

Nachrichtentechnik
Herausgegeben von H. Marko
Band 8



Rudolf Elsner

Nichtlineare Schaltungen

Grundlagen,
Berechnungsmethoden,
Anwendungen

Mit 113 Abbildungen

Springer-Verlag
Berlin Heidelberg New York 1981

Dr.-Ing. RUDOLF ELSNER

Professor, Institut für Nachrichtentechnik,
Technische Universität Braunschweig

Dr.-Ing. HANS MARKO

o. Professor, Lehrstuhl für Nachrichtentechnik
Technische Universität München

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Elsner, Rudolf:

Nichtlineare Schaltungen: Grundlagen, Berechnungen, Anwendungen/

Rudolf Elsner. – Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1981.

(Nachrichtentechnik; Bd. 8)

ISBN-13: 978-3-540-10477-3

e-ISBN-13: 978-3-642-81562-1

DOI: 10.1007/978-3-642-81562-1

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdruckes, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten.

Die Vergütungsansprüche des § 54, Abs. 2 UrhG werden durch die 'Verwertungsgesellschaft Wort', München, wahrgenommen.

© Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 1981.

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

Vorwort

Dieses Buch befaßt sich mit nichtlinearen Schaltungen. Eine Schaltung ist eine Zusammenfügung von Bauelementen. Bauelemente sind Widerstände, Induktivitäten, Kapazitäten, Übertrager, Leitungen, Spannungs- und Stromquellen sowie Elektronenröhren, Transistoren oder Operationsverstärker als Steuerelemente. Das Verhalten der Bauelemente in der Schaltung wird durch ihre Kennlinie oder Übertragungseigenschaften bestimmt. Wenn das Verhältnis der Spannung am Bauelement zu dem Strom durch das Bauelement unabhängig von dieser Spannung oder diesem Strom ist, bezeichnet man das Element als linear, wenn es abhängig ist als nichtlinear. Dies gilt genau genommen nur für Widerstände, Induktivitäten und Kapazitäten. Bei den anderen Bauelementen ist die Proportionalität zwischen Ausgangs- und Eingangsgröße das Kennzeichen der Linearität. Ihr Fehlen kennzeichnet die Nichtlinearität. Eine Schaltung heißt nichtlinear, wenn sie mindestens ein nichtlineares Bauelement enthält. Die Zusammenfügung der Bauelemente bezeichnet man auch als Netzwerk. Treten in der Schaltung nur Gleichstrom- oder Gleichspannungsquellen auf, so wird sie als Gleichstromnetzwerk bezeichnet. Treten auch Quellen mit zeitlich periodischem Verlauf der Ausgangsgrößen auf, so wird diese Schaltung als Wechselstromnetzwerk bezeichnet.

Nach einigen grundlegenden Betrachtungen (Kap. 1 und 2) werden Verfahren zur Analyse von Gleichstrom- (Kap. 3) und Wechselstromnetzwerken (Kap. 4) gezeigt. Dabei wird als Analyse die Bestimmung der Ströme und Spannungen im Netzwerk bezeichnet. In Kap. 5 werden Methoden zur Bestimmung des Einschwingverhaltens nichtlinearer Schaltungen dargestellt. Eine Theorie nichtlinearer Systeme mit beliebigem Eingangssignal bringt Kap. 6. Dabei wird als System ein Netzwerk bezeichnet, dessen Schaltungsaufbau im einzelnen unbekannt bleiben kann und dessen lineares und nichtlineares Verhalten durch geeignete Gewichtsfunktionen beschrieben wird. Kap. 7 und 8 weisen auf Ansätze zur Berechnung von Ausbreitungsvorgängen auf Leitungen und des Übertragungsverhaltens von Vierpolen hin, wenn die Eigenschaften dieser Elemente oder Schaltungen nichtli-

near sind. Wellenausbreitungsvorgänge in nichtlinearen Medien werden nicht behandelt. Die nächsten beiden Kapitel befassen sich mit Anwendungen und Störwirkungen nichtlinearer Bauelemente. Das letzte Kapitel zeigt die Wirkung nichtlinearer Kennlinien auf die statistischen Eigenschaften stochastischer Signale.

Zeitlich konstante Größen werden in der Regel mit Großbuchstaben, zeitlich veränderliche mit Kleinbuchstaben bezeichnet. Unabhängig davon, ob das Bauelement linear oder nichtlinear ist, ergibt sich aus der elektrischen Ladung q der Strom $i = dq/dt$ und aus dem magnetischen Windungsfluß ψ die Spannung $u = d\psi/dt$. In einer Liste am Ende des Buches werden einige Literaturstellen angegeben, die spezielle Probleme nichtlinearer Schaltungen, z.T. ausführlicher als in diesem Buch möglich, behandeln.

Der Inhalt dieses Buches ist aus der Vorlesung "Nichtlineare Elektrotechnik" entstanden. Bauelemente mit nichtlinearer Kennlinie sind in der Elektrotechnik, insbesondere in der Nachrichten- und Hochfrequenztechnik seit ihren Anfängen bekannt. Solche Kennlinien treten nicht nur als störende Abweichungen von der Linearität auf, sondern werden in vielfältigen Anwendungen eingesetzt. Daher sind in der Elektrotechnik eine große Zahl von Methoden entwickelt worden, um Schaltungen mit nichtlinearen Bauelementen rechnerisch erfassen und ihre Eigenschaften angeben zu können.

Dieses Buch versucht, diese Methode in einen Zusammenhang zu stellen. Diesen Zusammenhang liefern die in der Elektrotechnik weit entwickelten linearen Berechnungsmethoden, so daß der lineare Fall sich hier jeweils als einfachster Grenzfall der nichtlinearen Beschreibung ergibt. Das Buch ist daher weder anwendungsorientiert, noch betont es die mathematischen Lösungen der nichtlinearen Probleme, sondern beschreibt und begründet Methoden und zeigt ihre Anwendbarkeit an speziell ausgesuchten Fällen. Eine Reihe dieser Anwendungen wurden von meinen Mitarbeitern untersucht, denen hier mein besonderer Dank gilt.

Am Schluß dieses Vorworts möchte ich nicht unerwähnt lassen, daß meine verehrten Lehrer Herr Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e.h. L. Pungs und Herr Prof. Dr.-Ing. F. Kirschstein mich zur Beschäftigung mit dem Gebiet der nichtlinearen elektrischen Schaltungen angeregt haben, da sie als Nachrichtentechniker von seiner Bedeutung überzeugt waren.

Inhaltsverzeichnis

<u>1 Bauelemente mit nichtlinearen Kennlinien</u>	1
1.1 Bauelemente	1
1.2 Kennlinien	3
<u>2 Mathematische Erfassung nichtlinearer Kennlinien</u>	6
2.1 Prinzip des kleinsten quadratischen Fehlers	6
2.2 Rektifikation	8
2.2.1 Logarithmische Rektifikation	8
2.2.2 Doppellogarithmische Rektifikation	8
2.2.3 Rektifikation quadratischer Parabeln	9
2.2.4 Rektifikation von Hyperbeln	9
2.3 Harmonische Analyse	10
<u>3 Analyse von Gleichstromnetzwerken</u>	13
3.1 Regeln zur Analyse	13
3.1.1 Allgemeine Regeln	13
3.1.2 Zusammenschaltung nichtlinearer Widerständen	13
3.1.3 Aktive nichtlineare Zweipole	14
3.2 Berechnungsmethoden	16
3.2.1 Netzwerk mit einem nichtlinearen Widerstand	16
3.2.2 Netzwerk mit zwei nichtlinearen Widerständen	17
3.2.3 Netzwerk mit mehreren nichtlinearen Widerständen	17
3.2.4 Magnetische Kreise	18
<u>4 Analyse von Wechselstromnetzwerken</u>	19
4.1 Ansteuerart	19
4.2 Richtkennlinienfelder	24
4.2.1 Richtkennlinienfelder einer Diode	24
4.2.2 Richtkennlinienfelder nichtlinearer Reaktanzen	27

4.2.3 Richtkennlinienfelder nichtlinearer Bauelemente in Gegentaktschaltungen	28
4.3 Netzwerke mit einer sinusförmigen Quelle	33
4.4 Netzwerke mit zwei sinusförmigen Quellen	35
4.4.1 Leistungsbeziehungen für den nichtlinearen Widerstand	36
4.4.2 Leistungsbeziehungen für eine nichtlineare Kapazität .	38
4.4.3 Kleinsignaltheorie	40
4.5 Steuerkennlinienfelder	43
<u>5 Einschwingverhalten nichtlinearer Schaltungen</u>	<u>46</u>
5.1 Lösung nichtlinearer Differentialgleichungen	46
5.1.1 Nichtlineare Differentialgleichung 1. Ordnung mit zeitunabhängiger Störungsfunktion	46
5.1.2 Nichtlineare Differentialgleichung 2. Ordnung bei einem verlustfreien Schwingkreis	48
5.2 Grafische Lösungsmethoden	49
5.2.1 Isoklinen-Methode	49
5.2.2 Methode der Phasenebene	51
5.2.3 δ -Methode	53
5.3 Spezielle nichtlineare Differentialgleichungen	54
5.3.1 Duffingsche Differentialgleichung	54
5.3.2 Van der Pol'sche Differentialgleichung	56
5.3.3 Rayleighsche Differentialgleichung	56
<u>6 Systemtheorie rückwirkungsfreier Übertragungsglieder</u>	<u>59</u>
6.1 Quadratisches Potenzsystem	60
6.1.1 Gewichtsfunktion des quadratischen Potenzsystems	61
6.1.2 Übertragungsfunktion des quadratischen Potenzsystems .	65
6.1.3 Messung der Übertragungsfunktion	67
6.2 Kubisches Potenzsystem	68
6.3 Berechnung des Ausgangssignals eines nichtlinearen Potenzsystems im Frequenzbereich	69
6.4 Gedächtnisbehaftete Polynomsysteme	73
6.5 Nichtlineare Systeme in zeitdiskreter Darstellung	76
<u>7 Ansätze zu einer nichtlinearen Leitungstheorie</u>	<u>77</u>
<u>8 Ansätze zu einer nichtlinearen Vierpoltheorie</u>	<u>80</u>
<u>9 Anwendungen nichtlinearer Schaltungen</u>	<u>81</u>
9.1 Frequenzvervielfacher	82
9.1.1 Frequenzverdoppler mit Kapazitätsdiode	82

9.1.2	Frequenzverdreifacher mit Kapazitätsdiode	86
9.2	Frequenzteiler	88
9.2.1	Parametron	88
9.2.2	Magnetischer Frequenzhalbierer	91
9.2.3	Frequenzdritteler	100
9.2.4	Frequenzteilung durch Speicherwirkung	101
9.3	Parametrische Schaltungen	103
9.3.1	Parametrischer Umsetzer mit Kapazitätsdiode	103
9.3.2	Parametrischer Umsetzer mit nichtlinearem Widerstand	106
9.3.3	Parametrischer Verstärker mit Kapazitätsdiode	107
9.4	Steuerung	109
9.4.1	Eigensteuerkennlinien	110
9.4.2	Störsteuerkennlinien	113
9.5	Frequenzerzeugung	115
<u>10</u>	<u>Nichtlineare Verzerrungen</u>	<u>121</u>
10.1	Verzerrungen durch nichtlineare Kennlinien	121
10.2	Nebensprechen durch nichtlineare Verzerrungen	123
10.3	Linearisierung gedächtnisbehafteter Polynomsysteme	128
<u>11</u>	<u>Einfluß nichtlinearer Kennlinien auf statistische Signal-</u> <u>eigenschaften</u>	<u>130</u>
<u>Literaturverzeichnis</u>	<u>133</u>
<u>Sachverzeichnis</u>	<u>135</u>