Ing. K. THEILSIEFJE (SSW) und nicht zuletzt auch meine Frau. Ihnen allen danke ich an dieser Stelle aufrichtig für die Bereitwilligkeit und für die wertvollen Ratschläge, die sie mir gaben. Auch Frau G. GEISLER, welche die Reinschrift des Manuskriptes besorgte, und vielen Kolleginnen und Kollegen sei für die Diskussionen und Hilfeleistungen herzlich gedankt.

Mein besonderer Dank gilt schließlich dem Springer-Verlag für die schnelle und sorgfältige Drucklegung und für die hervorragende Ausstattung dieses Buches.

Erlangen, im Juli 1963

**Hans Edlmann**



# Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>A. Grundlagen der Netzwerktheorie für stationäre Wechselströme . . .</b>	<b>1</b>
1. Vorzeichenregeln . . . . .	1
1.1 Die Vorzeichenregeln für die Ladung, für den Strom und für die Klemmen einer Gleichspannungsquelle. . . . .	1
1.2 Das Verbraucherzählpeilsystem für Gleich- und Wechselstrom . .	1
2. Zweipole . . . . .	3
2.1. Das komplexe OHMSche Gesetz für ideale Zweipole . . . . .	3
Der OHMSche Widerstand . . . . .	3
Die Induktivität . . . . .	5
Die Kapazität . . . . .	6
2.2 Die komplexe Drehzeigermethode für Wechselstrom . . . . .	6
2.3 Die Leistungsbegriffe der Wechselstromtechnik. . . . .	8
Aufgaben. . . . .	9
<b>B. Theorie der Netze . . . . .</b>	<b>10</b>
3. Topologie der Zweipolnetze. . . . .	10
3.1 Graphen, Bäume, Verbindungszweige, Maschen . . . . .	10
3.2 Der EULERSche Polyedersatz . . . . .	15
3.3 Dualität ebener Graphen . . . . .	16
3.4 Graphen elektrischer Zweipolnetze. Orientierte Graphen . . . . .	21
3.5 Separable Graphen . . . . .	23
3.6 Schnittmengen . . . . .	25
3.7 Duale Netzwerke . . . . .	26
3.8 Ermittlung von Transformatorersatzschaltbildern durch duale Zuordnung . . . . .	27
Das magnetische OHMSche Gesetz. . . . .	27
Die KIRCHHOFFSchen Gesetze im magnetischen Kreis . . . . .	27
Die Dualitätsgesetze. . . . .	28
Der Zweiwicklungstransformator . . . . .	30
Aufgaben. . . . .	33
4. Berechnung linearer elektrischer Zweipolnetze bei ge- gebenen Spannungen und Strömen . . . . .	33
4.1 Die Knotenpunktsmethode . . . . .	34
4.2 Ermittlung eines vollständigen Baumes aus der Liste der Zweige bzw. aus einer gegebenen $\mathbf{K}$ -Matrix . . . . .	39

	Seite
4.3 Die Maschenmethode . . . . .	50
Behandlung der WHEATSTONESchen Brücke mit Hilfe der Maschenmethode . . . . .	55
4.4 Die Schnittmengenmethode . . . . .	58
Behandlung der WHEATSTONESchen Brücke mit Hilfe der Schnittmengenmethode . . . . .	62
Aufgaben . . . . .	65
5. Berücksichtigung von Transformatoren in Netzen . . . . .	66
5.1 Darstellung von Transformatoren in einem Netz durch eine Zweipolersatzschaltung . . . . .	67
5.2 Berücksichtigung der Übersetzungsverhältnisse der Transformatoren in verallgemeinerten Inzidenzmatrizen (Quasiinzidenzmatrizen) . . . . .	69
5.2.1 Quasiinzidenzmatrizen in der Knotenpunktmethode . . . . .	70
5.2.2 Quasiinzidenzmatrizen in der Maschenmethode . . . . .	76
5.2.3 Quasiinzidenzmatrizen in der Schnittmengenmethode . . . . .	80
6. Berechnung der Matrizen für besondere Klemmenpaare eines Netzes (Systemmatrizen) . . . . .	82
6.1 Teilelimination und Variablentausch in einem linearen System . . . . .	82
6.1.1 Die Grundaufgabe . . . . .	82
6.1.2 Verallgemeinerungen des Variablentausches . . . . .	84
6.1.3 Schrittweise Vertauschung der Variablen . . . . .	85
6.2 Erzeugung von Systemimpedanzmatrizen . . . . .	86
6.2.1 Reduktion einer Systemimpedanzmatrix . . . . .	86
6.2.2 Erzeugung einer Systemimpedanzmatrix durch Reduktion der Maschenimpedanzmatrix . . . . .	88
6.3 Erzeugung von Systemadmittanzmatrizen . . . . .	90
6.3.1 Reduktion einer Systemadmittanzmatrix . . . . .	90
6.3.2 Erzeugung einer Systemadmittanzmatrix durch Reduktion der Schnittmengenadmittanzmatrix . . . . .	91
6.4 Die Elimination von Knotenpunkten als Reduktion der Knotenpunktsadmittanzmatrix . . . . .	92
6.5 Die Erzeugung gemischter Matrizen aus Systemimpedanz- bzw. Systemadmittanzmatrizen . . . . .	95
6.5.1 Die Erzeugung von Kettenmatrizen aus Systemimpedanz- bzw. -Admittanzmatrizen . . . . .	96
7. Die Berücksichtigung nachträglicher Änderungen in den System- bzw. Admittanzmatrizen eines Netzes . . . . .	98
7.1 Änderungen in den Impedanz- oder Admittanzgrößen . . . . .	99
7.1.1 Auswirkungen auf die Maschenimpedanzmatrix (Knotenpunkts- oder Schnittmengenadmittanzmatrix) . . . . .	99
7.1.2 Auswirkungen auf die Systemimpedanz- (bzw. -admittanzmatrix) . . . . .	101
7.2 Änderungen in den Übersetzungsverhältnissen . . . . .	104
7.2.1 Auswirkungen auf die Maschenimpedanzmatrix (bzw. Knotenpunkts- oder Schnittmengenadmittanzmatrix) . . . . .	104
7.2.2 Auswirkungen auf die Systemimpedanz- (bzw. -admittanzmatrix) . . . . .	105

7.3 Änderungen in der Struktur des Netzes. . . . .	106
7.3.1 Auswirkungen auf die Maschenimpedanzmatrix (Knoten-	
punkts- oder Schnittmengenadmittanzmatrix) bei Hinzun-	
nahme eines Zweiges . . . . .	106
Rangerhöhende Änderungen. . . . .	107
Rangerhaltende Änderungen . . . . .	108
Besonderheiten bei der Knotenpunktmethode . . . . .	109
7.3.2 Auswirkungen auf die Systemimpedanzmatrix (bzw. -Admit-	
tanzmatrix) . . . . .	111
Rangerhöhende Änderungen. . . . .	111
Hinzunahme eines äußeren Klemmenpaares. . . . .	111
Hinzunahme eines Zweiges im Netz . . . . .	112
Rangerhaltende Änderungen . . . . .	112
Besonderheiten bei der Knotenpunktmethode . . . . .	112
7.3.3 Auswirkungen bei der Herausnahme eines Zweiges . . . . .	113
8. Bedingungen für besondere Klassen von Netzmatrizen . . . . .	114
8.1 Einschränkende Bedingungen für die Matrizen eines $2n$ -Portes bei	
Passivität des zugrundeliegenden Netzes. . . . .	114
Bedingungen für die Impedanz- und Admittanzmatrix . . . . .	115
Determinantenkriterien für die Definitheit . . . . .	116
Bedingungen für die Kettenmatrix . . . . .	117
8.2 Bedingungen der Symmetrie in Netzen . . . . .	119
8.2.1 Die Bedingungen der Reziprozität für die Matrizen eines $2n$ -	
Portes . . . . .	119
Das Reziprozitätsgesetz für Impedanz- und Admittanz-	
matrizen . . . . .	120
Das Reziprozitätsgesetz für Kettenmatrizen . . . . .	120
8.2.2 Auswirkungen der Längssymmetrie eines $2n$ -Portes in den	
Matrizen . . . . .	122
Auswirkungen in den Impedanz- und Admittanzmatrizen . . . . .	122
Auswirkungen in den Kettenmatrizen . . . . .	122
Die Kettendeterminantenmatrizen eines längssymmetrischen	
$2n$ -Portes . . . . .	123
9. Kombinatorische Verknüpfung von $2n$ -Port-Matrizen . . . . .	124
9.1 Additive Verknüpfung von Impedanzmatrizen . . . . .	124
9.2 Additive Verknüpfung von Admittanzmatrizen . . . . .	125
9.3 Multiplikative Verknüpfung von Kettenmatrizen . . . . .	126
9.4 Gleichungen für die wechselseitige Umwandlung von Impedanz-,	
Admittanz- und Kettenmatrizen von $2n$ -Porten . . . . .	127
10. Theorie der homogenen Leitungen. . . . .	128
10.1 Die einphasige homogene Leitung . . . . .	128
10.1.1 Die Wellenimpedanz . . . . .	128
10.1.2 Die Kettenmatrix für die homogene Leitung . . . . .	130
10.1.3 Die natürliche Leistung bei Freileitungen . . . . .	133
10.1.4 Phasengeschwindigkeit, Wellenwiderstand, Reaktanz und	
Suszeptanz von Freileitungen . . . . .	134
10.2 Die mehrphasige homogene Leitung. . . . .	136
10.2.1 Bemerkungen zur numerischen Berechnung der Ketten-	
matrix. . . . .	140

	Seite
10.2.2 Die Wellenimpedanzmatrix der mehrphasigen homogenen Leitung . . . . .	141
Die Matrixgleichung für die Wellenimpedanzmatrix . . . . .	141
Die vier Ausdrücke für die Wellenimpedanzmatrix . . . . .	143
10.2.3 Zahlenbeispiel zu den für die Theorie der mehrphasigen Leitung charakteristischen Matrizen . . . . .	144
Aufgaben . . . . .	147
11. Theorie der Komponentensysteme . . . . .	147
11.1 Drehstrom-Mehrphasensysteme . . . . .	149
11.2 Die Komponentensysteme . . . . .	150
11.2.1 Symmetrische Komponenten . . . . .	150
11.2.2 $\alpha\beta$ -Komponenten . . . . .	154
11.2.3 Verallgemeinerung auf andere Mehrphasensysteme . . . . .	155
11.2.4 Beweis dafür, daß auch die verallgemeinerten Transforma- tionen der symmetrischen und $\alpha\beta$ -Komponenten für mehrere Variablen bei zyklischer Symmetrie des Netzes eine Entkopplung erzeugen . . . . .	157
11.3 Nachbildbarkeit der Netze . . . . .	160
11.4 Nichtnormierte Komponentensysteme . . . . .	162
11.5 Die Ersatzschaltungen für Kurzschlüsse und Unterbrechungen . . . . .	166
11.6 Übertragermatrizen . . . . .	169
11.6.1 Die allgemeine 2n-Port-Übertragermatrix . . . . .	169
11.6.2 Übertragermatrizen für normierte symmetrische und $\alpha\beta$ - Komponenten . . . . .	170
11.7 Die KIMBARKSche Dreifachdarstellung . . . . .	176
Aufgaben . . . . .	177
<b>C. Anwendungen . . . . .</b>	<b>179</b>
12. Lastflußrechnung bei Vorgabe von Leistungswerten . . . . .	179
12.1 Die Lastflußrechnung mit gemischter Matrix . . . . .	179
12.2 Berücksichtigung von Abweichungen der Nennübersetzungs- verhältnisse von Transformatoren in der Lastflußrechnung durch Zusatzströme . . . . .	184
Aufgaben . . . . .	185
13. Stabilität in Drehstromverbundsystemen . . . . .	186
13.1 Dynamische Stabilität . . . . .	186
13.1.1 Allgemeine Bemerkungen . . . . .	186
13.1.2 Die Bewegungsgleichungen der transienten Polradwinkel . . . . .	187
13.1.3 Die von jedem Synchrongenerator in das Verbundnetz ab- gegebene Wirkleistung . . . . .	189
13.1.4 Das Differenzenverfahren . . . . .	190
13.1.5 Die richtige Berücksichtigung der Schaltzeiten . . . . .	193
13.2 Statische Stabilität . . . . .	194
13.2.1 Das Eigenwertproblem für kleine Schwingungen . . . . .	195
13.2.2 Die Funktionalmatrix $\frac{\partial \mathbf{P}_e}{\partial \mathfrak{P}}$ . . . . .	197
Aufgaben . . . . .	198
14. Der wirtschaftlich günstigste Verbundbetrieb . . . . .	199
14.1 Der rein thermische Verbundbetrieb . . . . .	199
Das Kostenintegral . . . . .	199

## Inhaltsverzeichnis

XV

Seite

14.2 Der hydrothermische Verbundbetrieb . . . . .	203
14.2.1 Der hydrothermische Verbundbetrieb mit Laufwasserkraftwerken . . . . .	203
14.2.2 Der hydrothermische Verbundbetrieb mit Speicherwasserkraftwerken . . . . .	205
14.3 Die Berechnung der Verlustkoeffizienten $B_{ik}$ nach G. KRON . . . . .	207
Aufgaben . . . . .	213
<b>Anhang</b> . . . . .	<b>214</b>
1: Determinanten und Matrizen. . . . .	214
1. Grundlegende Definitionen. . . . .	214
2. Addition und Subtraktion zweier Matrizen . . . . .	215
3. Multiplikation einer Matrix mit einer Zahl (Skalar) . . . . .	215
4. Multiplikation zweier Matrizen . . . . .	215
5. Das Rechnen mit Untermatrizen. . . . .	217
6. Determinanten . . . . .	218
6.1 Zeilen- (Spalten-) Entwicklungssatz . . . . .	219
6.2 LAPLACEScher Entwicklungssatz . . . . .	220
6.3 Determinanten-Multiplikationssätze . . . . .	221
7. Die Inverse einer Matrix . . . . .	221
8. Auflösung eines linearen Gleichungssystems . . . . .	222
8.1 Das inhomogene Gleichungssystem . . . . .	222
8.2 Das homogene Gleichungssystem . . . . .	223
9. Besondere Matrizen. . . . .	225
9.11 Diagonalmatrix . . . . .	225
9.12 Obere Dreiecksmatrix . . . . .	225
9.13 Untere Dreiecksmatrix . . . . .	225
9.21 Symmetrische Matrix. . . . .	225
9.22 Schiefsymmetrische Matrix . . . . .	225
9.23 Orthogonale Matrix . . . . .	225
9.31 Hermitesche Matrix . . . . .	225
9.32 Schiefhermitesche Matrix. . . . .	225
9.33 Unitäre Matrix . . . . .	226
9.4 Hermitesche und schiefhermitesche Komponenten einer Matrix . . . . .	226
10. Quadratische und hermitesche Formen . . . . .	226
11. Eigenwerttheorie der Matrizen. . . . .	227
11.1 Unitäre Ähnlichkeitstransformation einer hermiteschen Matrix auf Diagonalgestalt . . . . .	229
12. Potenzen von Matrizen und der Satz von CAYLEY-HAMILTON . . . . .	230
2: Die Formel von M. Woodbury für die Inverse einer geänderten Matrix . . . . .	232
3.1. Tabelle einiger häufig vorkommenden 2-Port-Matrizen . . . . .	233
2. Tabelle der C-Admittanzmatrizen von einigen Dreiphasen-6-Port-Netzwerken . . . . .	233
4: Ersatzschaltungen zur Darstellung von Kurzschlüssen, Erdschlüssen, Unterbrechungen und Lasten in Zwei- und Dreiphasensystemen in normierten symmetrischen und $\alpha\beta$ -Komponenten . . . . .	238
<b>Literaturverzeichnis</b> . . . . .	<b>255</b>
<b>Namenverzeichnis</b> . . . . .	<b>276</b>
<b>Sachverzeichnis</b> . . . . .	<b>276</b>