

LEHRBUCH

Karl Küpfmüller
Wolfgang Mathis
Albrecht Reibiger

Theoretische Elektrotechnik

Eine Einführung

19. Auflage



 Springer Vieweg

LEHRBUCH

Karl Küpfmüller
Wolfgang Mathis
Albrecht Reibiger

Theoretische Elektrotechnik

Eine Einführung

19. Auflage



 Springer Vieweg

Springer-Lehrbuch

Karl Küpfmüller
Wolfgang Mathis
Albrecht Reibiger

Theoretische Elektrotechnik

Eine Einführung

19., aktualisierte Auflage

Professor Dr.-Ing. Karl E. h. Küpfmüller †
em. o. Professor an der Technischen
Hochschule Darmstadt

Professor Dr.-Ing. habil. Wolfgang Mathis
Leibniz Universität Hannover
Institut für Theoretische Elektrotechnik
Appelstr. 9A
30167 Hannover
Email: mathis@tet.uni-hannover.de

Professor Dr.-Ing. habil. Albrecht Reibiger
Technische Universität Dresden
Institut für Grundlagen der Elektrotechnik
und Elektronik
Mommensenstr. 13
01062 Dresden
Email: reibiger@iee.et.tu-dresden.de

Extras im Web

<http://www.springer.com/978-3-642-37939-0>

ISSN 0937-7433

ISBN 978-3-642-37939-0

DOI 10.1007/978-3-642-37940-6

ISBN 978-3-642-37940-6 (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 1932, 1952, 1955, 1959, 1962, 1965, 1968, 1973, 1984, 1988, 1990, 1993, 2000, 2005, 2007, 2008, 2013

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

Unseren Frauen Barbara und Christine gewidmet

Vorwort

Erweiterte 19. Auflage:

Auch hinsichtlich der 18. Auflage haben wir viel Zuspruch, aber auch einige – zumeist konstruktive – Kritik erhalten.

Wir sind auf diese Kritik eingegangen, indem wir zahlreiche Stellen des Buches überarbeitet haben. Weiterhin wurden einige Erweiterungen eingefügt. Insbesondere wurde der Abschnitt „Potenzial- und Kapazitätskoeffizienten“ grundlegend überarbeitet und mit zusätzlicher Literatur versehen worden. Das gilt auch für die Abschnitte „Kirchhoff-Integral für Stromfäden“ und „Induktivitätskoeffizienten“, die zusammen mit M. Sc. Daniel Stahl (TET, Leibniz Universität Hannover) neu gestaltet wurden.

Wir hoffen, dass auch diese neue 19. Auflage wieder Anklang findet und danken sehr herzlich den folgenden aufmerksamen Lesern, die uns auf eine Reihe von Fehlern hingewiesen haben: Prof. Dr. Reinhold Unterricker (Hochschule München), Dr. Stefan Lahres (Voith Siemens Hydro, Heidenheim), Dipl.-Ing. Michael Freese (TU Dortmund), Marie Mathis (Braunschweig). Natürlich wären wir auch in Zukunft allen Lesern sehr dankbar, wenn wir Anmerkungen zum Buch und Hinweise auf Fehler erhalten würden.

Wir haben oben darauf hingewiesen, dass aus Platzgründen nicht sämtliche Inhalte der 15. Auflage der „Theoretischen Elektrotechnik“ übernommen werden konnten. In Absprache mit dem Springer-Verlag haben wir uns entschieden, einige, eher in den Hintergrund getretene, aber dennoch interessante Aspekte der theoretischen Elektrotechnik auf der Homepage des Buches verfügbar zu machen. Dazu gehören die Abschnitte über Elektronenoptik 14.5, Stromleitung in Gasen 37.1 und Elektronenröhren 38, deren Überschriften an den sachlich richtigen Stellen des Buches und im Gesamtinhaltsverzeichnis erscheinen (mit **(Internet)** gekennzeichnet), die in vollständiger Form als PDF-File von der Homepage

<http://www.springer.com/978-3-642-37939-0>

Schließlich danken wir M. Sc. Daniel Stahl (TET, Leibniz Universität Hannover) und Dipl.-Math. Christian Reibiger (INM, TU Dresden) sehr herzlich für die Hilfe bei der Erstellung des vorliegenden Buchmanuskripts in L^AT_EX.

Hannover und Dresden, Juni 2013 *Wolfgang Mathis und Albrecht Reibiger*

Vorwort zur 16. Auflage:

Im Jahre 1932 hat Karl Küpfmüller das erste Vorwort zu seinem Buch „Einführung in die Theoretische Elektrotechnik“ verfasst, aber es ist, wie man sich leicht überzeugen kann, nach wie vor ebenso aktuell wie sein Plan, der Ingenieurwissenschaft *Elektrotechnik* ein einheitliches Fundament zu verschaffen. In den Jahren nach dem erstmaligen Erscheinen dieses Buches wurden vor allem in der Nachrichtentechnik zahlreiche neue Konzepte entwickelt, die sich wie die Informationstheorie nicht mehr unter dem Dach einer feldtheoretisch und netzwerktheoretisch orientierten Elektrotechnik zusammenfassen lassen. Mit der Regelungstechnik hat sich nach dem 2. Weltkrieg eine neue Theorie entwickelt, die sich zwar ursprünglich aus der Netzwerktheorie entwickelte, aber inzwischen mit anderen Disziplinen wie Maschinenbau und Verfahrenstechnik ein neuer ingenieurwissenschaftlicher Bereich mit interdisziplinärer Ausprägung geworden ist. Schließlich ist zumindest der materialwissenschaftliche Teil der Halbleiterschaltungstechnik eine offenbar unauflösliche Verbindung mit der Physik und Chemie eingegangen. Anstatt dasjenige, was man unter *Theoretischer Elektrotechnik* versteht, immer weiter auszudehnen, beschränken wir uns ganz im Sinne von Küpfmüllers erster Auflage weitgehend auf die netzwerk- und feldtheoretischen Grundlagen der Elektrotechnik und wagen allenfalls hier und da einen Blick auf das, was auch noch zur Elektrotechnik gehört. Bevor wir näher darauf eingehen, was sich an Aufbau und Inhalt dieser 16. Auflage der *Einführung in die Theoretische Elektrotechnik* geändert hat, wollen wir zunächst noch einmal Karl Küpfmüller selbst sprechen lassen, indem wir das im Jahre 1932 noch an der Technischen Hochschule Danzig verfasste Vorwort voranstellen:

„Die Elektrotechnik bildet heute ein so großes und vielfach verzweigtes Gebiet der Ingenieurwissenschaften, dass es für den einzelnen nicht möglich ist, dieses Gebiet auch nur einigermaßen kennenzulernen; in noch stärkerem Maße muss sich der am Fortschritt der Technik arbeitende Ingenieur auf die Betätigung in einem verhältnismäßig engen Teilgebiet beschränken. Für das Studium an den Hochschulen, das nicht angenähert so weit spezialisiert werden kann, wie es die spätere Tätigkeit des Studierenden erfordern würde, ergibt sich daraus die Notwendigkeit einer Beschränkung auf diejenigen Grundlagen,

die möglichst vielen Gebieten gemeinsam sind. Das sind insbesondere die den elektrotechnischen Anwendungen zugrunde liegenden physikalischen Gesetze.

Es gibt heute eine Reihe von vorzüglichen Einführungen in die einfacheren Grundgesetze der Elektrotechnik. Es gibt ferner eine ausgezeichnete Spezialliteratur, die sich mit den Anwendungen der Grundgesetze beschäftigt. Hinsichtlich der theoretischen Vorbildung sind nun die Anforderungen an die allgemeinen Kenntnisse des wissenschaftlich tätigen Ingenieurs in den letzten Jahren bedeutend gewachsen, und wenn hier auch sehr gute physikalische Lehrbücher zur Verfügung stehen, so folgen doch Schwierigkeiten daraus, dass sich die Sprache der Elektrotechnik zum Teil nicht unerheblich von der der Physik entfernt hat und dass der Studierende nicht in der Lage ist, das für ihn Notwendige aus der großen Stoffmenge herauszufinden.

In dem vorliegenden Buch habe ich versucht, eine *Einführung in die Vorstellungen und die Methoden* zu geben, deren *Kenntnis* nach meinen Erfahrungen *heute zur Allgemeinbildung des an der Weiterentwicklung der Elektrotechnik interessierten Ingenieurs gehören muss*. Damit ergab sich eine Abgrenzung des Stoffes gegen die mehr physikalischen Lehrbücher. Eine weitere Einschränkung wurde noch im Hinblick auf die vorhandene einführende Literatur der Elektrotechnik vorgenommen, die gewisse Gebiete sehr ausführlich behandelt. Diese Gebiete konnten daher hier etwas zurückgestellt werden. Ebenso wurde kein Versuch gemacht, die Theorie der elektrischen Maschinen aufzunehmen; sie stellt ein hochentwickeltes Spezialgebiet dar, das ein besonderes Studium erfordert.

Die *Stoffeinteilung* ist keine systematische, sondern so gewählt, wie es für das Verständnis am zweckmäßigsten erschien. Daraus folgte eine Einteilung in einzelne Abschnitte, die nur verhältnismäßig lose zusammenhängen und z.T. ineinander greifen, die aber ungefähr von Leichterem zu Schwierigerem fortschreiten. Der Stoff ist so weit fortgeführt, wie es zum Verständnis und zum Studium der Spezialliteratur notwendig ist; insbesondere ist bei der Darstellung auch den Bedürfnissen von Studierenden der Physik, die auf dem Gebiet der Elektrotechnik tätig sein wollen, Rechnung getragen¹.

Die von Küpfmüller geschilderten Vorstellungen² über die Bedeutung von Theorie in der Elektrotechnik und ihr Verhältnis zu den technischen Anwendungen sind, so glauben wir, nach wie vor – und vielleicht sogar mehr denn

¹ Küpfmüllers Vorwort endete mit einigen Hinweisen über die Vorzüge von *Größengleichungen*, die in der heutigen Literatur vollständig umgesetzt sind. Daher müssen diese Ausführungen für heutige Leserinnen und Leser unverständlich bleiben und entfallen daher.

² Küpfmüllers Vorwort von 1932 endete mit einigen Danksagungen: „Für eine Reihe von Anregungen bei der Auswahl des Stoffes bin ich Herrn Dir. Dr. phil. Dr.-Ing. E.h. F. Lüschen zu Dank verpflichtet. Ferner danke ich den Herren Dr.-Ing. H. Jenss und Dipl.-Ing. H. Werrmann für ihre freundliche Mühewaltung bei der Durchsicht des Manuskripts und der Korrekturen. Der Verlagsbuchhandlung danke ich für das bereitwilligem Eingehen auf meine Wünsche“.

je – richtig. Küpfmüllers „Theoretische Elektrotechnik“ kann auch mehr als siebenzig Jahre nach dem Erscheinen der ersten Auflage trotz Computer und Internet und der dennoch fast unübersehbaren Fülle von Literatur auf diesem Gebiet ihren Platz in den Bücherregalen von ElektrotechnikerInnen und InformationstechnikerInnen finden. Ein Grund dafür mag sein, dass es Küpfmüllers nicht darum ging, ein neues Buch über elektromagnetische Felder zu schreiben, denn auch zu seiner Zeit gab es hervorragende Werke wie etwa Breisigs „Theoretische Telegraphie“ aus dem Jahre 1910. Vielmehr wollte er auf einem theoretisch durchaus anspruchsvollen Niveau eine Gesamtschau über diejenigen Bereiche der Elektrotechnik bieten, bei denen man durch Probieren nicht weiterkommt und daher Theorie benotigt. Eine solche Intention kann heute aus den oben genannten Gründen kein Ziel mehr sein; dazu ist die theoretische Basis der Elektrotechnik und Informationstechnik heute zu breit geworden. Beschränkt man sich jedoch auf die netzwerktheoretischen und feldtheoretischen Grundlagen, dann ist Küpfmüllers Unternehmung auch heute noch sinnvoll. Deshalb haben wir genau diesen Weg beschritten, als wir uns an die Neubearbeitung der „Theoretischen Elektrotechnik“ gemacht haben.

Nicht die Inhalte sondern die Form der „Theoretischen Elektrotechnik“ ist ein wenig in die Jahre gekommen. Das liegt nicht zuletzt daran, dass bisher keine *elektronische Form* von Küpfmüllers Buch vorlag. So haben G. Bosse, der die 11. Auflage bearbeitete, und G. Kohn, der die 12. bis 14. Auflage betreute³, wobei Änderungen in die vorhandene Buchvorlage eingearbeitet werden mussten. Dadurch konnten strukturelle Veränderungen nicht ausgeführt werden. Als wir die Arbeiten an der 16. Auflage aufnahmen, war es das Ziel, einen strukturellen Neuaufbau durchzuführen und dabei die Küpfmüllersche Art der Aufbereitung des Materials unbedingt zu beachten. Die Leserinnen und Leser mogen beurteilen, ob das gelungen ist. Zur besseren Orientierung wollen wir jedoch die Grundgedanken der neuen Struktur des Buches skizzieren. Dabei ist das Buch in Teile, Abschnitte und Unterabschnitte gegliedert.

Bevor wir näher auf die Grundelemente der theoretischen Elektrotechnik eingehen, stellen wir im ersten Teil zunächst einmal die Frage: Was ist theoretische Elektrotechnik? Dabei werden systemtheoretische Grundgedanken betont, wie sie von Küpfmüllers bereits in den 1920er Jahren erdacht und in seiner berühmten Monographie systematisch entwickelt wurden. Wie in Küpfmüllers ursprünglicher Konzeption der „Theoretische Elektrotechnik“ ist der zweite Teil des Buches der Theorie elektrischer Netzwerke gewidmet. Dieser Teil ist vollig neu konzipiert worden, wobei auch neuere Entwicklungen wie alternative Darstellungen der Grundlagen der resistiven Netzwerke und der Wechselstromrechnung einbezogen wurden. Anschließend werden die Methoden anhand ausgewählter Beispiele demonstriert.

Im gleichen Sinne wie der zweite Teil sind auch die anderen Teile der Neufassung des Buches aufgebaut. Dazu wurden die theoretischen und me-

³ In der 15. Auflage haben W. Mathis und A. Reibiger die 14. Auflage nur hinsichtlich der Abbildungen ein wenig kosmetisch verändert

thodischen Anteile, die zugehörigen Interpretationen und die Beispiele der vorherigen Auflage der „Theoretischen Elektrotechnik“ getrennt und in systematischer Weise neu geordnet. Um die inhaltliche Einordnung zu verbessern, wurden jedem Abschnitt in kompakter Form die wesentlichen theoretischen Aspekte hinzugefügt.

Nach der Theorie elektrischer Netzwerke wird die Theorie elektromagnetischer Felder in induktiver Weise aufgebaut. Darunter versteht man, dass nicht die vollständigen Maxwell'schen Gleichungen für das elektromagnetische Feld Ausgangspunkt der Betrachtungen sind wie beispielsweise bei Sommerfeld [261], sondern es werden schrittweise auf der Grundlage entsprechender experimenteller Erfahrungen näherungsweise gültige Theorien entwickelt, bis die vollständige Theorie aufgebaut ist. Wie Bopp in einem lesenswerten Artikel [33] betont, können wir elektromagnetische Felder nicht unmittelbar erfahren, sondern sie lassen sich nur über ihre Wirkungen auf geladene Körper erfahren. Daher wird der Inhalt der Theorie elektromagnetischer Felder anschaulicher, wenn man einerseits von den Ladungen, die unmittelbar messbar sind und andererseits von den Kräften auf sie ausgeht, die man ebenfalls messen kann, ohne den Inhalt der aufzubauenden Theorie zu kennen.

Von diesem induktiven Standpunkt ausgehend wird im dritten Teil dieses Buches in ausführlicher Weise auf die Theorie des statischen elektrischen Feldes – die Elektrostatik – eingegangen. Dazu wird wie im gesamten Buch intensiv vom Satz von Helmholtz (vgl. Anhang A.2) Gebrauch gemacht, um die mathematischen Felder zur Beschreibung des physikalischen Sachverhaltes in nachvollziehbarer Weise einzuführen; dabei wird auch das Nahwirkungsprinzip verwendet. Nach den theoretischen Grundlagen und einem Abschnitt über die Interpretation der Elektrostatik werden zahlreiche Beispiele diskutiert. Danach werden die Methoden zur Lösung der mathematischen Probleme ausführlich vorgestellt. In entsprechender Weise wird im vierten Teil das elektrische Strömungsfeld behandelt. Es ist zu hoffen, dass die Leserinnen und Leser aufgrund der neuen Struktur des Buches sehr viel besser auf die teilweise hochinteressanten Inhalte von Küpfmüllers „Theoretischer Elektrotechnik“ zugreifen können.

Im fünften Teil des Buches wird auf die Theorie des stationären Magnetfeldes eingegangen. Dabei werden die mathematischen Felder der Theorie auf eine wenig bekannte, aber sehr durchsichtige Weise aufgrund einer einfachen experimentellen Beobachtung eingeführt, die auf Falk und Ruppel [74] zurückgeht. Es folgen wiederum Beispiele und Rechenmethoden sowie weitere theoretische Aspekte. Ebenfalls auf eine alternative Weise wird das Induktionsgesetz in sechsten Teil des Buches eingeführt, die man in dem klassischen Lehrbuch über Theoretische Physik von Weizel [297] finden kann, die bisher aber kaum beachtet wurde. Für uns ist es besonders wichtig, dass die Gleichungen des quasistationären elektromagnetischen Feldes entwickelt werden. Diese Gleichungen enthalten auch einen Anteil des Verschiebungsstromes, um die Ladungsbilanz zu gewährleisten, aber ohne dass Wellenlösungen möglich sind. Auf diese Erweiterung hat Ludwig [170] erstmals in voller Klarheit hingewie-

sen; siehe auch Mathis [178]. Ansonsten wird der Gedanke der Felddiffusion in die Theorie des quasistationären elektromagnetischen Feldes eingearbeitet, wie er beispielsweise in der ausgezeichneten Monographie von Lehner [160] zu finden ist.

Im siebten Teil des Buches wird dann die vollständige Theorie des elektromagnetischen Feldes entwickelt, wobei der noch fehlende Anteil des Verschiebungsstromes – die Maxwellsche Ergänzung – hinzugefügt wird und somit Wellenlösungen auftreten können. Völlig neu ist der Abschnitt über TEM-Wellen auf Leitungen. Dabei werden die Leitungsgleichungen für verlustfreie homogene Leitungen konsequent aus den Maxwellschen Gleichungen hergeleitet. Für verlustbehaftete Leitungen gelten diese Gleichungen nur näherungsweise. Wie in den vorherigen Abschnitten wird in diesem Teil des Buches der Zusammenhang der feldtheoretischen Inhalte mit der Netzwerktheorie und der Zustandsdarstellung betont, die bei Leitungen einen unendlich-dimensionalen Zustandsraum erfordert.

Im achten Teil des Buches wird die Anwendung netzwerk- und feldtheoretischer Methoden auf die Modellierung von Bauelementen und Schaltungen behandelt. Auch in diesem Abschnitt werden zahlreiche neue Aspekte diskutiert. In den Anhängen werden schließlich einige wichtige mathematische Ergebnisse zusammenfasst.

Aus Platzgründen konnten nicht sämtliche Inhalte der 15. Auflage der „Theoretischen Elektrotechnik“ übernommen werden. In Absprache mit dem Springer-Verlag haben wir uns entschieden, einige, eher in den Hintergrund getretene, aber dennoch interessante Aspekte der theoretischen Elektrotechnik auf der Homepage des Buches verfügbar zu machen. Dazu gehören die Abschnitte über Elektronenoptik 14.5, Stromleitung in Gasen 37.1 und Elektronenröhren 38, deren Überschriften an den sachlich richtigen Stellen des Buches und im Gesamtinhaltsverzeichnis erscheinen (mit **(Internet)** gekennzeichnet), die jedoch in vollständiger Form als PDF-File von der Homepage <http://www.springer.com/978-3-540-78589-7>

heruntergeladen werden können. Dort findet man auch umfangreiches weiteres Material zur theoretischen Elektrotechnik: Eine Biographie von Karl Küpfmüller, PowerPoint-Files und PDF-Files von Vorlesungen über theoretische Elektrotechnik, Animationen, historische Hinweise, vieles andere mehr. Der eine von uns (W.M.) arbeitet mit seinem Team ständig daran, zusätzliches Material bereitzustellen. Da bei der erstmaligen Umsetzung eines derart umfangreichen Manuskripts in eine elektronische Version eine erhöhte Fehlerquote auftreten kann, wird auf der Homepage auch ein *Erratum* bereitgestellt, das laufend aktualisiert wird. Für ihre Hinweise wären wir allen Leserinnen und Lesern sehr dankbar. Wir laden Sie ein, die Seiten zu besuchen und freuen uns über ihre Anregungen. Eine Email-Adresse dafür steht auf der Homepage zur Verfügung.

Um dem Inhalt des Buches folgen zu können, sollten einige grundlegende Kenntnisse der Physik und Mathematik sowie der Grundlagen der Elektrotechnik bekannt sein. Hinsichtlich der physikalischen Vorkenntnisse sollte

zumindest die Schulphysik (wie Metzler Physik [198]) aber besser noch die Physik für Ingenieure (wie bei Dobrinski, Krakau, Vogel [64]) präsent sein. Die notwendigen mathematischen Vorkenntnisse der linearen Algebra und Vektoranalysis kann man bei Jänich [133], [132] erlangen. Zur Auffrischung dieser Mathematik kann das Repetitorium von Merziger und Wirths [196] sehr empfohlen werden. Die Grundlagen der Elektrotechnik werden in einer Vielzahl von Lehrbüchern dargestellt; vgl. z. B. das an der Universität Hannover eingeführte Buch von Haase, Garbe und Gerth [98] oder Unbehauen's Lehrbuch [278]. Hinsichtlich weiterführender (Übungs-)Aufgaben zur Theorie elektromagnetischer Felder sei u. a. auf Flügge [80], Mrozynski [202] und das Lehrbuch von Wolff [303] verwiesen; weitere Hinweise findet man auf der Homepage des vorliegenden Buches.

Abschließend sei noch darauf hingewiesen, dass in den letzten Jahren alternative Darstellungen der Theorie elektromagnetischer Felder mit Hilfe sogenannter *Differentialformen* entwickelt wurden. Man erhält gute strukturelle Einsichten in die Theorie und hat Vorteile bei analytischen Rechnungen. Allerdings genügen Differentialformen nicht, sondern es müssen orientierte Formen eingeführt werden. Darauf wird u. a. in den Monographien von Meetz und Engl [193] sowie von Hehl [106] hingewiesen werden; vgl. auch Russer [250]. Inzwischen konnten Bossavit [34], Hiptmair [119] und andere nachweisen, dass man von diesem geometrischen Standpunkt aus gesehen auch neuartige Einblicke in die Numerik elektromagnetischer Felder gewinnen kann. Ein weiterer Zugang wird bei Gerlich⁴ [85] beschrieben. Diese Aspekte gehen jedoch weit über den Rahmen dieses einführenden Buches hinaus, und wir müssen daher auf diese Literatur verweisen.

Am Schluss dieses Vorwortes sollen noch einige Danksagungen folgen, da ohne die entsprechende Hilfe das Buch wohl kaum in der vorliegenden Form entstanden wäre. Zunächst möchten wir unseren Familien herzlich für die Unterstützung danken, die uns zuteil geworden ist, da sie über einen längeren Zeitraum nicht selten auch an Abenden und Wochenenden auf uns verzichten mussten; aufgrund sehr großen Arbeitsanteils gilt das insbesondere für die (W.M.)-Familie. Weiterhin möchten wir uns zutiefst bei Herrn Hans-Jürgen Bödecker bedanken, denn ohne dessen engagierte und unermüdliche Arbeit bei der Vorbereitung eines großen Teils des Textes hinsichtlich der elektronischen Fassung und bei der Aufbereitung der Bilder das Erscheinen dieses Buches sich noch lange hinausgeschoben hätte. Mit Hans-Jürgen Bödecker ist einer von uns (W.M.) schon lange und intensiv freundschaftlich verbunden, wobei sich sein Wahlspruch „*Die Liebe zur Sache*“ und seine darauf gegründete Art des Arbeitens auch bei diesem Buchprojekt auf das Trefflichste bewährt hat. Wir danken auch unseren Mitarbeitern, den Herrn Dipl.-Ing. F. Felgenhau-

⁴ Herr Prof. Dr. rer. nat. Gerhard Gerlich war der Betreuer der Diplomarbeit von W.M. am Institut für Mathematische Physik in den Jahren 1978 bis 1980. W. M. ist ihm zu großem Dank verpflichtet, da er seine wissenschaftliche Laufbahn in vielfacher Weise stark beeinflussend hat

er und M. Streitenberger (beide Hannover) und Herrn Dipl.-Ing. T. Nähring (Dresden) für mannigfache Hilfe bei der computermäßigen Erstellung des Manuskripts, verschiedenen Abbildungen und Diskussionen zum Thema der jeweiligen Abschnitte. Darüberhinaus dankt einer von uns (W.M.) seiner Frau Barbara für das Korrekturlesen. Von zahlreichen Fachkolleginnen und Kollegen haben wir immer wieder ermunterndes Interesse erfahren; dabei möchten wir Herrn Prof. Jürgen Nitsch (Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg), Herrn Prof. Gerhard Wunsch (TU Dresden) und Herrn Prof. Sigurd Falk (TU Braunschweig) besonders erwähnen. Schließlich möchten wir uns bei den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Springer-Verlages für die ausgezeichnete Zusammenarbeit bedanken.

Hannover und Dresden, Juli 2004 *Wolfgang Mathis und Albrecht Reibiger*

Inhaltsverzeichnis

Teil I Was ist Theoretische Elektrotechnik?

1	Die elektrotechnischen Disziplinen	3
2	Systemtheoretische Grundlagen	9
3	Grundlegende Aspekte physikalischer Systeme	15
3.1	Verteilte physikalische Systeme	15
3.2	Mechanik und Energie-Impuls-Transporte	17

Teil II Theorie elektrischer Netzwerke

4	Grundgleichungen und Analysemethoden elektrischer Netzwerke	23
4.1	Netzwerkmodellierung und Widerstandsnetzwerke	23
4.2	Elektrischen Netzwerke mit dynamischen Elementen	38
4.3	Die Wechselstromrechnung: AC-Kalkül	42
4.4	Darstellungen von Übertragungsfunktionen	55
4.5	Zweitore und Vierpole	63
5	Einfache elektrische Grundsaltungen	74
5.1	Einführende Überlegungen	74
5.2	Einfache Schaltungen aus Spulen und Widerständen	76
5.2.1	Lade- und Entladevorgang eines RC-Gliedes	76
5.2.2	Ein einfacher Wechselstromkreis mit Kondensator	81
5.3	Netzwerke aus Spulen und Widerständen	86
5.3.1	Aufladevorgang eines LR-Gliedes	86
5.3.2	Ein einfacher Wechselstromkreis mit Spule	89
5.4	Dreiphasennetzwerke	94
5.5	Der Gyrator	101