

Inhaltsverzeichnis

1 Werkstofftechnologie in Industrie und Wirtschaft

| | | |
|-------|--|----|
| 1.1 | Werkstoffe und Werkstofftechnik | 11 |
| 1.2 | Bedeutung der Werkstofftechnik | 11 |
| 1.3 | Wirtschaftliche Aspekte der Werkstofftechnik | 12 |
| 1.4 | Werkstoffbegriff und Werkstoffeinteilung | 12 |
| 1.4.1 | Stoffe und Werkstoffe | 12 |
| 1.4.2 | Einteilung der Werkstoffe | 13 |
| 1.4.3 | Entwicklung der Werkstofftechnik | 15 |
| 1.4.4 | Werkstoffprüfung | 15 |
| 1.5 | Eigenschaften der Werkstoffe | 16 |
| 1.6 | Werkstoffauswahl | 17 |

2 Grundlagen der Metallkunde

| | | |
|---------|---|----|
| 2.1 | Aufbau der Metalle | 18 |
| 2.2 | Atombau und Periodensystem der Elemente | 18 |
| 2.2.1 | Bau der Atome | 19 |
| 2.2.2 | Periodensystem der Elemente (PSE) | 20 |
| 2.3 | Chemische Bindungen | 22 |
| 2.3.1 | Primäre chemische Bindungen | 22 |
| 2.3.1.1 | Ionenbindung | 23 |
| 2.3.1.2 | Atombindung | 23 |
| 2.3.1.3 | Metallbindung | 24 |
| 2.3.2 | Sekundäre chemische Bindungen | 25 |
| 2.3.2.1 | Dispersionsbindungen | 25 |
| 2.3.2.2 | Dipol-Dipol-Bindungen | 26 |
| 2.3.2.3 | Dipol-Ion-Bindungen | 26 |
| 2.3.2.4 | Induktionsbindungen | 26 |
| 2.3.2.5 | Wasserstoffbrückenbindungen | 26 |
| 2.4 | Gitteraufbau der Metalle | 27 |
| 2.4.1 | Kristallgittermodelle | 27 |
| 2.4.2 | Entwicklung von einfachen (primitiven) Kristallgittern | 28 |
| 2.4.3 | Kristallgitter von Metallen | 29 |
| 2.4.3.1 | Kubisch-flächenzentriertes Gitter (kfz) | 29 |
| 2.4.3.2 | Hexagonales Gitter dichtester Kugelpackung (hdP) | 30 |
| 2.4.3.3 | Kubisch-raumzentriertes Gitter (krz) | 30 |
| 2.4.3.4 | Packungsdichte der Kristallgitter | 31 |
| 2.4.3.5 | Vergleich von kubisch-flächenzentriertem Gitter und hexagonal dichtester Kugelpackung | 32 |
| 2.5 | Realkristalle und Gitterbaufehler | 33 |
| 2.5.1 | Realkristalle | 33 |
| 2.5.2 | Gitterbaufehler | 33 |
| 2.5.2.1 | Nulldimensionale Gitterbaufehler | 33 |
| 2.5.2.2 | Eindimensionale Gitterbaufehler | 34 |
| 2.5.2.3 | Zweidimensionale Gitterbaufehler | 37 |

| | | |
|----------|--|----|
| 2.6 | Gefüge | 40 |
| 2.7 | Anisotropie und Textur | 42 |
| 2.8 | Elastische und plastische Verformung | 42 |
| 2.8.1 | Elastische Verformung | 43 |
| 2.8.2 | Plastische Verformung | 43 |
| 2.8.2.1 | Mechanismus der plastischen Verformung | 44 |
| 2.8.2.2 | Gleitebenen und Gleitsysteme | 45 |
| 2.8.2.3 | Schmid'sches Schubspannungsgesetz | 46 |
| 2.8.2.4 | Plastische Verformung von Vielkristallen | 47 |
| 2.9 | Verfestigungsmechanismen | 48 |
| 2.9.1 | Korngrenzenverfestigung | 48 |
| 2.9.2 | Mischkristallverfestigung | 49 |
| 2.9.3 | Teilhchenverfestigung | 50 |
| 2.9.4 | Verformungsverfestigung (Kaltverfestigung) | 52 |
| 2.9.5 | Überlagerung der Verfestigungsmechanismen | 53 |
| 2.10 | Thermische aktivierte Prozesse | 54 |
| 2.10.1 | Diffusion | 54 |
| 2.10.2 | Erholung und Rekristallisation | 57 |
| 2.10.2.1 | Verformungsstrukturen | 57 |
| 2.10.2.2 | Erholung | 58 |
| 2.10.2.3 | Rekristallisation | 60 |
| 2.10.2.4 | Kornvergrößerung und sekundäre Rekristallisation | 63 |
| 2.10.2.5 | Kalt- und Warmverformung | 64 |
| 2.10.2.6 | Teilentfestigte Zustände | 64 |
| 2.10.3 | Kriechen | 65 |
| 2.10.3.1 | Kriechen und Werkstoffschädigung | 66 |
| 2.10.3.2 | Primäres Kriechen (Übergangskriechen) | 66 |
| 2.10.3.3 | Sekundäres Kriechen (stationäres Kriechen) | 66 |
| 2.10.3.4 | Tertiäres Kriechen (beschleunigtes Kriechen) | 67 |
| 2.10.3.5 | Warmfeste und hochwarmfeste Stähle und Legierungen | 67 |
| 2.10.4 | Sintern | 67 |
| 2.10.4.1 | Festphasensintern einphasiger Pulver | 68 |
| 2.10.4.2 | Festphasensintern zwei- bzw. mehrphasiger Pulver | 69 |
| 2.10.4.3 | Flüssigphasensintern | 70 |
| 2.10.4.4 | Reaktionssintern | 70 |

3 Grundlagen der Legierungskunde

| | | |
|-------|-------------------------------------|----|
| 3.1 | Aggregatzustände und Phasen | 71 |
| 3.2 | Phasenumwandlungen | 71 |
| 3.3 | Mischkristalle und Kristallgemische | 72 |
| 3.3.1 | Mischkristalle | 72 |
| 3.3.2 | Kristallgemische | 73 |

| | | | |
|---|------------|--|------------|
| 3.4 Intermetallische Phasen und Überstrukturen | 74 | 4.4.2.3 Lötmechanismus | 113 |
| 3.4.1 Intermetallische Phasen | 74 | 4.4.2.4 Metallurgische Probleme beim Löten | 114 |
| 3.4.2 Überstrukturen | 74 | 4.4.2.5 Flussmittel, Lötatmosphären und Vakuum | 115 |
| 3.5 Zustandsdiagramme | 75 | 4.4.2.6 Lötwerkstoffe | 116 |
| 3.5.1 Binäre Zustandsdiagramme | 76 | 4.5 Beschichten | 118 |
| 3.5.1.1 Erstellung binärer Zustandsdiagramme | 76 | 4.5.1 Beschichten aus dem flüssigen Zustand | 119 |
| 3.5.1.2 Lesen binärer Zustandsdiagramme | 77 | 4.5.1.1 Schmelztauchen | 119 |
| 3.5.1.3 Kristallseigerung und Zonenmischkristalle | 78 | 4.5.1.2 Emaillieren | 119 |
| 3.5.2 Grundtypen binärer Zustandsdiagramme | 79 | 4.5.1.3 Anstreichen und Lackieren | 120 |
| 3.5.2.1 Vollkommene Unlöslichkeit im festen und flüssigen Zustand | 79 | 4.5.2 Beschichten aus dem körnigen oder pulverförmigen Zustand | 120 |
| 3.5.2.2 Vollkommene Löslichkeit im festen und flüssigen Zustand (Linsendiagramm) | 79 | 4.5.2.1 Wirbelsintern | 120 |
| 3.5.2.3 Vollkommene Löslichkeit im flüssigen und vollkommene Unlöslichkeit im festen Zustand (eutektisches Legierungssystem) | 80 | 4.5.2.2 Thermisches Spritzen | 120 |
| 3.5.2.4 Vollkommene Löslichkeit im flüssigen und begrenzte Löslichkeit im festen Zustand (eutektisches Legierungssystem mit Mischungslücke) | 81 | 4.5.3 Beschichten durch Schweißen | 122 |
| 3.5.2.5 Peritektisches Zustandsdiagramm | 82 | 4.5.4 Beschichten aus dem gas- oder dampfförmigen Zustand | 123 |
| 3.5.3 Zustandsdiagramme mit Verbindungsbildung | 83 | 4.5.4.1 CVD-Verfahren | 123 |
| 3.5.4 Reale Zustandsdiagramme | 83 | 4.5.4.2 PVD-Verfahren | 124 |
| 3.5.5 Ternäre Zustandsdiagramme | 84 | 4.5.5 Beschichten aus dem ionisierten Zustand | 125 |
| | | 4.5.5.1 Galvanisches Beschichten | 125 |
| | | 4.5.5.2 Chemisches Beschichten | 126 |
| | | 4.5.6 Weitere Verfahren zur Erzeugung einer Oberflächenschicht | 126 |
| | | 4.5.6.1 Plattieren | 126 |
| | | 4.5.6.2 Anodische Oxidation (Eloxieren) | 127 |
| | | 4.5.6.3 Phosphatieren | 128 |
| | | 4.5.6.4 Chromatieren | 129 |
| | | 4.5.6.5 Brünieren | 130 |
| | | 4.6 Stoffeigenschaften ändern | 130 |
| | | 4.6.1 Verfestigen durch Umformen | 130 |
| | | 4.6.1.1 Verfestigen durch Walzen | 130 |
| | | 4.6.1.2 Verfestigen durch Ziehen | 131 |
| | | 4.6.1.3 Verfestigen durch Schmieden | 132 |
| | | 4.6.2 Wärmebehandeln | 132 |
| | | 4.6.2.1 Glühen | 132 |
| | | 4.6.2.2 Härten | 132 |
| | | 4.6.2.3 Isothermisches Umwandeln | 132 |
| | | 4.6.2.4 Anlassen und Auslagern | 133 |
| | | 4.6.2.5 Vergüten | 133 |
| | | 4.6.2.6 Tiefkühlen | 133 |
| | | 4.6.2.7 Thermochemisches Behandeln | 133 |
| | | 4.6.2.8 Aushärten | 134 |
| | | 4.6.3 Thermomechanisches Behandeln | 134 |
| | | 4.6.4 Sintern und Brennen | 134 |
| | | 4.6.5 Magnetisieren | 134 |
| | | 4.6.6 Bestrahlen | 135 |
| | | 4.6.7 Fotochemische Verfahren | 135 |
| | | 5 Gewinnung, Formgebung und Recycling metallischer Werkstoffe und Legierungen | |
| | | 5.1 Überblick zur Gewinnung metallischer Werkstoffe | 136 |
| | | 5.1.1 Gewinnung metallischer Rohstoffe | 136 |
| | | 5.1.2 Verfahren der Metallgewinnung | 137 |
| | | 5.1.3 Raffinationsverfahren | 138 |
| | | 5.1.4 Metallische Werkstoffe und deren Handelsformen | 138 |
| 4 Wechselwirkungen zwischen Werkstoffeigenschaften und Fertigungsverfahren | | | |
| 4.1 Urformen | 87 | | |
| 4.1.1 Kristallisation und Gefüge | 87 | | |
| 4.1.2 Gussfehler | 89 | | |
| 4.1.3 Gießbarkeit metallischer Werkstoffe | 91 | | |
| 4.1.3.1 Fließ- und Formfüllungsvermögen | 91 | | |
| 4.1.3.2 Schwindung | 92 | | |
| 4.1.3.3 Schmelzverhalten von Gusswerkstoffen | 92 | | |
| 4.1.4 Beeinflussung der Werkstoffeigenschaften beim Gießen | 92 | | |
| 4.1.5 Herstellung (Züchten) von Einkristallen | 94 | | |
| 4.2 Umformen | 95 | | |
| 4.2.1 Kaltumformung | 96 | | |
| 4.2.2 Warmumformung | 97 | | |
| 4.2.3 Neue Umformverfahren | 98 | | |
| 4.3 Trennen | 100 | | |
| 4.3.1 Zerteilen und Zerspanen | 100 | | |
| 4.3.2 Zerspanbarkeit | 101 | | |
| 4.3.3 Spanformen | 101 | | |
| 4.3.4 Automatenlegierungen | 101 | | |
| 4.4 Fügen | 102 | | |
| 4.4.1 Schweißen | 102 | | |
| 4.4.1.1 Schweißbarkeit | 102 | | |
| 4.4.1.2 Einteilung der Schweißverfahren | 103 | | |
| 4.4.1.3 Beeinflussung der Werkstoffeigenschaften durch das Schweißen | 104 | | |
| 4.4.2 Löten | 113 | | |
| 4.4.2.1 Vor- und Nachteile des Lötens | 113 | | |
| 4.4.2.2 Einteilung der Lötverfahren | 113 | | |

| | |
|--|------------|
| 5.2 Eisen- und Stahlerzeugung | 139 |
| 5.2.1 Hochofenprozess | 139 |
| 5.2.1.1 Hochofen | 141 |
| 5.2.1.2 Reduktionsvorgang | 141 |
| 5.2.1.3 Produkte des Hochofenprozesses | 144 |
| 5.2.2 Direktreduktionsverfahren | 145 |
| 5.2.3 Stahlerzeugung | 146 |
| 5.2.3.1 Sauerstoffblasverfahren | 147 |
| 5.2.3.2 Elektrolichtbogenofen-Verfahren | 149 |
| 5.2.3.3 Stahl-Sekundärmetallurgie | 150 |
| 5.3 Erzeugung von Nichteisenmetallen | 151 |
| 5.3.1 Gewinnung von Aluminium | 151 |
| 5.3.2 Gewinnung weiterer Nichteisenmetalle | 153 |
| 5.4 Legieren von Metallen | 153 |
| 5.5 Formgebungsverfahren für metallische Werkstoffe | 155 |
| 5.5.1 Gießen | 155 |
| 5.5.1.1 Formgießen | 155 |
| 5.5.1.2 Gießen von Knetlegierungen | 158 |
| 5.5.2 Umformen | 160 |
| 5.5.2.1 Walzen | 161 |
| 5.5.2.2 Durchdrücken | 162 |
| 5.5.2.3 Freiform- und Gesenkschmieden | 162 |
| 5.5.2.4 Ziehen | 163 |
| 5.6 Recycling von metallischen Werkstoffen | 164 |
| 5.6.1 Recycling von Stahl und Gusseisen | 165 |
| 5.6.2 Recycling von Nichtmetallen | 165 |

6 Eisenwerkstoffe

| | |
|---|------------|
| 6.1 Reines Eisen | 166 |
| 6.2 Eisen-Kohlenstoff-Legierungen | 168 |
| 6.2.1 Phasenausbildungen in Eisen-Kohlenstoff-Legierungen | 168 |
| 6.2.1.1 Mischkristalle (Ferrit, Austenit und δ -Ferrit) | 168 |
| 6.2.1.2 Verbindungsphasen (Zementit und ϵ -Carbid) | 170 |
| 6.2.1.3 Stabile Phase (Graphit) | 171 |
| 6.2.2 Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramm | 171 |
| 6.2.2.1 Erstarrungsformen von Eisen-Kohlenstoff-Legierungen | 172 |
| 6.2.2.2 Aufbau des metastabilen Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramms | 173 |
| 6.2.2.3 Bezeichnungen im metastabilen System | 174 |
| 6.2.2.4 Erstarrungsvorgänge im metastabilen System | 174 |
| 6.2.2.5 Stahlecke des metastabilen Systems | 178 |
| 6.3 Eisenbegleiter und Legierungselemente | 181 |
| 6.3.1 Begleitelemente und nicht-metallische Einschlüsse | 182 |
| 6.3.1.1 Mangan (Mn) | 182 |
| 6.3.1.2 Silicium (Si) | 183 |
| 6.3.1.3 Phosphor (P) | 185 |
| 6.3.1.4 Schwefel (S) | 187 |
| 6.3.1.5 Stickstoff (N) | 188 |

| | |
|--|------------|
| 6.3.1.6 Sauerstoff (O) | 190 |
| 6.3.1.7 Wasserstoff (H) | 191 |
| 6.3.1.8 Zusammenfassung der Wirkungsweisen von Begleitelementen in Stählen | 193 |
| 6.3.1.9 Nichtmetallische Einschlüsse | 193 |
| 6.3.2 Legierungselemente | 196 |
| 6.3.2.1 Allgemeine Wirkungsweisen von Legierungselementen in Stählen | 196 |
| 6.3.2.2 Wirkungsweisen ausgewählter Legierungselemente | 203 |
| 6.3.2.3 Wirkungsweise mehrerer Legierungselemente im Stahl | 211 |
| 6.4 Wärmebehandlung der Stähle | 212 |
| 6.4.1 Prinzip einer Wärmebehandlung | |
| 6.4.2 Einteilung der Wärmebehandlungsverfahren | 214 |
| 6.4.3 Glühen | 214 |
| 6.4.3.1 Normalglühen von Stählen | 214 |
| 6.4.3.2 Weichglühen von Stählen (Glühen auf kugelige Carbide) | 216 |
| 6.4.3.3 Spannungsarmglühen | 218 |
| 6.4.3.4 Rekristallisationsglühen | 219 |
| 6.4.3.5 Diffusionsglühen (Homogenisierungs-glühen) | 220 |
| 6.4.3.6 Grobkornglühen (Hochglühen) | 222 |
| 6.4.4 Härten | 222 |
| 6.4.4.1 Geschichte der Stahlhärtung | 222 |
| 6.4.4.2 Ziele der Stahlhärtung | 224 |
| 6.4.4.3 Verfahren | 225 |
| 6.4.4.4 Härtetemperatur | 225 |
| 6.4.4.5 Abkühlgeschwindigkeit und Gefügeausbildung | 225 |
| 6.4.4.6 Kritische Abkühlgeschwindigkeit | 232 |
| 6.4.4.7 Kohlenstofflöslichkeit des Austenits | 233 |
| 6.4.4.8 Temperaturbereich der Martensitbildung | 233 |
| 6.4.4.9 Restaustenit und Tiefkühlung | 234 |
| 6.4.4.10 Abschreckhärte | 234 |
| 6.4.4.11 Härtespannungen | 235 |
| 6.4.4.12 Abschrecken und Abschreckmittel | 237 |
| 6.4.4.13 Zeit-Temperatur-Umwandlungsdiagramme (ZTU-Diagramme) | 238 |
| 6.4.4.14 Zeit-Temperatur-Austenitisierungsdiagramme (ZTA-Diagramme) | 242 |
| 6.4.5 Anlassen und Vergüten | 245 |
| 6.4.5.1 Innere Vorgänge beim Anlassen | 246 |
| 6.4.5.2 Anlassen der legierten Stähle | 247 |
| 6.4.5.3 Versprödungserscheinungen beim Anlassen von Stählen | 248 |
| 6.4.5.4 Vergüten | 249 |
| 6.4.6 Verfahren des Oberflächenhärtens | 254 |
| 6.4.6.1 Einteilung der Oberflächenhärtungsverfahren | 255 |
| 6.4.6.2 Randschichthärtungsverfahren | 255 |
| 6.4.6.3 Thermochemisches Behandeln | 260 |
| 6.5 Eigenschaften und Verwendung von Stählen | 272 |
| 6.5.1 Einteilung der Stähle | 272 |
| 6.5.1.1 Einteilung der Stähle nach Hauptgüteklassen | 272 |

| | | | | | |
|----------|--|-----|------------|---|------------|
| 6.5.1.2 | Einteilung der Stähle nach dem Verwendungszweck | 274 | 6.5.16.3 | Einteilung der Werkzeugstähle | 309 |
| 6.5.2 | Unlegierte Baustähle | 274 | 6.5.16.4 | Unlegierte Kaltarbeitsstähle | 310 |
| 6.5.2.1 | Anwendung unlegierter Baustähle | 275 | 6.5.16.5 | Legierte Kaltarbeitsstähle | 311 |
| 6.5.2.2 | Normung und Gütegruppen unlegierter Baustähle | 275 | 6.5.16.6 | Warmarbeitsstähle | 312 |
| 6.5.2.3 | Technologische Eigenschaften unlegierter Baustähle | 276 | 6.5.16.7 | Schnellarbeitsstähle | 314 |
| 6.5.2.4 | Werkstoffkundliche Besonderheiten unlegierter Baustähle | 277 | 6.6 | Eisengusswerkstoffe | 320 |
| 6.5.3 | Schweißgeeignete Feinkornbaustähle | 277 | 6.6.1 | Einteilung der Eisengusswerkstoffe | 320 |
| 6.5.3.1 | Werkstoffkundliche Grundlagen schweißgeeigneter Feinkornbaustähle | 278 | 6.6.2 | Stahlguss | 321 |
| 6.5.3.2 | Stahlsorten und Gütegruppen | 279 | 6.6.2.1 | Gießbarkeit von Stahlguss | 322 |
| 6.5.4 | Federstähle | 282 | 6.6.2.2 | Wärmebehandlung von Stahlguss | 322 |
| 6.5.4.1 | Anforderungen an metallische Federwerkstoffe | 283 | 6.6.2.3 | Stahlgussorten | 322 |
| 6.5.4.2 | Federstahlsorten | 283 | 6.6.3 | Gusseisenwerkstoffe | 326 |
| 6.5.5 | Vergütungsstähle | 284 | 6.6.3.1 | Erschmelzung von Gusseisenwerkstoffen | 326 |
| 6.5.6 | Einsatzstähle | 285 | 6.6.3.2 | Gusseisendiagramme | 326 |
| 6.5.7 | Nitrierstähle | 285 | 6.6.3.3 | Gusseisen mit Lamellengraphit | 327 |
| 6.5.8 | Warmfeste Stähle | 285 | 6.6.3.4 | Gusseisen mit Kugelgraphit | 333 |
| 6.5.8.1 | Anforderungen an warmfeste Stähle | 285 | 6.6.3.5 | Ausferritisches Gusseisen mit Kugelgraphit | 336 |
| 6.5.8.2 | Werkstoffverhalten und Werkstoffkennwerte bei erhöhter Temperatur | 285 | 6.6.3.6 | Gusseisen mit Vermiculargraphit | 337 |
| 6.5.8.3 | Warmfeste Stahlsorten | 286 | 6.6.3.7 | Temperguss | 338 |
| 6.5.9 | Kaltzähe Stähle | 287 | 6.6.3.8 | Perlitischer Hartguss | 344 |
| 6.5.9.1 | Werkstoffverhalten und Kennwerte bei tiefen Temperaturen | 287 | 6.6.3.9 | Sondergusseisen | 345 |
| 6.5.9.2 | Kaltzähe Stahlsorten | 287 | 7 | Nichteisenmetalle | |
| 6.5.10 | Nichtrostende Stähle | 288 | 7.1 | Aluminiumwerkstoffe | 353 |
| 6.5.10.1 | Einteilung der nichtrostenden Stähle | 289 | 7.1.1 | Reinaluminium | 353 |
| 6.5.10.2 | Ferritische und halbferritische Chromstähle | 289 | 7.1.2 | Aluminium-Knetlegierungen | 354 |
| 6.5.10.3 | Martensitische Chromstähle | 291 | 7.1.3 | Aluminium-Gusslegierungen | 357 |
| 6.5.10.4 | Austenitische Chrom-Nickel-Stähle | 293 | 7.1.4 | Aluminiumschäume | 360 |
| 6.5.10.5 | Schweißtechnische Verarbeitung nichtrostender Stähle | 296 | 7.1.4.1 | Aufschäumprozesse | 360 |
| 6.5.11 | Hitze- und zunderbeständige Stähle | 297 | 7.1.4.2 | Eigenschaften von Aluminiumschäumen | 361 |
| 6.5.11.1 | Ferritische zunderbeständige Stähle | 297 | 7.1.5 | Aushärten von Aluminiumlegierungen | 363 |
| 6.5.11.2 | Austenitische zunderbeständige Stähle und Nickel-Chrom-Legierungen | 298 | 7.1.5.1 | Verfahren | 363 |
| 6.5.12 | Druckwasserstoffbeständige Stähle | 299 | 7.1.5.2 | Innere Vorgänge | 364 |
| 6.5.13 | Automatenstähle | 300 | 7.1.6 | Verarbeitung von Aluminiumwerkstoffen | 366 |
| 6.5.14 | Höherfeste Stähle für den Automobil-Leichtbau | 302 | 7.1.6.1 | Gießen | 366 |
| 6.5.14.1 | Mikrolegierte höherfeste Stähle | 303 | 7.1.6.2 | Umformen | 367 |
| 6.5.14.2 | Phosphorlegierte Stähle | 303 | 7.1.6.3 | Zerspanen | 367 |
| 6.5.14.3 | Bake-Hardening-Stähle | 303 | 7.1.6.4 | Schweißen | 368 |
| 6.5.14.4 | IF-Stähle | 304 | 7.2 | Magnesiumwerkstoffe | 368 |
| 6.5.14.5 | Dualphasen Stähle (DP-Stähle) | 304 | 7.2.1 | Eigenschaften von Magnesium | 368 |
| 6.5.14.6 | Stähle mit Restaustenit | 305 | 7.2.2 | Magnesiumlegierungen | 369 |
| 6.5.14.7 | Complexphasen-Stähle | 305 | 7.2.2.1 | Magnesium-Gusslegierungen | 370 |
| 6.5.14.8 | Martensit-Phasen-Stähle | 306 | 7.2.2.2 | Magnesium-Knetlegierungen | 370 |
| 6.5.14.9 | TWIP-Stähle | 306 | 7.2.3 | Verarbeitung von Magnesiumlegierungen | 372 |
| 6.5.15 | Höchstfeste Stähle | 306 | 7.2.3.1 | Gießen von Magnesiumlegierungen | 372 |
| 6.5.15.1 | Höchstfeste Vergütungsstähle | 307 | 7.2.3.2 | Umformen von Magnesiumlegierungen | 374 |
| 6.5.15.2 | Martensitaushärtende Stähle (Maraging Steels) | 307 | 7.2.4 | Entwicklungstendenzen | 374 |
| 6.5.16 | Werkzeugstähle | 309 | 7.3 | Titan und Titanlegierungen | 374 |
| 6.5.16.1 | Anforderungen an Werkzeugstähle | 309 | 7.4 | Silicium | 377 |
| 6.5.16.2 | Erschmelzung von Werkzeugstählen | 309 | 7.4.1 | Weitere bedeutsame Leichtmetalle | 378 |
| | | | 7.5 | Kupferwerkstoffe | 379 |
| | | | 7.5.1 | Unlegiertes Kupfer | 379 |
| | | | 7.5.1.1 | Sauerstoffhaltiges (zähgepoltes) Kupfer | 379 |
| | | | 7.5.1.2 | Desoxidiertes Kupfer | 381 |
| | | | 7.5.1.3 | Sauerstofffreies Kupfer hoher Leitfähigkeit | 381 |

| | | |
|-------------|--|------------|
| 7.5.2 | Niedriglegierte Kupferwerkstoffe | 383 |
| 7.5.3 | Kupfer-Zink-Legierungen (Messing). | 385 |
| 7.5.4 | Kupfer-Nickel-Zink-Legierungen (Neusilber). | 387 |
| 7.5.5 | Kupfer-Zinn-Legierungen (Bronze). | 387 |
| 7.5.6 | Kupfer-Nickel-Legierungen | 389 |
| 7.5.7 | Kupfer-Aluminium-Legierungen. | 390 |
| 7.5.8 | Kupfer-Mangan-Legierungen | 391 |
| 7.5.9 | Kupfer-Blei-Legierungen (Bleibronze) | 391 |
| 7.5.10 | Kupfer-Silicium-Legierungen | 391 |
| 7.6 | Nickel | 396 |
| 7.6.1 | Eigenschaften von Nickel | 396 |
| 7.6.2 | Nickel-Legierungen und deren Anwendungen. | 397 |
| 7.7 | Zinkwerkstoffe | 400 |
| 7.7.1 | Zink-Knetlegierungen | 402 |
| 7.7.2 | Zink-Gusslegierungen | 402 |
| 7.8 | Zinn | 402 |
| 7.8.1 | Eigenschaften von Zinn. | 402 |
| 7.8.2 | Weichlote | 403 |
| 7.8.3 | Gleitlagerwerkstoffe. | 404 |
| 7.9 | Blei | 404 |
| 7.9.1 | Gewinnung und Eigenschaften von Blei | 404 |
| 7.9.2 | Bleiwerkstoffe. | 404 |
| 7.10 | Technisch weniger bedeutsame Metalle. 406 | |
| 7.10.1 | Alkali- und Erdalkalimetalle. | 406 |
| 7.10.2 | Erdmetalle oder die Bor-/Aluminium- Gruppe. | 408 |
| 7.10.3 | Kohlenstoff/Silicium-Gruppe | 408 |
| 7.10.4 | Metalle der 5. Hauptgruppe | 409 |
| 7.10.5 | Metalle der 6. Hauptgruppe | 410 |
| 7.10.6 | Silber und Gold | 411 |
| 7.10.7 | Metalle der 2. Nebengruppe | 412 |
| 7.10.8 | Scandium, Yttrium und die Selten- erdmalle. | 412 |
| 7.10.9 | Metalle der 4. Nebengruppe | 413 |
| 7.10.10 | Metalle der 5. Nebengruppe | 414 |
| 7.10.11 | Metalle der 6. Nebengruppe | 414 |
| 7.10.12 | Mangan und Cobalt | 416 |
| 7.10.13 | Platinmetalle. | 417 |
| 7.10.14 | Thorium und Uran | 417 |
| 7.11 | Verbundwerkstoffe | 418 |
| 7.11.1 | Einteilung der Verbundwerkstoffe | 418 |
| 7.11.2 | Metal Matrix Composites (MMC) | 419 |
| 7.11.2.1 | Herstellung von MMC | 419 |
| 7.11.2.2 | Eigenschaften von MMC | 420 |
| 7.11.3 | Werkstoffverbunde. | 421 |

8 Normung und Benennung metallischer Werkstoffe

| | | |
|------------|--|------------|
| 8.1 | Stahlnormung | 422 |
| 8.1.1 | Stahlnormung durch Kurznamen | 422 |
| 8.1.1.1 | Kennzeichnung der Stähle nach der Verwendung oder den mechanischen oder physikalischen Eigenschaften | 424 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 8.1.1.2 | Kennzeichnung der Stähle nach der chemischen Zusammensetzung. | 424 |
| 8.1.2 | Stahlnormung durch Werkstoffnummern | 430 |
| 8.2 | Normung von Gusseisenwerkstoffen | 432 |
| 8.2.1 | Normung durch Kurznamen | 432 |
| 8.2.2 | Normung durch Werkstoffnummern | 433 |
| 8.3 | Normung von Nichteisenmetallen (NE-Metalle) | 433 |
| 8.3.1 | Normung von Aluminiumwerkstoffen. | 434 |
| 8.3.1.1 | Aluminiumknetwerkstoffe. | 435 |
| 8.3.1.2 | Aluminiumgusswerkstoffe | 439 |
| 8.3.2 | Normung von Magnesiumwerkstoffen | 440 |
| 8.3.2.1 | Normung von Magnesiumwerkstoffen nach DIN EN 1754. | 440 |
| 8.3.2.2 | Normung von Magnesiumwerkstoffen nach ASTM | 442 |
| 8.3.3 | Normung von Kupferwerkstoffen | 442 |
| 8.3.3.1 | Unlegiertes Kupfer. | 442 |
| 8.3.3.2 | Kupferlegierungen. | 442 |

9 Kunststoffe

| | | |
|------------|--|------------|
| 9.1 | Bedeutung der Kunststoffe. | 445 |
| 9.2 | Allgemeine Eigenschaften | 445 |
| 9.3 | Geschichtliche Entwicklung | 446 |
| 9.4 | Herstellung der Kunststoffe | 447 |
| 9.4.1 | Ausgangsstoffe zur Kunststoff- herstellung | 447 |
| 9.4.2 | Prinzipien der Kunststoffherstellung | 448 |
| 9.4.2.1 | Polymerisation und Polymerisate | 448 |
| 9.4.2.2 | Polykondensation und Polykondensate | 456 |
| 9.4.2.3 | Polyaddition und Polyaddukte | 461 |
| 9.4.3 | Spezialkunststoffe | 462 |
| 9.4.4 | Faserverstärkte Kunststoffe. | 463 |
| 9.5 | Einteilung und struktureller Aufbau der Kunststoffe | 464 |
| 9.5.1 | Thermoplaste (Plastomere) | 465 |
| 9.5.1.1 | Amorphe Thermoplaste | 465 |
| 9.5.1.2 | Teilkristalline Thermoplaste. | 465 |
| 9.5.2 | Duroplaste (Duromere) | 469 |
| 9.5.3 | Elastomere | 469 |
| 9.5.4 | Thermoplastische Elastomere | 469 |
| 9.6 | Mechanisch-thermisches Verhalten der Kunststoffe | 470 |
| 9.6.1 | Charakterisierung der Zustandsbereiche 470 | |
| 9.6.1.1 | Energieelastischer Bereich | 471 |
| 9.6.1.2 | Nebenerweichungsbereich (NEB) | 471 |
| 9.6.1.3 | Haupterweichungsbereich (HEB) | 471 |
| 9.6.1.4 | Entropieelastischer Bereich | 472 |
| 9.6.1.5 | Fließbereich | 472 |
| 9.6.2 | Amorphe Thermoplaste | 473 |
| 9.6.3 | Teilkristalline Thermoplaste | 473 |
| 9.6.4 | Duroplaste. | 474 |
| 9.6.5 | Elastomere | 474 |
| 9.6.6 | Thermoplastische Elastomere | 475 |

| | | |
|-------------|---|------------|
| 9.7 | Kennwerte, Eigenschaften und Anwendung ausgewählter Kunststoffe | 475 |
| 9.8 | Normung und Bezeichnung von Kunststoffen | 486 |
| 9.8.1 | Allgemeine Kennzeichnung von Kunststoffen | 486 |
| 9.8.1.1 | Kurzzeichen für Homopolymere und chemisch modifizierte polymere Naturstoffe | 486 |
| 9.8.1.2 | Copolymere und Polymergemische | 487 |
| 9.8.1.3 | Kennzeichnung besonderer Eigenschaften | 487 |
| 9.8.1.4 | Kennzeichnung von Zusatzstoffen | 488 |
| 9.8.2 | Kennzeichnung thermoplastischer Formmassen | 488 |
| 9.8.3 | Kennzeichnung von Duroplasten | 489 |
| 9.8.4 | Kennzeichnung von Elastomeren | 490 |
| 9.9 | Verarbeitung von Kunststoffen | 491 |
| 9.9.1 | Zuschlagstoffe | 491 |
| 9.9.2 | Urformen und Umformen | 491 |
| 9.9.2.1 | Formpressen | 492 |
| 9.9.2.2 | Spritzgießen | 492 |
| 9.9.2.3 | Extrudieren | 493 |
| 9.9.2.4 | Kalandrieren | 493 |
| 9.9.2.5 | Umformen | 494 |
| 9.9.3 | Mechanische Bearbeitung | 494 |
| 9.9.4 | Verarbeitung aus Lösungen und Dispersionen | 496 |
| 9.9.4.1 | Lacke | 497 |
| 9.9.4.2 | Klebstoffe | 497 |
| 9.10 | Kunststoffe und Umwelt | 498 |

10 Keramische Werkstoffe

| | | |
|-------------|--|------------|
| 10.1 | Einordnung keramischer Werkstoffe | 500 |
| 10.2 | Eigenschaften keramischer Werkstoffe | 501 |
| 10.2.1 | Allgemeine Eigenschaften | 501 |
| 10.2.2 | Physikalische Eigenschaften | 502 |
| 10.2.3 | Mechanische Eigenschaften | 502 |
| 10.2.3.1 | Festigkeit und Hochtemperaturfestigkeit | 502 |
| 10.2.3.2 | Härte | 503 |
| 10.2.3.3 | Verformbarkeit und Zähigkeit | 504 |
| 10.2.4 | Thermische Eigenschaften | 504 |
| 10.2.4.1 | Wärmeausdehnung und Temperaturwechselbeständigkeit | 504 |
| 10.2.4.2 | Wärmeleitfähigkeit | 505 |
| 10.2.5 | Elektrische und magnetische Eigenschaften | 505 |
| 10.2.5.1 | Elektrische Leitfähigkeit | 506 |
| 10.2.5.2 | Dielektrisches Verhalten | 506 |
| 10.2.6 | Chemische Eigenschaften | 506 |
| 10.3 | Einteilung keramischer Werkstoffe | 507 |
| 10.4 | Innere Struktur und Gefüge keramischer Werkstoffe | 508 |
| 10.5 | Silicatkeramische Werkstoffe | 509 |
| 10.5.1 | Porzellan | 510 |
| 10.5.2 | Steatit | 511 |
| 10.5.3 | Cordieritkeramik | 511 |

| | | |
|--------------|--|------------|
| 10.6 | Oxidkeramische Werkstoffe | 512 |
| 10.6.1 | Aluminiumoxid (Al_2O_3) | 512 |
| 10.6.2 | Zirkoniumoxid (ZrO_2) | 514 |
| 10.6.3 | Aluminiumtitanat (Al_2TiO_5) | 516 |
| 10.6.4 | Magnesiumoxid (MgO) | 517 |
| 10.6.5 | Weitere oxidkeramische Werkstoffe | 517 |
| 10.7 | Nichtoxidkeramische Werkstoffe | 518 |
| 10.7.1 | Keramische Werkstoffe aus elementaren Stoffen | 520 |
| 10.7.2 | Metallische Hartstoffe | 520 |
| 10.7.2.1 | Carbide | 521 |
| 10.7.2.2 | Nitride | 521 |
| 10.7.2.3 | Boride | 521 |
| 10.7.2.4 | Silicide | 522 |
| 10.7.3 | Nichtmetallische Hartstoffe | 522 |
| 10.7.3.1 | Siliciumcarbid (SiC) | 522 |
| 10.7.3.2 | Siliciumnitrid (Si_3N_4) | 525 |
| 10.7.3.3 | Bornitrid (BN) | 526 |
| 10.7.3.4 | Borcarbid (B_4C) | 527 |
| 10.8 | Elektro- und Magnetkeramik | 527 |
| 10.8.1 | Elektrokeramik | 528 |
| 10.8.1.1 | Trägerkörper | 528 |
| 10.8.1.2 | Dielektrische keramische Werkstoffe | 528 |
| 10.8.1.3 | Kaltleiter | 529 |
| 10.8.1.4 | Heißeleiter | 529 |
| 10.8.1.5 | Piezokeramik | 529 |
| 10.8.1.6 | Keramische Supraleiter | 530 |
| 10.8.2 | Magnetkeramik | 531 |
| 10.8.2.1 | Dauermagnetische Ferrite (Hartferrite) | 531 |
| 10.8.2.2 | Weichmagnetische Ferrite | 532 |
| 10.9 | Herstellungs- und Bearbeitungsverfahren für keramische Werkstoffe | 534 |
| 10.9.1 | Rohstoffgewinnung | 535 |
| 10.9.2 | Massenaufbereitung | 535 |
| 10.9.3 | Formgebung | 535 |
| 10.9.4 | Trocknen und Ausheizen | 538 |
| 10.9.5 | Grün- und Weißbearbeitung, Vorbrand | 538 |
| 10.9.6 | Sintern (Brennen) | 539 |
| 10.9.7 | Endbearbeitung (Hartbearbeitung) | 540 |
| 10.10 | Künftige Entwicklungen | 540 |

11 Korrosion und Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe

| | | |
|-------------|---|------------|
| 11.1 | Einleitung und Übersicht | 541 |
| 11.2 | Elektrochemische Korrosion | 541 |
| 11.2.1 | Lösungstension | 542 |
| 11.2.2 | Elektrochemische Spannungsreihe | 542 |
| 11.2.3 | Stromdichte-Potential-Kurven | 544 |
| 11.2.4 | Wasserstoffkorrosion | 545 |
| 11.2.5 | Sauerstoffkorrosion | 545 |
| 11.3 | Rost | 546 |
| 11.4 | Erscheinungsformen der Korrosion | 547 |
| 11.5 | Korrosionsschutz | 548 |
| 11.5.1 | Passiver Korrosionsschutz | 548 |
| 11.5.1.1 | Überzüge mit Metalloxiden | 549 |
| 11.5.1.2 | Überzüge mit edleren Metallen | 550 |
| 11.5.1.3 | Überzüge mit unedleren Metallen | 551 |
| 11.5.1.4 | Überzüge mit Nichtmetallen | 551 |

| | | |
|--------|--------------------------------|-----|
| 11.5.2 | Aktiver Korrosionsschutz | 551 |
| 11.5.3 | Konstruktive Maßnahmen | 553 |

12 Tribologie

| | | |
|----------|--|-----|
| 12.1 | Tribosysteme | 555 |
| 12.1.1 | Aufbau eines Tribosystems | 555 |
| 12.1.2 | Funktion eines Tribosystems | 556 |
| 12.2 | Hauptgebiete der Tribologie | 556 |
| 12.2.1 | Reibung | 556 |
| 12.2.1.1 | Reibungsarten | 557 |
| 12.2.1.2 | Reibungsmechanismen bei Festkörper- reibung | 557 |
| 12.2.1.3 | Reibungszustände in geschmierten Gleitpaarungen | 558 |
| 12.2.2 | Schmierung und Schmierstoffe | 559 |
| 12.2.2.1 | Schmieröle | 559 |
| 12.2.2.2 | Schmierfette | 561 |
| 12.2.2.3 | Festschmierstoffe | 562 |
| 12.2.3 | Verschleiß | 563 |
| 12.2.3.1 | Verschleißmechanismen | 563 |
| 12.2.3.2 | Verschleißarten | 568 |
| 12.3 | Verschleißbeständige (tribotechnische) Werkstoffe | 568 |
| 12.3.1 | Verwendung von Stählen bzw. Stahlguss mit hoher Verschleißbeständigkeit | 568 |
| 12.3.2 | Oberflächenschutzschichten | 569 |
| 12.3.3 | Verwendung verschleißbeständiger Werkstoffe | 571 |

13 Werkstoffprüfung

| | | |
|----------|---|-----|
| 13.1 | Einführung | 572 |
| 13.2 | Aufgaben der Werkstoffprüfung | 572 |
| 13.3 | Einteilung der Werkstoffprüfverfahren .. | 573 |
| 13.4 | Zerstörungsfreie Werkstoffprüfverfahren | 574 |
| 13.4.1 | Eindringprüfung | 574 |
| 13.4.2 | Magnetische und induktive Prüf- verfahren | 576 |
| 13.4.2.1 | Magnetische Streuflussverfahren | 576 |
| 13.4.2.2 | Wirbelstromprüfung | 577 |
| 13.4.3 | Ultraschallprüfung | 578 |
| 13.4.4 | Durchstrahlungsverfahren | 585 |
| 13.4.4.1 | Werkstoffprüfung mit Röntgenstrahlen .. | 585 |
| 13.4.4.2 | Werkstoffprüfung mit Gammastrahlen .. | 587 |
| 13.4.4.3 | Nachweis von Röntgen- und Gammastrahlen | 589 |
| 13.4.4.4 | Prüfbare Probendicken | 590 |
| 13.4.4.5 | Vergleich zwischen Röntgen- und Gammastrahlen | 591 |
| 13.4.5 | Vergleich der zerstörungsfreien Werkstoffprüfverfahren | 591 |
| 13.5 | Mechanische Werkstoffprüfverfahren .. | 593 |
| 13.5.1 | Zugversuch | 593 |
| 13.5.1.1 | Historisches | 593 |

| | | |
|----------|---|-----|
| 13.5.1.2 | Versuchsdurchführung | 594 |
| 13.5.1.3 | Probengeometrie | 594 |
| 13.5.1.4 | Spannungs-Dehnungs-Diagramme | 595 |
| 13.5.1.5 | Ermittlung von Werkstoffkennwerten im Zugversuch | 599 |
| 13.5.1.6 | Bruchvorgänge, Bruchformen und Bruchflächen | 603 |
| 13.5.2 | Druckversuch | 606 |
| 13.5.3 | Biegeversuch | 608 |
| 13.5.4 | Torsions- oder Verdrehversuch | 609 |
| 13.5.5 | Scherversuch | 610 |
| 13.5.6 | Härteprüfung | 611 |
| 13.5.6.1 | Einteilung der Härteprüfverfahren | 611 |
| 13.5.6.2 | Statische Härteprüfverfahren | 612 |
| 13.5.6.3 | Dynamische Härteprüfverfahren | 622 |
| 13.5.7 | Zähigkeitsprüfverfahren | 624 |
| 13.5.7.1 | Zähigkeitsbegriff | 624 |
| 13.5.7.2 | Sicherheitsrelevanz der Zähigkeit | 625 |
| 13.5.7.3 | Spröder und zäher Gewaltbruch | 625 |
| 13.5.7.4 | Einflussfaktoren auf die Zähigkeit | 626 |
| 13.5.7.5 | Verfahren der Zähigkeitsprüfung | 627 |
| 13.5.8 | Schwingfestigkeitsversuche | 632 |
| 13.5.8.1 | Entstehung von Schwingrissen | 634 |
| 13.5.8.2 | Ermüdungbruchflächen | 635 |
| 13.5.8.3 | Versuche zum Ermüdungsverhalten | 635 |
| 13.5.8.4 | Einstufige Schwingfestigkeitsversuche (Wöhlerversuche) | 636 |
| 13.5.8.5 | Betriebsfestigkeitsversuche | 639 |
| 13.5.8.6 | Schwingprüfmaschinen | 641 |
| 13.5.9 | Zeitstandversuch | 642 |
| 13.5.9.1 | Durchführung von Zeitstandversuchen .. | 643 |
| 13.5.9.2 | Werkstoffkennwerte | 644 |
| 13.5.9.3 | Spannungsrelaxation | 645 |
| 13.6 | Technologische Prüfungen | 645 |
| 13.6.1 | Tiefungsversuch nach Erichsen | 646 |
| 13.6.2 | Näpfchen-Tiefziehprüfung (nach Swift) .. | 647 |
| 13.6.3 | Technologischer Biegeversuch | 648 |
| 13.6.4 | Stirnabschreckversuch nach Jominy | 648 |
| 13.7 | Mechanische Prüfverfahren für Kunststoffe | 650 |
| 13.7.1 | Zugversuch an Kunststoffen | 652 |
| 13.7.1.1 | Probengeometrie | 652 |
| 13.7.1.2 | Versuchsdurchführung | 652 |
| 13.7.1.3 | Kennwerte | 653 |
| 13.7.2 | Härteprüfung an Kunststoffen | 654 |
| 13.7.2.1 | Kugeleindruckversuch | 656 |
| 13.7.2.2 | Härteprüfung nach Shore an Kunst- stoffen | 656 |
| 13.7.2.3 | Internationaler Gummihärtegrad (IRHD) .. | 658 |
| 13.7.3 | Charpy-Schlagversuch nach ISO | 658 |
| | Englische Fachausdrücke | 660 |
| | Sachwortverzeichnis | 676 |
| | Bildquellennachweis | 697 |
| | Anhang | 699 |