



Bibliothek des technischen Wissens

Wärmebehandlung des Stahls

12., aktualisierte und erweiterte Auflage

Prof. Dr.-Ing. Volker Läpple, Schorndorf

Prof. Dr.-Ing. Sabine Bührer, Heilbronn

VERLAG EUROPA-LEHRMITTEL · Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG
Düsselberger Straße 23 · 42781 Haan-Gruiten

Europa-Nr.: 13039

Autoren des Buches

Läpple, Volker	Dr.-Ing., Professor	Schorndorf
Bührer, Sabine	Dr.-Ing., Professor	Heilbronn (<i>Kapitel 11</i>)

Lektorat

Läpple, Volker	Dr.-Ing., Professor	Schorndorf
----------------	---------------------	------------

Verlaglektorat

Dr. Astrid Grote-Wolff

Bildbearbeitung

Zeichenbüro des Verlags Europa-Lehrmittel, Ostfildern

Diesem Buch wurden die neuesten Ausgaben der DIN-Blätter, Stand 2019, zugrunde gelegt.
Verbindlich sind jedoch nur die DIN-Blätter selbst.

Die DIN-Blätter können von der Beuth-Verlag GmbH, Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin, und Kamekestraße 2–8, 50672 Köln, bezogen werden.

12. Auflage 2020

Druck 5 4 3 2 1

Alle Drucke derselben Auflage sind parallel einsetzbar, da sie bis auf die Behebung von Druckfehlern untereinander unverändert sind.

ISBN 978-3-8085-1829-8

Alle Rechte vorbehalten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der gesetzlich geregelten Fälle muss vom Verlag schriftlich genehmigt werden.

© 2020 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten
<http://www.europa-lehrmittel.de>

Umschlaggestaltung: braunwerbeagentur, 42477 Radevormwald
Satz: Punkt für Punkt GmbH · Mediendesign, 40549 Düsseldorf
Druck: MedienHaus Plump GmbH, 53619 Rheinbreitbach

Vorwort

Wird heute in der Öffentlichkeit von Hochtechnologie gesprochen, so ist zumeist die Informations- und Automationstechnik gemeint. Daneben wird mitunter auch noch an die Luft- und Raumfahrttechnik gedacht. Hingegen wissen nur Fachleute, dass viele **Gebiete der Werkstofftechnik** gleichfalls zur Hochtechnologie gehören. Viele Maschinen, Anlagen und Geräte wurden in ihrer heutigen Leistungsfähigkeit erst durch die Entwicklung neuer oder die Verbesserung bereits vorhandener Werkstoffe möglich. Die Fähigkeit zur Herstellung, Verarbeitung und Anwendung leistungsfähiger Werkstoffe wird künftig für die Bereitstellung neuer, wettbewerbsfähiger Produkte und Verfahren zunehmend wichtiger werden und damit auch einen erheblichen Beitrag zu mehr Ressourceneffizienz und zum Umweltschutz leisten.

Von der Vielzahl der verfügbaren Werkstoffe bilden die **Stähle** nach wie vor die mit Abstand am häufigsten genutzte Werkstoffgruppe, da ihre Eigenschaften durch Änderung der chemischen Zusammensetzung (Legieren) oder durch eine Wärmebehandlung in weiten Grenzen verändert und an die jeweiligen betrieblichen Anforderungen angepasst werden können.

Im Hinblick auf eine zielgerichtete Anpassung der Werkstoffeigenschaften an die Betriebsbedingungen kommt der Wärmebehandlung eine zentrale Bedeutung zu. Unter Wärmebehandlung ist dabei ein Vorgang zu verstehen, in dessen Verlauf ein Werkstück Temperatur-Zeit-Folgen und gegebenenfalls zusätzlichen anderen physikalischen und chemischen Einwirkungen ausgesetzt wird, um ihm Eigenschaften zu verleihen, die für seine Weiterverarbeitung oder Verwendung erforderlich sind (z.B. Erhöhung der Festigkeit oder Verbesserung der Verschleißbeständigkeit).

Die richtige Auswahl und Anwendung einer geeigneten Wärmebehandlung ist nicht mehr allein mit Erfahrung und Methodenwissen zu bewältigen. Die Vielfalt der Stähle mit ihren differenzierter werdenden Eigenschaften und Behandlungsmethoden sowie den enger werdenden Anwendungsgrenzen verlangen in zunehmendem Maße Einblicke in das Wesen dieser Werkstoffgruppe. Das Wissen um die Zusammenhänge zwischen Struktur, Gefüge und Eigenschaften sowie die Möglichkeiten ihrer Veränderung gewinnen zunehmend an Bedeutung. Deshalb wurde im Rahmen dieses Lehrbuches sowohl auf die Vermittlung der **Grundlagen der Metall- und Legierungskunde** als auch auf die detaillierte Beschreibung mit bestimmten Wärmebehandlungsverfahren einher gehenden **Veränderungen der Werkstoffeigenschaften** besonderer Wert gelegt.

Die **Wärmebehandlung des Stahls** ist ein komplexes und vielschichtiges Wissensgebiet, das in Lehrbüchern der Werkstoffkunde aufgrund der eingeschränkten Seitenzahl kaum erschöpfend behandelt werden kann. Andererseits jedoch ist die Fülle der verfügbaren Literatur speziell zu Einzelaspekten der Wärmebehandlung für den Lernenden wie auch für den Praktiker nahezu unüberschaubar. Das vorliegende Lehrbuch zur Wärmebehandlung des Stahls soll dazu beitragen, einen gründlichen **Gesamtüberblick** zu geben. Für eine darüber hinausgehende Vertiefung findet der Leser am Ende dieses Buches eine Zusammenstellung ausgewählter Literaturhinweise.

Gegenüber der 11. Auflage wurde in der vorliegenden **12. Auflage** eine Überprüfung der Aktualität der Inhalte und der zitierten Normen vorgenommen. Ferner wurde die Auflage um ein neues Kapitel der Wärmebehandlung von Stahl in der Praxis erweitert. Alle Bilder und Tabellen des Lehrwerks sowie die ausführlichen Lösungen zu den Übungsaufgaben sind für die Übernahme in eigenes Material digital zugänglich (s. Informationen zur EUROPATHEK auf der vorderen Umschlaginnenseite).

Das Buch ist so aufgebaut, dass es nicht nur als Basis für einen Unterricht auf dem gesamten Gebiet der Wärmebehandlungstechnik für Stähle dienen kann, sondern es ermöglicht dem Leser auch, sich wertvolles Wissen auf diesem Gebiet im Selbststudium anzueignen.

Bei der Vermittlung der Kenntnisse und Zusammenhänge wurde auch in der vorliegenden 12. Auflage großer Wert darauf gelegt, dass sowohl der gut ausgebildete Facharbeiter als auch der Studierende sich weder unter- noch überfordert fühlt. Auch dem Praktiker kann das vorliegende Buch vertiefte Kenntnisse vermitteln, die es ihm ermöglichen, seine Werkstoff- und Verfahrensauswahl im Hinblick auf Qualität und Fertigungskosten zu optimieren und die für das Wärmebehandeln ursächlichen Fehler zu erkennen und zu beseitigen.

Wir sind uns bewusst, dass bei der Vielfalt der existierenden Verfahren einzelne Wünsche offen bleiben. Verbesserungsvorschläge und Hinweise auf Fehler nehmen wir auch für diese Auflage unter der Verlagsadresse oder per E-Mail (lektorat@europa-lehrmittel.de) dankbar entgegen.

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen der Metallkunde	9
1.1	Architektur des Atoms	9
1.1.1	Elementarteilchen und Atommodelle	9
1.1.2	Elektronenhülle.	11
1.2	Metallbindung	13
1.3	Kristallgitter	15
1.3.1	Elementarzelle und Kristallsystem	15
1.3.2	Kubisch-primitives Kristallgitter	16
1.3.3	Kubisch-raumzentriertes Kristallgitter.	16
1.3.4	Kubisch-flächenzentriertes Kristallgitter.	17
1.3.5	Hexagonales Gitter dichtester Packung	17
1.3.6	Polymorphie	18
1.4	Entstehung eines Gefüges	19
1.5	Gitterbaufehler	21
1.5.1	Punktförmige Gitterbaufehler	21
1.5.1.1	Leerstellen.	21
1.5.1.2	Zwischengitteratome	21
1.5.1.3	Austausch- oder Substitutionsatome.	22
1.5.1.4	Einlagerungsatome oder interstitielle Atome	22
1.5.2	Linienfehler.	23
1.5.2.1	Stufenversetzungen	23
1.5.2.2	Schraubenversetzungen	26
1.5.2.3	Gemischte Versetzungen	26
1.5.3	Flächenförmige Gitterbaufehler	26
1.5.3.1	Großwinkelkorngrenzen	26
1.5.3.2	Kleinwinkelkorngrenzen.	27
1.5.3.3	Stapelfehler.	27
1.6	Grundlagen der Legierungsbildung	27
1.6.1	Zustandsdiagramme von Zweistoffsystemen (binäre Legierungssysteme)	28
1.6.1.1	Erstellung von Zustandsdiagrammen	28
1.6.1.2	Thermische Analyse reiner Metalle und Metalllegierungen.	28
1.6.1.3	Grundtypen binärer Zustandsdiagramme	29
1.6.1.4	Lesen binärer Zustandsdiagramme	39
1.6.2	Lösungsphasen, Verbindungsphasen und Intermetallische Phasen.	42
1.6.2.1	Einteilung der Legierungphasen	42
1.6.2.2	Eigenschaften intermetallischer Phasen	43
1.6.2.3	Einteilung der intermetallischen Phasen.	43
1.6.3	Zustandsdiagramme mit Verbindungsbildung.	45
1.6.3.1	Zustandsdiagramme mit „offenem“ Schmelzpunktmaximum	45
1.6.3.2	Zustandsdiagramme mit „verdecktem“ Schmelzpunktmaximum	46
1.6.4	Legierungssysteme mit Umwandlungen im festen Zustand	47
1.6.4.1	Legierungssysteme deren Komponenten allotrop Modifikationen aufweisen	47
1.6.4.2	Legierungssysteme mit eutektoidem Zerfall der Mischkristalle	48
1.6.5	Reale Zustandsdiagramme	48
1.6.6	Zustandsdiagramme von Dreistoffsystemen	49
2	Eisenwerkstoffe	50
2.1	Reines Eisen	50
2.2	Eisen-Kohlenstoff-Legierungen	51
2.2.1	Mischkristalle (Ferrit, Austenit und δ -Ferrit)	51
2.2.1.1	Gitterlücken im α - und δ -Eisen	52
2.2.1.2	Gitterlücken im γ -Eisen	52
2.2.1.3	Kohlenstofflöslichkeit des Eisens	53
2.2.2	Zementit und ϵ -Carbid	53
2.2.3	Graphit.	54
2.3	Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramm	54
2.3.1	Erstarrungsformen von Eisen-Kohlenstoff-Legierungen	55
2.3.2	Aufbau des metastabilen Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramms	56
2.3.2.1	Phasengrenzen und Phasengebiete.	56
2.3.2.2	Liquiduslinie	56
2.3.2.3	Soliduslinie	57
2.3.2.4	Bezeichnung der wichtigsten Legierungsgruppen	57
2.3.3	Erstarrungsvorgänge im metastabilen System	57
2.3.4	„Stahlecke“ des metastabilen Systems	61
3	Stahlnormung	65
3.1	Unlegierte Stähle mit Mn < 1 % (keine Automatenstähle)	66
3.2	Unlegierte Stähle mit Mn > 1 %, unlegierte Automatenstähle sowie legierte Stähle mit Legierungsgehalten der einzelnen Elementen < 5 %	67
3.3	Legierte Stähle mit Legierungsgehalten mindestens eines Elements $\geq 5\%$	67
3.4	Schnellarbeitsstähle	68
3.5	Zusatzsymbole	69

4	Einführung in die Wärmebehandlung der Stähle 70	5.5 Normalglühen von Stählen 92 5.5.1 Anwendung 92 5.5.2 Verfahren und innere Vorgänge 93 5.5.3 Haltezeit beim Normalglühen 94
4.1	Ziele einer Wärmebehandlung von Stählen 70	5.6 Weichglühen von Stählen (Glühen auf kugelige Carbide) 95 5.6.1 Anwendung 95 5.6.2 Verfahren 95 5.6.3 Innere Vorgänge 96
4.2	Einteilung der Wärmebehandlungsverfahren 70	
4.3	Prinzip einer Wärmebehandlung 72	
5	Glühen 74	6 Härteln 98
5.1	Grobkornglühen (Hochglühen) 74	6.1 Sinn und Zweck des Härtens 98
5.1.1	Sinn und Zweck des Grobkornglühens 74	6.2 Prinzip des Härtens 98
5.1.2	Anwendung 75	6.3 Härtetemperatur 99
5.1.3	Verfahren 75	6.4 Abkühlgeschwindigkeit und Gefügeausbildung 100
5.1.4	Innere Vorgänge 75	Umwandlungen in der Perlitstufe 101
5.1.5	Grobkornbildung 76	Sehr langsame Abkühlung in der Perlitstufe 101
5.1.6	Nachteile des Grobkornglühens 77	Beschleunigte Abkühlung in der Perlitstufe 102
5.2	Spannungsarmglühen 77	Umwandlungen in der Bainitstufe 103
5.2.1	Eigenspannungen 77	Umwandlungen in der Martensitstufe 105
5.2.1.1	Arten von Eigenspannungen 77	6.5 Martensit 107
5.2.1.2	Entstehung von Eigenspannungen 77	Grundlagen der Martensitbildung 107
5.2.1.3	Auswirkungen von Eigenspannungen 78	Erscheinungsformen des Martensits 109
5.2.2	Sinn und Zweck 78	Kristallographie der Martensitbildung 110
5.2.3	Anwendung 79	Elementarzelle des Martensits 113
5.2.4	Verfahren 79	Kritische Abkühlgeschwindigkeit 114
5.2.5	Innere Vorgänge 79	6.5.5.1 Unlegierte Stähle 115
5.2.6	Anwendungsgrenzen 79	6.5.5.2 Legierte Stähle 115
5.3	Diffusionsglühen (Homogenisierungsglühen) 80	6.5.5.3 Zusammenfassung 116
5.3.1	Sinn und Zweck 80	6.6 Kohlenstofflöslichkeit des Austenits 117
5.3.2	Seigerungen und ihre Entstehung 80	6.7 Temperaturbereich der Martensitbildung 117
5.3.3	Anwendung 83	6.8 Restaustenit und Tiefkühlung 119
5.3.4	Verfahren 83	6.9 Abschreckhärte 120
5.3.5	Innere Vorgänge 83	6.10 Härtespannungen 121
5.3.6	Nachteile und Probleme des Diffusionsglühens 84	6.11 Abschrecken und Abschreckmittel 124
5.4	Rekristallisationsglühen 84	6.11.1 Grundlagen des Abschreckvorgangs 124
5.4.1	Sinn und Zweck 84	6.11.2 Kenngrößen von Abschreckmitteln und ihre Bestimmung 124
5.4.2	Anwendung 85	6.11.3 Abschreckmittel 126
5.4.3	Innere Vorgänge 85	
5.4.4	Rekristallisationstemperatur 86	
5.4.5	Verfahren 87	
5.4.6	Korngröße nach dem Rekristallisationsglühen 87	
5.4.6.1	Abhängigkeit der Korngröße vom Verformungsgrad bei konstanter Glühtemperatur 88	
5.4.6.2	Abhängigkeit der Korngröße von der Glühtemperatur bei konstantem Verformungsgrad 89	
5.4.7	Kornvergrößerung und sekundäre Rekristallisation 89	
5.4.8	Vor- und Nachteile des Rekristallisationsglühens 90	
5.4.9	Kristallerholung 90	
5.4.10	Kalt- und Warmverformung 91	

6.12 Zeit-Temperatur-Umwandlungsdiagramme (ZTU-Diagramme)	128	7.1.4 Anlassen der legierten Stähle	165
6.12.1 Zustandsdiagramm der unlegierten Stähle	128	7.1.4.1 Anlassen von Stählen mit nicht Carbid bildenden Elementen	166
6.12.2 Bedeutung der ZTU-Diagramme	129	7.1.4.2 Anlassen von Stählen mit Carbid bildenden Elementen	166
6.12.3 Kontinuierliche ZTU-Diagramme	129	7.1.5 Versprödungserscheinungen beim Anlassen von Stählen	167
6.12.3.1 Aufbau kontinuierlicher ZTU-Diagramme	129	7.1.5.1 300 °C-Versprödung	167
6.12.3.2 Ablesebeispiele	131	7.1.5.2 500 °C-Versprödung (Anlassversprödung)	168
6.12.3.3 Erstellung kontinuierlicher ZTU-Diagramme	132	7.1.6 Volumenänderungen durch das Anlassen	169
6.12.4 Isotherme ZTU-Diagramme	133	7.1.7 Anlassschaubilder	170
6.12.4.1 Aufbau isothermer ZTU-Diagramme	134	7.1.8 Zusammenfassung Anlassen	170
6.12.4.2 Ablesebeispiele	134	7.2 Vergüten	171
6.12.4.3 Erstellung isothermer ZTU-Diagramme	135	7.2.1 Sinn und Zweck des Vergütens	171
6.12.5 ZTU-Diagramme übereutektoider Stähle	136	7.2.2 Prinzip des Vergütens	172
6.12.6 Anwendungsgrenzen von ZTU-Diagrammen	137	7.2.3 Innere Vorgänge beim Vergüten	172
6.12.7 Einfluss von Legierungselementen auf die Austenitumwandlung	138	7.2.4 Vergütungstiefe	173
6.13 Zeit-Temperatur-Austenitisierungsdiagramme (ZTA-Diagramme)	140	7.2.5 Anlassschaubilder für das Vergüten	175
6.13.1 Kontinuierliche ZTA-Diagramme	141	7.2.6 Vergütungsstähle	175
6.13.1.1 Austenitisieren untereutektoider Stähle	141	7.2.6.1 Verwendung von Vergütungsstählen	176
6.13.1.2 Austenitisieren übereutektoider Stähle	143	7.2.6.2 Normung von Vergütungsstählen	176
6.13.2 Isotherme ZTA-Diagramme	145	7.2.6.3 Legierungselemente in Vergütungsstählen	181
6.13.2.1 Austenitisieren untereutektoider Stähle	145	7.2.7 Sonderverfahren des Vergütens	182
6.13.2.2 Austenitisieren übereutektoider Stähle	145	7.2.7.1 Bainitisieren	182
6.13.3 Ermittlung und Genauigkeit von ZTA-Diagrammen	146	7.2.7.2 Patentieren	184
6.13.4 Praktische Hinweise für das Austenitisieren	146		
6.14 Härteprüfverfahren	147	8 Verfahren des Oberflächenhärtens	185
6.14.1 Einteilung der Härteprüfverfahren	147	8.1 Einteilung der Oberflächenhärteteverfahren	186
6.14.2 Härteprüfverfahren nach Brinell	148	8.2 Randschichthärteln	186
6.14.3 Härteprüfverfahren nach Vickers	150	8.2.1 Verfahren des Randschichthärtens	186
6.14.4 Härteprüfverfahren nach Rockwell	152	8.2.1.1 Tauchhären	187
6.14.5 Vergleich der Härteprüfverfahren	155	8.2.1.2 Flammhären	188
6.14.6 Umwertung von Härtewerten	156	8.2.1.3 Induktionshären	189
6.15 Prüfung der Härtbarkeit – der Stirnabschreckversuch	157	8.2.1.4 Laserstrahlhären	192
7 Anlassen und Vergüten	160	8.2.1.5 Elektronenstrahlhären	192
7.1 Anlassen	160	8.2.1.6 Vergleich der Randschichthärteteverfahren	193
7.1.1 Sinn und Zweck des Anlassens	160	8.2.2 Prüfgrößen beim Randschichthärteln	194
7.1.2 Innere Vorgänge beim Anlassen	161	8.2.3 Werkstoffe für das Randschichthärteln	195
7.1.3 Anlassen der unlegierten Stähle	164		
7.1.3.1 Einfluss der Anlass-temperatur	164	8.3 Einsatzhären	197
7.1.3.2 Einfluss der Anlassdauer	164	8.3.1 Einführung in das Einsatzhären	197

<p>8.3.4.2 Behandlungsmittel für das Carbonitrieren 206</p> <p>8.3.4.3 Verfahren des Carbonitrierens 207</p> <p>8.3.4.4 Vor- und Nachteile des Carbonitrierens 208</p> <p>8.3.5 Härtung der Randschicht 209</p> <p>8.3.5.1 Härtetemperatur 209</p> <p>8.3.5.2 Oberflächenhärte 210</p> <p>8.3.5.3 Härteverfahren 210</p> <p>8.3.6 Einsatzhärtungstiefe 213</p> <p>8.3.7 Tiefkühlen 213</p> <p>8.3.8 Anlassen 214</p> <p>8.3.9 Einsatzstähle 214</p> <p>8.3.9.1 Eigenschaften von Einsatzstählen 214</p> <p>8.3.9.2 Normung von Einsatzstählen 214</p> <p>8.3.9.3 Legierungselemente in Einsatzstählen 216</p> <p>8.4 Nitrieren und Nitrocarburieren 217</p> <p>8.4.1 Einführung in das Nitrieren und Nitrocarburieren 217</p> <p>8.4.2 Aufbau von Nitrierschichten 218</p> <p>8.4.2.1 Verbindungsschicht 218</p> <p>8.4.2.2 Diffusionsschicht 220</p> <p>8.4.3 Härteverlaufskurven und Nitrierhärtetiefe 222</p> <p>8.4.3.1 Härte der Verbindungsschicht 222</p> <p>8.4.3.2 Härte der Diffusionsschicht 223</p> <p>8.4.3.3 Nitrierhärtetiefe 223</p> <p>8.4.4 Nitrierverfahren 224</p> <p>8.4.4.1 Gasnitrieren 224</p> <p>8.4.4.2 Plasmanitrieren 225</p> <p>8.4.5 Nitrocarburierverfahren 226</p> <p>8.4.5.1 Pulvernitrocarburieren 227</p> <p>8.4.5.2 Salzbadnitrocarburieren 227</p> <p>8.4.5.3 Gasnitrocarburieren 228</p> <p>8.4.5.4 Plasmanitrocarburieren 228</p> <p>8.4.6 Vergleich der Nitrier- und Nitrocarburierverfahren 229</p> <p>8.4.7 Vorteile und Nachteile des Nitrierens und Nitrocarburierens 229</p> <p>8.4.8 Anwendung des Nitrierens und Nitrocarburierens 231</p> <p>8.4.9 Nitrierstähle 232</p> <p>8.5 Borieren 233</p> <p>8.5.1 Einführung in das Borieren 233</p> <p>8.5.2 Aufbau und die Dicke von Boridschichten 233</p> <p>8.5.2.1 Verbindungsschicht 233</p> <p>8.5.2.2 Diffusionszone 234</p> <p>8.5.2.3 Schichtdicke beim Borieren 234</p> <p>8.5.3 Härtewerte und Härteverlaufskurven 235</p> <p>8.5.4 Borierverfahren 235</p> <p>8.5.4.1 Borieren in festen Medien 235</p> <p>8.5.4.2 Borieren in flüssigen Medien 236</p> <p>8.5.4.3 Borieren in gasförmigen Medien 236</p> <p>8.5.5 Werkstoffe für das Borieren 236</p> <p>8.5.6 Vor- und Nachteile des Borierens 237</p> <p>8.5.7 Hinweise zur boriergerechten Gestaltung von Werkstücken 238</p> <p>8.6 Weitere Oberflächenhärteverfahren (Metall-Diffusionsverfahren) 238</p>	<p>9 Verhaltensregeln und Vorsichtsmaßnahmen zum Schutz der Gesundheit 241</p> <p>10 Wärmebehandlungsangaben in technischen Produktspezifikationen 242</p> <p>10.1 Anwendung und Gültigkeit der Symbolik 242</p> <p>10.2 Wort- und Zustandsangaben 242</p> <p>10.2.1 Wärmebehandlungsverfahren 242</p> <p>10.2.2 Oberflächenhärte 242</p> <p>10.2.3 Härtetiefe 243</p> <p>10.2.4 Aufkühlungstiefe (CD) 244</p> <p>10.2.5 Verbindungsschichtdicke (CLT) 244</p> <p>10.3 Kenngrößen wärmebehandelter Werkstücke 245</p> <p>10.3.1 Randschichthärtungen 245</p> <p>10.3.2 Randschichtschmelzhärtungen 246</p> <p>10.3.3 Einsatzhärten 247</p> <p>10.3.4 Nitrieren und Nitrocarburieren 248</p> <p>10.4 Zeichnerische Darstellung von Wärmebehandlungsangaben 249</p> <p>10.4.1 Wärmebehandlung des gesamten Werkstücks 249</p> <p>10.4.2 Ortlich begrenzte Wärmebehandlung 249</p> <p>10.4.3 Kennzeichnung von Härteprüfstellen 250</p> <p>10.5 Wärmebehandlungsbilder 251</p> <p>10.6 Wärmebehandlungsanweisung und Wärmebehandlungsplan 251</p> <p>10.7 Zusammenfassung 252</p> <p>11 Wärmebehandlung von Stahl in der Praxis 254</p> <p>11.1 Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramm 254</p> <p>11.2 Normalglühen 254</p> <p>11.2.1 Normalglühen des unlegierten Einsatzstahles C15E 255</p> <p>11.2.2 Normalglühen des unlegierten Vergütungsstahles C45E 256</p> <p>11.2.3 Normalglühen des unlegierten Vergütungsstahles C60E 258</p> <p>11.3 Härt en 258</p> <p>11.3.1 Härt en von C15E 259</p> <p>11.3.2 Härt en von C45E 260</p> <p>11.3.3 Härt en von C60E 263</p> <p>11.4 Vergüten 264</p> <p>11.4.1 Einfluss der Anlasstemperatur beim Vergüten 264</p> <p>11.4.2 Vergüten des unlegierten untereutektoiden Einsatzstahles C15E 265</p>
--	---

11.4.3	Vergüten des unlegierten unter-eutektoiden Einsatzstahles C45E	267	11.5.3	Gefüge bei zu hoher Austenitisierungstemperatur	276
11.4.4	Vergüten des unlegierten unter-eutektoiden Einsatzstahles C60E	268	11.5.4	Gefüge bei zu hoher Austenitisierungstemperatur und zu lange Haltedauer	279
11.4.5	Vergüten legierter Vergütungs-stähle	270			
11.5	Wärmebehandlungsfehler	274	12	Englische Fachausdrücke	282
11.5.1	Einfluss der Austenitisierungs-temperatur und der Haltedauer auf das Gefüge	274			
11.5.2	Gefüge bei zu niedriger Austenitisierungstemperatur	274	13	Aufgabensammlung	287

1 Grundlagen der Metallkunde

Die makroskopischen Eigenschaften der Metalle und die inneren Vorgänge bei ihrer Veränderung sind nur aus ihrem mikroskopischen Aufbau zu deuten. Die nachfolgenden Abschnitte sollen daher die metallkundlichen Grundlagen vom Atom bis hin zur realen Gefügestruktur, zumindest soweit sie für das Verständnis der bei einer Wärmebehandlung ablaufenden inneren Vorgänge erforderlich sind, erläutern.

1.1 Architektur des Atoms

Der innere Aufbau eines Metalls bestimmt seine Eigenschaften. Um die Werkstoffeigenschaften sowie die Vorgänge bei ihrer gezielten Veränderung, beispielsweise durch eine Wärmebehandlung, zu verstehen und zu beurteilen, ist es erforderlich, bei den kleinsten beständigen Teilen der Materie, den Atomen, zu beginnen. Kapitel 1.1 befasst sich daher zunächst mit dem Aufbau der Atome.

1.1.1 Elementarteilchen und Atommodelle

Bereits im Altertum machte man sich Gedanken über den Aufbau der Materie. Der griechische Philosoph **Demokrit** (460...371 v. Chr.) begründete bereits die Vorstellung, dass Materie nicht beliebig teilbar sei, sondern dass man bei fortgesetzter Teilung schließlich auf nicht mehr zerlegbare Urbestandteile stoßen würde. Diese unteilbaren Einheiten nannte Demokrit **Atome** (*atomos*, griech.: unteilbar). Nach Demokrit existierten nur Atome und leerer Raum. Die verschiedenen Körper bilden sich dadurch, dass Atome in verschiedener Zahl und Lage zusammenentreten.

Erst im Jahre 1808 erfolgte durch **John Dalton** (1766...1844) die Wiederentdeckung des alten Prinzips des Demokrit und damit die Begründung der modernen Atomtheorie. Dalton verknüpfte die Atomvorstellung mit dem Elementbegriff und gelangte dadurch zu folgenden Aussagen, die er allerdings zu seiner Zeit noch nicht beweisen konnte:

- Die Materie besteht aus sehr kleinen Atomen, die nicht weiter zerlegt und weder erschaffen noch zerstört werden können.
- Jedes Element besteht aus einer bestimmten Atomart. Alle Atome eines Elementes sind unter sich gleich. Die Atome der verschiedenen Elemente unterscheiden sich voneinander durch ihre Größe und Masse.
- Da sich bei chemischen Vorgängen die Gesamtmasse aller Reaktionsteilnehmer nicht ändert, müssen auch die Atome unveränderlich sein.
- Bei der Bildung einer Verbindung vereinigen sich die Atome der Elemente in einem bestimmten Zahlenverhältnis. Dies erklärt die konstante Zusammensetzung einer Verbindung.

Während Demokrit und Dalton die Auffassung vertraten, Atome seien unteilbare Materienteilchen, entdeckte der englische Physiker **Joseph John Thomson** im Jahre 1897 Teilchen, die kleiner und leichter waren, als das leichteste Atom, das Wasserstoffatom. Diese

Information

Atomvorstellung von Demokrit

Die Materie besteht aus sehr kleinen, nicht mehr weiter zerlegbaren Teilchen, den Atomen. Zwischen den Atomen ist leerer Raum.

Information

Atomhypothese von Dalton

Dalton postulierte, dass Atome unteilbar sind und eine bestimmte unveränderte Masse haben. Er hielt diese Massen für unvorstellbar klein und glaubte, sie seien niemals zu bestimmen.

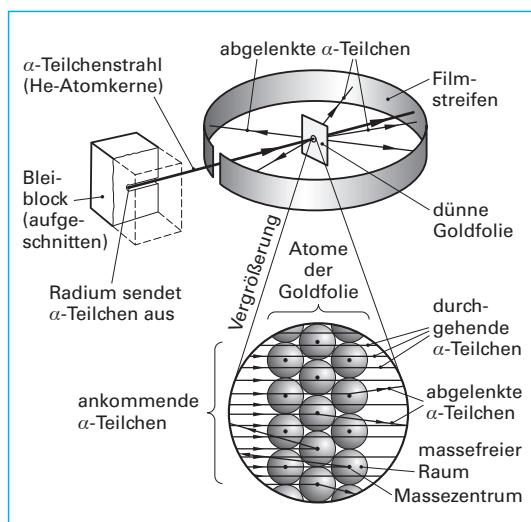


Bild 1.1: Blattgoldversuch von Rutherford (1911)

negativ geladenen Elektrizitätsteilchen wurden **Elektronen** (elektron, griech.: Bernstein) genannt. Zunächst hatte man allerdings noch angenommen, dass die Atome kleine, gleichmäßig mit positiver Ladung ausgefüllte Kugeln seien, in welche die leichten Elektronen eingebettet wären (**Thomsonsches Atommodell**, 1897). Die Vorstellung vom kompakten Atomaufbau konnte jedoch wenig später von **Ernest Rutherford** (1871...1957) widerlegt werden. Rutherford und seinen Mitarbeitern gelang 1911 ein Versuch, der als **Rutherford'scher Blattgoldversuch** bekannt wurde (Bild 1.1).

Eine dünne Goldfolie (0,002 mm) wird mit Helium-Atomkernen (α -Teilchen) beschossen. Ringförmig um die Folie ist ein Filmstreifen angebracht, der von den auftreffenden α -Teilchen geschrägt wird. Der Versuch ergab ein überraschendes Ergebnis. Die überwiegende Zahl der α -Teilchen durchdringt die Goldfolie ungehindert („es war als schieße man gegen einen Geist“). Daraus lässt sich schließen, dass die Atome zum größten Teil aus „masseleerem Raum“ bestehen. Da das bereits entdeckte Elektron ein fast masseloses Elementarteilchen ist, lag es nahe zu vermuten, dass die Elektronen den größten Teil des Atoms, die Atom- oder Elektronenhülle also, ausfüllen müssten. Nur etwa jedes 100000ste α -Teilchen wird abgelenkt oder prallt zurück und zwar derart, dass die Teilchen auf dem Filmstreifen „verstreut“ sind.

Die Experimente wurden auch an anderen Metallfolien (z.B. Aluminium, Kupfer, Silber und Platin) durchgeführt und erbrachten vergleichbare Ergebnisse. Aus den Experimenten schloss Rutherford, dass der größte Teil des Atomvolumens leer ist, denn die α -Teilchen dringen nahezu ungehindert durch viele Atomlagen hindurch. Die Masse des Atoms muss also in einem verschwindend kleinen Zentrum konzentriert sein. Dieses Zentrum ist der Atomkern, der außerdem, aufgrund der Ablenkung der positiven α -Teilchen, positiv geladen sein muss. Die räumliche Ausdehnung des Atoms wird durch die Atomhülle bewirkt. Sie enthält die Elektronen. Während die Atome bisher als unteilbar angesehen wurden, führten die Versuche von Rutherford zum **Kern-Hülle-Modell** des Atoms.

In den bereits 1886 entdeckten Kanalstrahlen einer mit Wasserstoffgas gefüllten Entladungsrohre erkannte Rutherford im Jahre 1913 die lange gesuchten positiven Gegenpartner der Elektronen. Er bezeichnete diese kleinste, als Bestandteil in Atomen auftretende Materieeinheit der positiven Elektrizität **Proton** (proton, griech.: erstes, Ur-(Teilchen)). Damit war auch das zweite am Atomaufbau beteiligte Elementarteilchen entdeckt.

Das **Neutron** wurde erst im Jahre 1930 von den deutschen Physikern **W. Bothe** und **H. Becker** entdeckt, jedoch von ihnen als energiereiche γ -Strahlung interpretiert. Erst der englische Physiker **J. Chadwick** bewies dann im Jahre 1932, dass es sich um neutrale Teilchen von etwa der Masse eines Protons handelt. Die Existenz der Neutronen wurde allerdings bereits 1920 von Rutherford postuliert. Von **W. D. Harkins** wurde hierfür 1921 der Name Neutron vorgeschlagen.

Information

Atommodell nach Rutherford

Die Atome bestehen aus einem Atomkern und einer Atomhülle. Der Atomkern ist positiv geladen und sehr klein. Die Atomhülle ist relativ ausgedehnt und fast masselos. Sie enthält die negativ geladenen Elektronen. Das Atommodell nach Rutherford wird daher auch als Kern-Hülle-Modell bezeichnet.

Tabelle 1.1: Elementarteilchen, die am Atomaufbau beteiligt sind

	Elektron (e)	Proton (p)	Neutron (n)
Ladung	negativ ($-e$) $-1,602 \cdot 10^{-19}$ As	positiv ($+e$) $+1,602 \cdot 10^{-19}$ As	neutral 0 As
Ruhe-masse ¹⁾	$9,11 \cdot 10^{-31}$ kg $= 0,00055$ μ	$1,6725 \cdot 10^{-27}$ kg $= 1,00728$ μ	$1,6748^{-27}$ kg $= 1,00867$ μ

¹⁾ 1 μ = atomare Masseneinheit. Sie ist festgelegt als $\frac{1}{12}$ der absoluten Masse des Kohlenstoffisotops ^{12}C (1 μ = $1,6606 \cdot 10^{-27}$ kg).

Elektronen, Protonen und Neutronen sind **Elementarteilchen**, die am Atomaufbau beteiligt sind (Tabelle 1.1). Durch Kombination der aus Protonen und Neutronen bestehenden Atomkerne mit den aus Elektronen bestehenden Atomhüllen entstehen die 112 bis heute bekannten **Elemente**. Die einzelnen Atomsorten unterscheiden sich dabei durch eine abweichende Zahl dieser Elementarteilchen. Aus den Elementen ergeben sich Millionen von Molekülen der chemischen Verbindungen und aus diesen schließlich die unendlich vielseitigen Erscheinungsformen der belebten und unbelebten Natur.

Heute kennt man einige hundert, am Atomaufbau jedoch nicht beteiligte Elementarteilchen. Grundsätzlich unterscheidet man entsprechend ihrer Masse zwei Gruppen von Elementarteilchen:

- die „leichten“ **Leptonen** (*leptos*, griech.: leicht)
- die „schweren“ **Hadronen** (*hadros*, griech.: dick, starr)

Zu jedem Elementarteilchen gehört auch ein Antiteilchen. So wurde das **Antiteilchen** des Elektrons, das **Positron**, bereits im Jahre 1928 vorausgesagt und 1932 in der Höhenstrahlung auch tatsächlich entdeckt.

Die Vielzahl der bekannten Elementarteilchen lässt vermuten, dass sie keine Urbausteine der Natur sind, sondern ihrerseits wieder aus kleineren Bausteinen zusammengesetzt sind. Während die Substruktur der Leptonen noch fraglich ist, bestehen die Hadronen aus kleineren Bausteinen, den **Quarks**. Grundsätzlich unterscheidet man dabei Hadronen die aus zwei Quarks bestehen, die **Mesonen**, und Hadronen mit drei Quarks, die **Baryonen**, zu denen auch die Protonen und Neutronen gehören (1966 experimentell nachgewiesen). Bisher kennt man sechs verschiedene Quarks und deren Antiquarks. Hierauf soll jedoch nicht näher eingegangen werden. In [10] werden die Eigenschaften der wichtigsten Elementarteilchen beschrieben. Für die Belange der Werkstoffkunde genügt das klassische Bild der drei am Atomaufbau beteiligten Elementarteilchen: Elektron, Proton und Neutron.

Nach dem bisher Gesagten kann man sich den Atomaufbau wie folgt vorstellen:

1. Das Atom besteht aus einem sehr kleinen **Atomkern** ($\varnothing 10^{-14} \dots 10^{-15}$ m) und einer den Kern umgebende **Atom- oder Elektronenhülle** ($\varnothing 10^{-10}$ m).
2. Der sehr kleine Atomkern besteht aus positiv geladenen Teilchen, den Protonen und (mit Ausnahme des Wasserstoffatoms) ungeladenen Teilchen, den Neutronen. Die Atomhülle wird ausschließlich von negativ geladenen Elektronen besetzt. Die Anzahl der Protonen im Kern (**Kernladungszahl**) dient außerdem als **Ordnungszahl im Periodensystem der Elemente (PSE)**.
3. Im elektroneutralen Atom muss die Anzahl der Protonen (+) im Kern gleich der Anzahl der Elektronen (-) in der Hülle sein. Verliert jedoch ein neutrales Atom eines oder mehrere Elektronen, dann wird es zu einem ein- oder mehrfach positiv geladenen **Ion (Kation)**. Treten hingegen zu einem neutralen Atom ein oder mehrere Elektronen hinzu, dann entsteht ein ein- oder mehrfach negativ geladenes Ion (**Anion**).
4. Der weitaus größte Teil der Masse eines Atoms ist im Atomkern konzentriert. Die Masse der Kernteilchen (Proton und Neutron) sind etwa gleich groß, während die Masse des Elektrons nur 1/1836 der Masse des Protons beträgt (Tabelle 1.1).

1.1.2 Elektronenhülle

Bei chemischen Vorgängen treten stets nur Veränderungen in der Elektronenhülle der Atome ein, während die Atomkerne völlig unverändert bleiben. Der Bau und das Verhalten der Elektronenhülle ist daher für die Chemie und somit auch für die Werkstoffkunde von besonderer Bedeutung.

Die positiven Ladungen (Protonen) des Atomkerns werden durch eine entsprechende Anzahl negativer Ladungen (Elektronen) in der Elektronenhülle kompensiert. Die Elektronen der Elektronenhülle umgeben den Atomkern dabei nicht regellos, sondern sie verteilen sich gesetzmäßig.

Für den Feinbau der Elektronenhülle wurde im Jahre 1913 von dem dänischen Physiker **Niels Bohr** (1885...1962) das nach ihm benannte **Bohrsche Atommodell** entwickelt. Nach dieser Modellvorstellung bewegen sich die Elektronen auf räumlichen **Schalen** um den Atomkern, ähnlich wie die Planeten um die Sonne. Das Modell wird daher mitunter auch als **Planetenmodell** bezeichnet.

Information

Packungsdichte in Atomen

Ein Würfel aus Eisen (Fe) mit einer Kantenlänge von 10 m und dementsprechend einem Volumen von 1000 m^3 , hat eine Masse von etwa 7600 Tonnen.

Das gesamte von den Fe-Atomkernen beanspruchte Volumen beträgt jedoch weniger als 1 mm^3 . Das restliche Volumen ist praktisch masse leer und nur von Kraftfeldern erfüllt.

Die Packungsdichte in einem Atom ist damit geringer als in unserem Planetensystem, falls man den Atomkern mit der Sonne und die umgebenden Planeten mit den Elektronen vergleicht.

Bei Atomen mit mehreren Elektronen „kreisen“ die Elektronen auf bestimmten, festgelegten Bahnen (Schalen) um den Atomkern (Bild 1.2). Als Folge ihrer Bewegung haben die Elektronen kinetische Energie (Bewegungsenergie) und aufgrund der Anziehungskraft durch den positiven Atomkern auch potenzielle Energie (Lageenergie). Jedes Elektron hat deshalb, abhängig von der Schale auf dem es sich befindet, einen ganz bestimmten Energienzustand. Die einzelnen Schalen des Bohr'schen Atommodells können daher auch mit verschiedenen, diskreten Energieniveaus verglichen werden.

In der Elektronenhülle verteilen sich die Elektronen auf verschiedene Energiestufen, die man anschaulich den Elektronenschalen des Bohr'schen Atommodells gleichsetzen kann.

Die Atomhülle kann in maximal 7 Schalen unterteilt sein, die von innen nach außen mit den Ziffern 1 bis 7, den **Hauptquantenzahlen** bzw. den Großbuchstaben K, L, M, N, usw. gekennzeichnet werden. Die 1. Schale (K-Schale) ist die dem Atomkern am nächsten liegende Schale, die 7. Schale (Q-Schale) ist dagegen vom Atomkern am weitesten entfernt. Die Schalen sind (mit Ausnahme der ersten Schale) ihrerseits wieder in maximal n Unterschalen aufgeteilt, die mit den Buchstaben s, p, d, f, usw. gekennzeichnet werden (Tabelle 1.2). Die Unterschalen kennzeichnen den Nebenquantenzustand des jeweiligen Elektrons, wobei man sich in der Chemie normalerweise nur mit den s-, p-, d- und f-Unterschalen befasst.

Durch Zufuhr von Energie (z.B. Wärme) oder durch den Aufprall von Fremdelektronen können einzelne Elektronen eines Atoms kurzfristig auf eine weiter außen liegende Schale und damit auf ein höheres Energieniveau gelangen. Sobald diese Elektronen jedoch wieder in ihre ursprüngliche Schale „zurückfallen“, geben sie die überschüssige Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung wieder ab. Dieser Effekt wird beispielsweise bei der Erzeugung von Röntgenstrahlen in einer Röntgenröhre technisch genutzt.

Ist die Energiezufuhr genügend groß, dann kann die potenzielle Energie des Elektrons so groß werden, dass es sich aus dem Atom löst und frei wird. Dem Atom geht dadurch ein Elektron verloren, es wird zu einem positiven Ion (Kation). Dieser Vorgang spielt beispielsweise beim Plasmanitrieren (Kapitel 8.4.4.2) eine Rolle.

Die Anordnung und Besetzung der einzelnen Schalen mit Elektronen unterliegt bestimmten Gesetzmäßigkeiten:

1. Die Besetzung der Schalen mit Elektronen erfolgt grundsätzlich so, dass Zustände geringerer Energie zuerst besetzt werden. Dementsprechend wird zuerst die 1. Schale, dann die 2. Schale, usw. besetzt. Sobald jedoch die äußerste Schale mit 8 Elektronen besetzt ist, wird eine stabile

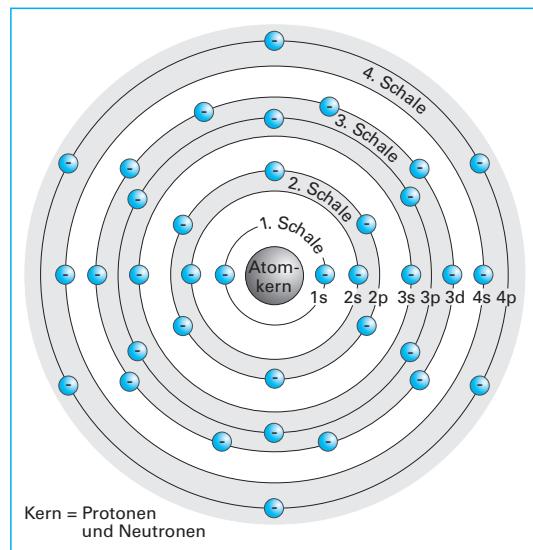


Bild 1.2: Bohrsches Modell der Elektronenhülle
(bis zur 4p-Unterschale dargestellt)

Tabelle 1.2: Schalenbau der Elektronenhülle

Schale	Haupt-quanten-zahl n	Unter-schalen	Max. Anzahl der Elektronen
K-Schale	1	1s	2
L-Schale	2	2s 2p	2 6
M-Schale	3	3s 3p 3d	2 6 10
N-Schale	4	4s 4p 4d 4f	2 6 10 14
O-Schale	5	5s 5p 5d 5f	2 6 10 14
P-Schale	6	6s 6p 6d	2 6 10
Q-Schale	7	7s	2

Zwischenstufe erreicht, und obwohl in der betreffenden Schale noch weitere Elektronen aufgenommen werden könnten, wird nunmehr die nächst höhere Schale mit Elektronen besetzt. Erst nachdem diese höhere Schale mit zwei Elektronen besetzt wurde, erfolgt in der Regel die weitere Auffüllung der darunter liegenden, noch nicht vollständig besetzten Schalen (Tabelle A1 im Anhang). Aus diesem Grund sind beispielsweise bei Eisen (Bild 1.3) in der 3. Schale noch Plätze unbesetzt, während bereits die nächst höhere Schale mit Elektronen besetzt wurde.

2. Jede Schale (Energieschicht) vermag maximal $2 \cdot n^2$ ($n = \text{Hauptquantenzahl}$) Elektronen aufzunehmen (Tabelle 1.2). Beispiele:
 1. Schale ($n = 1$): $2 \cdot 1^2 = 2$ Elektronen
 2. Schale ($n = 2$): $2 \cdot 2^2 = 8$ Elektronen
 3. Schale ($n = 3$): $2 \cdot 3^2 = 18$ Elektronen
3. Die chemischen Eigenschaften eines Elements werden weitgehend von der Anzahl der Elektronen auf der äußersten Schale, den **Valenzelektronen**, bestimmt. Elemente mit gleicher Anzahl an Valenzelektronen besitzen ähnliche chemische Eigenschaften (z.B. Fluor, Chlor, Brom, Jod, usw.).
4. Eine mit 8 Elektronen besetzte äußere Schale stellt einen besonders stabilen Zustand dar (**Edelgaskonfiguration**). Nur die Elemente Neon (Ne), Argon (Ar), Krypton (Kr), Xenon (Xe) und Radon (Rn), die als Edelgase bezeichnet werden, haben diese besonders stabile Elektronenkonfiguration (Tabelle A1, Anhang). Das ebenfalls stabile Edelgas Helium (He) bildet mit zwei Elektronen auf der 1. Schale hiervon eine Ausnahme. Sie gehen nur unter besonderen Bedingungen mit anderen Elementen chemische Verbindungen ein.

Vom Bohrschen Atommodell ist man zwischenzeitlich weitgehend abgekommen, da es mit vielen Beobachtungen in Widerspruch stand. So vermag es beispielsweise die Bindung in Molekülen nicht zu erklären. Außerdem ist die Bewegung eines geladenen Teilchens auf einer Kreisbahn nach den Gesetzen der Physik mit der Abstrahlung von Energie in Form elektromagnetischer Strahlung verbunden. Die Elektronen müssten also auf ihrem Weg um den Kern Energie verlieren, langsamer werden und schließlich in den Kern stürzen. Bereits in den zwanziger Jahren bereiteten daher **DeBroglie**, **Heisenberg** und **Schrödinger** die Grundlagen zur Entwicklung eines weitaus leistungsfähigeren wellenmechanischen Atommodells, das sogenannte **Orbitalmodell**.

Allerdings hat auch das Bohr'sche Atommodell zum Verständnis vieler Vorgänge in der Chemie und in der Werkstoffkunde seinen Wert bis heute behalten. Man kann sich auch durchaus des anschaulichen Schalenmodells nach Bohr bedienen, falls man sich dabei bewusst bleibt, dass die Elektronenschalen, lediglich bildliche Darstellungen der verschiedenen Energiezustände der Elektronen in der Atomhülle repräsentieren. Für die Betrachtungen im Rahmen dieses Buches genügt das einfache Schalenmodell nach Bohr. Für weiterführende Informationen sei auf die vielfältigen Fachbücher der Chemie verwiesen (z.B. [10]).

1.2 Metallbindung

Bekanntlich streben alle Atome eine mit acht Elektronen besetzte äußere Schale an, da dieser Zustand, energetisch gesehen, besonders stabil ist. Diese bevorzugte Elektronenkonfiguration haben jedoch nur die Edelgase. Sie gehen daher nur unter besonderen Bedingungen mit anderen Elementen chemische Verbindungen ein. Alle anderen Elemente, die nur mehr oder weniger voll besetzte äußere Elektronenschalen aufweisen, versuchen durch Ausbildung einer chemischen Bindung zu anderen Elementen einen stabileren Zustand zu erreichen.

Allen **interatomaren Bindungen** liegt das Bestreben zugrunde, durch Vereinigung mit anderen Atomen eine den Edelgasen ähnliche Elektronenstruktur (**Edelgaskonfiguration**) zu erlangen. Damit erhält das Gesamtsystem einen insgesamt energieärmeren und damit stabileren Zustand.

Abhängig von der Art des Atoms und damit seines Elektronenbauplans, unterscheidet man die folgenden primären chemischen Bindungsarten:

- **Atombindung** (auch als Elektronenpaarbindung, kovalente oder homöopolare Bindung bezeichnet),
- **Ionenbindung** (auch als heteropolare Bindung bezeichnet),
- **Metallbindung**.

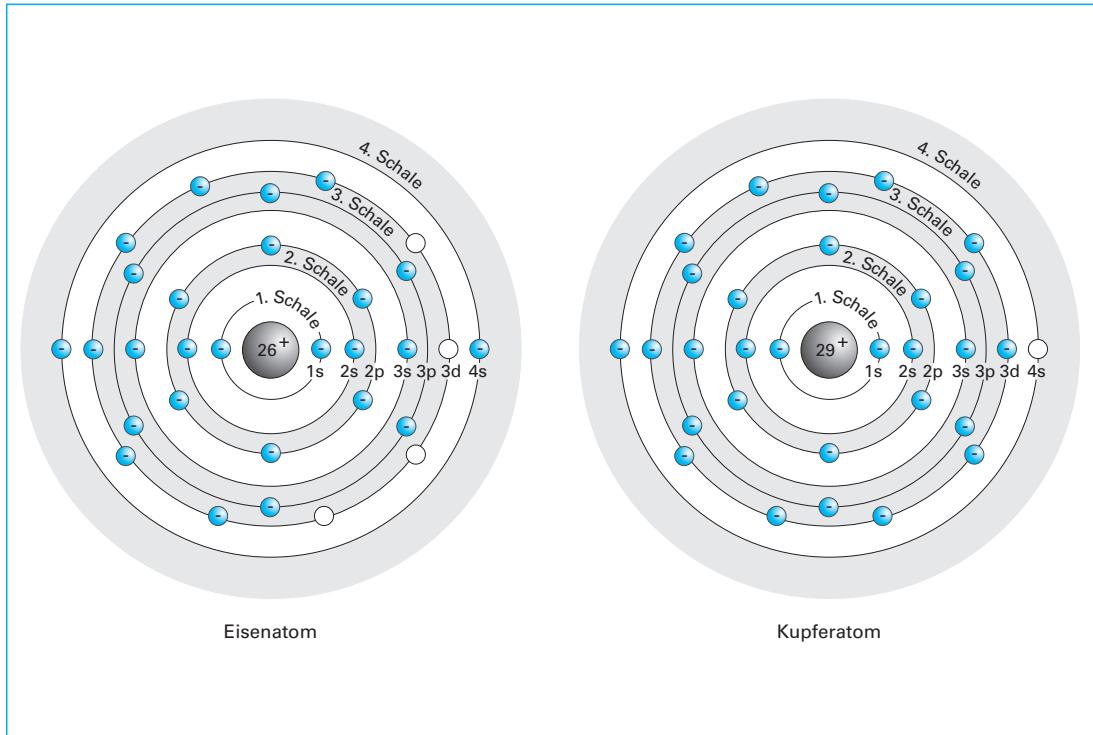
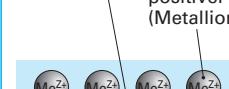


Bild 1.3: Atommodell eines Eisen- und eines Kupferatoms

Für die Metalle (*metallon*, griech.: Bergwerk) ist es typisch, dass sich nur relativ wenige (maximal 4) und zudem schwach gebundene Valenzelektronen (Elektronen auf der äußersten Schale) befinden. So hat beispielsweise das Eisenatom nur 2 Elektronen auf der äußersten (vierten) Schale, das Kupferatom sogar nur ein Valenzelektron (Bild 1.3). Eine nur mit wenigen Elektronen besetzte äußerste Schale ist, energetisch gesehen, sehr ungünstig. Beim Zusammenschluss mehrerer Metallatome bildet sich daher eine **Metallbindung** zwischen den Metallatomen aus, und zwar in der folgenden Weise: Jedes der gleichartigen Metallatome gibt seine wenigen Valenzelektronen ab. Dadurch entsteht jeweils ein positiv geladenes Metallion (Kation) bzw. ein **positiver Atomrumpf**. Künftig soll allerdings nicht mehr von einem positiven Atomrumpf oder von einem Metallion, sondern von einem Metallatom gesprochen werden. Dies ist zwar streng genommen nicht korrekt, jedoch allgemein üblich.



Durch Abgabe der Valenzelektronen gelangen die Metallatome zu einer vollbesetzten (oder zumindest weitgehend vollbesetzten) äußeren Schale und damit zu einem energetisch insgesamt stabileren Zustand. Die abgegebenen Elektronen sind nicht mehr bestimmten Atomen zugeordnet, sondern sie verschmelzen vielmehr zu einem gemeinsamen Elektronenorbital, das den gesamten Atomverband durchzieht. Man spricht von einem **Elektronengas**. Diese delokalisierten Elektronen sind zwischen den positiven Atomrumpfen mehr oder weniger frei beweglich. Der Zusammenhalt zwischen den Atomrumpfen, die Metallbindung also, kommt durch die elektrostatischen Anziehungskräfte zwischen den positiv geladenen Atomrumpfen und dem sich dazwischen befindlichen negativen Elektronengas.

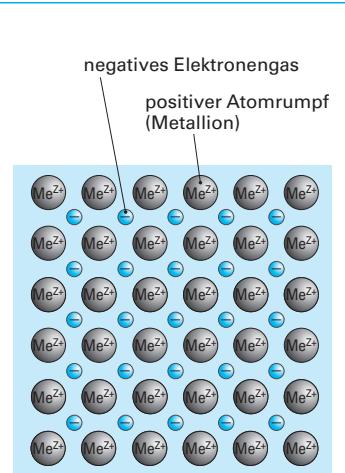


Bild 1.4: Aufbau einer Metallbindung nach dem Elektronengas-Modell

zustande. Die positiven Atomrümpe „schwimmen“ sozusagen im negativen Elektronengas, das als „Kitt“ wirkt (Bild 1.4).

Die Anziehungskräfte zwischen den positiven Atomrümpe und dem negativen Elektronengas sind allseits gerichtet und bewirken, dass die Metallrümpe nach allen Seiten von Nachbaratomen umgeben sind, zu denen jeweils der gleiche Abstand (Atomabstand) eingehalten wird. Auf diese Weise kommt es zur Ausbildung einer inneren Ordnung, dem **Raum-** oder **Kristallgitter** (Kapitel 1.3).

Diese Modellvorstellung, die als **Elektronengas-Modell** bezeichnet wird, wurde bereits im Jahre 1900 von **Drude** und **Lorentz** entwickelt. Wenngleich das neuzeitliche **Energiebänder-Modell** eine differenzierte Betrachtungsweise der Bindungsverhältnisse in Metallen erlaubt, so können dennoch mit dem einfachen und anschaulichen Elektronengas-Modell die im Rahmen dieses Buches zu besprechenden wichtigsten Eigenschaften der Metalle wie zum Beispiel die hohe elektrische Leitfähigkeit oder die gute plastische Verformbarkeit (Duktilität) auf einfache Weise erklärt werden.

1.3 Kristallgitter

Ein fester Körper ist, je nach Anordnung seiner Atome, amorph (*morphe*, griech.: gestaltlos) oder **kristallin** (*krystallos*, griech.: Eis) aufgebaut. Bei den Metallen findet man, sofern keine extrem hohen Abkühlgeschwindigkeiten aus dem schmelzflüssigen Zustand angewandt wurden, stets einen kristallinen Aufbau.

1.3.1 Elementarzelle und Kristallsystem

Zur Beschreibung eines Kristallgitters dienen einfache geometrische Körper, die so genannten **Elementarzellen**. Eine Elementarzelle ist dabei das kleinste geometrische Raumelement durch dessen Verschiebung um seine eigenen Kantenlängen man sich das Kristallgitter aufgebaut denken kann. Ein ganzer Kristall setzt sich demnach aus einer Vielzahl nach allen Raumrichtungen aneinander gesetzter Elementarzellen zusammen (Bild 1.5). Es ist dabei zweckmäßig, die Kristallstruktur als ein dreidimensionales Punktgitter aufzufassen, in dem jeder Gitterpunkt von einem Gitterbaustein (Atom, Ion oder Molekül) besetzt ist und jeder Gitterbaustein identische Nachbarbausteine hat.

Eine Elementarzelle wird durch die Atomabstände a , b und c sowie durch die Winkel α , β und γ zwischen den Kristallachsen gekennzeichnet. Die Achsschnitte a , b und c , also die Mittendistanzen der Atomrümpe, bezeichnet man als **Gitterparameter** oder **Gitterkonstante**. Ihre Größe liegt für die Mehrzahl der Metalle bei $2,5 \cdot 10^{-10} \text{ m} \dots 5 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ (Tabelle A2 im Anhang sowie Tabellen 1.3 bis 1.5), d.h. auf einen Millimeter kommen 2...4 Mio. Atome.

Bei allen in der Natur vorkommenden Kristallarten können 14 Elementarzellen, die so genannten **Bravais-Gitter** unterschieden werden, die sich 7 verschiedenen **Kristallsystemen** zuordnen lassen (Bild 1.6).

Neben den primitiven Strukturen, bei denen sich jeweils nur auf den Ecken der Elementarzelle ein Gitterpunkt (Atom, Molekül oder Ion) befindet, kann sich aus Symmetriegründen noch zusätzlich ein Gitterpunkt im Zentrum der Zelle (raumzentriert) oder auf einander gegenüberliegenden Flächenmitteln (flächenzentriert) befinden. Nicht für jedes Kristallsystem lassen sich ohne Verlust der Symmetrie alle Anordnungen verwirklichen.

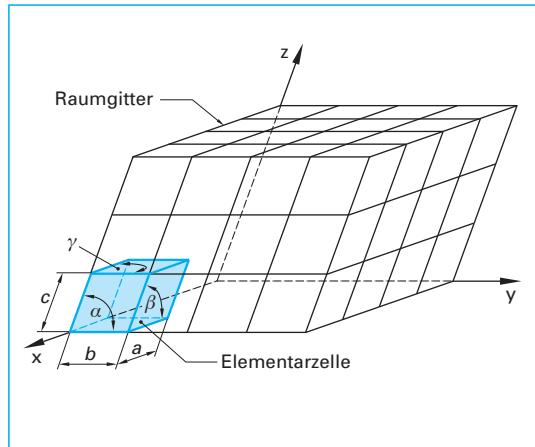


Bild 1.5: Elementarzelle und Raumgitter

Kristallsystem	Bestimmungsgrößen	Einfach	Basisflächenzentriert	Raumzentriert	Flächenzentriert
Triklin	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma$				
Monoklin	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq 90^\circ$ $\beta = \gamma = 90^\circ$				
Rhombisch (Orthorhombisch)	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$				
Tetragonal	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$				
Rhomboedrisch (Trigonal)	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$				
Hexagonal	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ$ $\gamma = 120^\circ$				
Kubisch	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$				

Bild 1.6: Elementarzellen der 14 Bravais-Gitter

1.3.2 Kubisch-primitives Kristallgitter (kp)

Die Anordnung der positiven Atomrümpfe im Kristallgitter kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Die einfachste Gitterart ist das kubisch-primitive Gitter (kurz: **kp-Gitter**), das bei Gebrauchsmetallen allerdings nicht auftritt. Dort unterscheidet man im Wesentlichen die folgenden Gitterarten:

- kubisch-raumzentriertes Gitter,
- kubisch-flächenzentriertes Gitter,
- hexagonales Gitter dichtester Packung.

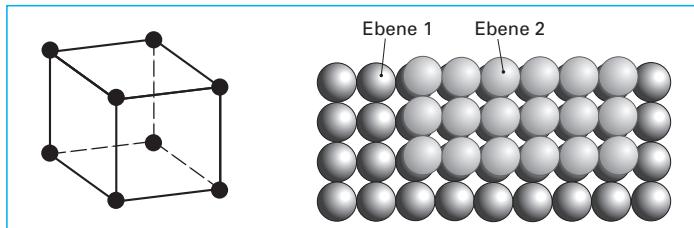
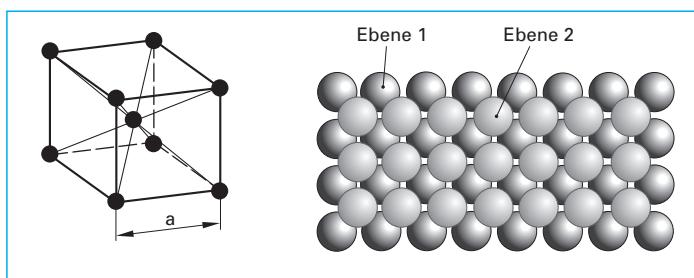


Bild 1.7: Punkt- und Kugelmodell des kubisch-primitiven Gitters

Bild 1.8: Punkt- und Kugelmodell des kubisch-raumzentrierten Kristallgitters (a = Gitterkonstante)

Beim kubisch-raumzentrierten Gitter (kurz: **krz-Gitter**) ordnen sich die Metallatome an den Ecken eines Würfels an. Zusätzlich ist auch die Würfelmitte mit einem Metallatom besetzt. Die Atome berühren sich auf den Raumdiagonalen des Würfels (Bild 1.8).

Im kubisch-raumzentrierten Gitter ist jedes Atom von 8 nächsten Nachbarn in gleicher Entfernung umgeben. Man nennt diese Zahl die **Koordinationszahl** des Kristallgitters. Da jedes Eckatom nur zu $\frac{1}{8}$, das Atom in der Raummitte jedoch vollständig einer Elementarzelle zugeordnet werden kann, enthält jede krz-Elementarzelle $8 \cdot \frac{1}{8} + 1 = 2$ Atome. Die **Packungsdichte**, also die Anzahl der Atome je Volumeneinheit (Raumnutzung), beträgt beim krz-Gitter 68 %.

Wichtige Gebrauchsmetalle mit kubisch-raumzentriertem Kristallgitter sind in Tabelle 1.3 zusammengestellt.

1.3.4 Kubisch-flächenzentriertes Kristallgitter (kfz)

Beim kubisch-flächenzentrierten Gitter (kurz: **kfz-Gitter**) sind nicht nur die Eckpunkte des Würfels, sondern auch die Mitten der Würfflächen mit Metallatomen besetzt. Die Raummitte des Würfels bleibt bei dieser Gitterstruktur dagegen unbesetzt. Die Atome berühren sich auf den Flächendiagonalen (Bild 1.9).

Im kfz-Gitter beträgt die Koordinationszahl 12, d.h. jedes Atom ist von 12 nächsten Nachbarn in gleicher Entfernung umgeben. Im kfz-Gitter gehören zu jeder Elementarzelle $8 \cdot \frac{1}{8} + 6 \cdot \frac{1}{2} = 4$ Atome. Die Packungsdichte des kfz-Gitters ist mit 74 % höher als die des krz-Gitters. Eine bessere Raumnutzung als 74 % ist allerdings mit gleich großen Metallatomen nicht mehr möglich. Man spricht daher von einem Kristallgitter dichtester Packung.

Wichtige Gebrauchsmetalle mit kfz-Kristallgitter sind in Tabelle 1.4 zusammengestellt.

Tabelle 1.3: Wichtige Gebrauchsmetalle mit krz-Kristallgitter sowie deren Gitterkonstanten¹⁾

Metall	Symbol	Temperatur in °C	Gitterkonstanten in 10^{-10} m		
			a	c	c/a
α-Eisen	α-Fe	< 911	2,867	—	—
δ-Eisen	δ-Fe	1392...1536	2,932	—	—
Chrom	Cr	—	2,884	—	—
Vanadium	V	—	3,024	—	—
Molybdän	Mo	—	3,147	—	—
Wolfram	W	—	3,165	—	—
Niob	Nb	—	3,301	—	—
Tantal	Ta	—	3,303	—	—
β-Titan	β-Ti	882...1668	3,320	—	—
β-Zirkonium	β-Zr	862...1862	3,616	—	—
Natrium	Na	—	4,291	—	—
Kalium	K	—	5,320	—	—

¹⁾ Gitterkonstanten gelten bei 20 °C mit Ausnahme von δ-Fe (1392 °C), β-Ti (882 °C) und β-Zr (862 °C)

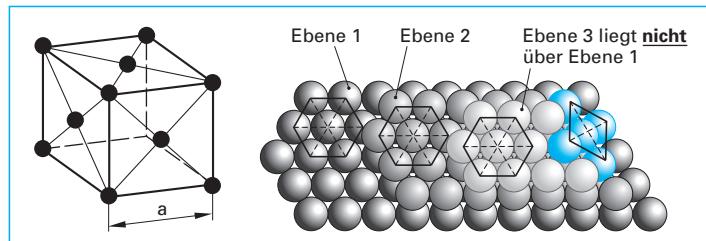


Bild 1.9: Punkt- und Kugelmodell des kubisch-flächenzentrierten Kristallgitters (kfz) (a = Gitterkonstante)

Tabelle 1.4: Wichtige Gebrauchsmetalle mit kfz-Kristallgitter sowie deren Gitterkonstanten¹⁾

Metall	Symbol	Temperatur in °C	Gitterkonstanten in 10^{-10} m		
			a	c	c/a
Nickel	Ni	—	3,524	—	—
β-Cobalt	β-Co	417...1492	3,560	—	—
Kupfer	Cu	—	3,615	—	—
γ-Eisen	γ-Fe	911...1392	3,646	—	—
Iridium	Ir	—	3,839	—	—
Platin	Pt	—	3,923	—	—
Aluminium	Al	—	4,049	—	—
Gold	Au	—	4,078	—	—
Silber	Ag	—	4,086	—	—
Blei	Pb	—	4,950	—	—

¹⁾ Gitterkonstanten gelten bei 20 °C mit Ausnahme von γ-Fe (911 °C) und β-Co (417 °C)

1.3.5 Hexagonales Gitter dichtester Packung (hdp)

Wenngleich die technisch wichtigsten Metalle in den kubischen Gittern (krz oder kfz) kristallisieren, so ist das hexagonale Gitter dichtester Packung (hdp-Gitter) dennoch für einige Metalle von Bedeutung.

Im hexagonalen Gitter dichtester Packung (kurz: **hdP-Gitter**) sind die Atome so angeordnet, dass sie eine regelmäßige, sechseckige Säule bilden, wobei sich zwischen der Deck- und der Grundfläche noch eine weitere Atomlage auf Lücke befindet (Bild 1.10).

Beim hdP-Gitter gehören zu jeder Elementarzelle $12 \cdot \frac{1}{6} + 2 \cdot \frac{1}{2} + 3 = 6$ Atome. Analog zum kfz-Gitter ist die Koordinationszahl im hdP-Gitter 12 und die Packungsdichte beträgt 74 %.

Wichtige Gebrauchsmetalle mit hdP-Kristallgitter sind in Tabelle 1.5 zusammengestellt.

Ein Vergleich der Kugelmodelle des kfz- und des hdP-Gitters zeigt, dass der Unterschied bei der Raumgitter lediglich in der Stapelfolge der Gitterebenen liegt. Während beim hdP-Gitter die Atome der 3. Ebene wieder über der ersten Ebene zu liegen kommen und damit die Stapelfolge ABABAB vorliegt, befinden sich beim kfz-Gitter erst die Atome der 4. Lage wieder über denen der 1. Lage. Die Stapelfolge im kfz-Gitter lautet demnach ABCABC.

1.3.6 Polymorphie

Eine Reihe von Metallen sind **polymorph** (vielgestaltig), d.h. sie treten abhängig von der Temperatur in unterschiedlichen Gitterstrukturen auf (man spricht von **allotropen Modifikationen**). Zu ihnen gehören Eisen, Titan, Cobalt, Zirkonium, Mangan und Zinn (Bild 1.11). Die verschiedenen Modifikationen eines Metalls werden durch kleine griechische Buchstaben (α , β , γ , usw.) gekennzeichnet, die man, durch einen Bindestrich getrennt, dem Namen oder dem chemischen Symbol des betreffenden Elements voranstellt, wie z.B. α -Eisen (oder α -Fe), β -Titan (oder β -Ti), usw.

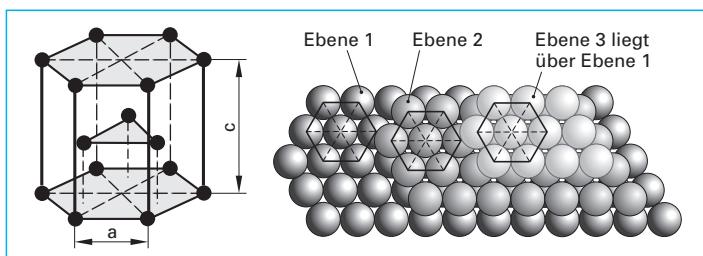


Bild 1.10: Punkt- und Kugelmodell des hexagonalen Gitters dichtester Packung (a und c = Gitterkonstanten)

Tabelle 1.5: Wichtige Gebrauchsmetalle mit hdP-Kristallgitter sowie deren Gitterkonstanten¹⁾

Metall	Chem. Symbol	Temperatur in °C	Gitterkonstanten in 10^{-10} m		
			a	c	c/a
Beryllium	Be	—	2,286	3,584	1,57
α -Cobalt	α -Co	< 417	2,508	4,070	1,62
Zink	Zn	—	2,665	4,947	1,86
Osmium	Os	—	2,735	4,319	1,58
α -Titan	α -Ti	< 882	2,950	4,679	1,59
Cadmium	Cd	—	2,979	5,617	1,89
Magnesium	Mg	—	3,209	5,211	1,62
α -Zirkonium	α -Zr	< 862	3,232	5,148	1,59

¹⁾ Gitterkonstanten gelten bei 20°C.

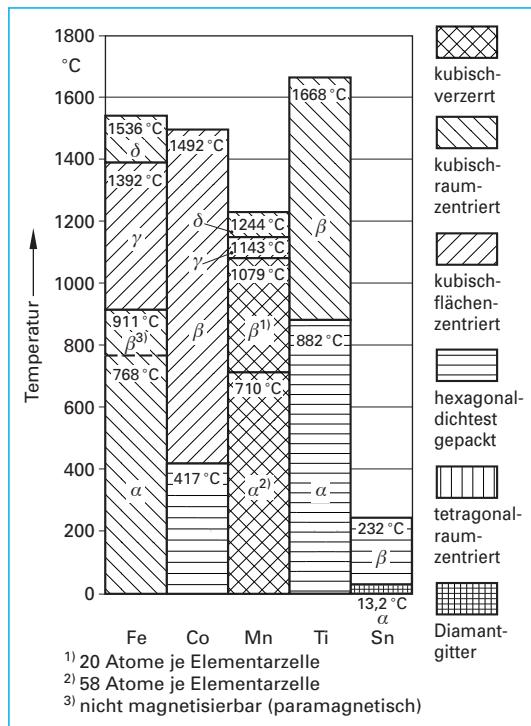


Bild 1.11: Allotrope Modifikationen verschiedener Gebrauchsmetalle

1.4 Entstehung eines Gefüges

Unter dem Begriff **Gefüge** versteht man das Zusammengefügtheit von Kristalliten (Körnern), Fremdphasen und Ausscheidungen in Metallen und Legierungen.

Bild 1.12 zeigt zunächst einen schematisierten Aufbau eines vielkristallinen Metallgefuges. Auf die Einzelheiten wird nachfolgend eingegangen.

In der Schmelze befinden sich die Metallatome und die freien Elektronen (abgegebene Valenzelektronen) infolge der vorangegangenen Wärmezufuhr in ungeordneter Bewegung. Die Schmelze hat daher keine innere Ordnung. Mit sinkender Temperatur rücken jedoch die Metallatome infolge der geringer werdenden Wärmebewegungen näher aneinander. Am Erstarrungspunkt werden schließlich die chemischen Bindungs Kräfte wirksam. Die freien Elektronen fixieren, von **Kristallisationskeimen** ausgehend, die Metallatome auf festen Gitterplätzen.

Der Kristallisationsvorgang lässt sich in zwei Abschnitte einteilen: Die **Keimbildung** und das sich (unter bestimmten Voraussetzungen) daran anschließende **Keimwachstum**. Kristallisationskeime können sich spontan durch eine Zusammenlagerung von Atomen bilden, man spricht dann von einem **Eigenkeim** bzw. von **homogener Keimbildung**. Diese kristallähnlichen Bereiche müssen jedoch eine Mindestgröße erreichen um weiter wachsen zu können, sonst werden sie in der Schmelze wieder aufgelöst. Auf die komplexen thermodynamischen Vorgänge der Eigenkeimbildung soll jedoch nicht näher eingegangen werden. In technisch reinen Metallen und Metalleigierungen findet die Kristallisation in der Regel an in der Schmelze befindlichen Fremdpartikeln wie zum Beispiel höherschmelzenden Verbindungen (Carbide, Nitride, Oxide) oder Legierungsbestandteilen statt, man spricht von **Fremdkeimen** bzw. von **heterogener Keimbildung**. Auch die Wand des die Schmelze umgebenden Gefäßes kann, ebenso wie die Fremdkeime, den Erstarrungsprozess erheblich erleichtern.

Ausgehend von den Kristallisationskeimen entstehen die einzelnen Kristallgitter zunächst völlig unabhängig voneinander, bis die gesamte Schmelze aufgebraucht ist, d.h. alle Metallatome an einem festen Gitterplatz fixiert sind. Die dabei entstehenden Kristallbereiche werden als **Kristallite** oder **Körner** bezeichnet (Bild 1.13a) und die Grenzen zwischen den Körnern als **Korngrenzen**. Korngrenzen bestehen aus losen, nicht in einem Gitter angeordneten Metallatomen und stellen Störungen im Gefügeaufbau dar (Kapitel 1.5.3.1). Die einzelnen Körner des entstehenden Metallgefuges haben in der Regel eine unterschiedliche räumliche Orientierung.

Entscheidend für die Korngröße des entstehenden Gefüges ist die Anzahl der Keime. Bei der in Metallschmelzen üblichen Erstarrung durch heterogene Keimbildung wird die Korngröße des

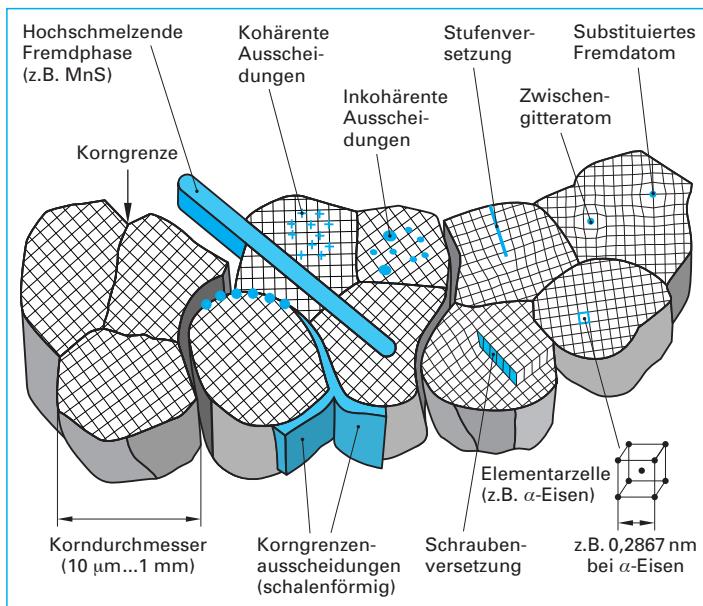


Bild 1.12: Aufbau eines vielkristallinen Metallgefuges

Information

Der Begriff „Kristallit“

Ein Kristallit oder Korn ist ein einzelner, räumlich ausgedehnter Bereich eines metallischen Werkstoffes (Kornhaufwerk) mit einheitlich ausgerichtetem Kristallgitter.

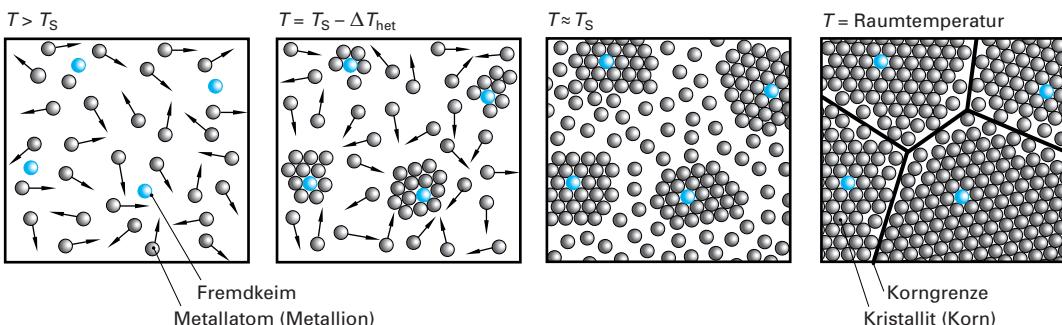
entstehenden Gefüges durch die Zahl der Keime und damit im Wesentlichen durch die Anzahl der in der Schmelze befindlichen Fremdpartikel bestimmt. Mit steigender Anzahl dieser Fremdpartikel setzt der Kristallisierungsvorgang an vielen Stellen gleichzeitig ein und es entsteht ein feinkörniges Gefüge. Je größer die Anzahl der Kristallisationskeime ist, desto mehr Körner wachsen gleichzeitig und desto feiner wird das Gefüge (Bild 1.13b). Sind dagegen wenige Keime in der Schmelze vorhanden, dann werden die wenigen Körner groß, bis sie aneinanderstoßen. Das Gefüge wird grobkörnig (Bild 1.13a).

Die **Korngröße** hat, bei gleicher chemischer Zusammensetzung, einen entscheidenden Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften eines Metalls:

- **Feinkörnige Gefüge** haben eine höhere Festigkeit (Kapitel 1.5.2.1), sowie eine bessere Zähigkeit und Verformbarkeit. Nach einer Verformung weisen feinkörnige Werkstoffe eine bessere Oberflächenqualität auf. Grobkörnige Werkstoffe werden häufig narbig.
- **Grobkörnige Gefüge** haben eine geringere Festigkeit, sie weisen eine geringere Zähigkeit auf und versprüden bei sinkender Temperatur schneller. Grobkörnige Gefüge sind allerdings besser zerspanbar.

Ein feinkörniges Gefüge kann durch Zugabe von Fremdkeimen wie Aluminium oder Seltene Erdenmetalle (z.B. Cer) hergestellt werden. Man spricht vom **Impfen** der Schmelze.

a) Wenige Fremdkeime: **grobkörniges Gefüge**



b) Viele Fremdkeime: **feinkörniges Gefüge**

→ verbesserte Festigkeit
→ verbesserte Zähigkeit

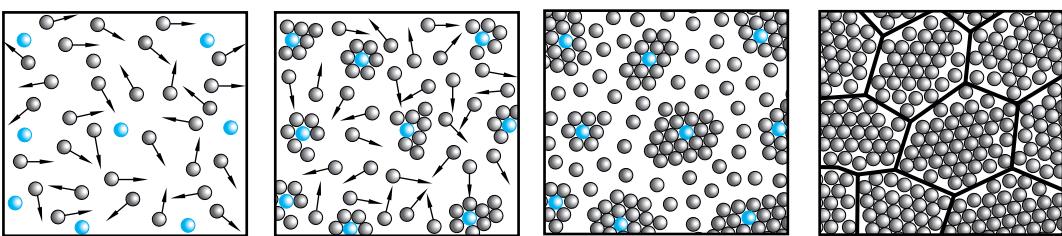


Bild 1.13: Zusammenhang zwischen Fremdkeimzahl in der Schmelze und Korngröße des Gefüges

a) Wenige Fremdkeime führen zu einem relativ groben Korn.

(ΔT_{het} = Unterkühlung der Schmelze; T_S = Schmelztemperatur)

b) Viele Fremdkeime führen zu einem feinen Korn mit verbesserten Eigenschaften.