

Inhaltsverzeichnis

1	Strukturen anorganischer Werkstoffe (Metalle und Keramiken)	1
1.1	Klassifizierung und allgemeine Charakteristika anorganischer Werkstoffe	1
1.2	Grundeigenschaften der anorganischen Werkstoffe	4
1.2.1	Metallische Werkstoffe	4
1.2.2	Keramische Werkstoffe	7
1.3	Kristalliner Aufbau anorganischer Werkstoffe (Kristallografie)	7
1.3.1	Gitterpunkte	13
1.3.2	Gittergeraden	14
1.3.3	Netzebenen (Gitterebenen)	14
1.3.4	Elementarzellenvolumen	15
1.3.5	Kristallformen	15
1.4	Chemische Bindung und Koordination, typische Kristallstrukturen	16
1.4.1	Metallische Bindung und Strukturen metallischer Werkstoffe	16
1.4.1.1	Strukturen metallischer Elemente	16
1.4.1.2	Intermetallische Verbindungen	19
1.4.1.3	Einlagerungsphasen (Intermediäre Phasen)	23
1.4.2	Kovalente Bindung (Atombindung)	24
1.4.3	Ionenbindung	26
1.4.4	Mischbindungen	29
1.5	Mischkristalle und Überstrukturen	30
1.5.1	Metalle	30
1.5.1.1	Substitutionsmischkristalle	32
1.5.1.2	Einlagerungsmischkristalle	34
1.5.1.3	Subtraktionsmischkristalle	36
1.5.2	Keramische Werkstoffe	37
1.6	Polymorphie, Polytypie	37
1.7	Kristallbaufehler	39
1.7.1	Klassifizierung von Kristallbaufehlern	39
1.7.2	Punktdefekte	40
1.7.2.1	Leerstellen	40
1.7.2.2	Zwischengitteratome	42
1.7.2.3	Fremdatome	42

Metallografie, 15. Auflage. Herausgegeben von H. Oettel und H. Schumann
Copyright © 2011 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim
ISBN 978-3-527-32257-2

- 1.7.3 Versetzungen 42
- 1.7.4 Flächendefekte 46
 - 1.7.4.1 Stapelfehler 47
 - 1.7.4.2 Antiphasengrenzen 48
 - 1.7.4.3 Subkorngrenzen 49
- 1.7.5 Volumendefekte 49
 - 1.7.5.1 Ausscheidungen 49
 - 1.7.5.2 Mikroporen 50
- 1.8 Amorphe Materialien, Gläser 50
- 1.9 Gefüge von Werkstoffen 52
 - 1.9.1 Gefügebegriff, innere Grenzflächen 52
 - 1.9.2 Gefügebildende Prozesse 55
 - 1.9.3 Gefügeelemente, Gefügebestandteile und Gefügetypen 57
- 1.10 Kristallografische Beziehungen 60

- 2 Metallografische Arbeitsverfahren 61**
 - 2.1 Ziel und Methoden metallografischer Untersuchungen 61
 - 2.2 Lichtmikroskopie 62
 - 2.2.1 Optische Grundlagen 62
 - 2.2.1.1 Polarisation 64
 - 2.2.1.2 Brechung 65
 - 2.2.1.3 Absorption und Reflexion 68
 - 2.2.1.4 Interferenz und Beugung 71
 - 2.2.1.5 Linsen 72
 - 2.2.2 Aufbau und Wirkungsweise von Auflichtmikroskopen 74
 - 2.2.2.1 Optische Elemente von Auflichtmikroskopen 74
 - 2.2.2.2 Zur Theorie der mikroskopischen Abbildung 79
 - 2.2.2.3 Abbildungsfehler 83
 - 2.2.3 Verfahren der Auflichtmikroskopie 85
 - 2.2.3.1 Hellfeldabbildung 86
 - 2.2.3.2 Dunkelfeldabbildung 87
 - 2.2.3.3 Phasenkontrastverfahren 89
 - 2.2.3.4 Polarisationsmikroskopie 90
 - 2.2.3.5 Interferenzmikroskopie 91
 - 2.2.3.6 Interferenzschichtenmikroskopie 94
 - 2.2.3.7 Mikroskopie mit konfokaler Abbildung 96
 - 2.2.3.8 Stereomikroskopie 101
 - 2.2.4 Dokumentation mikroskopischer Befunde 102
 - 2.2.4.1 Verfahrensauswahl 104
 - 2.2.4.2 Digitale Videografie 105
 - 2.3 Präparation 117
 - 2.3.1 Anschliffvorbereitung 119
 - 2.3.1.1 Probenahme 119
 - 2.3.1.2 Einfassen 128
 - 2.3.2 Anschliffherstellung 131

2.3.2.1	Allgemeines zu metallografischen Abtragsverfahren, zum Schleifen und mechanischen Polieren	132
2.3.2.2	Grundlagen der Mikrospannung	135
2.3.2.3	Schleifen	146
2.3.2.4	Mechanisches Polieren	162
2.3.2.5	Weitere spanende Abtragsverfahren	177
2.3.2.6	Chemisch-mechanisches Polieren	178
2.3.2.7	Elektrochemischer Metallabtrag	181
2.3.3	Auswahl der Präparationsmethoden	191
2.3.3.1	Methodenauswahl nach mechanischen Präparationseigenschaften	193
2.3.3.2	Vor-Ort-Metallografie	197
2.3.4	Kontrastierung	200
2.3.4.1	Chemisches und elektrochemisches Ätzen	203
2.3.4.2	Physikalische Kontrastierung	220
2.4	Besonderheiten bei der Präparation von keramischen Werkstoffen	224
2.4.1	Vorbemerkungen	224
2.4.2	Trennen	225
2.4.3	Einfassen	226
2.4.4	Anschliffherstellung	227
2.4.5	Kontrastieren	230
2.5	Quantitative Gefügeanalyse	233
2.5.1	Einleitung	233
2.5.2	Geometrische Gefügekenngößen	234
2.5.3	Methoden der Bildverarbeitung und -analyse	239
2.5.4	Kennwerte von Schnittprofilen	247
2.5.5	Messung der Grundparameter	251
2.5.6	Teilchengrößenverteilungen	263
2.6	Röntgenverfahren	264
2.6.1	Raumgitterinterferenzen	264
2.6.2	Ein- und Vielkristallinterferenzen	267
2.6.3	Vielkristalldiffraktometrie	269
2.6.4	Anwendungen der Röntgendiffraktometrie	273
2.6.4.1	Röntgenografische Phasenanalyse	273
2.6.4.2	Röntgenografische Untersuchung von Mischkristallen	274
2.6.4.3	Röntgenografische Korngrößenbestimmung	275
2.6.4.4	Ermittlung von Versetzungsdichten	277
2.6.4.5	Texturen	277
2.7	Rasterelektronenmikroskopie und Elektronenstrahlmikroanalyse	279
2.7.1	Wechselwirkung beschleunigter Elektronen mit Materie	279
2.7.2	Rasterelektronenmikroskopie	283
2.7.3	Elektronenstrahlmikroanalyse	286
2.8	Transmissionselektronenmikroskopie (TEM)	290
2.8.1	Grundlagen der Transmissionselektronenmikroskopie	290
2.8.2	Elektronenbeugung	292
2.8.3	Elektronenmikroskopische Kontraste	294

- 2.8.4 Probenpräparation 297
- 2.8.5 Analytische TEM 299
- 2.9 Rastersondenmikroskopie 300
- 2.10 Gefügetomografie 301
 - 2.10.1 Einleitung 301
 - 2.10.2 Tomografische Verfahren in Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 301
 - 2.10.2.1 Durchstrahlende Verfahren 303
 - 2.10.2.2 Röntgentomografie 304
 - 2.10.2.3 Neutronentomografie 305
 - 2.10.2.4 Elektronentomografie 305
 - 2.10.2.5 Serienschmitttechniken 305
 - 2.10.2.6 Atomsondentomografie 306
 - 2.10.3 FIB-Gefügetomografie 307
 - 2.10.3.1 Der Sputterprozess im FIB 308
 - 2.10.3.2 Abbildung im FIB 308
 - 2.10.3.3 Zweistrahl-FIB/REM-Mikroskope 309
 - 2.10.3.4 Serienschmitttechnik im FIB-Mikroskop 309
 - 2.10.3.5 Probenvorbereitung für die FIB-Gefügetomografie 310
 - 2.10.3.6 Anwendungsbeispiele 311
- 2.11 Akustische Mikroskopie 315
- 2.12 Mikrohärtetechnik 317
 - 2.12.1 Konventionelle Mikrohärtetechnik 318
 - 2.12.2 Registrierende Härtemessung 326
 - 2.12.3 Anwendungen der Mikrohärtetechniken 327
- 2.13 Gefügeuntersuchungen bei hohen Temperaturen 331

- 3 Phasengleichgewichte und Zustandsdiagramme 341**
 - 3.1 Thermodynamische Grundlagen 341
 - 3.1.1 Legierungen, Phasen und Phasengleichgewichte 341
 - 3.1.2 Zur Thermodynamik von Mischkristallen 349
 - 3.1.3 Diffusion 353
 - 3.2 Grundvorstellungen zu Zustandsdiagrammen 358
 - 3.3 Einkomponentensysteme 363
 - 3.4 Zweikomponentensysteme (binäre Zustandsdiagramme) 365
 - 3.4.1 Legierungen mit unbegrenzter Löslichkeit im festen Zustand 365
 - 3.4.2 Legierungen mit Mischungslücken im festen Zustand 371
 - 3.4.2.1 Entmischung, Ordnung und Bildung intermetallischer Phasen in Mischkristallen 372
 - 3.4.2.2 Eutektische Systeme 374
 - 3.4.2.3 Peritektische Systeme 384
 - 3.4.2.4 Eutektoide und peritektische Umwandlungen 388
 - 3.4.3 Mischungslücken im flüssigen Zustand 393
 - 3.4.4 Komplexe Zustandsdiagramme 398
 - 3.4.5 Zustandsdiagramme keramischer Systeme 402

3.5	Grundvorstellungen über Dreistofflegierungen (ternäre Systeme)	404
3.5.1	Grafische Darstellung der Zusammensetzung von Dreistofflegierungen	404
3.5.2	Hebelgesetz bei ternären Legierungen	406
3.5.3	Ternäre Zustandsdiagramme	407
3.5.4	Isotherme und Temperatur-Konzentrations-Schnitte	411
3.6	Arten und Kinetik von Phasenumwandlungen	418
3.6.1	Systematik der Phasenumwandlungen	418
3.6.2	Diffusionskontrollierte Phasenumwandlungen	420
3.6.3	Martensitische Phasenumwandlungen	428
3.6.4	Zeit-Temperatur-Diagramme	433
3.7	Verfahren zur Bestimmung von Zustandsdiagrammen	436
3.7.1	Thermoanalyse	437
3.7.2	Dilatometrie	441
4	Einfluss der Verarbeitung und Behandlung auf die Gefügeausbildung von Metallen und Legierungen	445
4.1	Gießen von Metallen	445
4.1.1	Zustand metallischer Schmelzen	445
4.1.2	Erstarrungsprozess	446
4.1.3	Gussgefüge	455
4.1.4	Seigerungen	463
4.1.5	Lunker	474
4.1.6	Gasblasen	477
4.1.7	Fremdeinschlüsse	480
4.2	Plastische Formgebung und Rekristallisation von Metallen	482
4.2.1	Kaltumformung	482
4.2.1.1	Spannungs-Dehnungs-Diagramm	482
4.2.1.2	Verformung durch Gleiten	484
4.2.1.3	Verformung durch Zwillingsbildung	491
4.2.1.4	Härtungsmechanismen	492
4.2.1.5	Vergleich zwischen Einkristall- und Vielkristallplastizität	494
4.2.1.6	Kornstreckung und Verformungstexturen	495
4.2.1.7	Eigenschaftsänderungen durch Kaltumformung	497
4.2.2	Entfestigungsvorgänge	497
4.2.2.1	Kristallerholung	498
4.2.2.2	Primäre Rekristallisation	498
4.2.2.3	Kornwachstum	499
4.2.2.4	Einfluss technischer Rekristallisationsvorgänge auf die Gefügebildung	500
4.2.3	Warmumformung	505
4.3	Oberflächenbehandlungen	516
4.3.1	Grundlegende Verfahren zur Oberflächenbehandlung	516
4.3.2	Beschichtungsverfahren	519

- 4.3.2.1 Beschichtungsverfahren mit atomarer Deposition des Beschichtungsmaterials 519
- 4.3.2.2 Beschichtungsverfahren mit makroskopischen Depositionen des Schichtmaterials 527
- 4.3.3 Schmelztauchen 527
- 4.3.4 Randschichtbehandlungen 530
 - 4.3.4.1 Chemisch-thermische Behandlungen 530
 - 4.3.4.2 Energetische Randschichtbehandlungen 540
- 5 Eisen und Eisenlegierungen 545**
 - 5.1 Roheisen- und Stahlherstellung im Überblick 545
 - 5.2 Gefüge des reinen Eisens und der Eisenlegierungen 547
 - 5.2.1 Reines Eisen 549
 - 5.2.2 Eisen-Kohlenstoff-Legierungen 551
 - 5.3 Polymorphe Phasenumwandlungen 566
 - 5.3.1 Umwandlungen beim Erwärmen 566
 - 5.3.2 Umwandlungen beim Abkühlen 573
 - 5.3.2.1 Allgemeine Betrachtungen 573
 - 5.3.2.2 Erstarrung 574
 - 5.3.2.3 Perlitbildung 576
 - 5.3.2.4 Martensitbildung 590
 - 5.3.2.5 Bainitbildung 597
 - 5.4 Thermische Verfahren der Gefügebeeinflussung 601
 - 5.4.1 Fertigungsgerechte werkstoffunabhängige Verfahren 602
 - 5.4.1.1 Rekristallisierendes Glühen 602
 - 5.4.1.2 Sphäroidisierendes Glühen 606
 - 5.4.1.3 Grobkorn- und Diffusionsglühen 612
 - 5.4.2 Fertigungsgerechte werkstoffspezifische Verfahren 616
 - 5.4.2.1 Normalglühen 616
 - 5.4.2.2 Glühen auf bestimmte Eigenschaften 621
 - 5.4.3 Beanspruchungsgerechte Verfahren 623
 - 5.4.3.1 Vergüten und Bainitisieren 623
 - 5.4.3.2 Normalisierendes Umformen 640
 - 5.4.3.3 Thermomechanisches Umformen 641
 - 5.5 Technische Eisenlegierungen 642
 - 5.5.1 Schweißbare Baustähle 649
 - 5.5.2 Stähle höherer Festigkeit 661
 - 5.5.3 Stähle für tiefe Temperaturen 671
 - 5.5.4 Stähle für hohe Temperaturen 677
 - 5.5.5 Stähle mit besonderen Korrosionseigenschaften 685
 - 5.5.6 Stähle mit besonderen magnetischen Eigenschaften 698
 - 5.5.7 Stähle mit besonderen Verarbeitungseigenschaften 703
 - 5.5.8 Stähle mit besonderen Verschleißseigenschaften 717
 - 5.5.9 Gusseisen 731

6	Gefüge der technischen Nichteisenmetalle und ihrer Legierungen	749
6.1	Kupfer und seine Legierungen	749
6.1.1	Reines Kupfer	749
6.1.2	Kupfer-Zink-Legierungen	753
6.1.2.1	Gefüge der α -Legierungen	754
6.1.2.2	Gefüge der ($\alpha + \beta'$)-Legierungen	755
6.1.2.3	Gefüge der β' -Legierungen	756
6.1.2.4	Einfluss von Wärmebehandlungen auf die Gefüge von ($\alpha + \beta'$)-Legierungen	757
6.1.3	Mehrstofflegierungen	764
6.1.4	Kupfer-Zinn-Legierungen	770
6.1.5	Kupfer-Aluminium-Legierungen und Mehrstofflegierungen	775
6.1.5.1	Gefüge binärer Kupfer-Aluminium-Legierungen	775
6.1.5.2	Gefüge der Mehrstofflegierungen	778
6.1.6	Kupfer-Zinn-Blei-Legierungen	785
6.1.7	Kupfer-Nickel-Legierungen und Mehrstofflegierungen	787
6.2	Nickel und seine Legierungen	789
6.2.1	Reines Nickel	789
6.2.2	Nickellegierungen	790
6.2.2.1	Hochwarmfeste Legierungen	790
6.2.2.2	Hitze – und korrosionsbeständige Legierungen	798
6.2.2.3	Formgedächtnislegierungen	800
6.2.2.4	Spannungselastische Martensitumwandlung und Pseudoelastizität	802
6.2.2.5	Thermoelastische Martensitumwandlung und Formgedächtniseffekte	803
6.3	Cobalt und seine Legierungen	803
6.3.1	Reines Cobalt	803
6.3.2	Cobaltlegierungen	804
6.4	Zink und seine Legierungen	808
6.4.1	Reines Zink	808
6.4.2	Zinklegierungen	810
6.5	Aluminium und Aluminiumlegierungen	815
6.5.1	Reines Aluminium	815
6.5.2	Aluminium-Silicium-Legierungen	818
6.5.3	Aluminium-Magnesium-Legierungen und Aluminium-Mangan-Legierungen	823
6.5.3.1	Aluminium-Magnesium-Legierungen	823
6.5.3.2	Aluminium-Mangan-Legierungen	826
6.5.4	Weitere Mehrstofflegierungen	828
6.6	Magnesium und Magnesiumlegierungen	835
6.6.1	Reines Magnesium	835
6.6.2	Magnesiumlegierungen	836
6.6.2.1	Legierungssysteme Mg-Al und Mg-Al-Zn	836
6.6.2.2	Legierungssystem Mg-Al-Mn (AM-Legierungen)	840
6.6.2.3	Legierungssystem Mg-Y-SE-Zr (WE-Legierungen)	841
6.6.2.4	Legierungssysteme Mg-Li, Mg-Li-Al und Mg-Li-Al-SE	842

6.7	Titan und Titanlegierungen	843
6.7.1	Reines Titan	843
6.7.2	α - und near α -Legierungen	845
6.7.3	($\alpha + \beta$)-Legierungen	848
6.7.4	Metastabile β -Legierungen	850
6.7.5	Stabile β -Legierungen	851
6.8	Weitere Nichteisenmetalllegierungen	851
6.8.1	Lotwerkstoffe	851
6.8.1.1	Weichlote	852
6.8.1.2	Hartlote	857
6.8.2	Gleitlagerwerkstoffe	860
6.8.2.1	Kupferlegierungen	862
6.8.2.2	Blei- und Zinn-Gusslegierungen für Verbundgleitlager	867
6.8.2.3	Aluminiumlegierungen	871
7	Hochleistungskeramik	875
7.1	Arten der Hochleistungskeramik	875
7.2	Herstellung keramischer Werkstoffe	875
7.3	Mechanische Festigkeit keramischer Werkstoffe	878
7.4	Materialeigenschaften und Anwendungen	881
7.4.1	Aluminiumoxid	882
7.4.2	Zirkoniumoxid	883
7.4.3	Siliciumcarbid	885
7.4.4	Siliciumnitrid	886
	Weiterführende Literatur	887
	Anhang I: Atomare Parameter technisch wichtiger Metalle und Metalloide (Raumtemperatur)	891
	Anhang II: Physikalische Eigenschaften technisch wichtiger Metalle und Metalloide	892
	Anhang III: Angaben von Mengenanteilen (Konzentrationen) in Legierungen	894
	Anhang IV: Ansetzen von prozentualen Lösungen	896
	Anhang V: Metallografische Ätzmittel	897
	Stichwortverzeichnis	915