

Springer-Lehrbuch

Theoretische Elektrotechnik

Eine Einführung

von

Karl Küpfmüller, Wolfgang Mathis, Albrecht Reibiger

Neuausgabe

Theoretische Elektrotechnik – Küpfmüller / Mathis / Reibiger

schnell und portofrei erhältlich bei beck-shop.de DIE FACHBUCHHANDLUNG

Thematische Gliederung:

Theoretische Physik, Mathematische Physik

Springer 2008

Verlag C.H. Beck im Internet:

www.beck.de

ISBN 978 3 540 78589 7

Vorwort

Im Jahre 1932 hat Karl Küpfmüller das erste Vorwort zu seinem Buch „Einführung in die Theoretische Elektrotechnik“ verfasst, aber es ist, wie man 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 mit der Informationstheorie nicht mehr unter dem Dach einer feldtheoretisch netzwerktheoretisch orientierten Elektrotechnik zusammenfassen lassen. Die Regelungstechnik hat sich nach dem 2. Weltkrieg eine neue Theorie verschaffen, die sich zwar ursprünglich aus der Netzwerktheorie entwickelte, sich aber inzwischen zwischen mit anderen Disziplinen wie Maschinenbau und Verfahrenstechnik zu einem 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 heute *Theoretischer Elektrotechnik* versteht, immer weiter auszuweiten, beugen wir uns ganz im Sinne von Küpfmüllers erster Auflage weitgehend an die netzwerk- und feldtheoretischen Grundlagen der Elektrotechnik und werfen 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 München verfasste Vorwort voranstellen:

Vorwort

igung in einem verhältnismäßig engen Teilgebiet beschränken. Für das um an den Hochschulen, das nicht angenähert so weit spezialisiert werden wie es die spätere Tätigkeit des Studierenden erfordern würde, ergibt daraus die Notwendigkeit einer Beschränkung auf diejenigen Grundlagen, 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 einfaches Grundgesetze der Elektrotechnik. Es gibt ferner eine ausgezeichnete Spezialliteratur, die sich mit den Anwendungen der Grundgesetze beschäftigt. Schließlich der theoretischen Vorbildung sind nun die Anforderungen an die eigenen 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 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.

Im dem vorliegenden Buch habe ich versucht, eine *Einführung in die Vorlesungen 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 Beschränkung 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. So wurde kein Versuch gemacht, die Theorie der elektrischen Maschinen aufzunehmen; sie stellt ein hochentwickeltes Spezialgebiet dar, das ein eigenes 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“.

Prof. Dr. H. G. G. Vorwort endete mit einigen Hinweisen über die Vorzüge von *Größensystemen*, die in der heutigen Literatur vollständig umgesetzt sind. Daher lassen diese Ausführungen für heutige Leserinnen und Leser unverständlich bleiben und entfallen daher.

müllers Vorwort von 1932 endete mit einigen Danksagungen: „Für eine Reihe Anregungen bei der Auswahl des Stoffes bin ich Herrn Dir. Dr. phil. Dr.-E.h. *F. Lüschen* zu Dank verpflichtet. Ferner danke ich den Herren Dr.-*E. Jäger* und Dipl.-Ing. *H. Wurm* für ihre freundliche Mithilfe bei

Vorwort

Küpfmüllers ursprünglicher Konzeption der „Theoretische Elektrotechnik“ ist der zweite Teil des Buches der Theorie elektrischer Netzwerke gewidmet. Dieser Teil ist völlig neu konzipiert worden, wobei auch neuere Entwicklungen und 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 Neuauflage des Buches aufgebaut. Dazu wurden die theoretischen und mechanischen Anteile, die zugehörigen Interpretationen und die Beispiele der früheren Auflage der „Theoretischen Elektrotechnik“ getrennt und in systematischer Weise neu geordnet. Um die inhaltliche Einordnung zu verbessern, werden in jedem Abschnitt in kompakter Form die wesentlichen theoretischen Konzepte 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 als Ausgangspunkt der Betrachtungen sind wie beispielsweise bei Sommerfeld [250], sondern es werden schrittweise auf der Grundlage entsprechender experimenteller Erfahrungen näherungsweise gültige Theorien entwickelt, bis eine vollständige Theorie aufgebaut ist. Wie Bopp in einem lesenswerten Artikel betont, können wir elektromagnetische Felder nicht unmittelbar erfahren, sondern sie lassen sich nur über ihre Wirkungen auf geladene Körper erfahren. Hier wird der Inhalt der Theorie elektromagnetischer Felder anschaulicher, indem man einerseits von den Ladungen, die unmittelbar messbar sind und andererseits von den Kräften auf sie ausgeht, die man ebenfalls messen kann, um 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 mathematischen Felder zur Beschreibung des physikalischen Sachverhaltes in anschaulicher Weise einzuführen; dabei wird auch das Nahwirkungsprinzip verwendet. Nach den theoretischen Grundlagen und einem Abschnitt zur 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 sehr interessanten Inhalte von Küpfmüllers „Theoretische Elektrotechnik“ eingehen können.

Im fünften Teil des Buches wird auf die Theorie des stationären Magnet-

Aspekte. Ebenfalls auf eine alternative Weise wird das Induktionsgesetz im ersten Teil des Buches eingeführt, die man in dem klassischen Lehrbuch der theoretischen Physik von Weizel [285] finden kann, die bisher aber kaum genutzt wurde. Für uns ist es besonders wichtig, dass die Gleichungen des stationären elektromagnetischen Feldes entwickelt werden. Diese Gleichungen enthalten auch einen Anteil des Verschiebungsstromes, um die Ladungsbilanz zu gewährleisten, aber ohne dass Wellenlösungen möglich sind. Diese Erweiterung hat Ludwig [163] erstmals in voller Klarheit hingewiesen, siehe auch Mathis [170]. Ansonsten wird der Gedanke der Felddiffusion in der Theorie des quasistationären elektromagnetischen Feldes eingearbeitet, beispielsweise in der ausgezeichneten Monographie von Lehner [153] 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 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 Feldendarstellung betont, die bei Leitungen einen unendlich-dimensionalen Lösungsraum erfordert.

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

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 tretende, aber dennoch interessante Aspekte der theoretischen Elektrotechnik auf der Homepage des Buches verfügbar zu machen. Dazu gehören die Beiträge über Elektronenoptik 14.5, Stromleitung in Gasen 37.1 und Elektrolysen 38, deren Überschriften an den sachlich richtigen Stellen des Inhaltsverzeichnis und im Gesamtinhaltsverzeichnis erscheinen (mit **(Internet)** gekennzeichnet), die jedoch in vollständiger Form als PDF-File von der Homepage www.springer.com/978-3-540-78589-7

hergeladen werden können. Dort findet man auch umfangreiches weiteres Material zur theoretischen Elektrotechnik: Eine Biographie von Karl Heppner, PowerPoint-Files und PDF-Files von Vorlesungen über theoretische

Vorwort

aufzutreten kann, wird auf der Homepage auch ein *Erratum* bereitgestellt, 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 [190]) aber besser noch die Physik für Ingenieure (wie bei Dobrinski, Krakau, Vogel [62]) präsent sein. Notwendigen mathematischen Vorkenntnisse der linearen Algebra und Analysis kann man bei Jänich [128], [127] erlangen. Zur Auffrischung der Mathematik kann das Repetitorium von Merziger und Wirths [188] empfohlen werden. Die Grundlagen der Elektrotechnik werden in einer Auswahl von Lehrbüchern dargestellt; vgl. z. B. das an der Universität Hannover eingeführte Buch von Haase, Garbe und Gerth [94] oder Unbehauen's Buch [266]. Hinsichtlich weiterführender (Übungs-)Aufgaben zur Theorie elektromagnetischer Felder sei u. a. auf Flügge [76], Mrozynski [194] und das Lehrbuch von Wolff [291] verwiesen; weitere Hinweise findet man auf der Homepage des vorliegenden Buches.

Schließlich 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 [185] sowie von Hehl [102] hingewiesen werden; vgl. auch Russer [239]. Historisch konnten Bossavit [34], Hiptmair [114] und andere nachweisen, dass man von diesem geometrischen Standpunkt aus gesehen auch neuartige Einsichten in die Numerik elektromagnetischer Felder gewinnen kann. Ein weiterer Aspekt wird bei Gerlich⁴ [81] beschrieben. Diese Aspekte gehen jedoch weit über den Rahmen dieses einführenden Buches hinaus, und wir müssen daher diese Literatur verweisen.

Am Schluss dieses Vorwortes sollen noch einige Danksagungen folgen, da die entsprechende Hilfe das Buch wohl kaum in der vorliegenden Form zustande 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 verzichteten; aufgrund sehr großen Arbeitsanteils gilt das insbesondere für die (I.)-Familie. Weiterhin möchten wir uns zutiefst bei Herrn Hans-Jürgen

er bedanken, denn ohne dessen engagierte und unermüdliche Arbeit bei
 bereitung eines großen Teils des Textes hinsichtlich der elektronischen
 g und bei der Aufbereitung der Bilder das Erscheinen dieses Buches
 ch lange hinausgeschoben hätte. Mit Hans-Jürgen Bödecker ist einer
 s (W.M.) schon lange und intensiv freundschaftlich verbunden, wobei
 n Wahlspruch „*Die Liebe zur Sache*“ und seine darauf gegründete Art
 eitens auch bei diesem Buchprojekt auf das Trefflichste bewährt hat.
 nken auch unseren Mitarbeitern, den Herrn Dipl.-Ing. F. Felgenhau-
 M. Streitenberger (beide Hannover) und Herrn Dipl.-Ing. T. Nähring
 en) für mannigfache Hilfe bei der computermäßigen Erstellung des Ma-
 ts, verschiedenen Abbildungen und Diskussionen zum Thema der je-
 a Abschnitte. Darüberhinaus dankt einer von uns (W.M.) seiner Frau
 a für das Korrekturlesen. Von zahlreichen Fachkolleginnen und Kolle-
 en wir immer wieder ermunterndes Interesse erfahren; dabei möchten
 ern Prof. Jürgen Nitsch (Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg),
 Prof. Gerhard Wunsch (TU Dresden) und Herrn Prof. Sigurd Falk (TU
 chweig) besonders erwähnen. Schließlich möchten wir uns bei den Mit-
 innen und Mitarbeitern des Springer-Verlages für die ausgezeichnete
 enarbeit bedanken.

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

Korrigierten und verbesserten Nachdruck:

on weit weniger als ein Jahr nach dem Erscheinen dieses Buches
 wir vom Springer-Verlag gebeten, einen Nachdruck vorzubereiten.
 er freundlichen Aufnahme der Neubearbeitung der neuen Fassung des
 illerschen Buches sind wir auf zahlreiche Fehler hingewiesen worden,
 wir uns an dieser Stelle entschuldigen wollen. Die wichtigsten Fehler
 dem Erratum auf den Internetseiten dieses Buches aufgelistet. Dort
 an auch die überarbeiteten Versionen der drei nicht in dem Buch son-
 Internet zu findenden Unterabschnitte, die im Inhaltsverzeichnis mit
 (net) gekennzeichnet sind. Diesen Nachdruck haben wir benutzt, um
 ie auch andere von uns entdeckte Fehler zu korrigieren und das Buch
 en Stellen zu verbessern. Wir sind deshalb allen Kollegen, Studenten
 besondere den unbekannten Gutachtern sehr dankbar, die uns mit ih-
 weisen geholfen und auf diese Weise dafür gesorgt haben, die Qualität
 Nachdrucks zu verbessern. Wir hoffen in dieser Hinsicht auch weiterhin
 tatkräftige Mithilfe der Leserinnen und Leser. Herrn H.-J. Bödecker
 sität Hannover) möchten wir ebenso wie Herrn Dipl.-Ing. M. Claus

Vorwort

7. August 2005 viel zu früh verstorben ist, für mannigfachen Gedankenaustausch über systemtheoretische Fragen und Wissenschaftsgeschichte sowie die Ermutigung, einen eigenen theoretischen Standpunkt zu bewahren.

Hannover und Dresden, August 2005 *Wolfgang Mathis und Albrecht Reibiger*

18. Auflage:

Auch hinsichtlich der 17. Auflage haben wir viel Zuspruch, aber auch einigem konstruktive – Kritik erhalten. Besonders haben wir uns über die freundlichen Worte von Prof. Dinis Magalhães Santos von der Universidade de Coimbra in Portugal gefreut, der Küpfmüllers Buch (in französischer Übersetzung) schon in den 1960er Jahren und seine Vorlesung „Electrotecnia Teórica“ auf dieser Vorlage präsentiert. Wir sind auf konstruktive Kritik eingegangen, an der wir zahlreiche Stellen des Buches überarbeitet haben. Weiterhin wurden neue Erweiterungen eingefügt. Aufgrund des Interesses wurde insbesondere der AC-Kalkül zur Analyse von Wechselstromschaltungen weiter ausgearbeitet und mit Beispielen versehen. Weiterhin haben wir den Abschnitt über Schutztechnik erweitert. Wir hoffen, dass auch diese neue 18. Auflage einen Anklang findet und danken sehr herzlich den folgenden aufmerksamen Lesern, die uns auf eine Reihe von Fehlern hingewiesen haben: Wolfgang Euland (Hockenheim), Michael Greiff (Leibniz Universität Hannover), Gerrit Krieger (Universität Duisburg-Essen), Prof. Dr.-Ing. Rainer Laur (Universität Bremen), Dr. Stefan Lahres (Voith Siemens Hydro, Heidenheim), Michael Lehmann (TU Dresden), Thomas Preisner (Leibniz Universität Hannover), Markus Siebert (Leibniz Universität Hannover). Wir sind natürlich auch Ihnen dankbar, wenn wir Ihre Anmerkungen zum Buch erhalten und Fehler aufmerksam gemacht werden. Schließlich danken wir Hans-Jürgen Tietz (TET, Leibniz Universität Hannover) und Martin Claus (TU Dresden) sehr herzlich für die Hilfe bei Erstellung des Manuskripts.

Hannover und Dresden, März 2008 *Wolfgang Mathis und Albrecht Reibiger*