

# Teubner Studienskripten (TSS)

Mit der preiswerten Reihe **Teubner Studienskripten** werden dem Studenten ausgereifte Vorlesungsskripten zur Unterstützung des Studiums zur Verfügung gestellt. Die sorgfältigen Darstellungen, in Vorlesungen erprobt und bewährt, dienen der Einführung in das jeweilige Fachgebiet. Sie fassen das für das Fachstudium notwendige Präsenzwissen zusammen und ermöglichen es dem Studenten, die in den Vorlesungen erworbenen Kenntnisse zu festigen, zu vertiefen und weiterführende Literatur heranzuziehen. Für das fortschreitende Studium können **Teubner Studienskripten** als Repetitorien eingesetzt werden. Die auch zum Selbststudium geeigneten Veröffentlichungen dieser Reihe sollen darüber hinaus den in der Praxis Stehenden über neue Strömungen der einzelnen Fachrichtungen orientieren.

Zu diesem Buch

Dieses Skriptum enthält den Stoff einer Vorlesung für Elektrotechniker vor dem Vorexamen. Der Studieneinrichtung entsprechend werden die elektrische Leitfähigkeit, die dielektrischen Eigenschaften und das magnetische Verhalten der Werkstoffe in den Vordergrund gestellt. Die Behandlung der Metallurgie, der Werkstoffprüfung und -verarbeitung beschränkt sich auf die im Rahmen der Ingenieurwissenschaften notwendigen Grundkenntnisse. Zum selbständigen Erarbeiten des Stoffes anhand des Skriptums sind elementare Kenntnisse in Physik, Chemie und Mathematik ausreichend.

# Werkstoffe der Elektrotechnik

Von Dr. phil. nat. W. von Münch.  
o. Professor an der  
Universität Stuttgart

6., überarbeitete Auflage  
Mit 200 Bildern und 41 Tafeln



Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Prof. Dr. phil. nat. Waldemar von Münch

1928 in Berlin geboren. 1948 bis 1953 Studium der Physik an der Technischen Hochschule Braunschweig und an der Universität Frankfurt a. M. 1957 Promotion. Von 1954 bis 1961 wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fernmeldetechnischen Zentralamt der Deutschen Bundespost in Darmstadt. Von 1961 bis 1967 bei der Firma IBM Deutschland, Sindelfingen (Leiter der Abteilung "Galliumarsenid-Bauelemente"). 1968/69 wissenschaftlicher Abteilungsvorsteher und Professor am Institut für Halbleitertechnik der TH Aachen. Von 1969 bis 1978 o. Professor und Direktor des Institutes A für Werkstoffkunde der Technischen Universität Hannover. Seit 1978 Direktor des Institutes für Halbleitertechnik der Universität Stuttgart.

CIP-Titelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Münch, Waldemar von:

Werkstoffe der Elektronik / von W. von Münch. - 6., überarb. Aufl. - Stuttgart : Teubner, 1989

(Teubner-Studienskripten ; 115 : Elektrotechnik)

ISBN 978-3-519-00115-7

ISBN 978-3-322-93055-2 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-322-93055-2

NE: GT

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt besonders für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

© Springer Fachmedien Wiesbaden 1989

Ursprünglich erschienen bei B. G. Teubner Stuttgart 1989

Umschlaggestaltung: W. Koch, Sindelfingen

## Vorwort

Die Entwicklung der Elektrotechnik war von jeher eng mit der Bereitstellung geeigneter Werkstoffe verknüpft. Bereits in der Frühzeit der Elektrotechnik benötigte man metallische Leiterwerkstoffe zum Aufbau eines Stromkreises sowie dielektrische Werkstoffe zur Isolation der Leitungen und zur Speicherung elektrischer Ladung. Mit der Entdeckung der Verknüpfung von elektrischen und magnetischen Erscheinungen begann der Einsatz magnetischer Werkstoffe, zunächst im Rahmen der Nachrichtentechnik (Relais), später besonders in der Energietechnik (Generatoren, Transformatoren etc.). Einen besonders nachhaltigen Einfluß auf die Entwicklung der Elektrotechnik haben die vielfältigen Fortschritte auf dem Gebiet der Halbleitertechnologie ausgeübt.

Im vorliegenden Skriptum wird zunächst der Aufbau der Materie, insbesondere der kristallinen Festkörper, erläutert. In den folgenden Kapiteln erfolgt eine Beschreibung und physikalische Deutung der elektrischen und magnetischen Eigenschaften der Werkstoffe, insbesondere im Hinblick auf Anwendungen in passiven Bauelementen und Sensoren. Mechanische Eigenschaften und Materialprüfverfahren werden nur in dem Umfang behandelt, der für die Allgemeinbildung in einer ingenieurwissenschaftlichen Disziplin als notwendig zu erachten ist.

Für die Formelzeichen wurden nach Möglichkeit die Empfehlungen des Deutschen Institutes für Normung berücksichtigt, jedoch erschienen gewisse Abweichungen im Hinblick auf internationale Gepflogenheiten, z.B. in der Halbleitertechnik, zweckmäßig und das Verständnis erleichternd.

Bei der vorliegenden Neuauflage wurde das Skriptum nochmals stellenweise überarbeitet.

Stuttgart, Januar 1989

W. v. Münch

## Inhaltsverzeichnis

1	Aufbau und Eigenschaften der Materie	9
1.1	Elementarteilchen	9
1.2	Dualismus Welle - Korpuskel	14
1.3	Aufbau der Atome und das Periodische System der Elemente	17
1.4	Die chemische Bindung	29
1.5	Die Materie in ihren Aggregatzuständen	33
1.5.1	Gase und Flüssigkeiten	33
1.5.2	Kristalle und Kristallbaufehler	40
1.5.3	Amorphe Festkörper	53
1.6	Mechanische Eigenschaften der Festkörper	54
1.7	Elektrische Eigenschaften der Festkörper	66
2	Metalle	70
2.1	Eigenschaften der Metalle	70
2.1.1	Mechanische Eigenschaften der Metalle	70
2.1.2	Elektrische Eigenschaften der Metalle	74
2.2	Legierungen, Zustandsdiagramme	80
2.2.1	Legierungen als Konstruktionswerkstoffe	80
2.2.2	Elektrische Eigenschaften der Legierungen	93
2.3	Anwendungen der Metalle in der Elektrotechnik	95
2.3.1	Leiterwerkstoffe	95
2.3.2	Kontaktwerkstoffe	99
2.3.3	Widerstände	101
2.3.4	Anwendungen in der Meßtechnik	106
3	Halbleiter	111
3.1	Elementare Halbleiter, Verbindungshalbleiter	111
3.2	Eigenhalbleiter	113
3.2.1	Temperaturabhängigkeit der Eigenkonzentration	113
3.2.2	Leitungsmechanismus in Halbleitern	117
3.3	Störstellenhalbleiter	119
3.3.1	Elektronen- und Löcherleitung	119
3.3.2	Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit	122
3.4	Diffusions- und Feldstrom	124
3.5	Zeitliche und räumliche Ausgleichsvorgänge	126

3.6	Galvanomagnetische und thermoelektrische Effekte	130
3.7	<i>Fermi</i> -Statistik	133
3.8	Anwendungen der Halbleiterwerkstoffe	140
3.8.1	Widerstände	140
3.8.2	Dioden und Verstärkerbauelemente	147
4	Dielektrische Werkstoffe	149
4.1	Übersicht über dielektrische Werkstoffe	149
4.2	Makroskopische Eigenschaften dielektrischer Werkstoffe	150
4.2.1	Elektrische Leitfähigkeit	150
4.2.2	Dielektrizitätszahl und dielektrische Verluste	152
4.2.3	Durchschlagfestigkeit	156
4.3	Dielektrika im atomaren Bild	157
4.3.1	Leitungsmechanismen in Isolatoren	157
4.3.2	Polarisationsmechanismen	159
4.3.3	Resonanz und Relaxation	165
4.4	Spezielle Dielektrika	168
4.4.1	Gase und Flüssigkeiten	168
4.4.2	Organische Dielektrika	174
4.4.3	Anorganische Dielektrika	185
4.5	Ferro- und piezoelektrische Werkstoffe	195
4.6	Anwendungen dielektrischer Werkstoffe	199
5	Magnetische Werkstoffe	204
5.1	Magnetische Eigenschaften der Materie	204
5.2	Atommodell und Magnetismus	209
5.2.1	Dia- und Paramagnetismus	209
5.2.2	Ferro-, Antiferro- und Ferrimagnetismus	213
5.3	Spezielle magnetische Werkstoffe	222
5.3.1	Eisen, Nickel, Kobalt	222
5.3.2	Ferrite und Granate	231
5.4	Anwendungen magnetischer Werkstoffe	236
	Literaturverzeichnis	242
	Liste der verwendeten Formelzeichen	244
	Sachverzeichnis	251