

Inhaltsverzeichnis

	Vorwort zur 16. Auflage	<i>v</i>
	Autoren (alphabetisch)	<i>vii</i>
	Danksagungen	<i>ix</i>
1	Strukturen anorganischer Werkstoffe	1
1.1	Charakteristika anorganischer Werkstoffe	1
1.2	Grundeigenschaften der anorganischen Werkstoffe	3
1.2.1	Metallische Werkstoffe	3
1.2.2	Keramische Werkstoffe	6
1.3	Struktur kristalliner Materialien (Kristallographie)	6
1.3.1	Gitterpunkte	11
1.3.2	Gittergeraden	11
1.3.3	Netzebenen (Gitterebenen)	12
1.3.4	Elementarzellenvolumen	12
1.3.5	Kristallformen	12
1.4	Strukturen metallischer Werkstoffe	13
1.4.1	Legierungsbildung bei metallischen Werkstoffen	13
1.4.2	Strukturen metallischer Elemente	14
1.4.3	Metallische Mischkristalle und Überstrukturen	16
1.4.3.1	Substitutionsmischkristalle	17
1.4.3.2	Einlagerungsmischkristalle	18
1.4.3.3	Subtraktionsmischkristalle	19
1.4.4	Intermetallische Verbindungen	20
1.4.4.1	Laves-Phasen	21
1.4.4.2	Hume-Rothery-Phasen	21
1.4.4.3	σ -Phasen	22
1.4.5	Einlagerungsphasen (Intermediäre Phasen)	22
1.5	Strukturen bei kovalenter Bindung	23
1.6	Strukturen bei Ionenbindung	24
1.7	Mischbindungen	27
1.8	Polymorphie, Polytypie	27
1.9	Kristallbaufehler	28
1.9.1	Klassifizierung von Kristallbaufehlern	28
1.9.2	Punktdefekte	29
1.9.2.1	Leerstellen	29
1.9.2.2	Zwischengitteratome	30
1.9.2.3	Fremdatome	30
1.9.3	Versetzungen	31
1.9.4	Flächendefekte	33

1.9.4.1	Stapelfehler	34
1.9.4.2	Antiphasengrenzen	35
1.9.4.3	Subkorngrenzen	35
1.9.5	Volumendefekte	36
1.9.5.1	Ausscheidungen	36
1.9.5.2	Mikroporen	36
1.10	Amorphe Materialien, Gläser	37
1.11	Gefüge von Werkstoffen	38
1.11.1	Gefügebegriff, innere Grenzflächen	38
1.11.2	Gefügebildende Prozesse	40
1.11.3	Gefügeelemente, Gefügebestandteile und Gefügetypen	42
1.11.4	Texturen	44
1.12	Kristallographische Beziehungen	45
1.13	Quellen und Literatur	45
2	Metallographische Arbeitsverfahren	47
2.1	Ziel und Methoden metallographischer Untersuchungen	47
2.2	Lichtmikroskopie	48
2.2.1	Optische Grundlagen	48
2.2.1.1	Polarisation	49
2.2.1.2	Brechung	50
2.2.1.3	Absorption und Reflexion	52
2.2.1.4	Beugung und Interferenz	54
2.2.1.5	Linsen	55
2.2.2	Aufbau und Wirkungsweise von Auflichtmikroskopen	56
2.2.2.1	Optische Elemente von Auflichtmikroskopen	56
2.2.2.2	Zur Theorie der mikroskopischen Abbildung	60
2.2.2.3	Abbildungsfehler	62
2.2.3	Verfahren der Auflichtmikroskopie	63
2.2.3.1	Hellfeldabbildung	63
2.2.3.2	Dunkelfeldabbildung	64
2.2.3.3	Phasenkontrastverfahren	65
2.2.3.4	Polarisationsmikroskopie	66
2.2.3.5	Interferenzmikroskopie	67
2.2.3.6	Verfügbare Mikroskoptechnik	70
2.2.3.7	Mikroskopie mit konfokaler Abbildung	72
2.2.3.8	Interferenzschichtenmikroskopie	75
2.2.3.9	Stereomikroskopie	77
2.2.4	Dokumentation mikroskopischer Befunde	78
2.2.4.1	Funktionsprinzip einer Digitalkamera und wichtige Einflussgrößen	78
2.2.4.2	Notwendige Pixelanzahl für eine verlustfreie Abbildung und zuverlässige Vermessung	79
2.2.4.3	Weiterverarbeitung und Speicherung mikroskopischer Bildaufnahmen	80
2.3	Präparation	82
2.3.1	Anschliffvorbereitung	82
2.3.1.1	Probenahme	83
2.3.1.2	Einfassen	88
2.3.2	Anschliffherstellung	91
2.3.2.1	Allgemeines zu metallographischen Abtragsverfahren, zum Schleifen und mechanischen Polieren	92
2.3.2.2	Grundlagen der Mikrospanung	94
2.3.2.3	Schleifen	101
2.3.2.4	Mechanisches Polieren	111
2.3.2.5	Weitere spanende Abtragsverfahren	122

2.3.2.6	Chemisch-mechanisches Polieren	123
2.3.2.7	Elektrochemischer Metallabtrag	138
2.3.3	Auswahl der Präparationsmethoden	145
2.3.3.1	Methodenauswahl nach mechanischen Präparationseigenschaften	147
2.3.3.2	Vor-Ort-Metallographie	150
2.3.4	Kontrastierung	151
2.3.4.1	Chemisches und elektrochemisches Ätzen	154
2.3.4.2	Physikalische Kontrastierung	170
2.4	Besonderheiten bei der Präparation von keramischen Werkstoffen	173
2.4.1	Vorbemerkungen	173
2.4.2	Trennen	174
2.4.3	Einfassen	175
2.4.4	Anschliffherstellung	176
2.4.5	Kontrastieren	177
2.5	Quantitative Gefügeanalyse	179
2.5.1	Einführung	179
2.5.2	Kennzahlen von Teilchen und Gefügebestandteilen	181
2.5.2.1	Kennzahlen eines Teilchens	181
2.5.2.2	Kennzahlen eines Gefügebestandteils	183
2.5.2.3	Kennwerte von Gefügen	185
2.5.2.4	Messfehler	185
2.5.2.5	Gefüge Kennzahlen und Materialeigenschaften	186
2.5.3	Bildverarbeitung	186
2.5.3.1	Morphologische Transformationen	187
2.5.3.2	Distanz- und Wasserscheidentransformation	187
2.5.3.3	Labeling	188
2.5.4	Kennzahlen von ebenen Anschliffen	188
2.5.4.1	Kennzahlen der Schnittprofile von Teilchen	189
2.5.4.2	Kennzahlen von ebenen Schnitten durch Gefügebestandteile	191
2.5.4.3	Stereologische Gleichungen	193
2.5.4.4	Charakterisierung nichtisometrischer Gefüge	194
2.5.5	Das Powerspektrum	195
2.5.6	Industrienormen	197
2.5.7	Quantitative Analyse mittels Machine Learning	200
2.5.7.1	Herausforderungen beim Einsatz klassischer Methoden	200
2.5.7.2	Grundlagen des maschinellen Lernens	202
2.5.7.3	Merkmalsbasierte Methoden	205
2.5.7.4	Deep Learning / Deep Convolutional Neural Networks	206
2.5.7.5	Vergleich von merkmalsbasierten Modellen und CNNs für die QGA	207
2.6	Röntgenographische Gefügeanalyse	210
2.6.1	Einleitung	210
2.6.2	Erzeugung von Röntgenstrahlen	210
2.6.3	Beugungsprinzip und Braggsche Gleichung	211
2.6.4	Röntgenbeugung an Vielkristallen	211
2.6.5	Probenanforderungen	212
2.6.6	Gefügeanalyse mittels Röntgenbeugung	213
2.6.6.1	Qualitative Phasenanalyse (Prinzip der Datenbanksuchen)	214
2.6.6.2	Quantitative Phasenanalyse (Grundzüge der Rietveld-Methode)	214
2.6.6.3	Gitterparameterbestimmung	216
2.6.6.4	Bestimmung mikrostruktureller Parameter aus Linienbreiten	217
2.6.6.5	Intensitäten	219
2.6.7	Textur und Polfiguren	220
2.6.8	Zusammenfassung	222

2.7	Rasterelektronenmikroskopie (REM)	222
2.7.1	Wechselwirkung beschleunigter Elektronen mit Materie	223
2.7.2	Prinzipien der Rasterelektronenmikroskopie	225
2.7.3	Elektronenstrahlmikroanalyse	230
2.8	Transmissionselektronenmikroskopie (TEM)	231
2.8.1	Grundlagen der Transmissionselektronenmikroskopie	231
2.8.2	Elektronenbeugung	233
2.8.3	Elektronenmikroskopische Kontraste	234
2.8.4	Probenpräparation	236
2.8.5	Analytische TEM	237
2.8.6	Rastertransmissionselektronenmikroskopie	238
2.9	Rastersondenmikroskopie	238
2.10	Tomographische Techniken in der Materialwissenschaft	240
2.10.1	Atomsondentomographie	242
2.10.2	Elektronentomographie	243
2.10.3	Serienschnitt-Tomographie	244
2.10.3.1	FIB/REM Serienschnitte	245
2.10.3.2	Mechanische Serienschnitte	247
2.10.4	Röntgentomographie	247
2.11	Indenterprüfung (Mikro- und Nanoindentierung)	250
2.11.1	Allgemeine Charakterisierung der Indenterprüfung	250
2.11.2	Konventionelle Indenterprüfung	253
2.11.3	Instrumentierte Indenterprüfung	255
2.11.4	Anwendungen der Indenterprüfung	256
2.11.4.1	Ermittlung von Härtewerten	256
2.11.4.2	Ermittlung des E-Moduls	257
2.11.4.3	Bruchverhalten spröder Werkstoffe	258
2.11.4.4	Verformungs- und Entfestigungsverhalten	258
2.11.4.5	Beschichtungen	259
2.11.4.6	Charakterisierung von Randschichtbehandlungen	261
2.11.4.7	Last- und Eigenspannungen	262
2.12	Gefügeuntersuchungen bei hohen Temperaturen	262
2.13	Quellen und Literatur	268
3	Phasengleichgewichte und Zustandsdiagramme	275
3.1	Grundbegriffe	275
3.1.1	Einführung	275
3.1.2	Stoffbilanzierung	275
3.1.3	Legierungen als Systeme im Gleichgewicht	278
3.1.4	Diffusion	284
3.2	Zustandsdiagramme	288
3.2.1	Zustandsdiagramme von Einkomponentensystemen	288
3.2.2	Zustandsdiagramme von Zweikomponentensystemen	292
3.2.2.1	Legierungen mit unbegrenzter Löslichkeit im festen Zustand	292
3.2.2.2	Entmischung im festen Zustand; Ordnung und Bildung intermetallischer Verbindungen in Mischkristallen	296
3.2.2.3	Eutektische Systeme	297
3.2.2.4	Peritektische Systeme	304
3.2.2.5	Eutektoide und peritektoide Umwandlungen	307
3.2.2.6	Mischungslücken im flüssigen Zustand	310
3.2.2.7	Komplexe Zustandsdiagramme	312
3.2.2.8	Zustandsdiagramme keramischer Systeme	314

3.2.3	Grundvorstellungen über Dreistofflegierungen (ternäre Systeme)	315
3.2.3.1	Graphische Darstellung der Zusammensetzung von Dreistofflegierungen	315
3.2.3.2	Hebelgesetz bei ternären Legierungen	317
3.2.3.3	Ternäre Zustandsdiagramme	318
3.2.3.4	Isotherme und Temperatur – Zusammensetzungs – Schnitte	322
3.3	Verfahren zur Analyse von Zustandsdiagrammen	328
3.3.1	Thermoanalyse	329
3.3.2	Dilatometrie	331
3.3.3	CALPHAD – Methode	333
3.4	Arten und Kinetik wichtiger Phasenumwandlungen	338
3.4.1	Systematik der Phasenumwandlungen	338
3.4.2	Diffusionskontrollierte Phasenumwandlungen	340
3.4.2.1	Keimbildung	340
3.4.2.2	Keimwachstum und Reifung	345
3.4.3	Martensitische Phasenumwandlungen	346
3.4.4	Zeit-Temperatur-Diagramme	349
3.5	Weiterführende Literatur	351
4	Technische Gefügebildung in Metallen und Legierungen	353
4.1	Erstarrung metallischer Schmelzen	353
4.1.1	Bildung kristalliner Keime in metallischen Schmelzen	354
4.1.2	Wachstum von Keimen zu Kristalliten/Kristallen	357
4.1.3	Technische Gussgefüge	360
4.1.4	Gussfehler	366
4.1.4.1	Seigerungen	366
4.1.4.2	Lunker	374
4.1.4.3	Gasblasen	377
4.1.4.4	Fremdeinschlüsse	379
4.2	Plastische Formgebung und Rekristallisation metallischer Werkstoffe	381
4.2.1	Kaltumformung	381
4.2.1.1	Spannungs-Dehnungs-Diagramm	381
4.2.1.2	Versetzungsbedingte Deformation	382
4.2.1.3	Härtungsmechanismen	387
4.2.1.4	Verformung durch Gitterscherungen	387
4.2.2	Entfestigungsvorgänge	389
4.2.2.1	Kristallerholung	390
4.2.2.2	Primäre Rekristallisation	390
4.2.2.3	Kornwachstum und sekundäre Rekristallisation	391
4.2.3	Gefügebildung bei Rekristallisationsprozessen	391
4.2.4	Warmumformung	396
4.3	Oberflächenbehandlungen	403
4.3.1	Verfahren zur Oberflächenbehandlung	403
4.3.2	Beschichtungsverfahren mit atomarer Deposition des Beschichtungsmaterials	405
4.3.2.1	PVD-Verfahren	405
4.3.2.2	CVD-Verfahren	408
4.3.2.3	Elektrochemische Schichtabscheidung	409
4.3.3	Beschichtungsverfahren mit makroskopischer Deposition des Schichtmaterials	411
4.3.4	Schmelztauchen	412
4.3.5	Chemisch-thermische Behandlungen	414
4.3.5.1	Nitrieren	415
4.3.5.2	Einsatzhärten	419
4.3.6	Energetische Randschichtbehandlungen	422

4.4	Schweißen von metallischen Werkstoffen	425
4.4.1	Einteilung, Schweißbeignung, Normen für die Schweißtechnik	425
4.4.2	Arten von Schweißverbindungen, Messgrößen	426
4.4.3	Prüfung von Schweißverbindungen	426
4.4.3.1	Zerstörungsfreie Prüfung	427
4.4.3.2	Zerstörende Prüfung	430
4.4.4	Gefügebildung in Schmelzschweißverbindungen	433
4.4.4.1	Verfahren und Begriffe	433
4.4.4.2	Unlegierte und legierte Stähle	434
4.4.4.3	Aluminium und Aluminiumlegierungen	444
4.4.4.4	Titan und Titanlegierungen	444
4.4.4.5	Kupfer und Kupferlegierungen	445
4.4.5	Unregelmäßigkeiten in Schweißverbindungen	445
4.5	Additive Fertigung metallischer Werkstoffe (3D-Druck)	450
4.5.1	Verfahrensübersicht	453
4.5.2	Besonderheiten bei Probennahme und Präparation	454
4.5.3	Einstufige AM-Prozesse	455
4.5.3.1	Pulverbettbasiertes Schmelzen (PBF)	455
4.5.3.2	PBF gefertigte Materialien	456
4.5.3.3	Materialauftrag mit gerichteter Energieeinbringung (DED)	462
4.5.3.4	DED gefertigte Materialien	462
4.5.4	Mehrstufige AM-Prozesse	464
4.5.4.1	Badbasierte Photopolymerisation (VPP)	464
4.5.4.2	Materialextrusion (MEX)	465
4.5.4.3	Materialien aus mehrstufigen AM-Prozessen	466
4.6	Quellen und Literatur	468
5	Eisen und Eisenlegierungen	469
5.1	Roheisen- und Stahlherstellung im Überblick	469
5.2	Gefüge des reinen Eisens und der Eisenlegierungen	471
5.2.1	Reines Eisen	472
5.2.2	Eisen-Kohlenstoff-Legierungen	474
5.3	Polymorphe Phasenumwandlungen	486
5.3.1	Umwandlungen beim Erwärmen	486
5.3.2	Umwandlungen beim Abkühlen	491
5.3.2.1	Allgemeine Betrachtungen	491
5.3.2.2	Erstarrung	492
5.3.2.3	Perlitbildung	494
5.3.2.4	Martensitbildung	505
5.3.2.5	Bainitbildung	510
5.4	Thermische Verfahren der Gefügebeeinflussung	513
5.4.1	Fertigungsgerechte werkstoffunabhängige Verfahren	514
5.4.1.1	Rekristallisierendes Glühen	514
5.4.1.2	Sphäroidisierendes Glühen	517
5.4.1.3	Grobkorn- und Diffusionsglühen	522
5.4.2	Fertigungsgerechte werkstoffspezifische Verfahren	525
5.4.2.1	Normalglühen	525
5.4.2.2	Glühen auf bestimmte Eigenschaften	529
5.4.3	Beanspruchungsgerechte Verfahren	531
5.4.3.1	Vergüten und Bainitisieren	531
5.4.3.2	Normalisierendes Umformen	544
5.4.3.3	Thermomechanisches Umformen	545

5.5	Technische Eisenlegierungen	546
5.5.1	Schweißbare Baustähle	551
5.5.2	Stähle höherer Festigkeit	559
5.5.3	Stähle für tiefe Temperaturen	567
5.5.4	Stähle für hohe Temperaturen	572
5.5.5	Stähle mit besonderen Korrosionseigenschaften	577
5.5.6	Stähle mit besonderen magnetischen Eigenschaften	588
5.5.7	Stähle mit besonderen Verarbeitungseigenschaften	591
5.5.8	Stähle mit besonderen Verschleißseigenschaften	602
5.5.9	Gusseisen	612
5.6	Weiterführende Literatur	624
6	Gefüge technischer Nichteisenmetalle, ihrer Legierungen sowie ausgewählter Funktionswerkstoffe	625
6.1	Kupfer und seine Legierungen	625
6.1.1	Reinkupfer und niedriglegiertes Kupfer	625
6.1.2	Kupfer-Zink-Legierungen	634
6.1.2.1	Gefüge der einphasigen α -Legierungen	636
6.1.2.2	Gefüge der zweiphasigen ($\alpha + \beta'$) - Legierungen	639
6.1.2.3	Gefüge der einphasigen β' - Legierungen	642
6.1.2.4	Einfluss von Wärmebehandlung auf die Gefüge von ($\alpha + \beta'$) - Legierungen	643
6.1.3	Mehrstofflegierungen (Sondermessing)	647
6.1.4	Kupfer-Zinn-Legierungen	652
6.1.5	Kupfer-Aluminium-Legierungen und Mehrstofflegierungen	658
6.1.5.1	Gefüge binärer Kupfer-Aluminium-Legierungen	659
6.1.5.2	Gefüge der Mehrstofflegierungen	661
6.1.6	Kupfer-Zinn-Blei-Legierungen	666
6.1.7	Kupfer-Nickel-Legierungen und Mehrstofflegierungen	668
6.2	Nickel und seine Legierungen	671
6.2.1	Reines Nickel	671
6.2.2	Nickellegierungen	672
6.2.2.1	Hochwarmfeste Legierungen	672
6.2.2.2	Hitze – und korrosionsbeständige Legierungen	680
6.2.2.3	Formgedächtnislegierungen	681
6.2.2.4	Spannungselastische Martensitumwandlung und Pseudoelastizität	682
6.2.2.5	Thermoelastische Martensitumwandlung und Formgedächtniseffekte	682
6.3	Cobalt und seine Legierungen	683
6.3.1	Reines Cobalt	683
6.3.2	Cobaltlegierungen	684
6.4	Zink und seine Legierungen	687
6.4.1	Reines Zink	687
6.4.2	Zinklegierungen	689
6.5	Aluminium und Aluminiumlegierungen	693
6.5.1	Geschichte des Werkstoffs Aluminium	693
6.5.2	Vorkommen und Herstellung	693
6.5.3	Eigenschaften und Anwendungen von Aluminium und Aluminiumlegierungen	694
6.5.4	Gefüge von Aluminium-Gusslegierungen	697
6.5.5	Gefüge von Aluminium-Knetlegierungen	704
6.5.5.1	Gefügeausbildung im Formateguss	704
6.5.5.2	Gefügeausbildung bei der Homogenisierung	709
6.5.5.3	Gefügeausbildung bei der Warmumformung	712
6.5.5.4	Gefügeausbildung bei der Kaltumformung und einer anschließenden Glühbehandlung	714

6.5.5.5	Gefügebeispiele wichtiger Aluminium-Knetlegierungen	715
6.5.6	Identifikation der intermetallischen Phasen	724
6.6	Magnesium und Magnesiumlegierungen	724
6.6.1	Reines Magnesium	724
6.6.2	Magnesiumlegierungen	725
6.6.2.1	Legierungssysteme Mg-Al und Mg-Al-Zn	725
6.6.2.2	Legierungssystem Mg-Al-Mn (AM-Legierungen)	728
6.6.2.3	Legierungssystem Mg-Y-SE-Zr (WE-Legierungen)	728
6.6.2.4	Legierungssysteme Mg-Li, Mg-Li-Al und Mg-Li-Al-SE	729
6.7	Titan und Titanlegierungen	729
6.7.1	Reines Titan	729
6.7.2	α - und near α -Legierungen	732
6.7.3	(α + β)-Legierungen	734
6.7.4	Metastabile β -Legierungen	736
6.7.5	Stabile β -Legierungen	736
6.8	Weitere Nichteisenmetalllegierungen	736
6.8.1	Lotwerkstoffe	736
6.8.1.1	Weichlote	737
6.8.1.2	Hartlote	740
6.8.2	Gleitlagerwerkstoffe	746
6.8.2.1	Gleitlager aus Kupferlegierungen	749
6.8.2.2	Blei- und Zinn-Gusslegierungen für Verbundgleitlager	754
6.8.2.3	Gleitlager aus Aluminiumlegierungen	756
6.9	Magnetwerkstoffe	758
6.9.1	Hartmagnetische Werkstoffe	758
6.9.1.1	Grundlagen und Allgemeines	758
6.9.1.2	FeNdB Magnete	759
6.9.1.3	EBSD-Analysen an Sintermagneten	761
6.9.1.4	CoSm Magnete	762
6.9.1.5	Hartferrite	762
6.9.1.6	Alnico Magnete	762
6.9.1.7	Sonstige Magnetwerkstoffe	762
6.9.2	Weichmagnetische Werkstoffe	763
6.9.2.1	Grundlagen	763
6.9.2.2	Elektroblech	764
6.9.2.3	Soft magnetic composites (SMC)	766
6.9.2.4	Sonstige weichmagnetische Materialien	767
6.10	Batteriematerialien	768
6.10.1	Einführung	768
6.10.2	Aufbau und Funktion einer Lithium-Ionen Batterie	768
6.10.3	Arbeitssicherheit beim Umgang mit Batterien und Batteriematerialien	769
6.10.4	Hinweise zur Präparation und empfohlene Präparationsroutine	771
6.10.5	Typische Mikrostrukturen von Li-Ionenbatterien	771
6.10.6	Typische Aktivmaterialien für Kathoden und Anoden in Li-Ionenbatterien	772
6.10.7	Zukünftige Batterietechnologien	773
6.11	Quellen und Literatur	776
7	Hochleistungskeramik	779
7.1	Arten der Hochleistungskeramik	779
7.2	Herstellung keramischer Werkstoffe	779
7.3	Mechanische Festigkeit keramischer Werkstoffe	781

7.4	Materialeigenschaften und Anwendungen	784
7.4.1	Aluminiumoxid	784
7.4.2	Zirkoniumoxid	784
7.4.3	Siliciumcarbid	787
7.4.4	Siliciumnitrid	787
7.5	Weiterführende Literatur	788

Anhang

A	Atomare Konstanten technisch wichtiger Metalle und Metalloide (Raumtemperatur)	789
B	Physikalische Eigenschaften technisch wichtiger Metalle und Metalloide	791
C	Angaben von Mengenanteilen in stofflichen Systemen	793
D	Ansetzen von prozentualen Lösungen	795
E	Metallographische Ätzmittel	797
Index		811

