

Leitfäden der Informatik

Reinhold Paul

**Elektrotechnik und Elektronik
für Informatiker**

Band 1 Grundgebiete der Elektrotechnik

Leitfäden der Informatik

Herausgegeben von

Prof. Dr. Hans-Jürgen Appelrath, Oldenburg

Prof. Dr. Volker Claus, Stuttgart

Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Günter Hotz, Saarbrücken

Prof. Dr. Lutz Richter, Zürich

Prof. Dr. Wolfried Stucky, Karlsruhe

Prof. Dr. Klaus Waldschmidt, Frankfurt

Die Leitfäden der Informatik behandeln

- Themen aus der Theoretischen, Praktischen und Technischen Informatik entsprechend dem aktuellen Stand der Wissenschaft in einer systematischen und fundierten Darstellung des jeweiligen Gebietes.
- Methoden und Ergebnisse der Informatik, aufgearbeitet und dargestellt aus Sicht der Anwendungen in einer für Anwender verständlichen, exakten und präzisen Form.

Die Bände der Reihe wenden sich zum einen als Grundlage und Ergänzung zu Vorlesungen der Informatik an Studierende und Lehrende in Informatik-Studiengängen an Hochschulen, zum anderen an „Praktiker“, die sich einen Überblick über die Anwendungen der Informatik(-Methoden) verschaffen wollen; sie dienen aber auch in Wirtschaft, Industrie und Verwaltung tätigen Informatikern und Informatikerinnen zur Fortbildung in praxisrelevanten Fragestellungen ihres Faches.

Elektrotechnik und Elektronik für Informatiker

Band 1 Grundgebiete der Elektrotechnik

Von Prof. Dr.-Ing. Reinhold Paul
Technische Universität Hamburg-Harburg

2., durchgesehene Auflage
Mit 282 Bildern und 54 Tafeln



B. G. Teubner Stuttgart · Leipzig 1999

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Paul, Reinhold:

Elektrotechnik und Elektronik für Informatiker / von Reinhold Paul. –

Stuttgart ; Leipzig : Teubner

Bd. 1. Grundgebiete der Elektrotechnik. – 2., durchges. Aufl. –
1999

(Leitfäden der Informatik)

ISBN-13: 978-3-519-12126-8

e-ISBN-13: 978-3-322-84866-6

DOI: 10.1007/978-3-322-84866-6

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt besonders für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

© B. G. Teubner Stuttgart 1994

Einband: Peter Pfitz, Stuttgart

Vorwort

Der vorliegende Gesamttext entstand aus dem Anliegen, Informatikern, aber auch Ingenieuren und Wissenschaftlern, die keinen Bezug zur Elektrotechnik/Elektronik hatten, eine angemessene Einführung in Schwerpunkte dieses Fachgebietes zu geben. Die Notwendigkeit dürfte unbestritten sein, nicht zuletzt ist gerade der Computer ein überzeugendes Produkt der elektronischen Industrie selbst. Auch für die Einbindung des Rechners über Sensoren und Aktoren in die technische Umwelt oder in Kommunikationsnetze sind elektronische Grundkenntnisse für jeden Informatiker höchst nützlich.

Dies ist einer der Gründe, weshalb Einführung in die Elektrotechnik/Elektronik in den einschlägigen Ausbildungsempfehlungen vorgesehen ist. Die Zielstellung bedingt von Anfang an eine Stoffbeschränkung auf wirkliche Grundkenntnisse, die mit minimalen Mathematikkenntnissen auskommen und dafür mehr Wert auf die anschauliche Darstellung legen. Häufiger Bezug auf uns täglich umgebende elektrotechnische Erscheinungen soll den Leser über Stoffklippen hinweghelfen und ein Gefühl dafür vermitteln, was sich z.B. hinter Begriffen wie analoge und digitale Signalverarbeitung und -übertragung, Wellenausbreitung u.a. verbirgt.

Der gesamte Stoff wurde auf zwei Bände verteilt: Der vorliegende erste Band enthält hauptsächlich die elektrotechnischen Grundbegriffe und Phänomene, die Grundlagen der Netzwerke (Stromkreise) und ihrer Netzwerkelemente, Wechselstromnetzwerke (als Grundlage einer allgemein zeitveränderlichen Signalübertragung), einen kurzen Abriss der Signal- und Systembegriffe sowie eine phänomenologische Einführung in das elektromagnetische Feld (das in konzentrierter Form z.B. in den Grundelementen auftritt).

Der folgende Band umfaßt die typischen Eigenschaften der wichtigsten Halbleiterbauelemente, analoge und vor allem digitale Schaltungen und Schaltkreise, digitale Systeme sowie Signalverarbeitung in solchen System und die Signalübertragung zwischen Systemen.

Zur Verstärkung der Lernmotivation wurden jedem Abschnitt Lernziele vorgegestellt und am Ende in Form von Lernorientierungen die wichtigsten Erkenntnisse thesenartig zusammengefaßt. Regelmäßig in den Text eingebaute

6 Vorwort

Aufgaben (mit Lösungen) und eine Reihe typischer praxisbezogener Beispiele vermitteln dem Leser sehr bald ein Gefühl für den jeweiligen Fortschritt. Bei der Abfassung des Textes stand mir – neben den eigenen Lehr- und Übungserfahrungen – vor allem Herr Prof. Dr. Waldschmidt sachwaltend zur Seite. Gerade von ihm kamen viele wertvolle Hinweise zur Stoffakzentuierung für Informatiker.

Herr Dr. Spuhler vom B.G. Teubner Verlag sorgte zusammen mit seinen Mitarbeitern – insbesondere Herrn Kretschmer – für die rasche drucktechnische Abwicklung.

Hamburg, Juli 1993

R. Paul

Vorwort zur zweiten Auflage

Die vorliegende Neuauflage enthält einige Druckfehlerberichtigungen, die mir von Fachkollegen, insbesondere von Herrn Dr.-Ing. habil. H. G. Schulz, TU Dresden, zugeleitet wurden. Dafür bin ich sehr dankbar.

Dem Verlag danke ich für die angenehme Zusammenarbeit und das Eingehen auf meine Wünsche.

Hamburg, im Herbst 1998

R. Paul

Inhalt

1	Grundbegriffe	17
1.1	Physikalische Größen und Maßeinheiten	22
1.2	Elektrische Ladung	26
1.3	Elektrisches Feld, elektrische Feldstärke, elektrische Spannung	30
1.3.1	Elektrische Feldstärke	30
1.3.2	Elektrische Spannung	32
1.3.3	Maschensatz	38
1.4	Elektrischer Strom. Stromdichte	40
1.4.1	Elektrische Stromstärke	40
1.4.2	Stromdichte	47
1.4.3	Knotensatz	50
1.5	Energie, Arbeit und Leistung im Stromkreis	55
1.5.1	Energie, Arbeit, Leistung	55
1.5.2	Energie und Leistung am Zweipol	58
1.5.3	Wirkungsgrad	60
	Lernorientierungen, Wiederholungsfragen	61
2	Einfache Stromkreise und ihre Bauelemente.	
	Netzwerkelemente	65
2.1	Die Grundelemente elektrischer Stromkreise	69
2.1.1	Unabhängige Quellen	69
2.2	Widerstand. Resistiver Zweipol	73
2.2.1	Linearer Widerstand. Ohmsches Gesetz	75
2.2.2	Einfache Zusammenschaltungen von linearen Widerständen . .	81
2.2.3	Nichtlineare resistive Zweipole	85
2.2.4	Temperatureinfluß auf Widerstandszweipole	90
2.3	Kondensator. Kapazitiver Zweipol	95
2.3.1	Grundprinzip des Kondensators	95
2.3.2	Der lineare kapazitive Zweipol als Netzwerkelement	99
2.3.3	Zusammenschaltungen von linearen Kapazitäten	103

8 Inhalt

2.3.4	Kondensator als Bauelement	106
2.3.5	Nichtlineare kapazitive Zweipole	112
2.4	Spule. Induktiver Zweipol	113
2.4.1	Grundprinzip der Spule	113
2.4.2	Der lineare induktive Zweipol als Netzwerkelement	118
2.4.3	Zusammenschaltung von linearen Induktivitäten	123
2.4.4	Spule als Bauelement	124
2.4.5	Nichtlineare induktive Zweipole	130
2.4.6	Gegeninduktion. Magnetisch verkoppelte Spulen	130
2.5	Mehrpolelemente	134
2.5.1	Gesteuerte Quellen	135
2.5.2	Passive Mehrpole	142
	Lernorientierungen, Wiederholungsfragen	144
3	Analyse elektrischer Netzwerke	148
3.1	Zusammenspiel aktiver-passiver Zweipol. Grundstromkreis . .	149
3.1.1	Reale unabhängige Quelle. Ersatzschaltungen des aktiven Zweipols	149
3.1.2	Der Grundstromkreis	154
3.1.3	Nichtlineare Zweipole im Grundstromkreis	159
3.1.4	Graphische Behandlung des nichtlinearen Grundstromkreises .	162
3.1.5	Analytische und numerische Lösungsverfahren	168
3.1.6	Grundstromkreis im Kleinsignalbetrieb	170
3.2	Zweipoltheorie	177
3.3	Überlagerungssatz	180
3.4	Allgemeine Netzwerkanalyse	182
3.4.1	Zweigstromanalyse	185
3.4.2	Maschenstromanalyse	188
3.4.3	Knotenspannungsanalyse	193
	Lernorientierungen, Wiederholungsfragen	201
4	Netzwerke bei sinusförmiger und zeitveränderlicher Erregung. Wechselstromschaltungen	205
4.1	Harmonische Zeitfunktionen	208
4.1.1	Sinusförmige Zeitfunktion	208
4.1.2	Mittelwerte periodischer Größen	212

4.1.3	Addition (Subtraktion) zweier Sinusspannungen gleicher Frequenz	219
4.2	Verhalten der Grundelemente und einfacher Zusammenschaltungen bei Sinusgrößen im Zeitbereich	221
4.2.1	Grundelemente	221
4.2.2	Zusammenschaltung von Grundelementen	226
4.3	Netzwerkanalyse im Frequenzbereich. Transformation in die komplexe Ebene	228
4.3.1	Eigenschaften komplexer Größen, Rechenoperationen	230
4.3.2	Zeigerdarstellung von Spannung und Strom	235
4.3.3	Differentiation und Integration rotierender Zeiger	238
4.3.4	Komplexer Widerstand und Leitwert. Widerstands-, Leitwertoperator	242
4.3.5	Widerstands-/Leitwertoperatoren der Grundelemente <i>RLC</i>	246
4.3.6	Zusammenfassung: Netzwerkanalyse im Frequenzbereich	254
4.3.7	Frequenzgang $\underline{F}(j\omega)$	262
4.4	Darstellung von Netzwerkeigenschaften. Netzwerke bei veränderlicher Frequenz	264
4.4.1	Zeigerdarstellung, Zeigerbild	264
4.4.2	Amplitude und Phase des Frequenzganges	268
4.4.3	Scheinwiderstandsdiagramm	274
4.4.4	Ortskurven	275
4.5	Leistung und Energie im Wechselstromkreis	279
4.5.1	Leistungsbegriffe	279
4.5.2	Leistungsanpassung	286
4.6	Typische Wechselstromschaltungen	288
4.6.1	Lineare Vierpole	290
4.6.2	Resonanzkreis	308
4.6.3	Vierpole mit Filtereigenschaften	314
4.6.4	Besondere Wechselstromschaltungen	326
4.6.5	Übertrager, Transformator	331
4.7	Signale und Netzwerke (Systeme) im Frequenzbereich	337
4.7.1	Allgemeine Netzwerkerregungen. Signalbegriff	343
4.7.2	Periodische Signale. Fourierreihe	349
4.7.3	Aperiodische Signale. Fouriertransformation	354
	Lernorientierungen, Wiederholungsfragen	364

10 Inhalt

5	Ausgleichsvorgänge. Netzwerke bei beliebiger Erregung	375
5.1	Ausgleichs-, Schaltvorgänge im Zeitbereich	375
5.1.1	Netzwerke mit einem Energiespeicher	380
5.1.2	Netzwerke mit einem Energiespeicher und beliebiger Erregerfunktion	391
5.1.3	Netzwerke mit zwei Energiespeichern	393
5.2	Ausgleichsvorgänge im Frequenzbereich. Laplace-Transformation	398
5.2.1	Überblick und Definition	398
5.2.2	Laplace-Transformation und Netzwerkdifferentialgleichung . .	407
5.2.3	Laplace-Transformation des Netzwerkes	408
5.3	Die Übertragungseigenschaften von Netzwerken und ihre Beschreibungsmöglichkeiten	410
5.3.1	Beschreibung des Netzwerkes durch die Differentialgleichung .	411
5.3.2	Beschreibung des Übertragungsverhaltens durch Antwortfunktionen	413
5.3.3	Die Übertragungsfunktion als verallgemeinertes Eingangs-/Ausgangsverhalten im Bildbereich	420
5.3.4	Eigenschaften und Darstellungen der Übertragungsfunktion .	428
	Lernorientierungen, Wiederholungsfragen	431
6	Das elektromagnetische Feld	435
6.1	Feldbegriff	435
6.2	Elektrisches Feld	437
6.2.1	Elektrische Feldstärke und Potential	437
6.2.2	Das elektrostatische Feld. Feld im Nichtleiter	441
6.2.3	Das Strömungsfeld. Feld im Leiter	452
6.3	Magnetisches Feld. Verknüpfung zwischen elektrischem und magnetischem Feld	473
6.3.1	Feldgrößen des Magnetfeldes. Durchflutungsgesetz	475
6.3.2	Materie im Magnetfeld	483
6.3.3	Integralgrößen des magnetischen Feldes. Magnetischer Kreis .	486
6.3.4	Spule, Induktivität	493
6.3.5	Induktionsgesetz. Verkopplung magnetische ↔ elektrische Größen	494
6.3.6	Kraftwirkung und Energie des Magnetfeldes	497
6.3.7	Magnetische Energie	502

6.4	Elektromagnetische Felder und Wellen	503
6.4.1	Maxwellsche Gleichungen	504
6.4.2	Einteilung elektromagnetischer Felder	512
6.4.3	Elektromagnetische Wellen	512
	Lernorientierungen, Wiederholungsfragen	517
	Literaturverzeichnis	521
	Anhang	522
	Übungsaufgaben	524
	Lösungen	534
	Sachverzeichnis	548