

Janko Auerswald und Pius Portmann

Grundlagen der Funktionswerkstoffe für Studium und Praxis



Inhaltsverzeichnis

[Cover](#)

[Titelblatt](#)

[Urheberrechte](#)

[Vorwort](#)

[Danksagung](#)

[1 Einführung und Grundlagen](#)

[1.1 Bindungsarten](#)

[1.2 Werkstoffklassen und Strukturmodelle](#)

[1.3 Nah- und Fernordnung](#)

[1.4 Die Richtungsabhängigkeit der Eigenschaften](#)

[1.5 Polymorphie: Die Vielgestalt von Werkstoffen](#)

[1.6 Phasen](#)

[1.7 Werkstoffe, Rohstoffe und Nachhaltigkeit](#)

[1.8 Aufgaben](#)

[2 Struktur und Gitterfehler](#)

[2.1 Gittertypen der wichtigsten Metalle](#)

[2.2 Kristallbaufekte](#)

[2.3 Elastische Verformung](#)

[2.4 Plastische Verformung der Metalle](#)

[2.5 Vertiefende Betrachtung der plastischen Verformung](#)

[2.6 Zusammenhang zwischen Gitterstruktur und plastischer Verformbarkeit](#)

[2.7 Verfestigungsmechanismen in Metallen](#)

[2.8 Rekristallisation](#)

[2.9 Verformung von Keramiken und Kunststoffen](#)

2.10 Aufgaben

3 Werkstoffprüfung

3.1 Mechanische Werkstoffprüfung

3.2 Verfahren der Rissprüfung

3.3 Mikroskopische Mess- und Prüfverfahren

3.4 Analyse von Struktur und Gefüge

3.5 Analyse der chemischen Zusammensetzung

3.6 Aufgaben

4 Legierungskunde

4.1 Erstarrungsverhalten von Metallschmelzen

4.2 Legierungen und Phasen

4.3 Zweistoffsystem mit vollständiger Löslichkeit

4.4 Eutektisches Zweistoffsystem mit begrenzter Löslichkeit

4.5 Eutektisches Zweistoffsystem mit vollkommener Unlöslichkeit im festen Zustand

4.6 Eutektisches Zweistoffsystem Al-Si

4.7 Erklärung der Ausscheidungshärtung

4.8 Zweistoffsysteme mit intermetallischen Phasen

4.9 Aufgaben

5 Korrosion

5.1 Standardpotentiale und galvanische Zelle

5.2 Wasserstoff- und Sauerstoffkorrosion

5.3 Sonderfall Passivierung

5.4 Flächenregel

5.5 Arten der Korrosion und Fallbeispiele

5.6 Korrosionsschutz und Prüfverfahren

5.7 Aufgaben

6 Metallische Leiter, Widerstände und Kontakte

[6.1 Bändermodell](#)

[6.2 Elektrische Leitfähigkeit](#)

[6.3 Leiterwerkstoffe](#)

[6.4 Widerstandswerkstoffe](#)

[6.5 Elektrische Kontakte](#)

[6.6 Aufgaben](#)

[7 Halbleiter](#)

[7.1 Eigenleitung und Störstellenleitung](#)

[7.2 Der p-n-Übergang und seine Anwendungen](#)

[7.3 Halbleitertechnologie](#)

[7.4 Graphen](#)

[7.5 Einige Bemerkungen zur Nanotechnologie](#)

[7.6 Aufgaben](#)

[8 Polymere \(Kunststoffe\)](#)

[8.1 Begriffe und Einteilung der Polymere](#)

[8.2 Struktur und Eigenschaften der Polymere](#)

[8.3 Polymere als Konstruktionswerkstoffe](#)

[8.4 Polymere als Leiterwerkstoffe](#)

[8.5 Biologisch abbaubare Polymere](#)

[8.6 Aufgaben](#)

[9 Magnetwerkstoffe](#)

[9.1 Ursachen des Magnetismus](#)

[9.2 Arten des Magnetismus](#)

[9.3 Physikalische Grundlagen](#)

[9.4 Kollektiver Magnetismus](#)

[9.5 Weichmagnete und Hartmagnete](#)

[9.6 Magnetspeicher](#)

[9.7 Supraleiter und Magnetismus](#)

[9.8 Aufgaben](#)

[10 Dielektrika](#)

[10.1 Polarisationsmechanismen](#)

[10.2 Physikalische Grundlagen](#)

[10.3 Materialien für Isolierstoffe](#)

[10.4 Materialien für Kondensator-Dielektrika](#)

[10.5 Ferroelektrika und Piezoelektrika](#)

[10.6 Aufgaben](#)

[11 Lichtleiter und Photonik](#)

[11.1 Brechungsgesetz und Totalreflexion](#)

[11.2 Lichtleiterfasern](#)

[11.3 Weitere optische Komponenten \(Auswahl\)](#)

[11.4 Laserbearbeitung von Funktionswerkstoffen](#)

[11.5 Aufgaben](#)

[12 Werkstoffe für Transducer](#)

[12.1 Einführung in die MEMS-Reinraumtechnologien](#)

[12.2 Photolithographie](#)

[12.3 Subtraktive Ätzverfahren](#)

[12.4 Additive Beschichtungsverfahren und Lift-off](#)

[12.5 Electroforming, LIGA](#)

[12.6 Wandlereffekte und typische Anwendungen](#)

[12.7 Aufgaben](#)

[Schlusswort](#)

[Lösungen zu den Aufgaben](#)

[Literatur](#)

[Stichwortverzeichnis](#)

[End User License Agreement](#)

Liste der Abbildungen

Vorwort

[Abb. 1 Funktionsweise und Herstellung des Magischen Zifferblatts \(© revelationwa...](#)

Kapitel 1

[Abb. 1.1 Das Periodensystem der Elemente mit Ordnungszahlen, molaren Atommassen,...](#)

[Abb. 1.2 Typische Gitterstrukturen von Metallen. \(a\) kubisch-flächenzentrierte E...](#)

[Abb. 1.3 Die Elementarzellen von Halbleitern der IV. Hauptgruppe \(Si und Germani...](#)

[Abb. 1.4 Struktur von piezoelektrischen Keramiken auf Basis der Perowskit-Strukt...](#)

[Abb. 1.5 Strukturmodell von Kunststoffen \(Polyethylen\). Kunststoffe bestehen aus...](#)

[Abb. 1.6 \(a\) Amorphes Quarzglas mit Nahordnung. Innerhalb der \$\text{SiO}_4\$ -Tetraeder gib...](#)

[Abb. 1.7 \(a\) Einkristalline Turbinenschaufel aus einem Flugzeugtriebwerk; \(b\) ei...](#)

[Abb. 1.8 \(a\) Anisotropie der meisten kubischen Einkristalle, dargestellt anhand ...](#)

[Abb. 1.9 \(a\) Quasiisotropes polykristallines Gefüge ohne Textur; \(b\) anisotropes...](#)

[Abb. 1.10 Unten: Reines Eisen liegt von Raumtemperatur \(20°C\) bis 911°C als kubisch...](#)

[Abb. 1.11 Wird dem Eisen mehr als 0.3% Kohlenstoff zulegiert und es sehr schnell...](#)

[Abb. 1.12 \(a\) Einphasiges polykristallines Siliziumgefüge \(lasergeschnittene Zif...](#)

Kapitel 2

[Abb. 2.1 Wichtige Richtungen im kubischen System. Beispiel: Die Richtung \$\[111\]\$ e...](#)

[Abb. 2.2 Wichtige Ebenen in kubischen Elementarzellen. Beispiel: Die Ebene \(100\)...](#)

[Abb. 2.3 Wichtige Richtungen \(blau\) und Ebenen \(rot\) im hdp System. Das Koordina...](#)

[Abb. 2.4 Die dichtest gepackten Ebenen der drei Kristallstrukturen krz \(a\), kfz ...](#)

[Abb. 2.5 Stapelfolge der dichtest gepackten Ebenen im kfz Gitter \(ABC ABC\) und i...](#)

[Abb. 2.6 Beispiele für Punktdefekte: Leerstelle, Zwischengitteratom, interstitie...](#)

[Abb. 2.7 Schematische Darstellung einer Stufenversetzung. Die Stufenversetzung i...](#)

[Abb. 2.8 Entstehung von Körnern und Korngrenzen bei der Kristallisation aus der ...](#)

[Abb. 2.9 \$\text{Ni}_3\text{Al}\$ - \$\gamma^2\$ -Ausscheidungen \(hell\) in einem Nickel-Mischkristall \(dunkel\)vo...](#)

[Abb. 2.10 Kohärenz von Ausscheidungen. \(a\) Inkohärent, Gitterebenen laufen in de...](#)

[Abb. 2.11 Atomares Kraft-Abstand-Modell. Die Nachbaratome stoßen sich elektrosta...](#)

[Abb. 2.12 Atomares Energie-Abstand-Modell. Der Gleichgewichtsabstand wird mit zu...](#)

[Abb. 2.13 Vereinfachtes Modell der plastischen Verformung durch Versetzungsgleit...](#)

[Abb. 2.14 Bei einer Schraubenversetzung ist die Sprungrichtung der Atome \(Burger...](#)

[Abb. 2.15 ► Tieferes Verständnis der plastischen Verformung durch Versetzungsgle...](#)

[Abb. 2.16 Die zwölf Gleitsysteme im kfz Gitter. Es gibt vier Gleitebenen vom Typ...](#)

[Abb. 2.17 Die zwölf Hauptgleitsysteme im krz Gitter. Es gibt sechs Gleitebenen v...](#)

[Abb. 2.18 Im krz Gitter gibt es noch zwölf weitere Gleitsysteme des Typs \$\frac{1}{2}\$ - \$\langle 11 \dots\$](#)

[Abb. 2.19 Die drei Gleitsysteme auf nur einer Gleitebene im hdp Gitter. Die rot ...](#)

[Abb. 2.20 Zeichnung zur Erläuterung des Schmid'schen Schubspannungsgesetzes \(a\)....](#)

[Abb. 2.21 Drei Stapelfehler in \$\text{Ni}_3\text{Al}\$ -Ausscheidungen einer einkristallinen Nickel...](#)

[Abb. 2.22 Gitterverzerrung durch das Spannungsfeld eines Austauschatoms.](#)

[Abb. 2.23 \(a\) Schematische Darstellung der gegenseitigen Behinderung von Versetz...](#)

[Abb. 2.24 Schematische Darstellung des Versetzungsaufbaus an Korngrenzen.](#)

[Abb. 2.25 Versetzungsaufbau an einer Ausscheidung schematisch \(a\) und an einer ...](#)

[Abb. 2.26 Rekristallisierter Zugstab aus Aluminium. Im Bereich nahe der Bruchste...](#)

[Abb. 2.27 Polyimid mit sterischen Behinderungen \(Benzolringe in der Hauptkette\).](#)

[Abb. 2.28 Qualitativer Vergleich von Festigkeit und E-Modul der Werkstoffklassen...](#)

Kapitel 3

[Abb. 3.1 Beanspruchungsarten von technischen Produkten.](#)

[Abb. 3.2 Definition der technischen Normalspannung \$\sigma\$ und der technischen Normal...](#)

[Abb. 3.3 Definition der technischen Schubspannung \$\tau\$ und der technischen Scherung...](#)

[Abb. 3.4 Schematischer Ablauf beim Zugversuch \(Spannungs-Dehnungs-Diagramm\). Zwi...](#)

[Abb. 3.5 Schematische Spannungs-Dehnungs-Diagramme mit Kennwerten für ein Metall...](#)

[Abb. 3.6 Der Zugversuch im Labor. Prüfmaschine \(b\) sowie Zugproben ohne und mit ...](#)

[Abb. 3.7 Extremanwendung des Zugversuchs: Der Rückhaltebolzen \(Retain Rod oder Z...](#)

[Abb. 3.8 Beispiel einer Weibull-Dichte-funktion \(a\) und eines Weibull-Plots \(b\) ...](#)

[Abb. 3.9 Wöhler-Versuch. Sinus-förmige mechanische Spannung mit Mittelspannung \$\sigma_m\$...](#)

[Abb. 3.10 Röntgen-Durchstrahlungsprüfung. Die Größe und Orientierung der Volumen...](#)

[Abb. 3.11 Wandstärkemessung und laufzeitbedingte Erkennung von Rissen mit Ultras...](#)

[Abb. 3.12 Magnetpulverprüfung mit Jochmagnetisierung zur Erkennung von Querrisse...](#)

[Abb. 3.13 Stereomikroskope ermöglichen einen sehr guten 3D-Überblick.](#)

[Abb. 3.14 Das Werth ScopeCheck vergleicht die optische Messung eines lasergeschn...](#)

[Abb. 3.15 Konfokales Lasermikroskop zur Messung von Tiefe und Rauheit \(hier geze...](#)

[Abb. 3.16 \(a\) Röntgendiffraktometrieauf-nahmen von kubisch-flächenzentrierten Na...](#)

[Abb. 3.17 \(a\) Auflichtmikroskop mit automatisch verfahrbarem x-y-z-Tisch und Bil...](#)

[Abb. 3.18 Rasterelektronenmikroskop und photolithographisch beidseitig isotrop g...](#)

[Abb. 3.19 Transmissionselektronenmikroskop EM 400 T der Firma Philips \(a\) und Ni...](#)

[Abb. 3.20 \(a\) Erklärung des Prinzips der Röntgenfluoreszenz \(RFA\) anhand der sch...](#)

[Abb. 3.21 \(a\) Erklärung des Prinzips der EDX-Spektroskopie anhand der schematisc...](#)

[Abb. 3.22 REM-Aufnahme im Materialkontrast \(BSE\) und EDX-Linienscans entlang der...](#)

[Abb. 3.23 \(a\) REM-BSEMaterialkontrastaufnahme von Mangansulfidausscheidungen \(du...](#)

[Abb. 3.24 \(a\) Erklärung der XPS-Messung anhand der schematischen Elektronenkonfi...](#)

[Abb. 3.25 Erklärung des Auger-Effekts anhand der schematischen Elektronenkonfigu...](#)

[Abb. 3.26 Gemessenes \(rot\) und hinterlegtes Vergleichsspektrum \(blau\) von Polyet...](#)

[Abb. A3.4-1 Spannungs-Dehnungs-Kurve für AlMgSi1-T6.](#)

[Abb. A3.4-2 Ausschnitt des elastischen Bereichs der Spannungs-Dehnungs-Kurve der...](#)

Kapitel 4

[Abb. 4.1 Abkühlungskurven von Schmelzen reiner Metalle bei langsamer bzw. schnell...](#)

[Abb. 4.2 Kubisch-raumzentrierter Eisen-Mischkristall \(Ferrit\) mit einem Chrom-Fre...](#)

[Abb. 4.3 \(a\) Die intermetallische Phase \$\text{Ni}_3\text{Al}\$ mit \$\text{L}_{12}\$ -Struktur, wie sie z. B. in...](#)

[Abb. 4.4 Das Zweistoffsystem Silber \(Ag\)-Gold \(Au\). Links ist reines Silber, rec...](#)

[Abb. 4.5 Für die Abkühlkurven überträgt man die Schnittpunkte der Legierungen mi...](#)

[Abb. 4.6 Gefüge und Hebelgesetz im Zweistoffsystem Silber-Gold \(Erklärungen im T...](#)

[Abb. 4.7 Eutektisches Zweistoffsystem Blei \(Pb\)-Zinn \(Sn\) mit begrenzter Löslich...](#)

[Abb. 4.8 Abkühlkurve und Ausbildung des Gefüges von Legierung \$\text{L}_1\$.](#)

[Abb. 4.9 Abkühlkurve und Ausbildung des Gefüges von Legierung \$\text{L}_2\$.](#)

[Abb. 4.10 Abkühlkurve und Ausbildung des Gefüges von Legierung \$\text{L}_3\$.](#)

[Abb. 4.11 Abkühlkurve und Ausbildung des Gefüges der eutektischen Legierung \$\text{L}_E\$.](#)

[Abb. 4.12 Gesamtüberblick über die möglichen Gefüge im eutektischen System Blei-...](#)

[Abb. 4.13 Abkühlkurve und Gefüge aus Primär- \$\beta\$ -Mischkristallen und eutektischen a...](#)

[Abb. 4.14 Zweistoffsystem Bismut-Cadmium mit dem Einphasenfeld Schmelze sowie de...](#)

[Abb. 4.15 Abkühlkurven. Die eutektische Legierung \$L_E\$ hat nur einen Haltepunkt, d...](#)

[Abb. 4.16 Abkühlkurve sowie Gefüge und Hebelgesetz für Legierung L in den Punkte...](#)

[Abb. 4.17 Das Zweistoffsystem Aluminium-Silizium.](#)

[Abb. 4.18 Ausscheidungshärtung im System Aluminium-Zink mit der hochfesten Aussc...](#)

[Abb. 4.19 Erklärung der Ausscheidungshärtung. Schritt 1 \(a\): Aufheizen vom Zweip...](#)

[Abb. 4.20 Zweistoffsystem Nickel-Titan. Die Formgedächtnislegierungen sind inter...](#)

[Abb. 4.21 Eisen-Kohlenstoff-Diagramm mit der intermediären Phase Zementit \(\$Fe_3C\$ \)...](#)

[Abb. A4.2 Zweistoffsystem Nickel-Kupfer mit vollständiger Löslichkeit.](#)

[Abb. A4.9 Eutektisches Zweistoffsystem Aluminium-Silizium mit Mischkristallbildu...](#)

Kapitel 5

[Abb. 5.1 Erklärung der Messung der elektrochemischen Standardpotentiale \$E_0\$ mit H...](#)

[Abb. 5.2 Daniel-Element mit der linken Halbzelle Zink/Zinksulfatlösung \(1 mol/l\)...](#)

[Abb. 5.3 Konzentrationszelle. Obwohl die Elektroden beider Halbzellen aus Silber...](#)

[Abb. 5.4 Aluminium korrodiert besonders stark in basischen Elektrolyten \(a Lochf...](#)

[Abb. 5.5 Lochfraßkorrosion in Edelstahl, Mikroskopieaufnahme \(a\) sowie Tiefenpro...](#)

[Abb. 5.6 Erklärung der Flächenregel. Da der Strom an der Kathode gleich dem Stro...](#)

[Abb. 5.7 Gleichmäßige \(langsame\) Flächenkorrosion des Fe-Mn-Stahls einer Eisenba...](#)

[Abb. 5.8 Schematischer Ablauf der Kontaktkorrosion. Das unedlere Metall löst sic...](#)

[Abb. 5.9 Kontaktkorrosion und Flächenregel. \(a\) Schnelle, gefährliche Korrosion ...](#)

[Abb. 5.10 Interkristalline Korrosion. \(a\) Der Chromgehalt in Körnern und an Korn...](#)

[Abb. 5.11 MnS-Ausscheidungen \(dunkel\) in einem kaltgezogenen ferritischen Stahl ...](#)

[Abb. 5.12 Lochfraßkorrosion an MnS-Ausscheidungen in der Oberfläche von rostfrei...](#)

[Abb. 5.13 Anreicherung und Auskristallisation von Salzen in einem Korrosionsloch...](#)

[Abb. 5.14 Zusammenhang zwischen Chrom-Eisen-Verhältnis in der Oxidschicht und de...](#)

[Abb. 5.15 PREN-Nummern verschiedener rostfreier Stähle. Eigene Darstellung. Quel...](#)

[Abb. 5.16 Lochfraßpotentiale von rostfreien Edelstählen, ermittelt in 1 mol/l Na...](#)

[Abb. 5.17 Fallbeispiel einer Lochfraßkorrosion in austenitischem V2A-Chrom-Nicke...](#)

[Abb. 5.18 Erklärung des Belüftungselements. Dort, wo weniger Sauerstoff hingelan...](#)

[Abb. 5.19 Fallbeispiel Spaltkorrosion in Gewinden von austenitischem Edelstahl 1...](#)

[Abb. 5.20 Fallbeispiel Kühlturbine einer Kühlanlage. Spiralförmig gewickelte, s...](#)

[Abb. 5.21 Fallbeispiele Spaltkorrosion. \(a\) Rändelmutter und Gitter aus 1.4301,...](#)

[Abb. 5.22 Gerades Blech aus austenitischem Edelstahl 1.4301 mit typischen Zwilli...](#)

[Abb. 5.23 \(a\) Lochfraß im Biegefalz eines Blechs aus austenitischem rostfreien E...](#)

[Abb. 5.24 Aktive Korrosionsschutzmaßnahmen durch eine Opferanode \(a\) und durch F...](#)

[Abb. 5.25 Edelstahlbleche aus 1.4301 mit eingepressten Stutzen aus 1.4301 \(a\) so...](#)

[Abb. 5.26 Messaufbau für Stromdichte-Potential-Kurven zur Bestimmung von Lochfra...](#)

[Abb. 5.27 Stromdichte-Potential-Kurve einer Wasserstoffkorrosion. Die obere Kurv...](#)

[Abb. 5.28 Stromdichte-Potential-Kurve für eine Sauerstoffkorrosion einer nicht p...](#)

[Abb. 5.29 \(a\) Resultierende Stromdichte-Potential-Kurven passivierender Metalle,...](#)

[Abb. 5.30 Schematischer Verlauf der Stromdichte-Potential-Kurven für ferritische...](#)

Kapitel 6

[Abb. 6.1 Einfaches Bändermodell von Metallen mit unvollständig besetztem Valenzb...](#)

[Abb. 6.2 \(a\) Bei Metallen und ihren Legierungen steigt der spezifische elektrisc...](#)

[Abb. 6.3 Spezifischer elektrischer Widerstand \(a\) und sein Temperaturkoeffizient...](#)

[Abb. 6.4 Einfluss der Legierungsbildung auf den spezifischen elektrischen Widers...](#)

[Abb. 6.5 Zusammenhang zwischen Leitfähigkeit und Festigkeit von Leiterwerkstoffe...](#)

[Abb. 6.6 Der Flächenwiderstand einer Schicht ist nichts anderes als der spezifis...](#)

[Abb. 6.7 Ausgewählte Temperaturkoeffizienten des spezifischen elektrischen Wider...](#)

[Abb. 6.8 Richtwerte für die Thermospannung gegen Kupfer. Eigene Darstellung. Que...](#)

[Abb. 6.9 Metallische Thermoelementpaarungen mit Angabe der Thermospannung \(a\) un...](#)

[Abb. 6.10 Maximalwerte von Spannung \$U\$ und Strom \$I\$ ohne Lichtbogenbildung für aus...](#)

Kapitel 7

[Abb. 7.1 Mechanismus der Eigenleitung im Atomgitter- und im Bändermodell. Durch ...](#)

[Abb. 7.2 Mechanismus der p-Störstellenleitung im Atomgitter- und im Bändermodell...](#)

[Abb. 7.3 Mechanismus der n-Störstellenleitung im Atomgitter- und im Bändermodell...](#)

[Abb. 7.4 Der p-n-Übergang, bevor p- und n-Bereich miteinander in Kontakt kommen....](#)

[Abb. 7.5 Erklärung des Aufbaus der Diffusionsspannung am p-n-Übergang. Wenn sich...](#)

[Abb. 7.6 Kennlinie einer Diode. Im Durchlassbereich muss zuerst die Diffusionssp...](#)

[Abb. 7.7 Der p-n-Übergang mit Durchlassspannung. Sobald die Diffusionsspannung d...](#)

[Abb. 7.8 Energieübergänge in Dioden mit Durchlassspannung. \(a\) Direkter Übergang...](#)

[Abb. 7.9 \(a\) Zweistoffsystem InSb-GaSb mit vollständiger Löslichkeit und einer k...](#)

[Abb. 7.10 III-V-Halbleiter für Leuchtdioden. Wegen der vollständigen Löslichkeit...](#)

[Abb. 7.11 Der p-n-Übergang mit Sperrspannung und breiter Raumladungszone. Das Er...](#)

[Abb. 7.12 Zonenschmelzverfahren - schematischer Aufbau und schematische Darstell...](#)

[Abb. 7.13 \(a\) Schematischer Ablauf des Czochralski-Verfahrens zur Züchtung von E...](#)

[Abb. 7.14 Die „klassischen“ Kohlenstoffkristallstrukturen Graphit \(a\) und Diaman...](#)

[Abb. 7.15 Kohlenstoff in Form von Nanopartikeln als Fulleren \(a\) und Kohlenstoff...](#)

[Abb. 7.16 Graphen ist praktisch eine Lage von Graphit und so etwas wie der Grund...](#)

Kapitel 8

[Abb. 8.1 Weltkunststoffproduktion in den letzten fünf Jahrzehnten. Eigene Darste...](#)

[Abb. 8.2 Einteilung der Kunststoffe nach ihrem chemischen Vernetzungsgrad.](#)

[Abb. 8.3 Grundbausteine der Polymerketten der vier Massenpolymere PE, PP, PVC, P...](#)

[Abb. 8.4 Einfluss der Kettenlänge auf die Zugfestigkeit.](#)

[Abb. 8.5 Polyimid ist ein Polymer mit sehr hoher Festigkeit und Schmelztemperatu...](#)

[Abb. 8.6 Amorpher thermoplastischer Kunststoff \(a\) und teilkristalliner thermopl...](#)

[Abb. 8.7 Vergleich der Eigenschaften von Low-Density- \(LD\) und High-Density-\(HD-...](#)

[Abb. 8.8 Überblick über die Einsatzgebiete von Kunststoffen in Deutschland \(2018...](#)

[Abb. 8.9 Konjugierte Doppelbindungen in Polyacetylen. Jede zweite Bindung ist ei...](#)

[Abb. 8.10 Typische aromatische Polymerhalbleiter mit konjugierten Doppelbindunge...](#)

[Abb. 8.11 Collage von abfotografierten OLED-Bildschirmmotiven eines Smartphones....](#)

[Abb. 8.12 \(a\) Funktionsweise eines auf Elektrophorese basierenden elektronische ...](#)

[Abb. 8.13 \(a\) Schematischer Aufbau einer Polymer-Solarzelle; \(b\) schematischer A...](#)

[Abb. 8.14 Einteilung der Biopolymere in einer klassischen Vier-Quadranten-Darste...](#)

[Abb. 8.15 Formel der Polylactide. Die biologische Zersetzung beginnt an den viel...](#)

Kapitel 9

[Abb. 9.1 \(a\) Das magnetisches Bahnmoment \$M_B\$ eines Elektrons trägt zum diamagneti...](#)

[Abb. 9.2 Die Nebengruppen-Elemente Mn, Fe, Co und Ni aus der 4. Periode des Peri...](#)

[Abb. 9.3 Feldlinienverlauf B und Magnetisierbarkeit M von Diamagneten, Paramagne...](#)

[Abb. 9.4 Schematische Darstellung der verschiedenen Arten des kollektiven Magnet...](#)

[Abb. 9.5 Schematischer Verlauf der quantenmechanischen Austauschkraft \(Austausch...](#)

[Abb. 9.6 Ferrimagnetische inverse Spinellstruktur des keramischen Weichferriten ...](#)

[Abb. 9.6 *Fortgesetzt* Ferrimagnetische inverse Spinellstruktur des keramischen We...](#)

[Abb. 9.7 Weiss'sche Bezirke und Blochwände. \(a\) Unmagnetisiertes ferromagnetisch...](#)

[Abb. 9.8 Hysteresekurve von Weichmagneten \(Transformatorbleche, Spulenkerne, Mag...](#)

[Abb. 9.9 \(a\) Vorzugsorientierung der Eisenkristalle in der Goss-Textur. Die Würf...](#)

[Abb. 9.10 Nutzung der Goss-Textur für Transformatorbleche. Die leicht ummagnetis...](#)

[Abb. 9.11 Hysteresefreie Magnetisierungskurve einer amorphen Eisenlegierung. Amo...](#)

[Abb. 9.12 Induktionskochplatte mit ebenen Kupferspulen, die das Magnetfeld mit e...](#)

[Abb. 9.13 Übersichtsdiagramm. Weichund hartmagnetische Werkstoffe werden entspre...](#)

[Abb. 9.14 Magnetischer Datenspeicher und schematischer Aufbau des Schreib-Lese-K...](#)

[Abb. 9.15 Funktionsweise eines Lesekopfs basierend auf Ferromagnetismus und Anti...](#)

[Abb. 9.16 \(a\) Gebiet des supraleitenden Zustandes, begrenzt durch eine kritische...](#)

[Abb. 9.17 \(a\) Supraleiter 1. Art verdrängen ein äußeres Magnetfeld aus ihrem Inn...](#)

[Abb. 9.18 Vereinfachte Darstellung der Elementarzelle von \$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}\$. In diesem...](#)

[Abb. 10.1 Elektronenpolarisation \(EP\) kommt in allen Werkstoffen vor. Die Elektr...](#)

[Abb. 10.2 Ionenpolarisation \(IP\) in Keramiken mit Ionenbindung. Die Ionen auf ih...](#)

[Abb. 10.3 Orientierungspolarisation \(OP\) von Kristallwasser in Silikatkeramik \(s...](#)

[Abb. 10.4 Frequenzabhängigkeit der Polarisationsmechanismen OP, IP, EP und ihr A...](#)

[Abb. 10.5 Typische Werte der Dielektrizitätszahlen \$\epsilon_r\$ verschiedener Dielektrika ...](#)

[Abb. 10.6 Herleitung von \$\tan \delta\$ und Ersatzschaltbild eines Kondensators mit Diele...](#)

[Abb. 10.7 Silikongebundene Kunstglimmerplatte für Mikrowellenfenster. Sie kommt ...](#)

[Abb. 10.8 Dreistoffsystem Kaolin-Quarz-Feldspat für isolierende Elektroporzellan...](#)

[Abb. 10.9 \(a\) Elementarzelle der Bariumtitanatstruktur *oberhalb* der Curie-Temper...](#)

[Abb. 10.10 Hysteresekurve eines Ferroelektrikums bei der Umpolarisierung \(\$E\$ - äu...](#)

[Abb. 10.11 Piezoelektrischer Effekt beim Quarz. Durch elastische mechanische Kom...](#)

Kapitel 11

[Abb. 11.1 Veranschaulichung von Brechungsgesetz und Totalreflexion.](#)

[Abb. 11.2 Schematischer Aufbau, radialer Verlauf des Brechungsindex \$n\$, Wegstreck...](#)

[Abb. 11.3 Schematischer Aufbau einer Laserdiode \(a\). Der technische Stromfluss i...](#)

[Abb. 11.4 Schematischer Aufbau eines refraktiven WDM. Die verschiedenfarbig_geze...](#)

[Abb. 11.5 Schematischer Aufbau von Faserlasern \(EDFA\) für die optisch-optische S...](#)

[Abb. 11.6 Filigrane mit UKP geschnittene Komponenten aus rostfreiem Edelstahl.](#)

[Abb. 11.7 Mit UKP lassen sich die Wärmeeinflusszonen heißer Laser im Material ve...](#)

[Abb. 11.8 Große Materialvielfalt in der UKP-Laserbearbeitung. \(a\) Elektrode aus ...](#)

[Abb. 11.9 Schneiden mit UKP ergibt Kanten von extrem guter Schnittqualität. Der ...](#)

[Abb. 11.10 Mit UKP gebohrte Lautsprecherlöcher in hochfester Aluminiumlegierung.](#)

[Abb. 11.11 Mit Dreh- oder Trepanieroptiken kann man den Laserstrahl schräg anste...](#)

[Abb. 11.12 Kalter Abtrag mit hoher Qualität. UKP-Laserablation von Goldleiterbah...](#)

[Abb. 11.13 Erzeugung von Laserlicht mit zirkularer Polarisation für isotrope Las...](#)

[Abb. 11.14 Funktionsweise und Herstellung des Magischen Zifferblatts der Uhrenma...](#)

Kapitel 12

[Abb. 12.1 Reinraum mit Überdruck und laminarem Luftstrom von oben nach unten. Di...](#)

[Abb. 12.2 Photolithographie, schematische Darstellung: \(a\) Belichtung des Photor...](#)

[Abb. 12.3 Ätzprofile \(blau: Ätzmaske, z. B. Photoresist; grau: Wafer\). \(b\) Isotr...](#)

[Abb. 12.4 Isotropes Ätzprofil einer beidseitig photolithographisch geätzten Edel...](#)

[Abb. 12.5 Schematische Ätzprofile von anisotrop mit KOH geätzten inversen \(nach ...](#)

[Abb. 12.6 Reale anisotrope Ätzprofile in Silizium nach 5, 10, 30 und 45 min Ätzz...](#)

[Abb. 12.7 \(a\) Trockengeätzte \(DRIE\) Siliziumgussform für die Abformung von mikro...](#)

[Abb. 12.8 \(a\) Schematischer Ablauf des Lift-off-Verfahrens. Ausgehend von der ph...](#)

[Abb. 12.9 Mikropumpe mit 50 \$\mu\text{m}\$ hohen Goldelektroden \(miteinem roten Pfeil markie...](#)

[Abb. 12.10 Beispiel eines piezoresistiven Drucksensors mit Gold-Wire-Bonds alsKo...](#)

[Abb. 12.11 PZT-Kristallstruktur oberhalb \(a, kubisch\) und unterhalb der CurieTem...](#)

[Abb. 12.12 \(a\) Transversaler inverser piezoelektrischer Effekt. Die Dehnung \$\epsilon\$ \(h...](#)

[Abb. 12.13 Bewegungshysterese eines ferroelektrischen PZT-Piezoelements bei bi p...](#)

[Abb. 12.14 \(a\) Ultraschallbild eines noch ungeborenen Kindes; \(b\) Aufkonzentration...](#)

[Abb. 12.15 Trockengeätzte \(DRIE\) kapazitive Kammstrukturen aus Silizium für Gyro...](#)

[Abb. 12.16 Typische Kennlinien des spezifischen elektrischen Widerstandes \$\rho\$ von ...](#)

[Abb. 12.17 Metallisches Thermoelement, das auf dem Seebeck-Effekt beruht. \(a\) Sc...](#)

[Abb. 12.18 Schematische Darstellung eines Halbleiter-Peltier-Elements. Im p-Halb...](#)

[Abb. 12.19 Piezoaktuiertes PikoliterDosiersystem zur Beschichtung eines implanti...](#)

[Abb. 12.20 Hall-Element und Entstehung der Hall-Spannung \$U_H\$ entsprechend der Lor...](#)

[Abb. 12.21 Lichtmikroskopische Aufnahmen eines Smartphonedisplays. \(a\) Mitdem Li...](#)

[Abb. 12.22 Lab-on-Chip-Systeme. \(a\) Kontaktloses Sortieren von Blutzellen durch ...](#)

Lösungen zu den Aufgaben

[Abb. A2.8 Gosstextur Elektroblech und krz Elementarzelle.](#)

[Abb. A2.9 Fasertextur Draht und kfz Elementarzelle.](#)

[Abb. A3.4-3 E-Modul und 0.2%-Dehngrenze.](#)

[Abb. A3.4-4 E-Modul und 0.2%-Dehngrenze.](#)

[Abb. A4.3 Zweistoffsystem Kupfer-Nickel.](#)

Liste der Tabellen

Kapitel 2

[Tab. 2.1 Die wichtigsten Kristallstrukturen von Metallen.](#)

[Tab. 2.2 Gleitsysteme in kfz, krz und hdp Metallen.](#)

[Tab. 2.3 Überblick über die typischsten Verfestigungsmechanismen.](#)

Kapitel 3

[Tab. 3.1 Beispiele für Werte des Elastizitätsmoduls \$E\$.](#)

Kapitel 4

[Tab. 4.1 Eigenschaften der Aluminiumgusslegierung EN AC-ALSi10Mg](#)

Kapitel 5

[Tab. 5.1 Elektrochemische Spannungsreihe, typische ausgewählte Werte. Je nach Qu...](#)

[Tab. 5.2 PREN-Nummern und Legierungszuschlagskosten \[17\] bei rostfreien Edelstäh...](#)

[Tab. 5.3 Kombinationen von anfälligen Werkstoffen und korrosiven Medien für Span...](#)

[Tab. 5.4 Einsatzempfehlungen für Chrom- und Chrom-Nickel-Stähle.](#)

Kapitel 6

[Tab. 6.1 Werte der Konzentration \$c\$ und Beweglichkeit \$\mu\$ der Leitungselektronen so...](#)

[Tab. 6.2 Kupfer als Leiterwerkstoff.](#)

Kapitel 8

[Tab. 8.1 Vergleich der Eigenschaften von der Polyethylen PE ohne sterische Behin...](#)

[Tab. 8.2 Bruchfestigkeit und -dehnung von ungerecktem und gerecktem Polypropylen...](#)

Kapitel 10

[Tab. 10.1 Materialparameter dielektrischer Werkstoffe \(typische Literaturwerte f...](#)

[Tab. 10.2 Relative Durchschlagfestigkeiten \$E_D\$ verschiedener Gase als Vielfaches ...](#)

Kapitel 11

[Tab. 11.1 Wellenlängenbereiche in der optischen Signalübertragung.](#)

[Tab. 11.2 Ausgewählte Werte für den Brechungsindex \$n\$.](#)

Kapitel 12

[Tab. 12.1 Tensorrechnungen zur Piezoelektrizität für Keramiken mit 4 mm-Struktur...](#)

Lösungen zu den Aufgaben

[Tab. L-1 Bindungsarten und Beispiele.](#)

[Tab. L-2 Gitterfehler und Verfestigungsmechanismen.](#)

[Tab. L-3 Zahlenwerte E-Modul, 0.2%-Dehngrenze, Zugfestigkeit und Bruchdehnung.](#)

[Tab. L-4 Untersuchungsverfahren.](#)

[Tab. L-5 Chemischer Vernetzungsgrad zwischen den Makromolekülen und typische Ver...](#)

[Tab. L-6 Typische Wirkungsgrade und Lebensdauern von Solarzellen aus Silizium bz...](#)

[Tab. L-7 Vorteile und Nachteile von Lift-off-Prozess und Siebdruck.](#)

Janko Auerswald

Pius Portmann

Grundlagen der Funktionswerkstoffe für Studium und Praxis

WILEY-VCH

Autoren

Dr. Janko Auerswald

Hochschule Luzern
Institut für Maschinen- und Energietechnik
Technikumstrasse 21
6048 Horw
Schweiz

Prof. Pius Portmann

Hochschule Luzern
Institut für Maschinen- und Energietechnik
Technikumstrasse 21
6048 Horw
Schweiz

Titelbild

© koto_feja, istock (1212064060, Abb. Hologram Data flow grid)

Zusatzmaterial für Dozentinnen und Dozenten erhältlich unter www.wiley-vch.de/textbooks

Alle Bücher von WILEY-VCH werden sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag in keinem Fall, einschließlich des vorliegenden Werkes, für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler irgendeine Haftung.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© 2022 WILEY-VCH GmbH, Boschstr. 12, 69469 Weinheim, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

Print ISBN 978-3-527-34963-0

ePDF ISBN 978-3-527-83522-5

ePub ISBN 978-3-527-83521-8

Satz le-tex publishing services GmbH, Leipzig

Gedruckt auf säurefreiem Papier.

10 9 8 7 6 5 4 3 2 1

Vorwort

Seit vielen Jahren unterrichten wir an der Hochschule Luzern das faszinierende Fach Werkstoffkunde für die Ingenieur-Studiengänge. Die klassischen Strukturwerkstoffe finden aufgrund ihrer mechanischen, thermischen und tribologischen Eigenschaften Anwendung in Konstruktionen, im Maschinenbau, in der Automobilindustrie oder in der Luft- und Raumfahrt. Darüber hinaus gibt es Werkstoffe mit ganz besonderen physikalischen Eigenschaften. Traditionell waren das in erster Linie die Werkstoffe der Elektrotechnik und Elektronik. Durch eine sich immer stärker entwickelnde Technologiebranche rücken weitere Materialien ins Zentrum des Interesses. Dazu gehören Werkstoffe für Anwendungen in der Mikro- und Nanotechnologie, in der Photonik, Telekommunikation und Lasertechnik oder die Hochtemperatur-Supraleiter, Polymerhalbleiter und Wandlerwerkstoffe. Sie alle lassen sich unter dem Begriff Funktionswerkstoffe zusammenfassen. Sie stehen im Zentrum dieses Buches.

Die ersten Kapitel beschäftigen sich mit den Grundlagen und Begriffen der Werkstoffkunde. Zwischen Bindungsart und Struktur einerseits sowie den Eigenschaften andererseits bestehen Zusammenhänge. Die wichtigsten Gitterdefekte wie Fremdatome, Versetzungen, Korngrenzen und Ausscheidungen werden vorgestellt. Sie bewirken in Metallen einen Anstieg der Festigkeit. Fremdatome beeinflussen den spezifischen elektrischen Widerstand von Leitern und Halbleitern maßgeblich, Korngrenzen und Texturen hingegen verändern das Verhalten von Ferromagneten bei der Ummagnetisierung. Die Untersuchung und Charakterisierung der Materialien

erfolgen in der Praxis oft mit Methoden, die im Kapitel Werkstoffprüfung behandelt werden. Im Zusammenhang mit Werkstoffen und Rohstoffen gewinnt in der globalisierten Wirtschaft die ökologische und soziale Nachhaltigkeit zunehmend an Bedeutung. Daher sei es gestattet, auch diesem schwierigen Thema ein paar Anregungen zum Nachdenken und Handeln zu widmen.

Die folgenden Kapitel sind den metallischen Funktionswerkstoffen gewidmet. Den Grundlagen der Legierungskunde folgt ein Einblick in das ungeliebte, aber in der Praxis äußerst wichtige Thema der Korrosion. Metalle und Legierungen kommen vor allem als Leiter, Widerstände und Kontaktwerkstoffe zum Einsatz.

Anschließend werden verschiedene andere Klassen von Funktionswerkstoffen und ihre praktischen Anwendungen näher betrachtet. Der Schwerpunkt liegt dabei auf den Halbleitern, Polymerhalbleitern, Magnetwerkstoffen, Dielektrika, Lichtwellenleitern und Werkstoffen für Transducer („Wandler“).

Die Entwicklung dieser Funktionswerkstoffe ist untrennbar verbunden mit der Entwicklung neuer mikrotechnologischer Fertigungsverfahren. Auch ihnen wird in diesem Buch Beachtung geschenkt. Eines dieser innovativen Produktionsverfahren, das in den letzten Jahren die Labore verlassen und in den Branchen der Hochtechnologie Einzug gehalten hat, ist der Ultrakurzpulslaser (UKP). Er ermöglicht die Bearbeitung praktisch aller Werkstoffe und Verbundwerkstoffe bis hin zum härtesten überhaupt, dem Diamanten. Er bringt in unvorstellbar kurzen Piko- oder Femtosekunden die Leistung eines Kraftwerks auf wenige Quadratmikrometer des Materials und erlaubt so eine „kalte“ Bearbeitung. Mit ihm werden die Touchscreen-Displays von Smartphones und Tablets ausgeschnitten. In der Augenchirurgie trennt

er die Hornhaut auf, um Korrekturen oder Operationen an der Linse zu ermöglichen. In der optischen Datenfernübertragung sorgen Erbium-dotierte Faserlaser (EDFA) mit ihren ultrakurzen Pulsen für eine unvorstellbar schnelle optisch-optische Signalverstärkung in interkontinentalen Glasfaserkabeln.

Viele Studierende nehmen die Werkstoffkunde anfangs als sehr trockene Disziplin wahr. Dabei ist die Welt der Werkstoffe überaus faszinierend. Die profunde Kenntnis von Struktur und Eigenschaften ist ein wertvolles Gut für die Hightechbranchen Maschinenbau, Lasertechnik und Photonik, MedTech, erneuerbare Energien, Luft- und Raumfahrt, Präzisionsmechanik oder Mikro- und Nanotechnologie. In all diesen Bereichen haben neue Funktionswerkstoffe und die damit verbundenen innovativen Fertigungsverfahren die Grenzen des Machbaren verschoben. Andererseits lässt sich immenser Schaden für Menschen, Umwelt und Unternehmen abwenden, wenn das potentielle Versagen von Werkstoffen aufgrund von Beanspruchung oder Korrosion bereits in der Produktentwicklung berücksichtigt und verhindert werden kann. Die Werkstofftechnik ist zu einer Schlüsseltechnologie geworden. In diesem Sinne soll unser Buch bei angehenden Ingenieurinnen und Ingenieuren der verschiedensten Fachrichtungen das Interesse und vielleicht sogar die Begeisterung für das Thema Funktionswerkstoffe wecken.

Beeindruckende Beispiele für werkstoffwissenschaftliche Innovationen liefert Jahr für Jahr die Schweizer Uhrenindustrie. Stellvertretend genannt seien hier die verblüffenden elastisch biegsamen Spiralfedern aus glasartig sprödem Silizium, die den Takt einer mechanischen Uhr präzise vorgeben und ihre Gangreserve erhöhen. Das eigentlich weiche Gold verhält sich als Verbundwerkstoff fast so kratzfest und hart wie Diamant.