

Werkstoffe in der Elektrotechnik

**Grundlagen – Struktur – Eigenschaften
Prüfung – Anwendung – Technologie**

von Hansgeorg Hofmann und Jürgen Spindler

begründet von Hans Fischer f

7., neu bearbeitete Auflage

mit 331 Bildern, 91 Tabellen
sowie zahlreichen Beispielen, Übungen und Testaufgaben

HANSER

Inhalt

Verwendete Formelzeichen (Fz) mit Einheiten(E) und Abkürzungen	13
1 Grundlagen	
1.0 Überblick	19
1.1 Atombau und Bindungen	21
1.1.1 Elektronenverteilung im Einzelatom	21
1.1.2 Bindungszustände	24
1.1.2.1 Atombindung	24
1.1.2.2 Ionenbindung	29
1.1.2.3 Metallbindung	31
1.2 Bildung von Ordnungszuständen in festen metallischen und nichtmetallischen anorganischen Werkstoffen	34
1.2.1 Ideale Kristallstruktur	36
1.2.2 Gittertypen	37
1.2.3 MiLLERsche Indizierung zur Angabe der Lage von Gitterebenen	42
1.2.4 Reale Kristallstruktur	43
1.3 Bildung von Ordnungszuständen in flüssigkristallinen Werkstoffen	48
1.3.1 Nematische Phasen	49
1.3.2 Cholesterische Phasen	51
1.3.3 Smektische Phasen	52
1.3.4 Kolumnare Phasen	53
1.3.5 Ausblick	53
1.4 Bildung von Phasen, Phasengleichgewichtsdiagramme	55
1.4.1 Phasenübergang flüssig-fest und fest-flüssig; Schmelzen und Erstarren	55
1.4.2 Zustandsdiagramme von metallischen Zweistoffsystemen	59
1.4.2.1 Legierungen mit vollständiger Löslichkeit der Komponenten im flüssigen Zustand und Unlöslichkeit im festen Zustand (V-Diagramm)	62
1.4.2.2 Legierung mit vollständiger Löslichkeit der Komponenten im flüssigen und völliger Löslichkeit im festen Zustand (Linsendiagramm)	64
1.4.2.3 Legierungen mit vollständiger Löslichkeit der Komponenten im flüssigen und teilweiser Löslichkeit im festen Zustand (Mischungslücke)	66
Selbstkontrolle zu Kapitel 1	69
2 Das mechanische Verhalten von Werkstoffen	
2.0 Überblick	71
2.1 Ausgewählte mechanische und thermische Kenngrößen	72
2.1.1 Mechanische Werkstoffkenngrößen	72
2.1.1.1 Zugversuch nach DIN EN ISO 6892-1 für Metalle	72
2.1.1.2 Zugversuch für Kunststoffe	75
2.1.1.3 Härteprüfung	77
2.1.1.4 Schlagfestigkeit	78
2.1.2 Thermische Werkstoffkenngrößen	79
2.2 Das Verformungsverhalten metallischer Werkstoffe	82
2.2.1 Elastische und plastische Verformung	82
2.2.2 Kristallerholung und Rekristallisation	85

2.3	Das Verformungsverhalten nichtmetallischer Werkstoffe	90
2.3.1	Das Verformungsverhalten polymerer organischer Werkstoffe	90
2.3.2	Das Verformungsverhalten nichtmetallischer anorganischer Werkstoffe	93
	Selbstkontrolle zu Kapitel 2	97
3	Das elektrische Verhalten von Werkstoffen	
3.0	Überblick	99
3.1	Ursachen der elektrischen Leitfähigkeit im Festkörper	99
3.2	Leitungsmechanismen	102
3.2.1	Leiter	102
3.2.2	Nichtleiter	105
3.2.3	Halbleiter	105
3.2.4	Supraleiter	107
	Selbstkontrolle zu Kapitel 3	110
4	Elektrochemisches Verhalten metallischer Werkstoffe	
4.0	Überblick	111
4.1	Redox-Reaktionen und das elektrochemische Potenzial	111
4.2	Galvanische Zellen	116
4.2.1	Zellen mit Metall-Anoden (Minuspol)	119
4.2.2	Zelle mit Li ⁺ -Ionen als Elektroden	121
4.3	Brennstoffzellen	125
4.4	Die Elektrolyse	128
4.5	Die elektrochemische Korrosion	130
	Selbstkontrolle zu Kapitel 4	134
5	Leiterwerkstoffe	
5.0	Überblick	136
5.1	Der spezifische elektrische Widerstand	136
5.2	Werkstoffe für kompakte Leiter	144
5.3	Werkstoffe für Leitschichten und Schichtkombinationen	155
	Selbstkontrolle zu Kapitel 5	162
6	Widerstandswerkstoffe	
6.0	Überblick	163
6.1	Werkstoffe für kompakte Widerstände	163
6.1.1	Präzisions- und Messwiderstände	164
6.1.2	Heizwiderstände (DIN 17470)	165
6.1.3	Werkstoffe für Dehnungsmessstreifen	166
6.2	Werkstoffe für Widerstandsschichten	168
	Selbstkontrolle zu Kapitel 6	172
7	Kontaktwerkstoffe	
7.0	Überblick	174
i 7.1	Der bewegte Kontakt	174
7.1.1	Physikalische und chemische Vorgänge am Kontakt	175
7.1.2	Werkstoffe für bewegte Kontakte	178
7.2	Der feste Kontakt	182
	Selbstkontrolle zu Kapitel 7	189

8 Halbleiterwerkstoffe	
8.0 Überblick	190
8.1 Werkstoffe für Sperrschicht gesteuerte Halbleiterbauelemente	191
8.1.1 Leitungsmechanismen, die n- und p-Leitung	193
8.1.2 Die spezifische elektrische Leitfähigkeit von Halbleiterwerkstoffen	196
8.1.3 Vorgänge am p-n-Übergang	198
8.1.4 Vorgänge in der p-n-p- bzw. n-p-n-Grenzschicht	206
8.1.5 Vorgänge im Feldeffekttransistor (FET)	208
8.2 Werkstoffe für Volumenhalbleiterbauelemente	210
8.2.1 Werkstoffe für Fotowiderstände	211
8.2.2 Werkstoffe für HALL-Sonden	212
8.2.3 Werkstoffe für Thermistoren und Varistoren	213
Selbstkontrolle zu Kapitel 8	216
9 Isolierstoffe und dielektrische Werkstoffe	
9.0 Überblick	218
9.1 Elektrische Kenngrößen	220
9.1.1 Spezifischer Durchgangswiderstand (Innenwiderstand)	220
9.1.2 Oberflächenwiderstand	221
9.1.3 Kriechstromfestigkeit	222
9.1.4 Durchschlagfestigkeit	222
9.2 Dielektrisches Verhalten	225
9.2.1 Polarisierung und Polarisationsmechanismen	225
9.2.2 Permittivitätszahl (Dielektrizitätszahl)	228
9.2.3 Dielektrischer Verlustfaktor	230
9.2.4 Temperatur- und Frequenzabhängigkeit	231
9.3 Isolierstoffe	233
9.3.1 Isolierstoffe für Kabel und Leitungen	234
9.3.2 Isolierstoffe für elektronische Baugruppen und Bauelemente	235
9.4 Dielektrika für Kondensatoren	244
9.5 Dielektrika für Sensoren und Aktuatoren	249
Selbstkontrolle zu Kapitel 9	255
10 Supraleitende Werkstoffe	
10.0 Überblick	257
10.1 Werkstoffentwicklung und Anwendungsmöglichkeiten	257
Selbstkontrolle zu Kapitel 10	263
11 Magnetwerkstoffe	
11.0 Überblick	264
11.1 Das magnetische Verhalten von Werkstoffen	264
11.1.1 Magnetische Größen	264
11.1.2 Ursachen des Magnetismus	266
11.2 Ferromagnetische Werkstoffe	272
11.2.1 Hartmagnetische Ferromagnetika	276
11.2.2 Weichmagnetische Ferromagnetika	281
11.3 Ferrimagnetische Werkstoffe	288
11.4 Magnetwerkstoffe für Speicher	292
Selbstkontrolle zu Kapitel 11	299

12		Inhalt
12	Lichtwellenleiter	
	12.0 Überblick	301
	12.1 Physikalische Grundlagen	301
	12.2 Werkstoffe und Technologie	306
	Selbstkontrolle zu Kapitel 12	311
13	Fertigungsverfahren in der Elektrotechnik und Elektronik	
	13.0 Überblick	312
	13.1 Verfahren der Si-Technologie	312
	13.1.1 Einkristallines Silizium	312
	13.1.2 Planartechnik	315
	13.2 Metallisierung von Dielektrika	316
	13.3 Leiterplattentechnik	321
	13.3.1 Allgemeines	321
	13.3.2 Technologische Varianten zur Leiterplattenherstellung	323
	Selbstkontrolle zu Kapitel 13	331
	Lösungsteil	
	Lösungen der Übungen	332
	Lösungen zur Selbstkontrolle	362
	Verwendete und weiterführende Literatur	364
	Bildnachweis	369
	Sachwortverzeichnis	370