
Vorwort und TET-Wegweiser

Erweiterte 20. Auflage:

In diesem Jahr ist es genau 85 Jahre her, seit Karl Küpfmüller, damals Professor für Elektrotechnik, Messtechnik und Nachrichtentechnik an der Technischen Hochschule Danzig (heute Gdańsk in Polen), die 1. Auflage seines Buches vorlegte. Auch die zuletzt erschienene 19. Auflage fand eine freundliche Aufnahme und hat uns damit ein unvermindertes Interesse an einer theoretischen Darstellung elektrotechnischer Inhalte angezeigt. Dieses Vertrauen ermutigte uns, nunmehr die 20. Jubiläumsauflage vorzulegen und wir hoffen natürlich, dass auch diese neue Auflage das Interesse an der Theoretischen Elektrotechnik erhöht.

Um einen schnellen Überblick zu erhalten, was unter der „Theoretischen Elektrotechnik (TET)“ zu verstehen ist, wurde der Untertitel des Buches verändert. Es soll betont werden, dass es um die theoretischen Hintergründe der elektromagnetischen Felder und von Schaltungen aus elektronischen Bauelemente geht. Dazu soll auch der TET-Wegweiser dienen, der erstmals in der 20. Auflage des Buches erscheint. Er soll einen kurzen Überblick über die Inhalte geben, die in den Teilen I bis VIII des Buches vermittelt werden sollen. Wir hoffen, dass diejenigen, die das Buch noch nicht kennen, schneller erkennen, in welcher Weise es ihnen in Studium und Beruf hilfreich sein kann.

Weiteres umfangreiches Material zum Buch findet man auf den Internet-Seiten zum Buch, die vom Springer-Verlag bereitgestellt werden:

<http://www.springer.com/de/book/9783662548363>

- Die Abschnitte über Elektronenoptik 14.6 und Stromleitung in Gasen 37.1 sowie das Kapitel über Elektronenröhren 38, die noch bis zur 15. Auflage im Buch enthalten waren, sind für einige Leser möglicherweise interessant. Daher haben wir sie auf der Homepage des Buches zugänglich gemacht. Deren Überschriften erscheinen an den sachlich richtigen Stellen des Bu-

ches und im Gesamtinhaltsverzeichnis (mit **(Internet)** gekennzeichnet). Auch die Verweise beziehen sich auf die vorliegenden 20. Auflage.

- Foliensätze der Vorlesung „Theoretischen Elektrotechnik (TET)“, gehalten von Wolfgang Mathis an der Leibniz Universität Hannover in den Jahren 2000 bis 2018 sowie entsprechende Übungs- und Klausuraufgaben (teilweise mit Lösungen), Repetitorien zu den Grundlagen der Elektrotechnik und der Halbleiterschaltungstechnik, zugehörige Foliensätze sowie Übungs- und Klausuraufgaben (teilweise mit Lösungen)

Bei einer intensiven Durchsicht wurden wiederum eine ganze Reihe von Präzisierungen des Textes durchgeführt und Schreibfehler beseitigt. Wir danken sehr herzlich den folgenden aufmerksamen Lesern, die uns auf eine Reihe von Fehlern hingewiesen haben: Lukas Kussel (TU Dortmund) sowie Michael Popp (Leibniz Universität Hannover), dem wir verschiedene Hinweise zum Abschnitt über elektrisch-mechanische Energiewandlung verdanken. Natürlich wären wir auch in Zukunft allen Lesern sehr dankbar, wenn wir Anmerkungen zum Buch und Hinweise auf Fehler erhalten würden.

Abschließend möchten wir uns nun endlich einmal ganz herzlich für die phantastische Zusammenarbeit mit Frau Eva Hestermann-Beyerle und Frau Birgit Kollmar-Thoni vom Springer-Verlag bedanken. Seit vielen Jahren haben wir von Ihnen in vielfältiger Weise Hilfe erfahren, so dass es immer großen Spaß gemacht hat, an dem Buchprojekt zu arbeiten. Unser Dank gilt natürlich auch den anderen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Springer-Verlages. Nicht zuletzt gilt unser Dank auch Herrn Dr. Hubertus von Riedesel vom Springer-Verlag, der uns vor vielen Jahren für dieses Buchprojekt begeistert hat. Wir waren immer bemüht, das in uns gesetzte Vertrauen mit guter Arbeit zu rechtfertigen.

Hannover und Dresden, Juni 2017 *Wolfgang Mathis und Albrecht Reibiger*

Vorwort zur 16. Auflage: (Neuordnung des Buches)

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 je – richtig. Küpfmüllers „Theoretische Elektrotechnik“ kann auch mehr als siebzig 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 Küpfmüller 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 benötigt. 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

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“.

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 mögen 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 Küpfmüller 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 völlig 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 methodischen 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 [264], 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 [35] 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

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

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 [76] 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 [300] 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 [172] erstmals in voller Klarheit hingewiesen; siehe auch Mathis [180]. Ansonsten wird der Gedanke der Felddiffusion in die Theorie des quasistationären elektromagnetischen Feldes eingearbeitet, wie er beispielsweise in der ausgezeichneten Monographie von Lehner [162] 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 14.6, 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 [200]) aber besser noch die Physik für Ingenieure (wie bei Dobrinski, Krakau, Vogel [66]) präsent sein. Die notwendigen mathematischen Vorkenntnisse der linearen Algebra und Vektoranalysis kann man bei Jänich [135], [134] erlangen. Zur Auffrischung dieser Mathematik kann das Repetitorium von Merziger und Wirths [198] 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 [100] oder Unbehauen's Lehrbuch [281]. Hinsichtlich weiterführender (Übungs-)Aufgaben zur Theorie elektromagnetischer Felder sei u. a. auf Flüge [82], Mrozynski [204] und das Lehrbuch von Wolff [306] 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 [195] sowie von Hehl [108] hingewiesen werden; vgl. auch Russer [253]. Inzwischen konnten Bossavit [36], Hiptmair [121] 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 [87] 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. Felgenhauer 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

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

TET-Wegweiser

Einleitung (Teil I)

Als Karl Küpfmüller⁵ im Jahre 1932, also vor genau 85 Jahren, die erste Auflage seines Buch „Theoretische Elektrotechnik“ verfasste, ging es ihm auch

⁵ Karl Küpfmüller (geboren am 6. Oktober 1897 in Nürnberg; gestorben am 26. Dezember 1977 in Darmstadt) studierte von 1913 bis 1919 am Königlich Bayerischen Technikum in Nürnberg das Fach Elektrotechnik. Danach ging er an das Telegraphen-Versuchsamt der Deutschen Post in Berlin, wechselte aber 1921 zur Siemens&Halske AG in Berlin. Dort war er bis 1928 Oberingenieur im Zentrallaboratorium. In diese Zeit fielen wichtige Arbeiten auf dem Gebiet der Nachrichtentechnik, mit denen er später die Systemtheorie mitbegründete. Ohne einen Abschluss an einer wissenschaftlichen technischen Hochschule zu besitzen, wurde er ordentlicher Professor für Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik an der Technischen Hochschule Danzig (heute Gdańsk in Polen). 1935 wechselte er an die Technische Hochschule zu Berlin, aber schon im Jahre 1937 wechselte er wiederum zu Siemens&Halske jetzt als Leiter der nachrichtentechnischen Entwicklung des Siemens-Wernerwerkes für Fernmeldetechnik und danach bis zum Mai 1945 als Direktor der Zentralen Entwicklungsabteilung. In diese Zeit fielen auch seine zunehmend engeren Verbindungen zum nationalsozialistischen Regime in Deutschland: 1933 wurde er Mitglied des NS-Kraftfahrkorps, 1934 Mitglied der SA und ab 1937 (bis 1945) Mitglied der NSDAP und der SS. In der SS stieg er bis 1945 zum Rang eines SS-Obersturmbannführers auf. Über die Nähe zum NS-Regime gibt es inzwischen eine umfassende vergleichende Untersuchung von J. Hagenauer und M. Pabst: Anpassung, Unbotmäßigkeit und Widerstand. Karl Küpfmüller, Hans Piloty, Hans Ferdinand Mayer – Drei Wissenschaftler der Nachrichtentechnik im „Dritten Reich“, Bayerische Akademie der Wissenschaften, München, Folge 178, C.H. Beck Verlag 2014. Auch wenn sich aufgrund der verfügbaren Quellen keine direkte Beteiligung an Überwachungs- und Verfolgungsmaßnahmen in der NS-Zeit nachweisen lassen, kann dies aufgrund seines hohen SS-Ranges auch nicht ausgeschlossen werden. Nach dem 2. Weltkrieg endete die Untersuchung seiner Aktivitäten während der NS-Zeit im Rahmen eines Spruchkammerverfahrens trotz seines SS-Ranges mit einer Einstufung als Mitläufer, was beim heutigen Kenntnisstand eher überraschend ist. Auch aufgrund der Neuorientierung der politischen Lage im Sinne des Ost-West-Konflikts spielte seine SS-Zugehörigkeit bald keine Rolle mehr und Küpfmüller konnte seine wissenschaftliche Karriere am Institut für allgemeine Fernmeldetechnik der TH Darmstadt mit vielfältigen Arbeiten auf dem Gebiet der Nachrichtentechnik weiterführen. Küpfmüller bekleidete verschiedene bedeutende Ämter im VDE und der Deutschen Forschungsgemeinschaft und starb im Jahre 1977 hochgeachtet im Alter von 80 Jahren. Es bleibt ein zwiespältiger Eindruck über Karl Küpfmüller zurück, denn auf der einen Seite gehört er zur Gruppe der wichtigstens Ingenieurwissenschaftler des 20. Jahrhunderts mit interdisziplinärer Ausrichtung. Andererseits hat er sich sehr stark an ein verbrecherisches politisches Regime angepasst. In diesem Sinne ist sein Fall dem des bekannten Raketenpioniers Wernher von Braun sehr ähnlich, der in der NS-Zeit und danach eine ganz ähnliche Karriere gemacht hatte. Auch er war SS-Mitglied und stieg zum Sturmbannführer auf. Allerdings hat von Braun im Unterschied zu Küpfmüller nachweislich Schuld auf sich geladen, in dem er die Qualen und

darum, den Inhalt des Gebietes genauer zu definieren. Seit der 8. Auflage des Buches hat er dazu ausgeführt, dass die „*theoretische Elektrotechnik*“ alle diejenigen physikalischen Gesetzmäßigkeiten und mathematischen Verfahren umfasst, die bei der Lösung von Aufgaben der Elektrotechnik nützlich sein können (siehe Kapitel 1). Auch wenn es an vielen Technischen Hochschulen ein Fach mit dieser Bezeichnung gab, wurden damit sehr unterschiedliche Inhalte in Beziehung gebracht. Der Ansatz, den er verfolgte, war vielleicht am ehesten vergleichbar mit Breisigs Monographie „Theoretische Telegraphie“, die im Jahre 1910 erschien. Jedoch fehlten dort weitgehend die Gebiete der Elektrotechnik, die sich mit energietechnischen Inhalten befassten. Das war in der 1. Auflage von Küpfmüllers „Theoretische Elektrotechnik“ nicht viel anders. Aber eine erste Buchbesprechung des damals bedeutenden Elektrotechnikers Franz Ollendorff wies auf diesen Mangel hin und er forderte, dass die theoretischen Konzepte der gesamten Elektrotechnik in dem Buch enthalten sein sollten. Diesem Rat folgte Küpfmüller offensichtlich. Denn in den folgenden Auflagen wurde das ursprünglich 285 Seiten starke Buch nach und nach erweitert, so dass schließlich ein Standardwerk der theoretischen Elektrotechnik entstand, das alle wichtigen Gebiete der Elektrotechnik ansprach und von Generationen geschätzt wurde. Bisher erschienen neunzehn Auflagen des Buches.

Die elektrotechnischen Disziplinen wurden von Küpfmüller schon in der 1. Auflage näher beschrieben und später ausgebaut. Dem ist bis heute nur wenig hinzuzufügen und daher findet man in Kapitel 1 die nur mit geringen Änderungen versehenen Ausführungen von Küpfmüller. In Kapitel 2 werden die für das Buch wichtigen mathematischen Aspekte der Systemtheorie in heuristischer Weise eingeführt. Die Systemtheorie, die der Charakterisierung allgemeiner Übertragungssysteme dient, geht ganz wesentlich auf Küpfmüllers Arbeiten aus den 1920er Jahren zurück; allerdings wären auch Harry Nyquist, Norbert Wiener, Andrej N. Kolmogorow und weitere zu nennen. Küpfmüllers wegweisende Arbeit „Über die Dynamik der selbsttätigen Verstärkungsregler“ von 1928 war Ausgangspunkt für seine Monographie „Systemtheorie der elektrischen Nachrichtentechnik“ von 1949. Die Systemtheorie ist wohl eine der wichtigen eigenständigen theoretischen Disziplinen, die von den Ingenieurwissenschaften geschaffen wurden. Vorbild war sicherlich die theoretische Mechanik, die von Isaac Newton gegen Ende des 17. Jahrhunderts begründet wurde und bis heute zu den erfolgreichsten physikalischen Disziplinen zählt. Die Mechanik ist auch für die Theorie elektromagnetischer Felder sehr wichtig und daher werden ihre Grundzüge in einer auf den Karlsruher Physiker Gottfried Falk zurückgehende Beschreibung auf der Basis von Energie-Impuls-Transporten dargestellt.

Die Ausweitung der Inhalte hatte allerdings gewisse Nachteile. In der 15. Auflage war der Umfang des Buches bereits auf 645 Seiten angewachsen, wobei

den Tod von Gefangenen bei der Produktion von Raketen in den Lagern von Peenemünde und Dora Mittelbau in Kauf nahm.

die neuen Inhalte weitgehend in die bereits vorhandene Vorlage eingearbeitet wurden. Des weiteren wurde versucht, der sich ausweitenden theoretischen Basis der Elektrotechnik Rechnung zu tragen und weitere Aspekte der theoretischen Nachrichtentechnik sowie System- und Regelungstechnik einzubeziehen. Eine grundlegende Revision wurde erst im Rahmen der 16. Auflage und im Zusammenhang mit der Erstellung einer elektronischen Fassung des Manuskripts vorgenommen. Dabei wurden die vorhandenen Inhalte des Buches nach dem systematischen Gesichtspunkten der Teilgebiete Netzwerke, Elektrostatik, elektrisches Strömungsfeld, stationäres Magnetfeld, quasistationäres elektromagnetisches Feld, vollständige Maxwellsche Gleichungen sowie einigen Anwendungsgebieten der Theorie elektromagnetischer Felder geordnet und zusätzliche Inhalte eingebracht. An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, dass die klassischen Bezeichnungen für die Feldgrößen des elektromagnetischen Feldes schon ab der 16. Auflage geändert wurden. Dafür gab es mindestens zwei Gründe: 1) Die den klassischen Feldbezeichnungen zugrundeliegenden physikalischen Interpretationen sind inzwischen überholt. 2) Die Bezeichnungen werden nicht einheitlich verwendet. Da die bereits von Maxwell eingeführten Bezeichnung der elektromagnetischen Feldgrößen bis heute auch international verwendet werden, bot es sich an, die Bezeichnungen E-Feld, D-Feld, B-Feld und H-Feld zu verwenden. An entsprechenden Stellen werden jedoch die im deutschsprachigen Raum verwendeten klassischen Bezeichnung erwähnt.

Der Ausbau in Richtung theoretische Nachrichtentechnik sowie der System- und Regelungstechnik wurde allerdings nicht fortgeführt. Trotzdem stieg der Umfang der 19. Auflage der „Theoretischen Elektrotechnik“ auf fast 800 Seiten an, so dass es selbst nach der Neuordnung nicht leicht war, innerhalb des Buches interessierende Inhalte schnell aufzufinden.

Insbesondere für die Einsteiger in die „Theoretische Elektrotechnik (TET)“ ist es durchaus zweckmäßig, eine Orientierung hinsichtlich der Kernaussagen und Anwendungsgebiete der einzelnen Teilgebiete der theoretischen Elektrotechnik zu haben. Daher habe wir uns entschlossen, einen TET-Wegweiser aufzubauen, um die Vielfalt des Buches besser nutzen zu können. Dabei soll in einer Art Doppelstrategie vorgegangen werden: 1. Das Buch enthält den TET-Wegweiser für die Hauptabschnitte. 2. Zusätzlich wird auf den Internet-Seiten zum Buch

<http://www.springer.com/de/book/9783662548363>

auch für die Unterkapitel ein Wegweiser aufgebaut. Gern können sich auch interessierte Leserinnen und Leser an diesem Aufbau beteiligen und eigene Beiträge für den TET-Wegweiser einreichen. So wird Küpfmüllers Buch zu einem kommunikativen Projekt.

Theorie elektrischer Netzwerke (Teil II)

- **Zweck:** Es handelt sich um eine Modelltheorie für elektromagnetische Anordnungen, bei denen die physikalischen Effekte einer elektrischen Strömung, der Elektrostatik, des stationären Magnetfelds und des quasistationären elektromagnetischen Feldes separiert und räumlich konzentriert betrachtet werden. Bei der Modellbildung werden integrale Größen wie Strom und Spannung herangezogen und damit die räumliche Ausdehnung der physikalisch aktiven Bereiche eliminiert. Die Bereiche werden durch wenige Parameter charakterisiert, welche die Netzwerkelemente Widerstand R (Abschn. 4.1), Kapazität C und Induktivität L (Abschn. 4.2) sowie unabhängige und gesteuerte Strom- und Spannungsquellen (Abschn. 4.1) parameterisieren. Eine Zusammenschaltung dieser Netzwerkelemente erfolgt durch widerstandslose Verbindungen.
- **Typische Anwendungen:** Elektrische und elektronische Schaltungen, die sich aus Bauelementen wie Widerständen, Kondensatoren und Spulen (Kapitel 5) sowie Elektronenröhren (Kapitel 38) und Halbleiterbauelementen (Dioden und Transistoren, Kapitel 39) zusammensetzen und im Frequenzbereich von 0 Hz (Gleichgrößen) bis zu einigen GHz (Wechselgrößen) eingesetzt werden. Diese Schaltungen werden mit Hilfe der Netzwerke modelliert, wobei man sich für das Verhalten hinsichtlich verschiedener (Klemmen-) Ströme und -Spannungen interessiert. Unter gewissen Voraussetzungen (ausschließlich transversale elektromagnetische Wellen) lässt sich auch das Klemmenverhalten von Übertragungsleitungen durch Netzwerkmodelle beschreiben (vgl. Kapitel 35).
- **Genauigkeit:** Durch Erhöhung der Anzahl der Netzwerkelemente kann die Genauigkeit der Nachbildung des Klemmenverhaltens technischer Bauelemente durch die Erhöhung der Anzahl der Netzwerkelemente verbessert werden. Dabei können auch nichtelektrische physikalische Effekte einbezogen werden.
- **Grenzen der Anwendung:** Wesentliche Voraussetzung der Modelltheorie ist die Möglichkeit einer getrennten Betrachtung der genannten physikalischen Effekte. Ist das nicht mehr gegeben, dann lassen sich elektromagnetische Effekte nur noch bedingt durch Netzwerkmodelle repräsentieren. Beispielsweise kann man Verzögerung auf Leitungen nur noch näherungsweise darstellen (Kapitel 35).
- **Methoden:** Analysemethoden für Gleichstromschaltungen beziehen sich auf die Lösung linearer und nichtlinearer Modellgleichungen (Abschn. 4.1). Werden dynamische Netzwerkelemente wie Kapazitäten und Induktivitäten einbezogen, dann ergeben sich Modellgleichungen in Form von Differentialgleichungen. Im Fall von linearen Differentialgleichungen mit konstanten Koeffizienten kann man diese Gleichungen in lineare algebraische Gleichungen mit komplexen Koeffizienten reduzieren, wobei die Wechselstromrechnung (Abschn. 4.3) bzw. die Fourier- und Laplace-Transformation (Abschn. 4.2) zum Einsatz kommen. Bei Modellgleichun-

gen mit nichtlinearen Zusammenhängen muss auf Lösungsmethoden für nichtlineare Differentialgleichungen und ggf. Algebro-Differentialgleichungen zurückgegriffen werden (Abschn. 40.4.5).

Das elektrostatische Feld (Teil III)

- **Zweck:** Nach dem Coulombschen Gesetz üben zwei nicht bewegte Punktladungen Kräfte aufeinander aus (Kapitel 6). Ausgehend davon verallgemeinert man im Rahmen des Modellierungsansatzes der Elektrostatik die Coulombsche Anordnung dahingehend, dass man eine Punktladung als Probeladung auffasst und die andere Punktladung durch eine nicht bewegte Ladungsverteilung ersetzt, um die auf die Probeladung normierte Kraft zu bestimmen - das E-Feld. Im Sinne des Nahwirkungsprinzips (Kapitel 6) wird die Ladungsverteilung durch eine elektrische Erregung - das D-Feld - äquivalent ersetzt. Legt man ein lineares Materialgesetz (Kapitel 8) zwischen D- und E-Feld zugrunde, kann man für das mit dem E-Feld zusammenhängende elektrische Potenzial eine Fundamentalgleichung in Form einer Poissongleichung ableiten. Zumindest für lineare Materialgleichungen ist die Poissongleichung, eine partielle Differentialgleichung, deren Eigenschaften im Rahmen der mathematischen Potenzialtheorie behandelt werden, die Grundlage für alle Feldberechnungen. Bei allgemeineren Materialgleichungen erhält man eine kompliziertere Differentialgleichung.
- **Typische Anwendungen:** Elektrostatische Modellierungsansätze verwendet man immer dann, wenn die Bewegung von Ladung vernachlässigt werden kann oder Ladungen ihre endgültige räumliche Position eingenommen haben. Das ist häufig in der Hochspannungstechnik der Fall, aber auch in vielen elektronischen Bauelementen (Kapitel 38 und 39) ist die Ladung der Gitteratome nicht ortsveränderlich und die Elektrostatik erfolgreich anwendbar.
- **Genauigkeit:** Die Modelle für das Materialgesetz (Kapitel 8) bestimmen die Art der partiellen Differentialgleichungen des elektrischen Feldes, während die Geometrie eines Problems die Randbedingungen festlegt. Ist man an analytischen Lösungen interessiert, muss man einen Kompromiss von der Güte einer Lösung und deren Berechenbarkeit finden.
- **Grenzen der Anwendung:** Um den elektrostatischen Modellansatz erfolgreich einsetzen zu können, dürfen sich die Ladungen nicht bewegen. Kommt es zu zeitveränderlichen elektrischen Strömungen von Ladungen, ist das Wegintegral des E-Feldes nicht mehr wegunabhängig. Bei sehr hohen elektrischen Feldern können Ladungen aus elektrischen Leitern austreten (Feldemission), was durch die Elektrostatik nicht beschrieben werden kann.
- **Methoden:** Liegt eine Poissongleichung für das elektrostatische Potenzial vor, dann kann man auf die Methoden partieller Differentialgleichungen

der Potenzialtheorie (Abschn. 11.1) zurückgreifen. Neben einigen speziellen analytischen Methoden zur Bestimmung exakter sowie approximativer Lösungen (Abschn. 11.2 - 11.7) kann man die auf viele Typen linearer partieller Differentialgleichungen anwendbare Separationsmethode (Abschn. 11.8) benutzen. Darüber hinaus gibt es sehr effiziente numerische Methoden (Hinweise in Abschnitt 11.9). Im Fall eines linearen Materialgesetzes kann man auch bei Randbedingungen im Endlichen die Methode der Greenschen Funktion anwenden, die als Methode der Antwortfunktion in vielen Bereichen der Physik und Elektrotechnik bekannt ist. Dabei können Lösungen bei bekannter Greenscher Funktion formelmäßig bis auf eine Integration angegeben werden. In einigen Fällen kann die Methode der Spiegelladungen zur Bestimmung der Greenschen Funktion herangezogen werden.

Das elektrische Strömungsfeld (Teil IV)

- **Zweck:** Bewegen sich Ladungen in einem leitfähigen Material, ohne dass sich die Ladungsdichte ρ zeitlich verändert, dann reduziert sich die Kontinuitätsgleichung, welche die allgemeine Ladungserhaltung beschreibt (Kapitel 15), zu $\text{div}\mathbf{J} = 0$. Ist man nur an der Bestimmung des elektrischen Feldes und der aus dem Ohmschen Gesetz folgenden zeitunabhängigen elektrischen Stromdichte interessiert, kann der Modellierungsansatz des elektrischen Strömungsfeldes gewählt werden. Das stationäre Magnetfeld wird bei diesem Ansatz nicht berücksichtigt, lässt sich aber anschließend berechnen (Teil V).
- **Typische Anwendungen:** Dieses Modellierungskonzept wird bei der Berechnung der Verteilung der elektrischen Stromdichte in leitfähigen Gebieten mit inhomogener Leitfähigkeit sowie unter Berücksichtigung komplizierter Geometrien angewendet: Stromverteilungen auf Gerätechassis und Stromschienen bei Gleichströmen und Strömen sehr kleiner Frequenz, wobei das gleichzeitig auftretende stationäre Magnetfeld keine Bedeutung besitzt und daher außer acht gelassen werden kann. Derartige Problemstellungen kommen beispielsweise bei der Modellierung der elektrischen Kopplung über das Substrat in integrierten MOS-Schaltungen (Abschn. 39.3) sowie bei der Erstellung von Modellen für die geoelektrische Widerstandstiefensondierung auf, wobei das Problem der geometrischen Auslegung von Erdern gegen gefährliche Blitzeinschläge (Kapitel 17) als Spezialfall gesehen werden kann.
- **Genauigkeit:** Untersuchungen der Stromdichteverteilungen hängen insbesondere bei linearen "Ohmschen" Materialmodellen von der Genauigkeit der Modellierung der Leitfähigkeit in den betrachteten Gebieten ab. Dabei sollte die räumliche Ausdehnung der Gebiete so groß sein, dass die atomis-

tische Struktur der Materie keine wesentliche Rolle spielt. Bei nichtlinearen Materialmodellen müssen gesonderte Überlegungen angestellt werden.

- **Grenzen der Anwendung:** Wesentliche Voraussetzung für die Genauigkeit der sich ergebenden Stromdichteverteilungen ist die Zeitunabhängigkeit der Stromdichte und damit des umgebenden Magnetfeldes. Andernfalls würde es aufgrund der Felddiffusion (Kapitel 29) zu einer Rückwirkung auf die Stromdichteverteilung kommen und diese insbesondere bei höheren Frequenzen erheblich verändern.
- **Methoden:** Geht man von einem linearen "Ohmschen" Materialmodell aus, erhält man eine Laplacegleichung (Kapitel 15), mit der das elektrische Potenzial in dem betrachteten Gebiet berechenbar ist und aus dem die Stromdichteverteilung ermittelt werden kann. Dabei kommen neben den graphischen Methoden (Abschn. 16.1) alle analytischen und numerischen Methoden zur Lösung der Laplacegleichung zum Einsatz, die schon aus der Elektrostatik bekannt sind (Kapitel 11). Allerdings hat man es hinsichtlich der Randbedingungen mit anderen Situationen zu tun, da elektrische Einströmungen durch Neumann-Randwerte zu beschreiben sind. Im Fall nichtlinearer Materialgesetze ergeben sich kompliziertere partielle Differentialgleichungen, die fast ausschließlich numerisch behandelt werden können.

Das stationäre Magnetfeld (Teil V)

- **Zweck:** Stationäre Magnetfelder treten auf, wenn in der Umgebung zeitunabhängige, divergenzfreie Stromdichteverteilungen – Experimente von Ørsted – oder permanente Magnete vorhanden sind (Kapitel 18), wobei bewegte Ladungen ein sehr guter Indikator für solche magnetische Felder sind. Geht man von der heute experimentell überprüfbaren Erfahrungssache aus, dass sich bewegte Ladungen in stationären Magnetfeldern hinsichtlich der Richtung ihrer Geschwindigkeit, aber nicht in Bezug auf deren Betrag verändern, kann auf die Kopplung von Ladung und Feld geschlossen werden. Dazu muss das Vektorpotenzial eingeführt werden, was den translatorischen Impuls im Sinne einer Minimalkopplung verändert und dessen Rotation in die Bewegungsgleichungen im Sinne der Lorentz-Kraft eingeht (Kapitel 18). Die Grundgleichungen des stationären Magnetfeldes erhält man unter Berücksichtigung des Nahwirkungsprinzips und eines linearen Materialgesetzes (Kapitel 20). Schließlich erhält man eine vektorielle Poissongleichung für das Vektorpotenzial, die als Grundgleichung des stationären Magnetfeldes angesehen werden kann, da alle anderen Feldgrößen aus dem Vektorpotenzial ermittelt werden können. Das gilt insbesondere für das $\mathbf{B}$ -Feld, das mit mechanischen Kräften in Beziehung steht. Allerdings müssen bei Aufgabenstellungen des stationären Magnetfeldes häufig auch andere Materialgesetze unter Einschluss von Hysterese-Effekten ver-

wendet werden (Kapitel 20), so dass modifizierte Poissongleichungen auftreten.

- **Typische Anwendungen:** Zu den bekanntesten Effekten, die mit stationären Magnetfeldern in Zusammenhang gebracht werden, gehören die auf metallische Körper wirkenden anziehenden und abstoßenden mechanischen Kräfte (Kapitel 25), die sich mit Permanent- und Elektromagneten erzeugen lassen (Abschn. 22.3). Diese Kräfte lassen sich detailliert bestimmen, wenn das B-Feld bekannt ist. Solche Magnete werden aber nicht nur in großtechnischen Anlagen wie in elektrischen Maschinen und bei Hubmagneten eingesetzt. Seit langer Zeit werden magnetisierbare Materialien zur Datenspeicherung eingesetzt, wobei die Strukturgröße magnetisierbarer Gebiete bei Festplatten und CDs inzwischen im Mikrometer- und teilweise sogar im Nanometer-Bereich liegt. Zur messtechnischen Charakterisierung müssen dann sogenannte magnetische Kraftmikroskope eingesetzt werden, die eine Auflösung bis zu wenigen Nanometern erreichen. Ein anderes Anwendungsgebiet stationärer Magnetfelder ist die Bestimmung magnetischer Kopplungen, wobei Selbst- und Gegeninduktivitäten zu berechnen sind (Kapitel 12), die in Form von Spulen und Transformatoren in elektronischen Schaltungen sowie in energietechnischen Anlagen auftreten. Schließlich werden stationäre Magnetfelder bei der Konstruktion von elektronischen Bauelementen (z. B. Braunsche Röhre, Magnetron) und in der Teilchenphysik (z. B. Zyklotron (Abschn. 19.2) und Kernspinresonanzspektroskopie (NMR)) benötigt.
- **Genauigkeit:** Bei einem linearen Materialgesetz kommt es auf die Bestimmung von Lösungen der vektoriellen Poissongleichung für das Vektorpotenzial an, wobei nur eine begrenzte Anzahl von Geometrien eine exakte Lösung erlauben. In vielen Anwendungen stellt ein lineares Materialgesetz nur eine grobe Näherung dar. Werden inhomogene, anisotrope oder sogar nichtlineare Materialgesetze verwendet, können nur selten exakte Lösungen ermittelt werden. Alternativ kann auf die Biot-Savart-Formel zurückgegriffen werden, die aber ähnlichen Einschränkungen unterliegt.
- **Grenzen der Anwendung:** Um die Theorie stationärer Magnetfelder anwenden zu können, müssen die physikalischen Voraussetzungen eingehalten werden. Wenn das Gebiet leitfähig ist, führen moderate, zeitveränderliche Magnetfelder zu einer Kopplung mit dem elektrischen Feld und es kommt zu Wirbelströmen (Abschn. 29.1), die zu einer Veränderung des Magnetfelds führen.
- **Methoden:** Die Berechnung stationärer Magnetfelder führt bei einem linearen Materialgesetz zu einer vektoriellen Poissongleichung für das Vektorpotenzial, wobei eine Reihe von analytischen und Näherungsmethoden zur Verfügung stehen (Kapitel 21). Insbesondere wenn keine Randbedingungen im Endlichen vorgegeben sind, kann für das Vektorpotenzial eine Lösungsformel angegeben werden (Abschn. 21.2), aus der eine Lösungsformel für das B-Feld ableitbar ist (Biot-Savart-Laplace-Formel in Abschn. 21.3 und Kapitel 22). Enthält das Gebiet, in dem das stationäre Magnet-

feld zu berechnen ist, keine Stromdichten bzw. Ströme, dann kann mit einem skalaren magnetischen Potenzial gerechnet werden. Anders als in der Elektrostatik verliert man jedoch die Wegunabhängigkeit entsprechender Wegintegrale, was sich in nicht einfach zusammenhängenden Gebieten zeigt. Kraftberechnungen im stationären Magnetfeld kann man auch auf der Grundlage der magnetischen Energie durchführen (Abschn. 25.2).

Das quasistationäre elektromagnetische Feld (Teil VI)

- **Zweck:** Sind die elektromagnetischen Felder zeitabhängig und verändern sich mit moderaten Frequenzen, dann führt das von Faraday entdeckte Induktionsgesetz (Abschn. 26.2) zu einer Kopplung des elektrischen und magnetischen Feldes. Berücksichtigt man die allgemeine Form der Kontinuitätsgleichung durch eine Erweiterung des Durchflutungsgesetzes (Abschn. 26.4 und Kapitel 30), erhält man die Grundgleichungen des quasistationären elektromagnetischen Feldes, die alle Phänomene außer den elektromagnetischen Wellen beschreiben (Abschnitt 26.5). Ein Vorteil der Theorie ist, dass die Berechnung des Magnetfeldes auf der Grundlage der Theorie des stationären Magnetfeldes erfolgen kann (Teil V). Insbesondere kommt es in leitfähigen Gebieten zu einer Felddiffusion, wobei äußere elektromagnetische Felder in diese Gebiete gedämpft eindringen (Kapitel 29). Bei höheren Frequenzen dringt das Feld nur wenig in das leitfähige Gebiet ein, so dass die elektromagnetischen Felder fast nur an der Oberfläche vorhanden sind; man spricht auch vom Skinneffekt (Abschn. 29.1). Innerhalb des leitfähigen Gebietes fließen sogenannte Wirbelströme (Abschn. 29.1.4), die u. U. zu ganz erheblichen Ohmschen Verlusten führen können. Die traditionelle Bezeichnung Strom- oder Feldverdrängung für die Felddiffusion ist physikalisch nicht gerechtfertigt. Um neben den elektromagnetischen auch mechanische Vorgänge einzubeziehen, was zu zeitabhängigen geometrischen Nebenbedingungen führt, können die Gleichungen so umgeschrieben werden, dass sie explizite mechanische Größen wie die Geschwindigkeit enthalten (Abschn. 31.1).
- **Typische Anwendungen:** Die Energietechnik ist ein bedeutendes Anwendungsgebiet der Theorie quasistationärer elektromagnetischer Felder. Insbesondere bei der Modellierung von Transformatoren (Abschn. 29.3) und bei der elektrisch-mechanischen Energiewandlung (Abschn. 29.4) baut man auf diese Theorie auf. Aber auch das Gebiet der elektronischen Schaltungstechnik, wo ebenfalls Spulen und Transformatoren (Abschn. 29.3.4 - 29.3.5) sowie Kondensatoren eingesetzt werden, nutzt diese Theorie.
- **Genauigkeit:** Die Theorie quasistationärer elektromagnetischer Felder ist physikalisch abgeschlossen. Erst wenn die Effekte elektromagnetischer Wellen zu berücksichtigen sind, müssen die Grundgleichungen der Theo-

rie (Abschn. 26.5) erweitert werden, was Maxwell durch seine Ergänzung realisiert hat (Abschn. 32.1).

- **Grenzen der Anwendung:** Die Abgrenzung quasistationärer und instationärer elektromagnetischer Felder sollte die Frequenz, die Lichtgeschwindigkeit und die Größenordnung der räumlichen Abmessungen einer Anordnung berücksichtigen (Abschn. 32.1). Auch die Formulierung des Induktionsgesetzes für elektromagnetische Anordnungen mit mechanisch beweglichen Teilen ist auf Änderungsgeschwindigkeiten der Mechanik beschränkt, die klein gegenüber der Lichtgeschwindigkeit sind. Andernfalls muss die spezielle Relativitätstheorie berücksichtigt werden (Abschn. 31.1)
- **Methoden:** Bei linearen Materialien lassen sich alle Phänomene der Theorie quasistationärer Felder auf der Grundlage von Vektor-Diffusionsgleichungen für die verschiedenen Feldgrößen analysieren. Für den räumlich 1-dimensionalen Fall steht eine Lösungsformel in Form eines Faltungsintegrals zur Verfügung, wenn die zugehörige Greensche Funktion bekannt ist (Kapitel 28). Weiterhin kann auch die Methode der Separation angewendet werden, wenn eine entsprechende Geometrie des Problems vorliegt (z. B. Zylindergeometrie). Ansonsten gibt es in der Literatur zahlreiche spezielle Methoden zur Berechnung von Wirbelströmen ("Eddy-Currents") sowie einige Methoden für die Behandlung von Problemen mit nichtlinearer Felddiffusion.

Das instationäre elektromagnetische Feld (Teil VII)

- **Zweck:** Die Theorie des instationären elektromagnetischen Feldes muss eingesetzt werden, wenn elektromagnetische Wellen im Freiraum oder wenn geführte elektromagnetische Wellen auftreten. Solche Wellen wurden ursprünglich von Maxwell nach dem Aufbau seiner Theorie des elektromagnetischen Feldes vorausgesagt und später von Hertz experimentell nachgewiesen. Die grundlegenden Gleichungen der Theorie werden Maxwellsche Gleichungen genannt (Abschn. 32.2), wobei für den Fall linearer Materialgleichungen und einer Eichung (d.h. geeignete Nutzung des Freiheitsgrades der Divergenz des Vektorpotenzials) eine skalare und eine vektorielle Wellengleichung für das skalare elektrische Potenzial und das Vektorpotenzial auftreten. Der Hertzsche Dipol ist eine der ganz wenigen Anordnungen, für die ein instationäres elektromagnetisches Feld mit Hilfe elementarer Funktionen dargestellt werden kann (Abschn. 34.1). Eine Rekonstruktion der in der Strahlen- und Wellenoptik bekannten Phänomene wie Reflexion und Brechung kann mit Hilfe von ebenen elektromagnetischen Wellen erfolgen (Abschn. 34.3).
- **Typische Anwendungen:** Anordnungen, bei denen Wellenphänomene eine wichtige Rolle spielen, sind Antennen und Draht- und Koaxialleitungen (Kapitel 35) sowie Hohlleiter und Hohlraumresonatoren (Kapitel 36).

Die Ergebnisse des Hertzschen Dipols können auf eine einfache Dipolantenne übertragen werden (Abschn. 34.1.3).

- **Genauigkeit:** Wenn man die Maxwellschen Gleichungen mit geeigneten Materialmodellen für eine gegebene geometrische Anordnung formuliert, hat man im Bereich der klassischen Physik die bestmögliche Beschreibung. Allerdings muss man bei vielen Anordnungen erhebliche Näherungen anwenden, um zu analytisch lösbaren Gleichungen zu kommen. Dadurch wird die Genauigkeit beschränkt.
- **Grenzen der Anwendung:** Treten in elektromagnetischen Anordnungen auch Quantenphänomene auf, muss auf ein allgemeineres physikalisches Konzept zurückgegriffen werden. Allerdings verlässt man dann den Rahmen der klassischen Physik.
- **Methoden:** Bei linearen Materialgesetzen müssen Wellengleichungen für das skalare elektrische Potenzial und das Vektorpotenzial gelöst werden, was analytisch nur dann gelingt, wenn man sich auf den Fall ebener harmonische Wellenlösungen beschränkt (Abschn. 34.3). Darüber hinaus kann man nach d'Alembert eine additive Zerlegung in einen retardierten und einen avancierten Anteil auch in allgemeineren Fällen ableiten, ohne allerdings die funktionale Abhängigkeit der Anteile explizit zu bestimmen (Abschn. 34.3). Weiterhin gibt es auch eine Vielzahl numerischer Methoden mit unterschiedlichen Anwendungsgebieten. Dazu findet man ebenso wie für die Methode der Greenschen Funktion bei Wellengleichungen einige Literaturhinweise in Abschn. 32.2.

Das elektromagnetische Feld in elektronischen Bauelementen (Teil VIII)

- **Zweck:** Elektromagnetische Felder werden zur Manipulation von Ladungsträgern (z.B. Elektronen) herangezogen. Die verschiedenen Techniken wurden seit Ende des 19. Jahrhunderts zur Konstruktion elektronischer Bauelemente wie die Braunsche Röhre (1897) und die Elektronenröhre (ab 1904) als auch halbleiterbasierter Bauelemente wie PN-Dioden und Transistoren verwendet. Daher wird in Teil VIII dieses Buches auf die Funktion dieser Bauelemente (Kapitel 39) und auf die entsprechende Art der Manipulation der Ladungsträger eingegangen (Kapitel 37). Um den Umfang des Buches zu reduzieren, wurden die Grundlagen einiger nur noch selten gebräuchlicher Bauelemente wie die Stromleitung in Gasen (Abschn. 37.1) und Elektronenröhren (Kapitel 38) ausgegliedert, stehen jedoch im Internet zur Verfügung (s. URL oben). Da elektronische Bauelemente zum Aufbau von elektronischen Schaltungen verwendet werden, wird auch auf ausgewählte Schaltungen sowie auf deren Analyse und deren Eigenschaften eingegangen (Kapitel 40).

- **Typische Anwendungen:** Elektronische Bauelemente werden in linearen und nichtlinearen elektronischen Schaltungen eingesetzt und bilden damit die Basis auch für integrierte Schaltungstechnik analoger Schaltungen (Kapitel 40). Für die Analyse- und Entwurfsmethoden werden die in Teil II diskutierten Netzwerkmodelle verwendet, wobei nicht immer scharf zwischen Netzwerkmodell und realer Schaltung unterschieden wird. Schaltungen, bei denen sich Strom und Spannung nur in zwei Niveaus (binäre Level) befinden, wenn man von den Umschaltvorgängen absieht, nennt man digitale Schaltungen. Darüber hinaus gibt es Schaltungen, in denen sich die Ströme und Spannungen kontinuierlich als auch binär verändern; man spricht dann von Mixed-Signal-Schaltungen. Neben den Grundsaltungen für Bipolartransistoren (Abschn. 40.2) wird auch kurz auf den Aufbau von Operationsverstärkern eingegangen (Abschn. 40.3). Weiterhin werden Systeme mit Rückkopplung betrachtet (Abschn. 40.4), bei denen die Rückkopplung zu einem negativen Widerstand äquivalent ist. Zu diesen Schaltungen gehören auch die Oszillatoren, die nichtlineare Eigenschaften besitzen und die periodische Schwingungen erzeugen.
- **Genauigkeit:** Für die Bauelemente werden Netzwerkmodelle angegeben, bei denen die räumliche Ausdehnung durch einen räumlichen Mittelungsprozess eliminiert wurde. Das führt insbesondere bei den Anwendungen in der Schaltungstechnik zu brauchbaren Ergebnissen, wenn man exemplarische Vergleiche mit Messungen zugrunde legt.
- **Grenzen der Anwendung:** Wenn die Strukturen der Bauelemente immer kleiner werden, wie es in der modernen integrierten Schaltungstechnik der Fall ist, müssen gegebenenfalls Modellierungsansätze für den räumlich verteilten Ladungstransport (Drift-Diffusions-Näherung) oder sogar mit Quantenaspekten erweiterte Modelle verwendet werden. Aufgrund des großen Rechenaufwandes kann man nur sehr kleine Anteile des strukturierten Siliziums analysieren.
- **Methoden:** Die Transportmechanismen nutzen fast ausschließlich elektrostatische Kräfte, so dass man auf die der Elektrostatik zugrundeliegende Poissongleichung und deren Lösungsverfahren (ggf. unter Berücksichtigung von Näherungen) zurückgreifen kann. Bei der Analyse von Schaltungen die Beschreibungsgleichungen in Form von linearen und nichtlinearen Differentialgleichungen verwendet (Teil II) werden.

Küpfmüller Theoretische Elektrotechnik
Elektromagnetische Felder, Schaltungen und
elektronische Bauelemente

Mathis, W.; Reibiger, A.

2017, XXXIV, 789 S. 377 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-662-54836-3