

*Herausgegeben von
Herrmann Schumann[†] und Heinrich Oettel*

Metallografie

14. Auflage



**WILEY-
VCH**

WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

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	Linse	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	Nickellegierungen	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