



Bibliothek des technischen Wissens

# Werkstofftechnik für Elektroberufe

Eckhard Ignatowitz, Otto Spielvogel, Klaus Tkotz

Lektorat und Leitung des Arbeitskreises: Klaus Tkotz

3. Auflage

VERLAG EUROPA  
Düsseldorf

**HLuHB Darmstadt**



**15938358**

Vollmer GmbH & Co.  
Frankfurt am Main

Europa-Nr.: 51317

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Werkstoffe der Elektrotechnik</b> .....	<b>7</b>	<b>3.7</b>	<b>Wärmebehandlung der Stähle</b> .....	<b>79</b>
<b>2</b>	<b>Naturwissenschaftliche Grundlagen der Werkstoffkunde</b> .....	<b>10</b>	3.7.1	Glühen .....	79
2.1	Physikalische Grundlagen .....	10	3.7.2	Härten .....	80
2.1.1	Körper und Stoff .....	10	3.7.3	Gittervorgänge und Gefügeveränderungen .....	81
2.1.2	Bewegung der Körper (Bewegungslehre) ..	13	3.7.4	Vergüten .....	82
2.1.3	Kräfte .....	16	3.7.5	Härten der Randzone .....	83
2.1.4	Mechanische Beanspruchung .....	20	3.7.6	Wärmebehandlung der Stahlgruppen .....	84
2.1.5	Aufbau der Stoffe .....	22	<b>3.8</b>	<b>Kupfer- und Kupferlegierungen</b> .....	<b>85</b>
2.1.6	Mechanik der Flüssigkeiten und Gase .....	24	3.8.1	Kupfergewinnung .....	85
2.1.7	Ausdehnung der Körper beim Erwärmen ..	27	3.8.2	Allgemeine Eigenschaften und Verwendung .....	86
2.1.8	Temperatur .....	28	3.8.3	Kupfersorten .....	86
2.1.9	Zustandsänderung der Stoffe .....	29	3.8.4	Niedrig legierte Kupferwerkstoffe .....	87
2.1.10	Ausbreitung der Wärme .....	31	3.8.5	Kupfer-Zinn-Legierungen (Messing) .....	88
2.1.11	Wärmeenergie .....	31	3.8.6	Kupfer-Zinn-Legierungen .....	89
<b>2.2</b>	<b>Chemische Grundlagen</b> .....	<b>33</b>	3.8.7	Kupfer-Nickel-Legierungen .....	90
2.2.1	Stoffe und Stoffänderungen .....	33	3.8.8	Kupfer-Nickel-Zinn-Legierungen .....	90
2.2.2	Sauerstoff und Oxidation .....	33	<b>3.9</b>	<b>Aluminium und Aluminiumlegierungen</b> ..	<b>91</b>
2.2.3	Chemische Zeichensprache .....	35	3.9.1	Aluminium-Herstellung .....	91
2.2.4	Wasserstoff und Redox-Reaktion .....	37	3.9.2	Allgemeine Eigenschaften und Verwendung .....	92
2.2.5	Atome und Ionen .....	38	3.9.3	Aluminium-Werkstoffgruppen .....	93
2.2.6	Chemische Bindung .....	39	3.9.4	Nichtaushärtbare Aluminium-Werkstoffe .....	94
2.2.7	Säuren .....	41	3.9.5	Aushärtbare Aluminium-Knetlegierungen .....	94
2.2.8	Basen (Laugen) .....	42	3.9.6	Aluminium-Gusswerkstoffe .....	94
2.2.9	Salze .....	43	<b>3.10</b>	<b>Werkstoffe für Hochtemperatur- und Vakuumtechnik</b> .....	<b>95</b>
2.2.10	Periodensystem der Elemente .....	44	<b>3.11</b>	<b>Niedrigschmelzende Metalle</b> .....	<b>96</b>
2.2.11	Kohlenwasserstoffe .....	46	<b>3.12</b>	<b>Legierungsmetalle</b> .....	<b>97</b>
2.2.12	Alkanole und Alkanale .....	50	<b>3.13</b>	<b>Edelmetalle</b> .....	<b>97</b>
2.2.13	Carbonsäuren .....	51	<b>3.14</b>	<b>Sinterwerkstoffe</b> .....	<b>98</b>
2.2.14	Ester .....	52	3.14.1	Herstellung von Sinterteilen .....	98
2.2.15	Organische Stickstoffverbindungen .....	52	3.14.2	Typische Verwendung von Sintermetallen .....	99
2.2.16	Tabellarische Übersicht organischer Verbindungen .....	53	3.14.3	Hartmetalle .....	100
<b>3</b>	<b>Konstruktionswerkstoffe</b> .....	<b>54</b>	<b>3.15</b>	<b>Korrosion und Korrosionsschutz</b> .....	<b>101</b>
3.1	Einteilung der Konstruktionswerkstoffe ..	54	3.15.1	Elektrochemische Korrosionsarten .....	101
3.2	Roheisengewinnung und Stahlherstellung .....	56	3.15.2	Chemische Korrosion .....	104
3.3	Atomare Vorgänge bei der Metallerzeugung .....	58	3.15.3	Erscheinungsformen der Korrosion .....	104
3.4	Verarbeitung des Stahls zu Halbzeugen ..	59	3.15.4	Maßnahmen zur Korrosionsvermeidung ..	105
3.5	Eisen- und Stahl-Konstruktionswerkstoffe .....	62	3.15.5	Korrosionsschutz von Eisen- und Stahlwerkstoffen .....	105
3.5.1	Stahlbaustähle .....	63	3.15.6	Korrosion von Kupferwerkstoffen .....	107
3.5.2	Stähle in Elektromaschinen .....	66	3.15.7	Korrosion von Aluminiumwerkstoffen ..	108
3.5.3	Werkzeugstähle .....	69	3.15.8	Korrosionsverhalten weiterer Werkstoffe ..	108
3.5.4	Eisen- und Stahl-Gusswerkstoffe .....	70	<b>3.16</b>	<b>Kunststoffe (Plaste)</b> .....	<b>109</b>
3.6	Der innere Aufbau der Metalle .....	71	3.16.1	Eigenschaften und Verwendung .....	109
3.6.1	Gefüge und kristalline Struktur .....	71	3.16.2	Herstellung und innerer Aufbau .....	110
3.6.2	Die Kristallgittertypen der Metalle .....	72	3.16.3	Technologische Einteilung .....	111
3.6.3	Der reale kristalline Aufbau .....	72	3.16.4	Thermoplaste .....	112
3.6.4	Kristalline Struktur und Eigenschaften ..	73	3.16.5	Duroplaste .....	115
3.6.5	Gefüge und Eigenschaften .....	74	3.16.6	Elastomere (Elaste, Gummi, Kautschuk) ..	116
3.6.6	Gefügearten der Eisen- und Stahl-Werkstoffe .....	75	3.16.7	Formgebung der Kunststoffe .....	117
3.6.7	Das Eisen-Kohlenstoff-Zustands-schaubild .....	77			

<b>3.17 Verbundwerkstoffe</b>	119
3.17.1 Innerer Aufbau	119
3.17.2 Verbundstoffe auf Kunststoffbasis	119
3.17.3 Trennscheiben, Schleifkörper, Hartmetalle	120
3.17.4 Schichtverbundwerkstoffe	120
<b>3.18 Werkstoffprüfung</b>	121
3.18.1 Technologische Eignungsprüfungen	121
3.18.2 Kerbschlagbiegeversuch	121
3.18.3 Zugversuch	122
3.18.4 Weitere Festigkeits-Kennwerte	123
3.18.5 Härteprüfungen	124
3.18.6 Untersuchungen des inneren Aufbaus	125

## **4 Hilfsstoffe** ..... 126

<b>4.1 Lotwerkstoffe</b>	126
4.1.1 Lötverfahren und Löttemperaturen	126
4.1.2 Vorgänge beim Weichlöten	126
4.1.3 Kurzbezeichnungen der Lotwerkstoffe	127
4.1.4 Weichlote	127
4.1.5 Hartlote	129
<b>4.2 Schmierstoffe und Kühlschmierstoffe</b>	130
<b>4.3 Klebstoffe</b>	132

## **5 Leiterwerkstoffe** ..... 135

<b>5.1 Elektrische Grundlagen</b>	135
5.1.1 Leitungsvorgang in Metallen	135
5.1.2 Einflüsse auf den Leitungsvorgang	136
5.1.3 Supraleitung	138
<b>5.2 Leiterwerkstoff Kupfer</b>	139
5.2.1 Reinkupfer (unlegiertes Kupfer)	139
5.2.2 Kupferlegierungen	140
<b>5.3 Leiterwerkstoff Aluminium</b>	142
5.3.1 Unlegiertes Aluminium	142
5.3.2 Aluminiumlegierungen	143

## **6 Kontaktwerkstoffe** ..... 144

<b>6.1 Einteilung der Kontakte</b>	144
<b>6.2 Anforderungen an Kontaktwerkstoffe</b>	144
<b>6.3 Begriffe der Kontakttechnik</b>	145
6.3.1 Kontaktwiderstand	145
6.3.2 Kontaktverschleiß	145
6.3.3 Kleben und Verschweißen von Kontakten	146
<b>6.4 Eigenschaften von Kontaktwerkstoffen</b>	147
6.4.1 Reine Metalle als Kontaktwerkstoffe	147
6.4.2 Kontaktlegierungen und Sinter-Verbundwerkstoffe	150
<b>6.5 Schichtverbundkontakte</b>	152
6.5.1 Kontaktbimetalle	152
6.5.2 Thermobimetalle	152
<b>6.6 Kohlehaltige Kontaktwerkstoffe</b>	153

## **7 Widerstandswerkstoffe** ..... 155

<b>7.1 Elektrotechnische Grundlagen</b>	155
<b>7.2 Heizleiterwerkstoffe</b>	158
<b>7.3 Technische Widerstände</b>	160
<b>7.4 Schichtschaltungen</b>	162
7.4.1 Dickschicht-Technik	162
7.4.2 Dünnschicht-Technik	163
7.4.3 Hybrid-Technik	164

## **8 Isolierstoffe** ..... 165

<b>8.1 Einteilung und Anforderungen</b>	165
<b>8.2 Elektrische Eigenschaften und ihre Messung</b>	166
8.2.1 Durchgangswiderstand	166
8.2.2 Oberflächenwiderstand	166
8.2.3 Durchschlagfestigkeit	167
8.2.4 Lichtbogenfestigkeit	167
8.2.5 Kriechstromfestigkeit	168
8.2.6 Elektrostatische Aufladung	169
8.2.7 Permittivität	169
8.2.8 Dielektrischer Verlustfaktor	169
<b>8.3 Wichtige nichtelektrische Eigenschaften</b>	170
<b>8.4 Feste Isolierstoffe</b>	171
<b>8.5 Organische Isolierstoffe</b>	171
8.5.1 Thermoplaste	172
8.5.2 Duroplaste	175
8.5.3 Elastomere	177
<b>8.6 Anorganische Isolierstoffe</b>	178
8.6.1 Keramik-Isolierstoffe	178
8.6.2 Glas	180
8.6.3 Glaskeramik	181
8.6.4 Glimmer	181
<b>8.7 Flüssige Isolierstoffe</b>	182
<b>8.8 Gasförmige Isolierstoffe</b>	184

## **9 Halbleiterwerkstoffe** ..... 186

<b>9.1 Stromleitung in Metallen und Halbleitern</b>	187
<b>9.2 Ausgangsstoffe für Halbleiter</b>	195
<b>9.3 Herstellung der wichtigsten Halbleiterwerkstoffe</b>	199
9.3.1 Silicium Si	199
9.3.2 Germanium Ge	199
9.3.3 Galliumarsenid GaAs	200
9.3.4 Indiumarsenid InAs	200
9.3.5 Indiumantimonid InSb	200
9.3.6 Indiumantimonid-Nickelantimonid	201
<b>9.4 Weiterverarbeiten des Halbleiterwerkstoffs</b>	202
<b>9.5 Anwendungen</b>	211
9.5.1 Heißleiter	211
9.5.2 Kaltleiter	212

9.5.3	Spannungsabhängige Widerstände	213
9.5.4	Sperrschicht-Bauelemente	213
9.5.5	Selen-Gleichrichter	213
9.5.6	Optoelektronische Bauelemente	214
9.5.7	Fotowiderstände	214
9.5.8	Half-Generatoren	215

<b>9.6</b>	<b>Herstellen integrierter Schaltungen</b>	<b>216</b>
9.6.1	Reinigen der Oberfläche von Siliciumscheiben	218
9.6.2	Oxidieren der Siliciumscheiben	220
9.6.3	Fotolack (Fotoresist)	222
9.6.4	Herstellen der Fotomasken	222
9.6.5	Belichten mit der Fotomaske	223
9.6.6	Abätzen des Siliciumdioxids	225
9.6.7	Metallisierung	226
9.6.8	Endmontage der Chips	227

## **10 Magnetwerkstoffe** ..... 230

<b>10.1</b>	<b>Magnetisches Feld</b>	<b>230</b>
<b>10.2</b>	<b>Magnetische Eigenschaften der Stoffe</b>	<b>231</b>
<b>10.3</b>	<b>Magnetisierung ferro-magnetischer Stoffe</b>	<b>232</b>
<b>10.4</b>	<b>Ferri- und Antiferromagnetismus</b>	<b>233</b>
<b>10.5</b>	<b>Elektromagnetismus</b>	<b>234</b>
10.5.1	Leitermagnetfeld	234
10.5.2	Magnetfeld einer Spule	234
<b>10.6</b>	<b>Magnetische Größen und Begriffe</b>	<b>235</b>
10.6.1	Durchflutung	235
10.6.2	Magnetische Feldstärke	235
10.6.3	Magnetischer Fluss	235
10.6.4	Magnetische Flussdichte	235
10.6.5	Permeabilität	236
10.6.6	Magnetische Polarisation	237
10.6.7	Hysteresekurve	237
10.6.8	Energieprodukt bei Dauermagnetwerkstoffen	238
10.6.9	Hystereseverluste	239
10.6.10	Wirbelstromverluste	239
10.6.11	Ummagnetisierungsverluste	240
10.6.12	Magnetische Scherung	240
<b>10.7</b>	<b>Entmagnetisierung</b>	<b>241</b>
<b>10.8</b>	<b>Magnetostriktion</b>	<b>242</b>
<b>10.9</b>	<b>Magnetisch weiche Werkstoffe</b>	<b>243</b>
10.9.1	Magnetisch weiches Eisen	243
10.9.2	Magnetisch weiche Ferrite	246
10.9.3	Pulververbundwerkstoffe	247
10.9.4	Amorphe Metalle (Metallgläser)	248
<b>10.10</b>	<b>Magnetisch harte Werkstoffe</b>	<b>249</b>
10.10.1	Metallische magnetisch harte Werkstoffe	250
10.10.2	Seltenerdmetall-Magnete	252

10.10.3	Keramische magnetisch harte Werkstoffe	253
10.10.4	Kunststoffgebundene Hartferrite	254
<b>10.11</b>	<b>Magnetisch halbharte Werkstoffe</b>	<b>255</b>

## **11 Gedruckte Schaltungen und SMD-Technik** ..... 256

<b>11.1</b>	<b>Gedruckte Schaltungen</b>	<b>256</b>
11.1.1	Basismaterial	256
11.1.2	Erstellen des Leiterbildes	257
11.1.3	Herstellung gedruckter Schaltungen	259
11.1.4	Mehrlagenleiterplatten (Multilayer)	262
<b>11.2</b>	<b>Oberflächenmontage (SMD-Technik)</b>	<b>263</b>
11.2.1	Bauelemente zur Oberflächenmontage	263
11.2.2	Bestückungsverfahren	263
11.2.3	Lötverfahren bei der SMD-Technik	264

## **12 Besondere Werkstoffe** ..... 265

<b>12.1</b>	<b>Flüssigkristalle</b>	<b>265</b>
<b>12.2</b>	<b>Solarzellen</b>	<b>267</b>
<b>12.3</b>	<b>Lichtwellenleiter</b>	<b>269</b>
<b>12.4</b>	<b>Piezoelektrische Werkstoffe</b>	<b>272</b>
12.4.1	Piezoeffekt	272
12.4.2	Direkter und indirekter Piezoeffekt	273
12.4.3	Werkstoffkennwerte	273
12.4.4	Herstellung piezokeramischer Werkstoffe	274
12.4.5	Anwendung piezoelektrischer Keramiken	275

## **13 Umweltschutz, Arbeitssicherheit** ..... 277

<b>13.1</b>	<b>Umweltbelastung bei der Erzeugung der Werkstoffe</b>	<b>277</b>
<b>13.2</b>	<b>Umweltbelastungen bei der Fertigung</b>	<b>277</b>
<b>13.3</b>	<b>Abwasserreinigung eines Elektrobetriebs</b>	<b>279</b>
<b>13.4</b>	<b>Wiederverwertung (Recycling)</b>	<b>279</b>
<b>13.5</b>	<b>Entsorgung nicht verwertbarer Werkstoffe</b>	<b>281</b>
<b>13.6</b>	<b>Gefährliche Arbeitsstoffe</b>	<b>281</b>
<b>Firmenverzeichnis</b>		<b>283</b>
<b>Sachwortverzeichnis</b>		<b>284</b>