

Springer-Verlag Berlin
Heidelberg GmbH



Rolf Unbehauen

Grundlagen der Elektrotechnik 2

Einschwingvorgänge, Nichtlineare Netzwerke,
Theoretische Erweiterungen

Vierte, völlig neubearbeitete Auflage
mit 250 Abbildungen

Springer-Verlag
Berlin Heidelberg GmbH

Prof. Dr.-Ing. Rolf Unbehauen

Universität Erlangen-Nürnberg

Lehrstuhl für Allgemeine und

Theoretische Elektrotechnik

Cauerstraße 7

91058 Erlangen

ISBN 978-3-662-07578-4

ISBN 978-3-662-07577-7 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-662-07577-7

CIP-Eintrag beantragt

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1972, 1981, 1987 and 1994

Ursprünglich erschienen bei Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1994

Softcover reprint of the hardcover 4th edition 1994

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

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Satz: Reproduktionsfertige Vorlage des Autors

SPIN: 10472330

62/3020 - 5 4 3 2 1 0 - Gedruckt auf säurefreiem Papier

Vorwort

Das vorliegende Buch, das nunmehr in vierter überarbeiteter und wesentlich erweiterter Auflage vorliegt, ist aus Vorlesungen hervorgegangen, die vom Verfasser seit dem Jahre 1965 an der Technischen Fakultät der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg im Rahmen der Grundausbildung für Studenten der Elektrotechnik und Nebenfachstudenten gehalten werden. Das Hauptziel ist eine Einführung in Verfahren zur Beschreibung und Untersuchung elektrischer Schaltungen, wie sie in den verschiedenen Anwendungsbereichen auftreten. Ein besonderes Anliegen ist es, die Schaltungen nicht nur rein systemtheoretisch als elektrische Netzwerke zu betrachten und zu behandeln, indem die Netzwerkelemente und die Kirchhoffschen Gesetze axiomatisch eingeführt werden, sondern die Schaltungen auch physikalisch zu motivieren. Ein ingenieurmäßiges Verständnis der Funktionsweise insbesondere elektronischer Schaltungen erfordert zweifellos auch eine Einsicht in die einschlägigen physikalischen Mechanismen.

Es war notwendig, das Buch in zwei Bände aufzuteilen. Die Aufteilung wurde so vorgenommen, daß die ersten fünf Kapitel im bereits erschienenen Band 1 zusammengefaßt wurden. Der vorliegende Band 2 umfaßt die weiteren Kapitel 6, 7 und 8 sowie zwei Anhänge und eine Sammlung von Aufgaben mit Lösungen. Diese Aufgabensammlung ist zur Intensivierung der Mitarbeit des Lesers gedacht.

Gegenstand von Kapitel 6 ist das Studium des Einschwingverhaltens von zeitinvarianten, linearen Netzwerken. Es stützt sich auf die in den ersten Kapiteln geschaffenen netzwerktheoretischen Grundlagen sowie auf die mathematischen Methoden zur Behandlung von linearen Differentialgleichungen mit konstanten Koeffizienten; es soll den Leser von der Betrachtung zunächst nur einfacher Netzwerke erster bzw. zweiter Ordnung bis zur Untersuchung des zeitlichen Verhaltens von Netzwerken beliebiger Ordnung führen. Hierfür werden das modifizierte Maschenstromverfahren und das modifizierte Knotenpotentialverfahren eingeführt. Breiter Raum wird der Lösung der mit diesen Verfahren verbundenen Differentialgleichungssysteme geschenkt. Dabei werden sowohl reine Zeitbereichsverfahren, die besonderen Einblick in das Zustandekommen der Lösung bieten, als auch die elegante Methode der Laplace-Transformation einschließlich der damit zusammenhängenden Konzepte, wie z. B. dem Konzept der Übertragungsfunktion, behandelt. Auch das Problem der Stabilität zeitinvarianter, linearer Netzwerke wird diskutiert.

Kapitel 7 ist der Beschreibung und Analyse nichtlinearer Netzwerke gewidmet. Hierfür werden zunächst die nichtlinearen Netzwerkelemente eingeführt, welche als Sonderfälle alle bis dahin allein zugelassenen zeitinvarianten, linearen Netzwerkelemente enthalten. Danach findet der Leser eine ausführliche Behandlung von nichtlinearen Widerstandsnetzwerken, also von nichtlinearen Netzwerken, die keine Energiespeicher enthalten. Bevor die Analyse nichtlinearer dynamischer Netzwerke beliebiger Ordnung behandelt wird, werden nichtlineare Netzwerke erster und zweiter Ordnung untersucht. Bei letzteren, deren Verhalten in der Phasenebene anschaulich beschrieben werden kann, interessieren vor allem multistabile Netzwerke und Oszillatoren. Das Problem der numerischen Lösung von gemischten Systemen aus algebraischen Gleichungen und Differentialgleichungen, wie sie bei der Analyse nichtlinearer Netzwerke auftreten, wird gestreift.

Kapitel 8 bietet einen Einblick in die Leitungstheorie, wobei die Grenzen der Theorie der Netzwerke mit konzentrierten Elementen ersichtlich und Möglichkeiten zur Behandlung von Netzwerken mit verteilten Elementen angedeutet werden. In diesem Zusammenhang wird der physikalischen Begründung wieder ein verhältnismäßig breiter Raum geschenkt, wodurch zusammen mit den physikalischen Grundlagen aus Kapitel 1 inklusive der zahlreichen einschlägigen Aufgaben mit Lösungen gleichzeitig ein kurzer Ausblick auf die Feldtheorie gegeben ist.

Die dem vorliegenden Band 2 beigelegten Anhänge E und F enthalten eine Tabelle für Korrespondenzen der Laplace-Transformation sowie Elemente der Quantenmechanik, soweit sie für das Verständnis des im Kapitel 1 behandelten Leitungsmechanismus in Leitern und Halbleitern nützlich sind.

Am Ende des Buches findet der Leser eine umfangreiche Sammlung von Aufgaben mit Lösungen zum Stoff von Band 2, geordnet entsprechend den Themen von Kapitel 6, 7 und 8. Bezüglich der Bezeichnungen sei auch hier angemerkt, daß zeitabhängige Größen in der Regel durch Kleinbuchstaben gekennzeichnet werden, komplexe Größen, die von einem reellwertigen Parameter wie der Kreisfrequenz ω abhängen, sowie Zeigergrößen dagegen durch unterstrichene Buchstaben. Zur Bezeichnung von Matrizen und Vektoren werden fette Buchstaben verwendet. Im übrigen wird die in der Elektrotechnik, Mathematik und Physik übliche Notation benützt.

Das Buch hätte in der nun vorliegenden Form und in der zur Verfügung gestandenen Zeit nicht ohne die massive Unterstützung von Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls für Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik der Universität Erlangen-Nürnberg fertiggestellt werden können. Herr Dr. H. Roßmanith hat mich sowohl bei der inhaltlichen Gestaltung als auch bei der technischen Durchführung des Projekts in besonderer Weise ständig mit Rat und Tat unterstützt. Wertvolle Anregungen und außerordentlich nützliche Unterstützung empfang ich weiterhin durch Herrn Prof. Dr. A. Cichocki, Herrn Dr. U. Forster, Herrn Dipl.-Ing. K. Weinzierl und Herrn Dipl.-Phys. K. Reif. Dank des besonderen Engagements und der großen Sorgfalt von Herrn Dipl.-Ing. R. Finkler war es möglich, die Lösungen der Aufgaben kurzfristig und sachgerecht

abzuschließen. Erwähnt werden soll auch die ständige Unterstützung durch Herrn Dipl.-Ing. H. Brandenstein und Herrn Dipl.-Ing. H. Weglehner. Herr Dipl.-Phys. G. Philipp hat mit wichtigen Kommentaren zum Anhang F beigetragen.

Die Textverarbeitung wurde von Frau H. Geisenfelder-Göhl, Frau H. Schadel, Frau B. Scholz und Frau H. Wolf besorgt, einen großen Teil der Bilder erstellte Frau E. Orth. Den Umbruch und die äußere Form hat Frau H. Schadel mit viel Hingabe gestaltet.

Allen Genannten und den nicht genannten Mitarbeitern, die durch die Formulierung von früheren Prüfungsaufgaben Anregungen geliefert haben, sei an dieser Stelle besonderer Dank ausgesprochen. Für gute Kooperation und das Verständnis für manche Verzögerung sei Herrn Dr. D. Merkle vom Springer-Verlag gedankt.

Erlangen, im August 1994

R. Unbehauen

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-----------|---|----------|
| 6. | Analyse von Einschwingvorgängen | 1 |
| 6.1 | Vorbemerkungen | 1 |
| 6.2 | Einschwingvorgänge in einfachen Netzwerken | 4 |
| 6.2.1 | Der Einschwingvorgang in einem RL-Zweipol | 4 |
| 6.2.2 | Ergänzungen zum Einschwingverhalten eines RL-Zweipols | 10 |
| 6.2.3 | Der Einschwingvorgang in einem RC-Zweipol | 14 |
| 6.2.4 | Der Einschwingvorgang im Schwingkreis | 17 |
| 6.2.5 | Elementar-anschauliche Bestimmung des Einschwingvorgangs bei sprungförmiger Erregung | 25 |
| 6.2.6 | Erregung durch mehrere Quellen, Methode der Superposition | 32 |
| 6.2.7 | Stationäres Verhalten einfacher Netzwerke bei periodischer Erregung | 38 |
| 6.3 | Einschwingvorgänge in allgemeinen Netzwerken | 41 |
| 6.3.1 | Grundsätzliches | 41 |
| 6.3.2 | Lösung des homogenen Gleichungssystems | 51 |
| 6.3.3 | Lösung des inhomogenen Gleichungssystems | 56 |
| 6.3.4 | Beispiele | 60 |
| 6.3.5 | Das modifizierte Knotenpotentialverfahren | 64 |
| 6.3.6 | Die Moden eines Netzwerks | 69 |
| 6.4 | Das Konzept der komplexen Frequenz | 76 |
| 6.4.1 | Die Übertragungsfunktion | 76 |
| 6.4.2 | Übertragungsfunktion und Eigenwerte, Pol-Nullstellen-Darstellung | 83 |
| 6.5 | Asymptotische Stabilität von Netzwerken | 91 |
| 6.5.1 | Das Hurwitzsche Stabilitätskriterium | 91 |
| 6.5.2 | Beispiele | 93 |
| 6.6 | Bestimmung des Einschwingverhaltens mittels Laplace-Transformation | 96 |
| 6.6.1 | Die Laplace-Transformation | 96 |
| 6.6.2 | Grundlegende Korrespondenzen, allgemeine Eigenschaften | 99 |
| 6.6.3 | Lösung eines Differentialgleichungssystems | 104 |
| 6.6.4 | Übertragungsfunktion und Einschwingvorgang | 110 |
| 6.6.5 | Einschwingverhalten eines Übertragernetzwerks, Überlagerungssatz | 116 |
| 6.6.6 | Lösung der Grundgleichungen des Maschenstrom- und des Schnittmenverfahrens mit Hilfe der Laplace-Transformation | 120 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 6.6.7 | Lösung der Zustandsgleichungen mit Hilfe der Laplace-Transformation | 122 |
| 6.6.8 | Degenerierte Netzwerke | 124 |
| 7. | Nichtlineare Netzwerke | 126 |
| 7.1 | Einführung | 126 |
| 7.2 | Die nichtlinearen Netzwerkelemente | 127 |
| 7.2.1 | Die Variablen | 127 |
| 7.2.2 | Der Widerstand | 128 |
| 7.2.3 | Die Induktivität | 139 |
| 7.2.4 | Die Kapazität | 142 |
| 7.2.5 | Gesteuerte Quellen | 144 |
| 7.2.6 | Der Übertrager | 145 |
| 7.3 | Leistung und Energie | 147 |
| 7.4 | Widerstandsnetzwerke | 152 |
| 7.4.1 | Vorbemerkungen | 152 |
| 7.4.2 | Widerstandszweipole | 153 |
| 7.4.3 | Widerstandszweitore | 160 |
| 7.4.4 | Arbeitspunkte | 166 |
| 7.4.5 | Kleinsignalanalyse | 175 |
| 7.4.6 | n-Tore | 183 |
| 7.4.7 | Allgemeine Analyseverfahren | 183 |
| 7.5 | Netzwerke erster Ordnung | 187 |
| 7.5.1 | Die Zustandsbeschreibung | 188 |
| 7.5.2 | Netzwerk mit einer Induktivität | 195 |
| 7.5.3 | Netzwerk mit einer Kapazität | 202 |
| 7.6 | Nichtlineare Netzwerke zweiter Ordnung | 206 |
| 7.6.1 | Die Zustandsbeschreibung | 206 |
| 7.6.2 | Multistabile Netzwerke | 218 |
| 7.6.3 | Das Flipflop aus zwei Invertern | 226 |
| 7.6.4 | Oszillatoren | 236 |
| 7.6.5 | Dynamisches Verhalten eines Reihenschlußmotors | 247 |
| 7.6.6 | Der Schwingkreis mit nichtlinearer Induktivität | 250 |
| 7.7 | Nichtlineare Netzwerke beliebiger Ordnung | 256 |
| 7.7.1 | Vorbemerkungen | 256 |
| 7.7.2 | Das Maschenstromverfahren | 257 |
| 7.7.3 | Das Knotenpotentialverfahren | 260 |
| 7.7.4 | Kleinsignalanalyse | 262 |
| 7.8 | Magnetische Kreise | 267 |
| 7.8.1 | Magnetische Flüsse und Spannungen | 267 |
| 7.8.2 | Knotenregel, Maschenregel | 268 |
| 7.8.3 | Pfadgleichungen für magnetisierbare Bereiche, Luftstrecken und permanet magnetisierte Bereiche | 271 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 7.8.4 | Wahl der magnetischen Zweige | 272 |
| 7.9 | Computergestützte Netzwerkanalyse | 274 |
| 7.9.1 | Allgemeines | 274 |
| 7.9.2 | Das Widerstandsersatznetzwerk..... | 275 |
| 7.9.3 | Analyse des Widerstandsnetzwerks..... | 280 |
| 8. | Netzwerktheoretische Behandlung der homogenen Doppelleitung. | 285 |
| 8.1 | Die Anwendbarkeitsgrenzen der gewöhnlichen Netzwerktheorie | 285 |
| 8.2 | Kapazitäts- und Induktivitätsbelag eines Koaxialkabels..... | 288 |
| 8.3 | Strom- und Spannungswellen längs einer Koaxialleitung..... | 291 |
| 8.4 | Ersatznetzwerke mit infinitesimalen Elementen | 295 |
| 8.5 | Stationäre Lösungen | 297 |
| 8.6 | Abschluß der Leitung mit einem Zweipol..... | 302 |
| 8.7 | Schaltvorgänge..... | 307 |
| | Anhang E: Korrespondenzen der Laplace-Transformation..... | 309 |
| | Anhang F: Elemente der Quantenmechanik..... | 310 |
| | Aufgaben..... | 337 |
| | Lösungen..... | 365 |
| | Literaturverzeichnis..... | 424 |
| | Namen- und Sachverzeichnis..... | 428 |