

Inhaltsverzeichnis

1	Strukturen metallischer Werkstoffe	1
1.1	Der metallische Zustand	1
1.2	Der kristalline Aufbau von Metallen und Legierungen	4
1.2.1	Geometrische Beschreibung des Kristallaufbaus	5
1.2.2	Kristallstrukturen von Metallen und Legierungen	14
1.2.2.1	Chemische Bindung und Kristallbauprinzipien	14
1.2.2.2	Mischkristalle	20
1.2.2.3	Intermetallische Verbindungen	27
1.2.2.4	Einlagerungsphasen (intermediäre Phasen)	30
1.2.2.5	Polymorphie	31
1.2.3	Kristallbaufehler	33
1.2.3.1	Klassifizierung von Kristallbaufehlern	33
1.2.3.2	Punktdefekte	34
1.2.3.3	Versetzungen	36
1.2.3.4	Flächendefekte	39
1.2.3.5	Volumendefekte	42
1.3	Amorphe Metalle und Legierungen	44
1.4	Gefüge von Metallen und Legierungen	45
1.4.1	Gefügebegriff, innere Grenzflächen	45
1.4.2	Gefügebildende Prozesse	48
1.4.3	Gefügeelemente, Gefügebestandteile und Gefügetypen	50
1.5	Kristallografische Beziehungen	52
2	Metallografische Arbeitsverfahren	55
2.1	Ziel und Methoden metallografischer Untersuchungen	55
2.2	Lichtmikroskopie	56
2.2.1	Optische Grundlagen	56
2.2.1.1	Polarisation	58
2.2.1.2	Brechung	59
2.2.1.3	Absorption und Reflexion	62
2.2.1.4	Interferenz und Beugung	65
2.2.1.5	Linsen	67
2.2.2	Aufbau und Wirkungsweise von Auflichtmikroskopen	68

- 2.2.2.1 Optische Elemente von Auflichtmikroskopen 68
- 2.2.2.2 Zur Theorie der mikroskopischen Abbildung 73
- 2.2.2.3 Abbildungsfehler 77
- 2.2.3 Verfahren der Auflichtmikroskopie 79
 - 2.2.3.1 Hellfeldabbildung 80
 - 2.2.3.2 Dunkelfeldabbildung 82
 - 2.2.3.3 Phasenkontrastverfahren 83
 - 2.2.3.4 Polarisationsmikroskopie 84
 - 2.2.3.5 Interferenzmikroskopie 85
 - 2.2.3.6 Interferenzschichtenmikroskopie 88
 - 2.2.3.7 Mikroskopie mit konfokaler Abbildung 90
 - 2.2.3.8 Stereomikroskopie 95
 - 2.2.3.9 Mikroreflexionsmessung 96
- 2.2.4 Dokumentationsverfahren 101
 - 2.2.4.1 Wiedergabe mikroskopischer Bilder 101
 - 2.2.4.2 Arbeitsschritte bei der Dokumentation 105
 - 2.2.4.3 Fototechnik 106
 - 2.2.4.4 Videotechnik 117
- 2.3 Präparation 134
 - 2.3.1 Anschliffvorbereitung 135
 - 2.3.1.1 Probenahme 137
 - 2.3.1.2 Einfassen 144
 - 2.3.2 Anschliffherstellung 147
 - 2.3.2.1 Allgemeines zu metallografischen Abtragsverfahren, zum Schleifen und mechanischen Polieren 149
 - 2.3.2.2 Grundlagen der Mikrospanung 152
 - 2.3.2.3 Schleifen 163
 - 2.3.2.4 Mechanisches Polieren 185
 - 2.3.2.5 Weitere spanende Abtragsverfahren 201
 - 2.3.2.6 Chemisch-mechanisches Polieren 202
 - 2.3.2.7 Elektrochemischer Metallabtrag 206
 - 2.3.3 Auswahl der Präparationsmethoden 214
 - 2.3.3.1 Methodenauswahl nach mechanischen Präparationseigenschaften 216
 - 2.3.3.2 Vor-Ort-Metallografie 221
 - 2.3.4 Kontrastierung 224
 - 2.3.4.1 Chemisches und elektrochemisches Ätzen 227
 - 2.3.4.2 Physikalische Kontrastierung 244
- 2.4 Quantitative Gefügeanalyse 250
 - 2.4.1 Einleitung 250
 - 2.4.2 Geometrische Gefügekenngößen 252
 - 2.4.3 Methoden der Bildverarbeitung und -analyse 257
 - 2.4.4 Kennwerte von Schnittprofilen 266
 - 2.4.5 Messung der Grundparameter 269
 - 2.4.6 Teilchengrößenverteilungen 282
- 2.5 Röntgenverfahren 284

2.5.1	Raumgitterinterferenzen	284
2.5.2	Ein- und Vielkristallinterferenzen	286
2.5.3	Vielkristalldiffraktometrie	289
2.5.4	Anwendungen der Röntgendiffraktometrie	293
2.5.4.1	Röntgenografische Phasenanalyse	293
2.5.4.2	Röntgenografische Untersuchung von Mischkristallen	294
2.5.4.3	Röntgenografische Korngrößenbestimmung	295
2.5.4.4	Ermittlung von Versetzungsdichten	296
2.5.4.5	Texturen	297
2.6	Rasterelektronenmikroskopie und Elektronenstrahlmikroanalyse	300
2.6.1	Wechselwirkung beschleunigter Elektronen mit Materie	300
2.6.2	Rasterelektronenmikroskopie	302
2.6.3	Elektronenstrahlmikroanalyse	307
2.7	Transmissionselektronenmikroskopie (TEM)	310
2.7.1	Grundlagen der Transmissionselektronenmikroskopie	310
2.7.2	Elektronenbeugung	312
2.7.3	Elektronenmikroskopische Kontraste	314
2.7.4	Probenpräparation	317
2.7.5	Analytische TEM	319
2.8	Rastersondenmikroskopie	320
2.9	Akustische Mikroskopie	322
2.10	Mikrohärte	324
2.10.1	Konventionelle Mikrohärtemessung	325
2.10.2	Registrierende Härtemessung	333
2.10.3	Anwendungen der Mikrohärtemessungen	334
2.11	Gefügeuntersuchungen bei hohen und tiefen Temperaturen	338
2.11.1	Hochtemperaturmikroskopie	341
2.11.2	Tieftemperaturmikroskopie	345
2.11.3	Möglichkeiten und Grenzen der Hoch- und Tieftemperaturmikroskopie	346
3	Phasengleichgewichte und Zustandsdiagramme	349
3.1	Thermodynamische Grundlagen	349
3.1.1	Legierungen, Phasen und Phasengleichgewichte	349
3.1.2	Zur Thermodynamik von Mischkristallen	357
3.1.3	Diffusion	362
3.2	Grundvorstellungen zu Zustandsdiagrammen	366
3.3	Einkomponentensysteme	372
3.4	Zweikomponentensysteme (binäre Zustandsdiagramme)	373
3.4.1	Legierungen mit unbegrenzter Löslichkeit im festen Zustand	373
3.4.2	Legierungen mit Mischungslücken im festen Zustand	380
3.4.2.1	Entmischung, Ordnung und Bildung intermetallischer Phasen in Mischkristallen	381
3.4.2.2	Eutektische Systeme	383
3.4.2.3	Peritektische Systeme	392

- 3.4.2.4 Eutektoide und peritektoide Umwandlungen 397
- 3.4.3 Mischungslücken im flüssigen Zustand 402
- 3.4.4 Komplexe Zustandsdiagramme 407
- 3.5 Grundvorstellungen über Dreistofflegierungen (ternäre Systeme) 411
- 3.5.1 Grafische Darstellung der Zusammensetzung von Dreistofflegierungen 411
- 3.5.2 Hebelgesetz bei ternären Legierungen 413
- 3.5.3 Ternäre Zustandsdiagramme 414
- 3.5.4 Isotherme und Temperatur-Konzentrations-Schnitte 418
- 3.6 Arten und Kinetik von Phasenumwandlungen 425
- 3.6.1 Systematik der Phasenumwandlungen 425
- 3.6.2 Diffusionskontrollierte Phasenumwandlungen 427
- 3.6.3 Martensitische Phasenumwandlungen 435
- 3.6.4 Zeit-Temperatur-Diagramme 440
- 3.7 Verfahren zur Bestimmung von Zustandsdiagrammen 443
- 3.7.1 Thermoanalyse 445
- 3.7.2 Dilatometrie 448

- 4 Einfluss der Verarbeitung und Behandlung auf die Gefügeausbildung von Metallen und Legierungen 453**
- 4.1 Gießen von Metallen 453
- 4.1.1 Zustand metallischer Schmelzen 453
- 4.1.2 Erstarrungsprozess 454
- 4.1.3 Gussgefüge 463
- 4.1.4 Seigerungen 471
- 4.1.5 Lunker 482
- 4.1.6 Gasblasen 485
- 4.1.7 Fremdeinschlüsse 488
- 4.2 Plastische Formgebung und Rekristallisation von Metallen 490
- 4.2.1 Kaltumformung 490
- 4.2.1.1 Spannungs-Dehnungs-Diagramm 491
- 4.2.1.2 Verformung durch Gleiten 492
- 4.2.1.3 Verformung durch Zwillingsbildung 499
- 4.2.1.4 Härtungsmechanismen 501
- 4.2.1.5 Vergleich zwischen Einkristall- und Vielkristallplastizität 502
- 4.2.1.6 Kornstreckung und Verformungstexturen 503
- 4.2.1.7 Eigenschaftsänderungen durch Kaltumformung 505
- 4.2.2 Entfestigungsvorgänge 506
- 4.2.2.1 Kristallerholung 506
- 4.2.2.2 Primäre Rekristallisation 507
- 4.2.2.3 Kornwachstum 508
- 4.2.2.4 Einfluss technischer Rekristallisationsvorgänge auf die Gefügebildung 508
- 4.2.3 Warmumformung 514

4.3	Löten und Schweißen von Metallen	528
4.3.1	Löten	528
4.3.1.1	Weichlöten	528
4.3.1.2	Hartlöten	529
4.3.2	Schweißen	530
4.3.2.1	Schmelzschweißen	530
4.3.2.2	Pressschweißen	534
4.4	Oberflächenbehandlungen	535
4.4.1	Grundlegende Verfahren zur Oberflächenbehandlung	535
4.4.2	Beschichtungsverfahren	537
4.4.2.1	Beschichtungsverfahren mit atomarer Deposition des Beschichtungsmaterials	537
4.4.2.2	Beschichtungsverfahren mit makroskopischen Depositionen des Schichtmaterials	545
4.4.3	Schmelztauchen	546
4.4.4	Randschichtbehandlungen	549
4.4.4.1	Chemisch-thermische Behandlungen	549
4.4.4.2	Energetische Randschichtbehandlungen	559
5	Eisen und Eisenlegierungen	565
5.1	Roheisen- und Stahlherstellung im Überblick	565
5.2	Gefüge des reinen Eisens und der Eisenlegierungen	568
5.2.1	Reines Eisen	569
5.2.2	Eisen-Kohlenstoff-Legierungen	572
5.3	Polymorphe Phasenumwandlungen	586
5.3.1	Umwandlungen beim Erwärmen	586
5.3.2	Umwandlungen beim Abkühlen	594
5.3.2.1	Allgemeine Betrachtungen	594
5.3.2.2	Erstarrung	595
5.3.2.3	Perlitbildung	597
5.3.2.4	Martensitbildung	611
5.3.2.5	Bainitbildung	618
5.4	Thermische Verfahren der Gefügebeeinflussung	623
5.4.1	Fertigungsgerechte werkstoffunabhängige Verfahren	624
5.4.1.1	Rekristallisierendes Glühen	624
5.4.1.2	Sphäroidisierendes Glühen	628
5.4.1.3	Grobkorn- und Diffusionsglühen	634
5.4.2	Fertigungsgerechte werkstoffspezifische Verfahren	638
5.4.2.1	Normalglühen	638
5.4.2.2	Glühen auf bestimmte Eigenschaften	644
5.4.3	Beanspruchungsgerechte Verfahren	645
5.4.3.1	Vergüten und Bainitisieren	646
5.4.3.2	Normalisierendes Umformen	662
5.4.3.3	Thermomechanisches Umformen	663
5.5	Technische Eisenlegierungen	665

- 5.5.1 Schweißbare Baustähle 672
- 5.5.2 Stähle höherer Festigkeit 684
- 5.5.3 Stähle für tiefe Temperaturen 695
- 5.5.4 Stähle für hohe Temperaturen 701
- 5.5.5 Stähle mit besonderen Korrosionseigenschaften 708
- 5.5.6 Stähle mit besonderen magnetischen Eigenschaften 722
- 5.5.7 Stähle mit besonderen Verarbeitungseigenschaften 727
- 5.5.8 Stähle mit besonderen Verschleißseigenschaften 741
- 5.5.9 Gusseisen 756

- 6 Gefüge der technischen Nichteisenmetalle und ihrer Legierungen 773**
- 6.1 Kupfer und seine Legierungen 773
 - 6.1.1 Reines Kupfer 773
 - 6.1.2 Messinge 777
 - 6.1.3 Sondermessinge 789
 - 6.1.4 Zinnbronzen 794
 - 6.1.5 Aluminiumbronzen und Mehrstoffaluminiumbronzen 799
 - 6.1.6 Blei- und Blei-Zinn-Bronzen 809
 - 6.1.7 Berylliumbronzen 810
 - 6.1.8 Kupfer-Nickel-Legierungen 814
- 6.2 Nickel und seine Legierungen 816
 - 6.2.1 Reines Nickel 816
 - 6.2.2 Nickellegerungen 818
- 6.3 Cobalt und seine Legierungen 832
 - 6.3.1 Reines Cobalt 832
 - 6.3.2 Cobaltlegierungen 833
- 6.4 Zink und seine Legierungen 837
 - 6.4.1 Reines Zink 837
 - 6.4.2 Zinklegierungen 839
- 6.5 Aluminium und Aluminiumlegierungen 844
 - 6.5.1 Reines Aluminium 844
 - 6.5.2 Aluminium-Silicium-Legierungen 847
 - 6.5.3 Aluminium-Magnesium-Legierungen und Aluminium-Mangan-Legierungen 852
 - 6.5.4 Weitere Mehrstofflegierungen 858
- 6.6 Magnesium und Magnesiumlegierungen 864
 - 6.6.1 Reines Magnesium 864
 - 6.6.2 Magnesiumlegierungen 866
- 6.7 Titan und Titanlegierungen 872
 - 6.7.1 Reines Titan 872
 - 6.7.2 α - und near α -Legierungen 875
 - 6.7.3 $(\alpha + \beta)$ -Legierungen 877
 - 6.7.4 Metastabile β -Legierungen 879
 - 6.7.5 Stabile β -Legierungen 880
- 6.8 Edelmetalle und ihre Legierungen 880

- 6.8.1 Übersicht 880
- 6.8.2 Silber und seine Legierungen 880
 - 6.8.2.1 Reines Silber 880
 - 6.8.2.2 Silber-Nickel 882
 - 6.8.2.3 Silber-Kupfer 884
 - 6.8.2.4 Silber-Cadmium 886
 - 6.8.2.5 Silber-Palladium 888
 - 6.8.2.6 Dispersionsgehärtete Silberlegierungen 889
- 6.8.3 Gold und seine Legierungen 890
 - 6.8.3.1 Reines Gold 890
 - 6.8.3.2 Gold-Nickel 891
 - 6.8.3.3 Gold-Silber 892
 - 6.8.3.4 Gold-Silicium 893
- 6.8.4 Platin und seine Legierungen 894
 - 6.8.4.1 Reines Platin 894
 - 6.8.4.2 Platin-Rhodium und Platin-Iridium 898
- 6.9 Weitere Nichteisenmetalllegierungen 899
 - 6.9.1 Lotwerkstoffe 899
 - 6.9.2 Gleitlagerwerkstoffe 904
- Stichwortverzeichnis 947