
Springer-Lehrbuch

Steffen Paul · Reinhold Paul

Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik 1

Gleichstromnetzwerke und ihre
Anwendungen

5., aktualisierte Auflage

 Springer Vieweg

Steffen Paul
Institut für Theoretische Elektrotechnik
und Mikroelektronik (ITEM)
Universität Bremen
Bremen, Deutschland

Reinhold Paul
Institut für Nanoelektronik
TU Hamburg-Harburg
Hamburg, Deutschland

ISSN 0937-7433

ISBN 978-3-642-53947-3

DOI 10.1007/978-3-642-53948-0

ISBN 978-3-642-53948-0 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1990, 1993, 1996, 2010, 2014

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk 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.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media

www.springer-vieweg.de

Vorwort zur 5. Auflage

Die freundliche Aufnahme, die die Neubearbeitung bei den Lesern fand, veranlasste die Autoren zu einer Neuauflage. Berücksichtigt haben wir vor allem die Anregungen, Kommentare und Wünsche der Leser. Sie führten an manchen Stellen zu tieferen Erklärungen, Bildergänzungen und auch Verbesserungen. Eingearbeitet wurden öfters auch unterstützende Querverweise auf Band 2 und den abgeschlossenen Band 3 Dynamische Netzwerke. Eingefügt wurden auf Leserwünsche hin Zusammenfassungen zu jedem Kapitel, die als knappe Fakten zum präsenten studentischen Wissen werden sollten.

Eine Textrevision bietet Gelegenheit zur Beseitigung von Schreibfehlern, die sich trotz moderner Hilfsmittel immer wieder einschleichen. Wir danken an dieser Stelle allen Lesern für viele Hinweise und Kommentare und erhoffen sie uns auch für diese Auflage (paul@me.uni-bremen.de, paul@tu-harburg.de). Ganz besonderer Dank gebührt Herrn Dr.-Ing. habil. H. G. Schulz, der mit seinem fundierten feldtheoretischen Sachverstand manchen wertvollen Ratschlag geben konnte.

Unser Dank gebührt zuletzt dem Springer-Verlag und insbesondere Frau E. Hestermann-Beyerle sowie Frau B. Kollmar-Thoni für die gute Zusammenarbeit, aber auch die Geduld, die sie uns entgegen brachten.

Bremen, Frühjahr 2014

Steffen Paul

Buchholz, Frühjahr 2014

Reinhold Paul

Vorwort zur 4. Auflage

Nichts kennzeichnet den Umfang, in dem die Elektrotechnik heute Wirtschaft, Technik und überhaupt das öffentlich-gesellschaftliche Leben beherrscht, besser als ein plötzlicher Stromausfall: *alles ruht*. Deshalb ist dieses Gebiet stark interdisziplinär ausgerichtet, stellt es doch einerseits mit der Energietechnik die Grundlage für großtechnischen Energietransport und Energiewandlung dar, andererseits hat es in der Informations- und Kommunikationstechnik mit Stichworten wie Rundfunk-/Fernsehen, Computer, Internet und Satellitentechnik Anwendungsbereiche weltweiten Ausmaßes. Nur folgerichtig haben die Grundlagen dieses Gebietes in ingenieurtechnischen Studienrichtungen Elektrotechnik, Informationstechnik, Mikroelektronik, Automatisierungstechnik und natürlich Energie- und Antriebstechnik, aber auch Mechatronik und Maschinenbau an Fachhochschulen und Universitäten seit langem einen festen Platz.

Das vorliegende dreibändige Lehrwerk „Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik“ vermittelt dazu notwendiges Grundwissen nach modernen methodisch-didaktischen Gesichtspunkten basierend auf langjährigen Ausbildungserfahrungen der Autoren.

Motivation Gegenüber vorherigen Ausgaben dieses Lehrbuches erfolgte eine weitgehende Neubearbeitung aus mehreren Gründen:

- Die eingeführten Bachelor- und Master-Abschlüsse als Angebot statt des Diplom-Studiengangs drängen zur Neubewertung und stärker modularisierten Form des Lehrstoffes. Deshalb muss die Themenfolge der Vorlesung nicht unbedingt mit der Stofffolge eines Lehrbuches übereinstimmen.
- Es gibt Stoffverschiebungen: Fortschritte der Mikroelektronik, der Solartechnik, die wachsende Bedeutung elektromagnetischer Felder durch die Thematik der elektromagnetischen Verträglichkeit, die wachsende Sensorik und Mikrosystemtechnik u. a. finden sich nicht nur im Ausbildungsangebot der Oberstufe, sondern verschieben auch relevante Grundaspekte ins Grundstudium.
- Halbleiterbauelemente (Solarzellen, Dioden, Transistoren, Operationsverstärker u. a.) bestimmen heute die Schaltungstechnik. Das erfordert von der Grundausbildung eine stärkere Beachtung nichtlinearer Probleme, vor allem aber gesteuerter Quellen und

ihren Einbezug in Netzwerke. Dazu ist ein einfaches Verständnis ihrer Funktionsprinzipien und Eigenschaften im Stromkreis wünschenswert.

- Die wachsende Bedeutung der Mechatronik verlangt eine stärkere Berücksichtigung der elektromechanischen Wechselwirkung (Stichworte Aktorik/Sensorik), der Erweiterung des Netzwerkes zum physikalischen Netzwerk und den damit verbundenen Analogien.
- Der PC ist heute in den Ausbildungseinrichtungen breit verfügbar. Das erlaubt die Softwarenutzung bei der Problemlösung: Programme wie SPICE/PSPICE (u. a.) für die Schaltungssimulation oder MATLAB/SIMULINK, Mathematika/MAPLE u. a. für die mathematische Unterstützung sind sehr nützliche Hilfsmittel. Sie stehen für die Grundausbildung als ausreichende Versionen meist kostenlos im Internet zur Verfügung, auch gibt es preisgünstige Studentenversionen.

Doch dieses sei vermerkt: Man erlernt Elektrotechnik nicht durch Beschäftigung mit solchen Hilfsmitteln, sondern zunächst durch permanente Nutzung von Papier, Stift und eigenes Nachdenken!

Erst dann bieten diese Werkzeuge eine sinnvolle Ergänzung.

- Manche Normen und Begriffe, ja sogar die Rechtschreibung haben sich teilweise verändert.

Der erste Band umfasst einfache (Gleich-) Stromkreise sowie Netzwerke, ihre Analyseverfahren und Anwendungen, der zweite Band die Gesetzmäßigkeiten des elektrischen und magnetischen Feldes, die Verbindung zu den Netzwerkelementen und schließlich die Energiewandlung sowie Energie und Kraftwirkung in elektromagnetischen Feldern einschließlich verallgemeinerter physikalischer Netzwerke und Analogievorstellungen.

Der dritte Band enthält dynamische Netzwerke und zeitveränderliche Vorgänge (Wechsel-, Drehstromtechnik), Transformationen und Schaltvorgänge. Begriffen wird in allen Bänden die Grundausbildung nicht als etwas Abgeschlossenes, Selbständiges, sondern als das, was sie ist: das Fundament nachfolgender Lehrgebiete.

Inhalt und Stoffgestaltung Zu den stoffbezogenen Problemen einer elektrotechnischen Grundvorlesung treten erfahrungsgemäß noch die Schwierigkeiten der Anwendung mathematischer Methoden auf technisch-naturwissenschaftliche Problemstellungen, wie sie beispielsweise das Verständnis der elementaren Vektoralgebra zum Umgang mit Feldgrößen erfordert, stünde die Feldvorstellung am Beginn der Ausbildung. Dagegen sind Stichworte wie Strom, Spannung, Widerstand als Schulwissen, durch die Berufsausbildung oder eigenes Interesse meist schon bekannt. Diesem Aspekt trägt der erste Band Rechnung. Ein einführender Abschnitt greift diese Begriffe auf und wendet sie im Kapitel „Gleichstromnetzwerke“ auf einfache Stromkreise an.

Dem Einsatz von Halbleiterbauelementen in der Schaltungstechnik tragen Schwerpunkte wie nichtlinearer Grundstromkreis, Zweitore und gesteuerte Quellen mit besonderer Beachtung der netzwerktechnischen Modellierung des Transistors und Verstärkers (Operationsverstärker) Rechnung.

Das Kapitel „Netzwerkanalyse“ behandelt die Standardverfahren und eine vertiefte Zusammenstellung der matrixorientierten Darstellung (letztlich als Grundlage aller rechnergestützten Methoden). Weil sie zunehmend wichtiger werden, führt eine knappe Vertiefung in „Simulationsmethoden“ und ihre Anwendung ein. Hier spielen hauptsächlich lineare Gleichungssysteme eine Rolle und damit findet die meist parallel verlaufende Mathematikausbildung ein sehr praktisches Anwendungsfeld.

Das vierte Kapitel stellt nützliche Netzwerktheoreme zusammen, deren Anwendung die Netzwerkberechnung stark vereinfacht.

Ein knapper Anhang enthält übergreifende Themen: physikalische Größen und Gleichungen, Einheiten und Dimensionen.

Hat der Lernende an dieser Stelle den ersten Schwerpunkt der Grundausbildung erarbeitet, so konzentriert sich der zweite Schwerpunkt auf die Wirkungen ruhender und bewegter Ladungen im *Raumpunkt* beschrieben durch das elektromagnetische Feld mit seinen Bestandteilen Strömungsfeld, elektrostatisches und magnetisches Feld. An dieser Stelle dürfte seitens der Mathematikausbildung die Vektorrechnung (ergänzt durch Linien- und Hüllenintegrale) verfügbar sein.

Der Übergang vom Stromkreis zur Feldebetrachtung im Band 2 gelingt am anschaulichsten mit dem „Strömungsfeld“. Ausgehend von Strom und Spannung wird zunächst der feldmäßige Ursache-Wirkungs-Zusammenhang durch Feldgrößen im Raumpunkt hergeleitet mit dem Strömungsfeld als Mittler. Am Ende steht die feldmäßige Begründung des Netzwerkelementes ohmscher Widerstand.

Vertraut mit dieser Vorgehensweise wird anschließend das „Elektrostatische Feld“ mit seinen Feldgrößen und Phänomenen erläutert. Am Schluss führt der Übergang auf die Globalgrößen Spannung und Ladung zum Netzwerk- und Schaltelement Kondensator. Besonderer Wert liegt auf den technischen Aspekten der Felder und ihren Anwendungen, etwa der Einführung des MOSFET als Beispiel eines feldgesteuerten, nichtlinearen Strömungsfeldes. Ein Überblick der Stromleitungsvorgänge in Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen schließt den Abschnitt ab, lenken doch heute Brennstoffzellen den Blick stärker auf dieses Teilgebiet.

Die gleiche Vorgehensweise nutzt das Kapitel „Magnetisches Feld“ mit den zugehörigen Feldgrößen und Phänomenen. Das fundamentale Induktionsgesetz und seine Anwendungen wird unter verschiedenen Gesichtspunkten behandelt, wichtige Netzwerkfolgerungen sind die Einführung der Selbst- und Gegeninduktivität.

Den Schluss bilden die Maxwellschen Gleichungen in Integralform, wie sie für viele praktische Problemstellungen ausreichen. Ihre Differenzialform wird lediglich als Ausblick erwähnt, denn sie ist Inhalt des Lehrgebietes „Theoretische Elektrotechnik“. Wird auf diese Vertiefung verzichtet – was manche Studiengänge bevorzugen – so genügen einige einfache Beispiele zum breiteren Verständnis der Differenzialform.

Das elektromagnetische Feld ist Träger der elektromagnetischen Energie. Energie und Kraftwirkungen bilden deshalb den letzten Schwerpunkt. Hier haben Wechselwirkungen zu anderen Energieformen, besonders zur Mechanik, große Bedeutung mit Einrichtungen wie Motoren, Generatoren, Elektromagneten, heute verstanden als Teilgebiet der Aktoren.

Für die Energiewandlungsvorgänge elektrisch – nichtelektrisch wird ihre Modellierung zunehmend wichtiger und durch Analogievorstellungen lassen sich Netzwerkverfahren auf nichtelektrische Vorgänge über den Begriff physikalische Netzwerke übertragen.

Die Stoffzuordnung der ersten beiden Bände hat sich nicht nur pädagogisch langjährig bewährt, sondern sie zeigt auch den Unterschied zur Elektrizitätslehre der Physik: Sie beginnt mit der ruhenden Ladung und Elektrostatik gefolgt von den Phänomenen der bewegten Ladung usw. In der Elektrotechnikausbildung stehen mehr Zweck und Mittel im Focus: die Energie- und Informationsübertragung mit Netzwerken. Erst allmählich wird das Verständnis zum elektromagnetischen Feld und seiner Nutzung aufgebaut.

Didaktik Die Lehrveranstaltung „Grundgebiete der Elektrotechnik“ bringt den ersten Kontakt der Studierenden zum späteren Berufsfeld. Das verlangt neben der motivierenden inhaltlichen Darlegung nicht nur einen ständigen Bezug zu praktischen Beispielen, er stellt auch eine didaktische Herausforderung dar.

Methodisch ist der Stoff so angelegt, dass er selbständig erarbeitet werden kann und vom Lernenden einen ständigen Dialog mit dem Lehrbuch verlangt. Damit eignen sich die Bücher auch zum autodidaktischen Lernen unterstützt durch mehrere Aspekte:

- Formulierung der Lernziele für jeden Stoffschwerpunkt, knappe Erklärung wichtiger Begriffe als Merksätze, strukturierte Lösungsmethoden zur Anwendung bestimmter Verfahren, Zusammenfassungen/Tutorials zu jedem Stoffschwerpunkt, Prüfungs- und Kontrollfragen,
- optische Hervorhebung wichtiger Begriffe und Fakten, sie sind gleichzeitig Stützen zur Prüfungsvorbereitung,
- Stoffgebiete mit erhöhtem Schwierigkeitsgrad oder speziellen Problem, die zunächst zurücktreten können, sind mit einem Stern (*) versehen,
- wichtige Themen werden mit einem ansteigenden, zweistufigen Anforderungsniveau behandelt. So lässt sich der Vertiefungsgrad selbst wählen. Dabei verhelfen manche Rückverweise zum allmählichen Aufbau eines Übersichtswissens,
- Anleitung zum Einbezug relevanter Computerprogramme,
- zahlreiche Beispiele und praktische Hinweise festigen den Lehrstoff,
- gut gestaltete Bilder, sie wurden durchweg neu bearbeitet,
- Hinweise auf Aufgaben, die mit Lösung in zwei Arbeitsbüchern bereitstehen.

Studienmethodik Die Erlernung elektrotechnischer Grundlagen gelingt ohne intensives Selbststudium kaum. Dazu gehören neben der Beherrschung der wichtigsten Definitionen und Gesetze, Lösungsmethoden und physikalischen Sachverhalte die permanente eigenständige Lösung von Übungsaufgaben. Dann wird schnell deutlich, was verstanden wurde und was nicht. Die Fragen zur Selbstkontrolle sollten unbedingt beantwortet werden, um ein Gefühl für das Stoffverständnis zu erhalten.

Leserkreis Das Lehrwerk wendet sich an:

- Studierende der Fachrichtungen Elektrotechnik, Informationstechnik, Informatik, aber auch Maschinenbau, Physik und Wirtschaftsingenieurwesen an Universitäten und Fachhochschulen,
- an den im Berufsleben stehenden Ingenieur und Techniker als Nachschlagewerk bei auftretenden Problemen über Grundzusammenhänge, die er einmal gehört hat,
- an Abiturienten und Schüler in oberen Klassen, die sich während der Schulzeit oder im Wehr- und Ersatzdienst auf ein Studium vorbereiten wollen.

Dank Die Motivation zu diesem Buch entsprang der Erkenntnis, dass die Grundlagen eines Fachgebietes nie abgeschlossen sind, sondern in Abständen neu durchdacht und formuliert werden müssen. Das bestätigte sich auch in zahlreichen Diskussionen mit Fachkollegen, wodurch das Vorhaben sehr gefördert wurde. Der Dank gilt aber gleichfalls den Lesern vorhergehender Auflagen, die manch gute Ratschläge zur Verbesserung übermittelten.

In der Bearbeitungsphase des Manuskriptes hat Herr Dr.-Ing. sc. techn. H.-G. Schulz mit einer Reihe von Vorschlägen aus seiner langjährigen Tätigkeit als Lehrender des Fachgebietes Theoretische Elektrotechnik (TU Dresden) beigetragen. Ihm gilt unser ganz persönlicher und herzlicher Dank.

Dem Springer-Verlag, insbesondere Frau E. Hestermann-Beyerle, danken wir für die gute Zusammenarbeit, die sorgfältige Drucklegung des Buches sowie dafür, dass Wünschen weitgehend entsprochen worden ist. Der Firma le-tex, insbesondere Frau N. Kroke und Frau P. Möws danken wir für die Unterstützung bei der Erstellung des druckreifen Manuskripts.

Über die Jahre gingen von vielen Fachkollegen und Lesern zahlreiche Hinweise und Anregungen ein, ein Fundus für die Neubearbeitung. Unzulänglichkeiten bleiben natürlich nicht aus und wir sind für Anregungen, Fehler und Verbesserungshinweise jederzeit dankbar (steffen.paul@item.uni-bremen.de, paul@tu-harburg.de).

Ein Grundlagenbuch Elektrotechnik mit einem Anspruch für einen weiten Nutzerkreis ist immer eine Herausforderung: es soll einerseits den Leser in seiner Studienwahl bekräftigen, ein breites Fundament für das weitere Studium legen eingebettet in die Lernfortschritte, die er in Mathematik und Physik erzielt und ihn schließlich auf die Vielfalt der Elektrotechnik neugierig machen. Die Autoren hoffen, dass das Buch diesem Anspruch gerecht wird.

Bremen, Frühjahr 2010

Steffen Paul

Buchholz, Frühjahr 2010

Reinhold Paul

Inhaltsverzeichnis

1	Grundbegriffe	1
1.1	Grundaufgaben der Elektrotechnik	1
1.2	Teilchen- und Feldmodell	5
1.3	Elektrische Ladung	7
1.3.1	Eigenschaften der elektrischen Ladung	7
1.3.2	Erhaltungssatz der Ladung	12
1.3.3	Elektrische Feldstärke	13
1.4	Bewegte Ladung, elektrische Stromstärke	17
1.4.1	Strombegriff	17
1.4.2	Elektrische Stromstärke	20
1.4.3	Erstes Kirchhoffsches Gesetz, Knotensatz	24
1.4.4	Zusammenhang Strom-Ladung	27
1.5	Elektrische Spannung, elektrisches Potenzial	29
1.5.1	Elektrische Spannung	29
1.5.2	Zweites Kirchhoffsches Gesetz, Maschensatz	36
1.5.3	Spannung, Potenzial und elektrische Feldstärke	38
1.6	Elektrische Energie, elektrische Leistung	39
1.6.1	Energie	39
1.6.2	Elektrische Energie	41
1.6.3	Elektrische Leistung, Wirkungsgrad	43
1.7	Zusammenfassung	49
2	Einfache resistive Stromkreise und Netzwerkelemente	51
2.1	Modelle elektrischer Stromkreise	51
2.2	Unabhängige Spannungs- und Stromquellen	54
2.2.1	Ideale Spannungs- und Stromquellen	56
2.2.2	Reale Spannungs- und Stromquellen	60
2.3	Widerstand, resistiver Zweipol	69
2.3.1	Lineare resistive Zweipole	70
2.3.2	Zusammenschaltungen linearer resistiver Zweipole	76
2.3.3	Nichtlineare resistive Zweipole	83

2.3.4	Temperaturverhalten resistiver Zweipole	86
2.3.5	Allgemeine resistive Zweipole	91
2.3.6	Widerstand als Bauelement	94
2.4	Der Grundstromkreis	98
2.4.1	Der lineare Grundstromkreis	98
2.4.2	Leistungsumsatz im Grundstromkreis	102
2.4.3	Einfache verzweigte Stromkreise	107
2.4.4	Zweipoltheorie	112
2.4.5	Überlagerungssatz	119
2.5	Nichtlinearer resistiver Grundstromkreis*	121
2.5.1	Zusammenschaltung nichtlinearer und linearer Schaltelemente, Ersatzkennlinie	122
2.5.2	Kennlinienapproximationen	126
2.5.3	Arbeitspunkteinstellung	127
2.5.4	Leistungsumsatz im nichtlinearen Grundstromkreis	129
2.5.5	Kleinsignalverhalten	134
2.6	Zweitore	138
2.6.1	Zweitorbegriff	139
2.6.2	Strom-Spannungs-Beziehungen linearer Zweitore	145
2.6.3	Zweitorarten	155
2.6.4	Zweitorersatzschaltungen, gesteuerte Quellen	158
2.6.5	Elementarzweitore	172
2.6.6	Zweitorzusammenschaltungen	175
2.6.7	Zweitor in der Schaltung, Betriebsverhalten	182
2.6.8	Zweitor mit unabhängigen Quellen	190
2.6.9	Überlagerungssatz und Zweipoltheorie in Netzwerken mit gesteuerten Quellen	191
2.7	Gesteuerte Bauelemente und ihre Modellierung*	194
2.7.1	Nichtlineares Zweitor	196
2.7.2	Bipolartransistormodell	199
2.7.3	Kleinsignalverhalten nichtlinearer Zweitore	205
2.7.4	Kleinsignalverhalten des Bipolartransistors, Verstärkungsprinzip	208
2.7.5	Allgemeines lineares Verstärkermodell	217
2.7.6	Operational-Transkonduktanz-Verstärker, Operationsverstärker	220
2.7.7	Grundsaltungen mit Operationsverstärkern	229
2.8	Zusammenfassung	238
3	Netzwerkanalyseverfahren, resistive Schaltungen	247
3.1	Netzwerkbeschreibung	247
3.1.1	Netzwerkgleichungen	248

3.1.2	Zweigstromanalyse	256
3.2	Maschenstromanalyse	263
3.2.1	Maschenströme	263
3.2.2	Maschenwiderstandsmatrix, Ordnung der Maschenströme	268
3.2.3	Erweiterte Maschenstromanalyse*	275
3.2.4	Maschenstromanalyse in Matrixform	281
3.2.5	Maschenstromanalyse in nichtlinearen Netzwerken	282
3.3	Knotenspannungsanalyse	283
3.3.1	Knotenspannungen	283
3.3.2	Knotenleitwertmatrix, Ordnung der Knotenspannungen	288
3.3.3	Erweiterte Knotenspannungsanalyse*	294
3.3.4	Modifizierte Knotenspannungsanalyse*	303
3.3.5	Knotenspannungsanalyse in Matrixform	304
3.3.6	Unbestimmte Knotenleitwertgleichungen	305
3.3.7	Knotenspannungsanalyse und Zweipolparameter*	308
3.3.8	Netzwerkanalyse mit Operationsverstärkern	310
3.3.9	Knotenspannungsanalyse von nichtlinearen Netzwerken*	316
3.4	Netzwerkanalyse in Matrixdarstellung*	316
3.4.1	Netzwerke, Graph und Inzidenzmatrizen	317
3.4.2	Schleifenanalyse	327
3.4.3	Schnittmengenanalyse	329
3.4.4	Zusammenhänge, Vergleiche	335
3.5	Computerunterstützte Netzwerkanalyse	340
3.5.1	Numerische Auswertung	340
3.5.2	Schaltungssimulation	346
3.6	Mehrpole Netzwerke*	354
3.6.1	Ströme und Spannungen an Mehrpolen	355
3.6.2	Zusammenschaltung von Mehrpolen	358
3.6.3	Mehrtore	368
3.6.4	Torgruppierung	373
3.6.5	Klemmenmanipulationen	375
3.7	Zusammenfassung	381
4	Netzwerktheoreme	387
4.1	Ähnlichkeitssatz	387
4.2	Versatzungs- und Teilungssatz idealer Quellen	388
4.3	Reziprozitäts-Theorem, Umkehrsatz	390
4.4	Ersatz gesteuerter Quellen, Miller-Theorem	392
4.5	Äquivalente Netzwerke*	401
4.6	Duale Netzwerke*	403
4.7	Leistung in elektrischen Netzwerken, Tellegen-Theorem*	407
4.8	Zusammenfassung	411

A	Anhang	413
	A.1 Physikalische Größen und Gleichungen	413
	A.2 Physikalische Größen, Vorzeichen- und Richtungsregeln	422
	A.3 Verzeichnis der wichtigsten Symbole	433
	Literatur	439
	Sachverzeichnis	441