

Die wissenschaftlichen Grundlagen der Elektrotechnik

Von

Dr.-Ing. habil. Heinz Schönfeld †

o. Professor für Grundgebiete der Elektrotechnik und Regelungstechnik
an der Technischen Hochschule Karlsruhe

Dritte Auflage

besorgt von

Johannes Fischer

Dr.-Ing., o. Professor an der Technischen Hochschule Karlsruhe

Mit 298 Abbildungen



Springer-Verlag
Berlin/Göttingen/Heidelberg
1960

ISBN-13:978-3-642-92794-2
DOI: 10.1007/978-3-642-92793-5

e-ISBN-13:978-3-642-92793-5

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten
Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es auch nicht gestattet,
dieses Buch oder Teile daraus auf photomechanischem Wege
(Photokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen
Copyright 1951 by S. Hirzel Verlag, Leipzig
© by Springer-Verlag OHG., Berlin/Göttingen/Heidelberg 1960
Softcover reprint of the hardcover 3rd edition 1960

Vorwort zur dritten Auflage

HEINZ SCHÖNFELD war im Jahre 1956 aus der Tätigkeit in der elektrotechnischen Industrie dem Ruf der Technischen Hochschule Karlsruhe gefolgt. Am 5. Mai 1957 erlag er einer von niemand geahnten tückischen Krankheit, mitten heraus aus froh begonnener Arbeit, aus Vorbereitungen und Plänen für Lehre und Forschung. Zu diesen gehörte auch die Neuauflage dieses Buches, dessen zweite Auflage (1952) vergriffen war. Die von ihm begonnene Lehrtätigkeit und unsere Gespräche ließen erkennen, daß er keine grundlegenden Änderungen, keine Umgestaltung beabsichtigte. Als ich mich bereit erklärte, eine Neuauflage zu besorgen, ließ ich mich darum von dem Gedanken leiten, daß es nicht meine Aufgabe sei, Wesen und Art des Buches nach meinem Ermessen zu ändern.

Meiner Arbeit kam einerseits der Umstand zustatten, daß ich an der Technischen Hochschule Karlsruhe sieben Jahre lang die Vorlesung gehalten hatte, die das Kernstück für das neue Ordinariat ausmachte, auf das als erster SCHÖNFELD berufen wurde, andererseits hatte ich Nutzen von dem fruchtbaren wissenschaftlichen Meinungsaustausch im Ausschuß für Einheiten und Formelgrößen (AEF im DNA), der in den letzten Jahren zur Veröffentlichung einer Reihe von Normblättern geführt hat, die gerade für den Gegenstand des Buches Bedeutung haben (sie sind im Literaturnachweis unter 16. angeführt). Ich habe in den Text und die Abbildungen möglichst weitgehend die Ausdrucksweisen und Bezeichnungen (Formelzeichen) eingetragen, die heute üblich und anerkannt sind. An manchen Stellen ging allerdings die Rücksicht auf die didaktische Linie SCHÖNFELDS vor. So wurde z. B. konsequent die Benennung „Urspannung“ als Synonym für „elektromotorische Kraft“ und dieser Begriff selbst beibehalten, und ebenso das Wort „Spannungsabfall“ auch dort, wo man unmißverständlich mit dem einfacheren Wort „Spannung“ auskäme. Auch die altgewohnte Benennung des Fachgebietes „Schwachstromtechnik“ wurde nicht geändert, etwa in „Nachrichtentechnik“; zur Rechtfertigung kann angeführt werden, daß die Meßtechnik nur zu einem Teil zur engeren Nachrichtentechnik gehört. An manchen Stellen habe ich den Ausdruck geglättet oder eine besonders prägnant klingende Formulierung kommentiert. Völlig neu gefaßt werden mußten nur der Abschnitt über die Einheiten (jetzt Anhang I und II) und die zahlreichen Bezugnahmen auf diesen im laufenden Text, da auf diesem Gebiet seit

dem Erscheinen der ersten Auflage 1951 sich die theoretischen Einsichten und die internationalen Vereinbarungen wesentlich geändert haben. Im übrigen war mir daran gelegen, nicht durch (vielleicht manchmal nahe-liegende) Umformungen oder Ergänzungen die Darstellung zu verändern und den Umfang zu vergrößern.

Möge das jetzt im Springer-Verlag erscheinende Buch weiterhin von Nutzen sein als das, was es von Anfang an sein wollte: als Buch für Studenten.

Karlsruhe, im Januar 1960

J. Fischer

Vorwort zur ersten Auflage

Dieses Lehrbuch richtet sich vor allem an den Studierenden der Elektrotechnik. Es will ihm eine breite und wissenschaftliche Kenntnis der Grundlagen seines Fachgebietes vermitteln, die ihn zum weiteren Vordringen in höhere und spezielle Fächer befähigt. Wohl gibt es bereits eine größere Zahl von Büchern, die in die Elektrotechnik einführen. Aber der Verfaasser glaubt, daß sich neben ihnen das vorliegende Buch als nützlich erweist, weil Inhalt und Darstellung in manchem anders sind.

Zum Inhalt

Die Fülle der elektrotechnischen Schöpfungen imponiert und mag den oberflächlichen Betrachter verwirren. Sieht man genauer zu, so findet man, daß ihre Wirkung auf einer kleinen Zahl immer wieder vorkommen-der (Grund-)Gesetze und einer ständig wachsenden Zahl von seltener an-zutreffenden (Spezial-)Gesetzen beruht. Ferner fällt auf, daß bestimmte Verfahren und Geräte, durch die die Naturgesetze nutzbar gemacht wer-den, sich in ihrem Kernstück oft wiederholen. Der angehende Ingenieur, der im Berufsleben elektrotechnische Probleme zu lösen hat, soll daher in diesem Buche kennenlernen:

1. Die grundlegenden Naturgesetze der elektrischen Welt;
2. Grundlegende technische Anwendungen;
3. Arbeitsmethoden zur Lösung elektrotechnischer Probleme.

Bemerkungen zu 1.

Es ist eine bekannte Tatsache, daß die Lehre von der elektrischen Welt dem Lernenden weit mehr Schwierigkeiten bereitet als die Mecha-

nik, d.h. die Lehre von der materiellen Welt. Offenbar hat das zwei Ursachen:

a) Wir besitzen keine Sinnesorgane, um die Partner der elektrischen Welt, z. B. die Ladungen oder Spannungen, direkt wahrzunehmen. Daher sind sie uns nicht von Kindesbeinen an gewohnt, und mithin erscheint uns ihr Verhalten nicht als selbstverständlich. Hiergegen hilft nur fleißiges, tiefgründiges Sich-damit-Beschäftigen.

b) Dem Lernenden ist meist zu wenig von der Sprache, die zur Beschreibung der physikalischen Dinge dient, und ihrer Methodik bekannt, was sich wegen des Umstandes a) besonders nachteilig auswirkt. Um hierüber von vornherein Klarheit zu schaffen, ist der Stoffbehandlung ein kurzer Abschnitt (Einführungskapitel) **Vorbetrachtung über physikalische Größen und Naturgesetze** vorangestellt.

Der Stoff selbst läßt sich bekanntlich in drei arteigene Gebiete aufteilen, die die Grundsäulen unseres Lehrgebietes darstellen: 1. Kapitel: **Elektrische Erscheinungen in Leitern**; 2. Kapitel: **Elektrische Erscheinungen in Nichtleitern**; 3. Kapitel: **Elektromagnetische Erscheinungen**. Bei jedem Kapitel verwendet man zwei Betrachtungsweisen, um die Erscheinungen vollständig zu erfassen: die örtliche und die energetische.

Die örtliche Betrachtungsweise – sie soll bei jedem der drei Erscheinungsgebiete die Verteilung auf den zur Verfügung gestellten Raum beschreiben, also jeweils die arteigene „Welt“ – kann man für das Leiter-, Nichtleiter- und magnetische Gebiet in völlig analoger Formulierung durchführen. Hierzu muß man nur die Grundbegriffe nach etwas höheren Gesichtspunkten definieren (Strom im erweiterten Sinn, Spannung im erweiterten Sinn). Da dadurch eine wesentliche Vereinfachung und Vertiefung der Lehre entsteht, nützen wir diese Möglichkeit mit einer fast unerbittlichen Konsequenz aus. Der Spannungsbegriff, der bekanntlich dem Lernenden die größte Schwierigkeit bereitet, wird im Gegensatz zur üblichen Gepflogenheit¹ direkt über die Energie hergeleitet, da die Spannung mit dieser in unmittelbarer Beziehung steht.

Die energetische Betrachtungsweise – sie soll die Wechselwirkung jeder der drei arteigenen „Welten“ mit der Umwelt beschreiben – hinterläßt uns stets das Gefühl, besonders tief in das Naturwalten eingeblickt zu haben, offenbar weil Energiebegriff und -satz allen Naturgebieten gemeinsam sind. Wir legen daher auf energetische Betrachtungen besonderen Wert.

¹ Hiernach wird die Spannung über die Feldstärke eingeführt. Es will uns nachteilig erscheinen, daß der Grundbegriff Spannung erst über diesen Umweg erhalten wird. Wir leiten umgekehrt die Feldstärke aus der Spannung her durch Bezugnahme auf die örtliche Verteilung, analog wie man ebenfalls über die örtliche Verteilung die Stromdichte aus der Stromstärke gewinnt.

Beim Dielektrikum und beim Magnetikum bilden die Verkopplungsgesetze, die Strom- bzw. Spannungsgrößen dieser Gebiete mit denen des Leitergebietes verknüpfen, das Verbindungsglied zwischen der örtlichen und der energetischen Betrachtung. Diese Verkopplungsgesetze verursachen viel Verwirrungen in der Elektrizitätslehre, da ihre Formulierung Inkonsequenzen enthält. Wir versuchen letztere nicht zu übergehen, sondern klar aufzuzeigen.

Den oben erwähnten drei Kapiteln ist noch ein kurzes 4. Kapitel, **Rückblick über die drei Erscheinungsgebiete an Hand der Wechselströme**, angefügt. In diesem Kapitel soll nur das in den drei Hauptkapiteln Kennengelernte an der speziellen und technisch so wichtigen Form der Wechselströme im raschen Flug noch einmal überblickt und auf diese Weise wiederholt werden. Gleichzeitig soll der Leser für eine genauere Behandlung der Wechselströme vorbereitet sein.

Bemerkungen zu 2.

Die charakteristischen Verfahren und Geräte der Elektrotechnik, die zum selbstverständlichen Wissensbestand des Ingenieurs gehören, werden jeweils als Nutzenanwendung des Naturverhaltens, auf dem sie beruhen, angeführt. Hier beschränken wir uns im Gegensatz zur Mehrzahl der Bücher nicht auf die Anwendungen in der Starkstromtechnik, sondern behandeln die der Schwachstromtechnik gleichberechtigt. Das erscheint uns wichtig, da die technische Grundforderung nach einer möglichst hohen Wirtschaftlichkeit in beiden Fällen zu völlig verschiedenen Folgerungen führt.

Bemerkungen zu 3.

Man erwartet vom Ingenieur, daß er rationell arbeitet. Die bekannten hierzu entwickelten Methoden werden daher gründlich behandelt, soweit sie für den Anfänger anwendbar sind, wie z. B. die Ersatzschaltungen, die Zweipoltheorie, das Rechnen mit Größengleichungen u. a. m. Sie sollen befähigen, einerseits Probleme rasch überschlagsmäßig zu übersehen, andererseits sie exakt und schnell rechnerisch zu lösen.

Zur Darstellung des Stoffes

Um dem Leser das Lernen möglichst zu erleichtern, sind die drei Hauptkapitel soweit als möglich in gleicher Weise aufgebaut. In jedem Kapitel ist der Stoff weitgehend aufgegliedert, selbst kleine Abschnitte tragen ein vorangestelltes Kennwort, damit man sicher weiß, was jeweils behandelt werden soll. Die wichtigsten Ergebnisse sind teils in Form von Sätzen, teils als Formeln eingerahmt, um klar zu kennzeichnen, worauf es ankommt. Da den Gleichungen nicht ohne weiteres anzusehen ist, ob

sie (vom Menschen festgesetzte) Definitionsgleichungen für eine Größe, oder ob sie Naturgesetze sind, wird dieses jeweils vermerkt. Zur Erhöhung der Anschaulichkeit der Darstellung wurde an Bildern nicht gespart. Weil man in der Sprache der Elektrotechnik eine Anzahl Worte gebraucht, die vorerst dem Lernenden einen falschen Eindruck erwecken und somit verwirren können¹, sind diese nach Möglichkeit ersetzt oder der Leser wird wenigstens aufmerksam gemacht. Die Normenbestimmungen und die Richtlinien des AEF (Auschuß für Einheiten und Formelgrößen) wurden berücksichtigt außer in den wenigen Fällen, wo dem Verfasser Änderungsbestrebungen bekannt sind.

Ich nehme die Gelegenheit gern wahr, um meinem verehrten Lehrer, Herrn Prof. Dr. H. BARKHAUSEN, meinen besonderen Dank zu sagen. Durch offene Kritik der Vorlesung, aus der dieses Buch entstand, trug er zu manchen Verbesserungen bei. Weiterhin gilt mein aufrichtiger Dank Herrn Prof. Dr. FELDTKELLER, der freundlicherweise von sich aus übernahm, die Korrekturen mitzulesen, zu kritisieren und Verbesserungshinweise zu geben. Besonders danke ich noch meinem Hauptassistenten, Herrn Dipl.-Ing. KLAUS LUNZE, für seine tatkräftige und mühevollen Hilfe bei den Vorarbeiten zu dem Buch und für das gründliche Mitlesen aller Korrekturen. Herr cand. ing. GERALD SAHNER hat mit anderen fleißigen Helfern die vielen Zeichnungen fertiggestellt.

Dresden, im November 1950

H. Schönfeld

¹ Z. B.: Das, was mit „Elektromotorischer Kraft“ bezeichnet wird, hat nichts mit Kraft, sondern etwas mit Energie zu tun. Wir bevorzugen für diese Form der Spannung den Ausdruck „Urspannung“. Die Bezeichnung „Stromquelle“ erweckt den Gedanken, daß der Strom nur aus dieser herausfließen könnte. Da er aber stets mit der gleichen Stärke einströmen muß, also nur durchfließt, dort nur seinen Antrieb erhält, verwenden wir das Wort „Spannungsquelle“. Auch auf solche, das Lernen erschwerende Unebenheiten, z.B. Strom und Spannung nebeneinander zu nennen, wobei der Strom eine Erscheinung ist, die Spannung aber eine physikalische Größe (die die Antriebserscheinung charakterisiert), weisen wir hin.

Inhaltsverzeichnis

Vorbetrachtung über physikalische Größen und Naturgesetze	1
Erstes Kapitel: Elektrische Erscheinungen in Leitern	6
I. Linienhafte Leiter	6
A. Grundbegriffe	6
1. Strom: Was wird als Strom bezeichnet? – Kennzeichen – Bestimmungsstücke – Einheiten – Strommeßinstrumente – Größenvorstellung – Haupteigenschaft	6
2. Spannung: Was wird mit Spannung bezeichnet? – Die zwei Formen der Spannung – Die drei wichtigsten Erzeugungsarten von Urspannungen – Kennzeichen der Spannung – Definition der beiden Spannungen – Einheit – Spannungsmeißinstrumente – Größenvorstellung – Grundeigenschaften	15
3. Widerstand: Was wird mit Widerstand bezeichnet? – Leiter/Nichtleiter – Definition des Widerstandes – Ohmsches Gesetz – Widerstands-Bemessungsgleichung – Einheit – Leitwert – Zahlenwerte – Technische Ausführungsformen	27
B. Stromkreise	36
1. Strom, Spannung und Widerstand im Stromkreis	37
2. Der Grundstromkreis	46
3. Methoden zur Berechnung von Leitungsnetzen: Kirchhoffsche Sätze – Überlagerungssatz – Satz von der Ersatzspannungsquelle (Zweipoltheorie)	50
C. Elektrische Energie und Leistung	60
1. Grundbeziehungen und Definitionen	60
2. Leistungsbetrachtung bei stromdurchflossenen Schaltelementen: Widerstand – Urspannung – Kapazität, Induktivität	67
3. Leistungsbetrachtung beim Stromkreis: Nicht umkehrbarer Energieumsetzer als Verbraucher – Urspannung mit Widerstand als Verbraucher – Stromkreis mit Leitungen	71
4. Meßinstrumente und Leistung: Leistungsbedarf der Instrumente – Auswirkung auf Messungen	78
5. Umformung elektrische Energie → Wärmeenergie (und umgekehrt): Grundlegende Fragen – Wärmegeräte – Thermoelemente	82

6. Umformung elektrische Energie \rightleftharpoons Lichtenergie: Grundlegendes vom Licht – Umformung elektrische Leistung \rightarrow Lichtleistung – Umformung Lichtleistung \rightarrow elektrische Leistung	90
7. Umformung elektrische Energie \rightleftharpoons chemische Energie: Grundlagen – Umwandlung elektrische Energie \rightarrow chemische Energie (Elektrolyse) – Umwandlung chemische Energie \rightarrow elektrische Energie (galvanische Elemente) – Umkehrbare Energieumwandlung elektrische \rightleftharpoons chemische Energie in der gleichen Zelle (Sammler, Akkumulator) . . .	102
II. Räumliche Leiter	117
A. Die Grundbegriffe am Beispiel der flächenhaften Leiter	118
1. Mit Strom verknüpfted Feld	118
2. Mit Spannung verknüpfte Felder: Bezogenes Spannungsfeld – Feldstärkefeld	122
3. Der Zusammenhang zwischen mit Strom und mit Spannung verknüpften Feldern	128
4. Randbedingungen	130
5. Widerstand	131
B. Räumliche Strömung	132
 Zweites Kapitel: Elektrische Erscheinungen in Nichtleitern	 134
A. Die maßgebenden Felder	134
1. Mit Spannung verknüpfte Felder: Spannungsfeld – Feldstärkefeld	134
2. Mit Strömung verknüpfte Felder: Dielektrischer Strom – Verschiebungsfluß – Zusammenhang zwischen beiden Strömungsfeldern	136
3. Zusammenhang der mit Spannung und mit Strömung verknüpften Felder	144
B. Kapazität: Definition und Folgerungen – Wesen – Strom und Spannung – Zusammenschaltungen – Technische Ausführungen	146
C. Energien und Kräfte im Nichtleiter	151
1. Energien: Grundsätzliches – Schaltvorgänge am Kondensator	151
2. Kräfte: Grundlagen – Anwendungen – Piezoelektrizität	156
D. Influenz	160
1. Wesen	160
2. Teilkapazitäten	161
3. Anwendungen: Ladungstrennung – Wanderwellen – Elektrische Abschirmung – Aufladung von Hohlkörpern – Ströme durch Influenz	162
E. Freie Ladungen	165
1. Grundlagen: Definition – Erzeugung freier Ladungen – Freie Ladungen im Spannungsfeld – Freie Ladungen im Feldstärkefeld – Konvektionsströme	165
2. Anwendungen: Ströme im Hochvakuum – Ströme in Gasen	169

Drittes Kapitel; Elektromagnetische Erscheinungen	174
I. Die grundlegenden magnetischen Erscheinungen	174
A. Linienhafte magnetische Leiter	175
1. Analogien	175
2. Einzelbetrachtungen: Magnetischer Fluß – Magnetische Spannung – Magnetischer Widerstand	176
B. Räumliche Leiter	183
1. Analogien	183
2. Einzelbetrachtungen: Flußdichte (Induktion) – Feldstärke – Verknüpfung beider Feldgrößen	183
II. Kopplung zwischen elektrischen und magnetischen Größen	190
A. Kopplung elektrische → magnetische Größen	190
1. Qualitatives	190
2. Quantitatives: Durchflutungsgesetz – Gesetz von BIOT-SAVART	191
3. Elektrisch erregter Eisenkreis mit Luftspalt	195
4. Magnetische Felder wichtiger Stromgebilde: Gerader, unendlich langer Runddraht – Konzentrischer Leiter – Paralleldrahtleitung mit Hin- und Rückleiter – Kreisschleife – Lange enge Spule mit w Windungen – Ringspule mit w Windungen	197
B. Kopplung magnetische → elektrische Größen = Induktion	201
1. Qualitatives	201
2. Quantitatives: Induktionsgesetz in allgemeiner Form – Induktionsgesetze in spezieller Form für Relativbewegungen	203
3. Anwendungen der Induktionserscheinung: Elektrische Generatoren (Starkstromtechnik) – In Schwachstromtechnik – Spannungserzeugung in massiven Leitern	209
C. Gegenseitige Verkopplung elektrische \Leftrightarrow magnetische Größen	217
1. Vorbetrachtung	217
2. Selbstinduktion: Induzierte Spannung – Induktivität – Stromverhalten im Kreis mit Induktivität	218
3. Gegeninduktion: Induzierte Spannung – Gegeninduktivität – Transformator – Elektromagnetische Wellen	225
III. Energien und Kräfte im magnetischen Feld	236
A. Energien	237
1. Mit Magnetfeld verknüpfte Energien und magnetische Größen	237
2. Mit Magnetfeld verknüpfte Energien und elektrische Größen	240
B. Kräfte	242
1. An Trennflächen Ferromagnetika/Nichtferromagnetika: Grundlagen – Elektromagnet – Anwendungen	243
2. Kräfte auf Ströme im Magnetfeld: Grundlagen – Anwendungen (antreibende Kräfte, bremsende Kräfte)	251
3. Kraftwirkungen von Strömen aufeinander	263

Viertes Kapitel:**Rückblick über die drei Erscheinungsgebiete an Hand der Wechselströme** 265

A. Eigenschaften sinusförmiger Größen	265
1. Eine sinusförmige Schwingung	265
2. Addition von zwei Sinusgrößen	268
B. Strom, Spannung und Widerstand bei Wechselgrößen	270
1. Grundschaltelemente	270
2. Zusammenschaltungen von Grundschaltelementen	273
C. Leistung bei Wechselströmen	276
D. Drehstrom (Starkstromtechnik)	279
E. Modulation (Schwachstromtechnik)	284
F. Umformen einer Stromart in eine andere	285
1. Wechselstrom \rightarrow Gleichstrom	285
2. Gleichstrom \rightarrow Wechselstrom	287

Anhang:

I. Einheiten und Einheitensysteme	289
II. Einige wichtige Konstanten	297
III. Vorzeichen der Größen	297
IV. Die wichtigsten Kurzzeichen auf Instrumenten	299
V. Die wichtigsten Schaltzeichen	300
VI. Lösungen der Aufgaben	301
Literaturverzeichnis	316
Sachverzeichnis	317