

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Strukturen metallischer Werkstoffe</b>	<b>1</b>
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
<b>2</b>	<b>Metallografische Arbeitsverfahren</b>	<b>55</b>
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	Teilchengößenverteilungen	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
<b>3</b>	<b>Phasengleichgewichte und Zustandsdiagramme</b>	<b>349</b>
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 Lunken 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 Lüten und Schweißen von Metallen 528
  - 4.3.1 Lüten 528
    - 4.3.1.1 Weichlüten 528
    - 4.3.1.2 Hartlüten 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  $\alpha$ - und near  $\alpha$ -Legierungen 875
    - 6.7.3 ( $\alpha + \beta$ )-Legierungen 877
    - 6.7.4 Metastabile  $\beta$ -Legierungen 879
    - 6.7.5 Stabile  $\beta$ -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