

**de Gruyter Lehrbuch
Michel, Elektrotechnik II**

Einführung in die Allgemeine Elektrotechnik

II. Elektrisches und magnetisches Feld Einfache Schaltungen mit Transistoren und Operationsverstärkern

von
Manfred Michel

Mit 127 Abbildungen und 4 Tabellen



Walter de Gruyter · Berlin · New York · 1975

Dr.-Ing. Manfred Michel,

o. Professor für Allgemeine Elektrotechnik an der Technischen Universität Berlin

© Copyright 1975 by Walter de Gruyter & Co., vormals G.J. Göschen'sche Verlagshandlung – J. Guttentag, Verlagsbuchhandlung – Georg Reimer – Karl J. Trübner – Veit & Comp., Berlin 30. – Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (durch Photokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. Printed in Germany. Satz: IBM-Composer, Walter de Gruyter & Co., Berlin – Druck: K. Gericke, Berlin. – Buchbindearbeiten: Wübben, Berlin
ISBN 3 11 005880 4

Vorwort zum Band II

Band I der „Einführung in die Allgemeine Elektrotechnik“ stellte die Arbeitsverfahren zur Berechnung einfacher elektrischer Netzwerke dar.

Im vorliegenden zweiten Band werden in den ersten Abschnitten die elektrotechnischen Gesetze erörtert, die die Arbeitsweise elektrischer Bauelemente beschreiben. Das sind die Gesetze des elektrischen Feldes im Leiter, des elektrostatischen und des magnetischen Feldes. Ein weiterer Abschnitt befaßt sich mit den Wechselwirkungen zwischen magnetischen und elektrischen Feldern.

Ergänzt wird der Band durch zwei Abschnitte über die Anwendung von Transistoren und Operationsverstärkern. Damit ist beabsichtigt, die in vielen Bereichen der Elektrotechnik angewendeten Bauelemente, die erst in den letzten Jahren entwickelt worden sind, in die Grundausbildung der Studenten der Elektrotechnik einzubeziehen.

Der Anlage des Buches entsprechend, wird der Leser in die einzelnen Gebiete der Elektrotechnik eingeführt. Es soll ihn in die Lage versetzen, das vertiefte Studium in den einzelnen Gebieten aufzunehmen. Wie im Vorwort zum Band I gesagt, entspricht der in den beiden Bänden der „Einführung in die Allgemeine Elektrotechnik“ behandelte Stoff etwa dem der zweiseimestrigen Vorlesung „Grundzüge der Elektrotechnik“ an der Technischen Universität Berlin. Diese Vorlesung dient als Einführungsveranstaltung für alle Studenten der Elektrotechnik.

Auch im zweiten Band haben die den einzelnen Abschnitten angefügten Aufgaben eine besondere Bedeutung. Viele von ihnen dienen der Erweiterung des dargebotenen Stoffes unter besonderer Betonung der praktischen Anwendung. Alle Aufgaben sollten dazu benutzt werden, das Verständnis durch selbständige Arbeit zu vertiefen. Die angegebenen Lösungen sollten lediglich zur Kontrolle verwendet werden.

Berlin, im Februar 1975

Manfred Michel

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zum Band II	5
8. Elektrisches Feld im Leiter	11
8.1 Feldgrößen	11
8.2 Materialeigenschaften des Leiters	13
8.3 Feldliniendarstellung	13
9. Elektrisches Feld im Nichtleiter	16
9.1 Das Coulombsche Gesetz	16
9.2 Feldgrößen	16
9.3 Materialeigenschaften des Dielektrikums	19
9.4 Eigenschaften des elektrostatischen Feldes	20
9.5 Kapazität	22
9.6 Energie im elektrostatischen Feld	25
9.7 Aufgaben zum Abschnitt 9	27
10. Magnetisches Feld	38
10.1 Feldgrößen	38
10.2 Einfluß der Materialeigenschaften im magnetischen Feld	45
10.3 Magnetischer Kreis	48
10.4 Aufgaben zum Abschnitt 10	51
11. Wechselwirkung zwischen magnetischem und elektrischem Feld	63
11.1 Induktionsgesetz	63
11.2 Anwendung des Induktionsgesetzes	70
11.3 Energie im magnetischen Feld	76
11.4 Aufgaben zum Abschnitt 11	78
12. Anwendung von Transistoren	90
12.1 Aufbau des Transistors, Schaltbild, Diodenersatzschaltbild	90
12.2 Kennlinien des Transistors	91
12.3 Transistor-Grundsaltungen	93
12.4 Emitterschaltung als Niederfrequenzverstärker	97
12.5 Transistoreigenschaften in der Vierpoldarstellung	100
12.6 Anwendung des Transistors als Schalter	103
12.7 Aufgaben zum Abschnitt 12	104
13. Anwendung von Operationsverstärkern	116
13.1 Eigenschaften von Operationsverstärkern	116
13.2 Prinzip der Gegenkopplung beim Operationsverstärker	119
13.3 Beispiele für Gegenkopplungsschaltungen	121
13.4 Aufgaben zum Abschnitt 13	125

14. Anhang: Zusammenstellung einiger Begriffe aus der Vektorrechnung	131
14.1 Skalare und vektorielle Größen	131
14.2 Vektorielle Darstellung im rechtwinkligen Koordinatensystem	131
14.3 Vektor-Eigenschaften von Weg- und Flächenelementen	132
14.4 Skalares Produkt	133
14.5 Vektorielles Produkt	133
14.6 Differentiation eines Vektors nach einem Skalar	134
Literatur	135
Sachregister zu Band I/II	136

Inhaltsverzeichnis zum Band I

Vorwort	5
1. Grundbegriffe	11
1.1 Physikalische Größen, Einheiten	11
1.2 Elektrische Größen	15
Elektrische Ladung	15
Elektrischer Strom	16
Elektrische Spannung	18
Energie, Leistung	21
Elektrischer Widerstand	21
Ohmsches Gesetz	22
Berechnung des Widerstandes für einen linienhaften Leiter	23
Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstandes	24
1.3 Aufgaben zum Abschnitt 1	25
2. Grundelemente in elektrischen Netzwerken	29
2.1 Spannungen und Ströme	29
2.2 Aktive Netzwerkelemente, aktive Zweipole	33
2.3 Leistung bei zeitveränderlichen Größen	35
2.4 Passive Netzwerkelemente	36
2.5 Aufgaben zum Abschnitt 2	39
3. Grundgesetze elektrischer Netzwerke	47
3.1 Vorbemerkungen	47
3.2 Kirchhoffsche Sätze	48
3.3 Reihen- und Parallelschaltungen	51
3.4 Spannungs- und Stromteilerregeln	54
3.5 Reihen- und Parallelschaltung von Drosselspulen und Kondensatoren	55
3.6 Einfaches Ersatzbild für die technische Ausführung aktiver Zweipole	57
3.7 Die Anwendung von Ersatzspannungs- und Ersatzstromquellen	60
3.8 Überlagerungsprinzip	63
3.9 Aufgaben zum Abschnitt 3	64
4. Netzwerke bei Speisung mit harmonischen Größen	73
4.1 Darstellung von harmonischen Größen	73
4.2 Definition der Wechselstromwiderstände und Wechselstromleitwerte	78
4.3 Berechnung der Leistung bei harmonischen Größen	84
4.4 Mehrphasensysteme	86
4.5 Aufgaben zum Abschnitt 4	94
5. Frequenzabhängigkeit elektrischer Netzwerke	106
5.1 Ortskurven	106
5.2 Frequenzgang-Darstellung	112

5.3	Resonanz	117
5.4	Aufgaben zum Abschnitt 5	126
6.	Netzwerke mit nicht-linearen Elementen	139
6.1	Darstellung der Eigenschaften nicht-linearer Netzwerkelemente	139
6.2	Zusammenschaltung linearer und nicht-linearer Netzwerkelemente	144
6.3	Nicht-lineare Elemente bei Speisung mit harmonischen Größen	148
6.4	Effektivwert und Leistung bei nicht-sinusförmigen Größen	154
6.5	Aufgaben zum Abschnitt 6	157
7.	Ausgleichsvorgänge in Netzwerken	171
7.1	Ausgleichsvorgänge, die nur Drosselspulen oder nur Kondensatoren enthalten	172
7.2	Ausgleichsvorgänge, die Drosselspulen und Kondensatoren enthalten	179
7.3	Aufgaben zum Abschnitt 7	185
	Literatur	199
	Sachregister	200

8. Elektrisches Feld im Leiter

Im folgenden werden elektrische Erscheinungen in räumlich ausgedehnten Gebieten betrachtet. Alle vorangegangenen Berechnungen beschäftigten sich mit der Zusammenschaltung diskreter Bauelemente zu Netzwerken. Die Eigenschaften der Bauelemente wurden durch die Zweipolgleichungen dieser Elemente beschrieben. Die Verbindung der Bauelemente untereinander erfolgte durch widerstandsfreie Leitungen.

In diesem Abschnitt sollen die elektrischen Erscheinungen untersucht werden, die in elektrischen Leitern mit einem endlichen Widerstandswert vorliegen für den Fall, daß die räumliche Ausdehnung des Leiters berücksichtigt werden muß. In solchen Leitern liegt eine Strömung von Ladungsträgern vor, so daß das elektrische Feld im Leiter auch **Strömungsfeld** heißt.

8.1 Feldgrößen

Zur Beschreibung der elektrischen Erscheinungen in räumlich ausgedehnten Leitern, die mit strömenden Ladungsträgern verbunden sind, werden zwei Größen definiert:

- Eine Größe, die den Antrieb auf Ladungsträger beschreibt.
- Eine Größe, die die Strömung selbst beschreibt.

In der Gleichung (1.2) im Abschn. 1 wird, ausgehend von der Kraftwirkung in einem elektrischen Feld, eine Antriebsgröße – die **Feldstärke** – definiert

$$\vec{E} = \frac{1}{Q} \vec{F}$$

Sie ist die auf die Ladungseinheit wirkende Kraft und ist eine im Raum gerichtete Größe.

Über die Vorstellung der Ortsverteilung der potentiellen Energie im elektrischen Feld war in der Gleichung (1.6) das elektrische Potential eingeführt worden. Aus dieser Gleichung kann der Betrag der Feldstärke bestimmt werden:

$$|\vec{E}| = E = - \frac{dV}{dn} \quad (8.1)$$

Die Richtung von \vec{E} ist gegeben durch die Richtung der Kraftwirkung auf die Ladung (Gleichung (1.2)). Diese ist identisch mit der Richtung der größten Potentialänderung. In der Gleichung (8.1) ist dn demzufolge ein Wegelement in der Richtung der größten Potentialänderung dV .

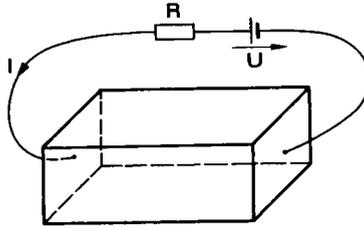


Bild 8.1 Beispiel eines räumlichen, ausgedehnten Leiters

Das Bild 8.1 zeigt einen räumlich ausgedehnten Leiter, der an einen Stromkreis angeschlossen ist. Der im Kreis fließende Strom I setzt sich auch in dem räumlich ausgedehnten Leiter als Strömung von Ladungsträgern fort. Zur Beschreibung dieses Vorganges genügt die Größe Strom nicht, da etwas über die örtliche Verteilung der Strömung im Leiter ausgesagt werden soll. Daher wird der auf die Querschnittsfläche bezogene Strom verwendet. Diese Größe heißt **Stromdichte**. Ihr Betrag wird definiert:

$$|\vec{S}| = S = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta I}{\Delta A} = \frac{dI}{dA} \quad (8.2)$$

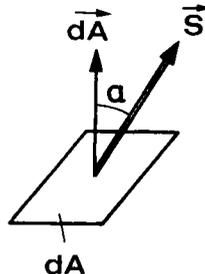
Der Gesamtstrom durch eine Fläche A ist dann durch die Summation der Ströme durch die Flächenelemente zu bestimmen.

$$I = \int^A \vec{S} \cdot d\vec{A} \quad (8.3)$$

Nun ist bei einer allgemeinen Strömung nicht notwendig, daß das Flächenelement dA dieselbe Richtung hat wie S . In der Gleichung (8.3) soll berücksichtigt werden, daß Fläche und Stromdichte Vektoren sind.

$$I = \int^A \vec{S} \cdot d\vec{A} \quad (8.4)$$

Die Richtung des Flächenelementes wird durch den Normalvektor $d\vec{A}$ gekennzeichnet. Die Stromdichte in diesem Flächenelement wird durch \vec{S} wiedergegeben. Für den Strom in Richtung $d\vec{A}$ kommt nur die Komponente $|\vec{S}| \cos \alpha$ in

Bild 8.2 Vektorielle Darstellung Stromdichte \vec{S} und Flächenelement $d\vec{A}$

Frage. Dieses wird durch die vektorielle Schreibweise in der Gleichung (8.4) berücksichtigt (Gleichung (14.3) im Abschn. 14).

Als Richtung von \vec{S} wird die Strömungsrichtung der positiven Ladungsträger verwendet.

8.2 Materialeigenschaften des Leiters

Mit Hilfe eines Experimentes läßt sich zeigen, daß im elektrischen Strömungsfeld zwischen der den Antrieb beschreibenden Größe – Feldstärke \vec{E} – und der die Strömung beschreibenden Größe – Stromdichte \vec{S} – der folgende Zusammenhang besteht:

$$\vec{S} = \kappa \vec{E} \quad (8.5)$$

Das Experiment zeigt, daß mit der Größe κ die Materialeigenschaften berücksichtigt werden können.

Das soll in folgender Weise geschehen:

Die Materialgröße κ ist für den betrachteten Raumausschnitt vom Ort unabhängig, dann liegt ein homogenes Material vor. Bei Ortsabhängigkeit von κ liegt inhomogenes Material vor.

Für die Materialien, bei denen die Strömungsrichtung identisch ist mit der Antriebsrichtung, d. h. bei denen die Richtungen von \vec{S} und \vec{E} übereinstimmen, ist κ eine skalare Größe. Solche Stoffe heißen isotrope Stoffe. Stoffe, bei denen die Materialgröße von der Richtung abhängig ist, heißen anisotrope Stoffe in bezug auf die Größen des Strömungsfeldes.

Schließlich ist zu unterscheiden zwischen Stoffen, bei denen κ nicht von der Feldstärke abhängt, κ also eine Stoffkonstante ist, und Stoffen, bei denen κ nicht konstant ist.

Die meisten Leiterwerkstoffe sind isotrope Stoffe mit einer konstanten Materialgröße κ . Sie lassen sich oft so herstellen, daß sie als homogene Leiter verwendet werden können. Dann ist κ die im Abschn. 1.2 eingeführte Leitfähigkeit (siehe Tab. 1.4).

8.3 Feldliniendarstellung

Soll das Strömungsfeld vollständig beschrieben werden, so müssen für jeden Punkt des Raumes \vec{E} und \vec{S} angegeben werden. Es ist zu beachten, daß damit für jeden Punkt eine Betrags- und eine Richtungsaussage über die Feldstärke und die Stromdichte gemacht wird.

Eine anschauliche Darstellung ergibt sich, wenn das Feld durch eine Anzahl von **Feld- oder Kraftlinien** beschrieben wird. Diese entstehen, wenn ausgehend von einem Punkt die Kraftrichtung auf einen positiven Ladungsträger jeweils in differentiellen Abständen eingezeichnet wird und wenn dieser Polygonzug durch eine Kurve ersetzt wird. Die Tangentenrichtung an die so entstandene Feldlinie gibt die Kraft- und damit die Feldstärkerichtung in jedem Punkt an. Die Feldlinien werden um so dichter gezeichnet, je größer die Feldstärke ist.

Bei einem homogenen Stoff, für den $\kappa = \text{konst}$ ist, gilt die Richtungsaussage sowohl für die Feldstärke als auch für die Stromdichte. Der Betrag der Stromdichte ist entsprechend der Gleichung (8.5) zu berechnen.

Für diesen Fall ($\kappa = \text{konst}$) läßt sich auch der Abstand der einzelnen Feldlinien gut veranschaulichen. Der Abstand zweier Feldlinien ist so zu wählen, daß in dem bei einem ebenen Feld von zwei Feldlinien gebildeten Streifen ein konstanter Teilstrom fließt.

Analog dazu begrenzen in einem räumlich ausgedehnten Feld vier Feldlinien eine Röhre, in der ein konstanter Teilstrom fließt.

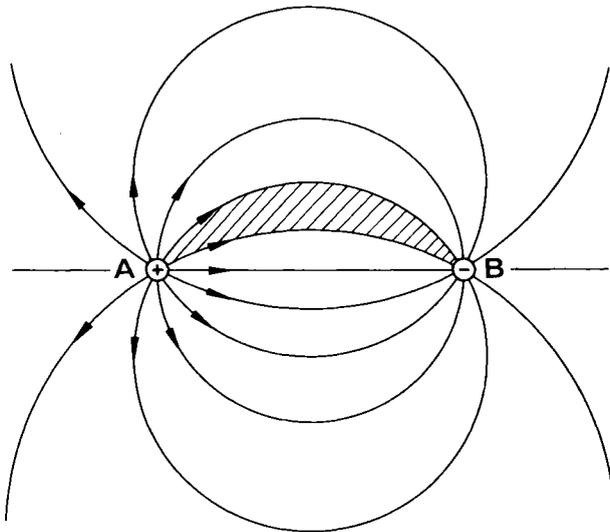


Bild 8.3 Feldlinienbild des Strömungsfeldes in einem ebenen Leiter

Das Bild 8.3 zeigt das Feldlinienbild eines ebenen Leiters mit einer Stoffkonstanten $\kappa = \text{konst}$. Es wird dabei angenommen, daß bei A eine Strömung in den Leiter eintritt und diesen bei B wieder verläßt. Dieser Gesamtstrom wird in 12 Teilströme gleichmäßig aufgeteilt. Das Feldbild zeigt zwölf Streifen, in denen je ein Teilstrom fließt. Im Bild 8.3 wurde einer dieser Streifen zur Veranschaulichung hervorgehoben.