



Bibliothek des technischen Wissens

Wärmebehandlung des Stahls

14. aktualisierte Auflage

Prof. Dr. Ing. Volker Läßle, Schorndorf

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

Europa-Nr.: 13039

Autor des Buches

Läpple, Volker Dr.-Ing., Professor Schorndorf

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 2024, 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.

14. Auflage 2025

Druck 5 4 3 2 1

Alle Drucke derselben Auflage sind parallel einsetzbar, da sie bis auf die Korrektur von Druckfehlern identisch sind.

ISBN 978-3-7585-1437-1

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

© 2025 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten
www.europa-lehrmittel.de

Umschlaggestaltung: braunwerbeagentur, 42477 Radevormwald
Satz: Punkt für Punkt GmbH · Mediendesign, 40549 Düsseldorf
Druck: Plump Druck und Medien 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 an deren 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 13. Auflage wurde in der vorliegenden **14. Auflage** eine Überprüfung der Aktualität der Inhalte und der zitierten Normen vorgenommen. 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 14. 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

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 (kp)	16
1.3.3	Kubisch-raumzentriertes Kristallgitter (krz)	16
1.3.4	Kubisch-flächenzentriertes Kristallgitter (kfz)	17
1.3.5	Hexagonales Gitter dichtester Packung (hdP)	17
1.3.6	Polymorphie	18
1.4	Entstehung eines Gefüges	19
1.5	Gitterbaufehler	21
1.5.1	Punktformige 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 Zweistoff- systemen (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 Legierungsphasen	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 (Legierungs- systeme mit einer kongruent schmelzenden Verbindung)	45

1.6.3.2	Zustandsdiagramme mit verdecktem Schmelzpunktmaximum (Legierungs- systeme mit einer inkongruent schmelzenden Verbindung)	46
1.6.4	Legierungssysteme mit Umwandlungen im festen Zustand	47
1.6.4.1	Legierungssysteme deren Kompo- nenten allotrope 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

2.1	Reines Eisen	50
2.2	Eisen-Kohlenstoff-Legierungen	51
2.2.1	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-Zustands- diagramm	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

3.1	Unlegierte Stähle mit Mn < 1% (Automatenstähle)	66
3.2	Unlegierte Stähle mit Mn > 1%, unlegierte Automatenstähle sowie legierte Stähle mit Legierungsgehalten der einzelnen Elemente < 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

4.1	Ziele einer Wärmebehandlung von Stählen	70
4.2	Einteilung der Wärmebehandlungsverfahren	70
4.3	Prinzip einer Wärmebehandlung	72

5 Glühen

5.1	Grobkornglühen (Hochglühen)	74
5.1.1	Sinn und Zweck des Grobkornglühens ...	74
5.1.2	Anwendung	75
5.1.3	Verfahren	75
5.1.4	Innere Vorgänge	75
5.1.5	Grobkornbildung	76
5.1.6	Nachteile des Grobkornglühens	77
5.2	Spannungsarmglühen	77
5.2.1	Eigenspannungen	77
5.2.1.1	Arten von Eigenspannungen	77
5.2.1.2	Entstehung von Eigenspannungen	77
5.2.1.3	Auswirkungen von Eigenspannungen	78
5.2.2	Sinn und Zweck	78
5.2.3	Anwendung	79
5.2.4	Verfahren	79
5.2.5	Innere Vorgänge	79
5.2.6	Anwendungsgrenzen	79
5.3	Diffusionsglühen (Homogenisierungsglühen)	80
5.3.1	Sinn und Zweck	80
5.3.2	Seigerungen und ihre Entstehung	80
5.3.3	Anwendung	83
5.3.4	Verfahren	83
5.3.5	Innere Vorgänge	83
5.3.6	Nachteile und Probleme des Diffusionsglühens	84
5.4	Rekristallisationsglühen	84
5.4.1	Sinn und Zweck	84
5.4.2	Anwendung	85
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 Umformgrad bei konstanter Glühtemperatur	88
5.4.6.2	Abhängigkeit der Korngröße von der Glühtemperatur bei konstantem Umformgrad	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
5.5	Normalglühen von Stählen	92
5.5.1	Anwendung	92
5.5.2	Verfahren und innere Vorgänge	93
5.5.3	Haltdauer beim Normalglühen	94

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

6 Härten

6.1	Sinn und Zweck des Härtens	98
6.2	Prinzip des Härtens	98
6.3	Härtetemperatur	99
6.4	Abkühlgeschwindigkeit und Gefügeausbildung	100
6.4.1	Umwandlungen in der Perlitstufe	101
6.4.1.1	Sehr langsame Abkühlung in der Perlitstufe	101
6.4.1.2	Beschleunigte Abkühlung in der Perlitstufe	102
6.4.2	Umwandlungen in der Bainitstufe	103
6.4.3	Umwandlungen in der Martensitstufe	105
6.5	Martensit	107
6.5.1	Grundlagen der Martensitbildung	107
6.5.2	Erscheinungsformen des Martensits	109
6.5.3	Kristallographie der Martensitbildung	110
6.5.5	Kritische Abkühlgeschwindigkeit	114
6.5.5.1	Unlegierte Stähle	115
6.5.5.2	Legierte Stähle	115
6.5.5.3	Zusammenfassung	116
6.6	Kohlenstofflöslichkeit des Austenits	117
6.7	Temperaturbereich der Martensitbildung	117
6.8	Restausenit und Tiefkühlung	119
6.9	Abschreckhärte	120
6.10	Härtesspannungen	121
6.11	Abschrecken und Abschreckmittel	124
6.11.1	Grundlagen des Abschreckvorgangs	124
6.11.2	Kenngrößen von Abschreckmitteln und ihre Bestimmung	124
6.11.3	Abschreckmittel	126
6.12	Zeit-Temperatur-Umwandlungsdiagramme (ZTU-Diagramme)	128
6.12.1	Zustandsdiagramm der unlegierten Stähle	128

6.12.2	Bedeutung der ZTU-Diagramme	129	7.1.5	Versprödungserscheinungen beim Anlassen von Stählen	167
6.12.3	Kontinuierliche ZTU-Diagramme	129	7.1.5.1	300°C-Versprödung	167
6.12.3.1	Aufbau kontinuierlicher ZTU-Diagramme	129	7.1.5.2	500°C-Versprödung (Anlassversprödung)	168
6.12.3.2	Ablesebeispiele	132	7.1.6	Volumenänderungen durch das Anlassen	169
6.12.3.3	Erstellung kontinuierlicher ZTU-Diagramme	132	7.1.7	Anlassschaubilder	170
6.12.4	Isotherme ZTU-Diagramme	133	7.1.8	Zusammenfassung Anlassen	170
6.12.4.1	Aufbau isothermer ZTU-Diagramme	134	7.2	Vergüten	171
6.12.4.2	Ablesebeispiele	134	7.2.1	Sinn und Zweck des Vergütens	171
6.12.4.3	Erstellung isothermer ZTU-Diagramme ..	135	7.2.2	Prinzip des Vergütens	172
6.12.5	ZTU-Diagramme übereutektoider Stähle	136	7.2.3	Innere Vorgänge beim Vergüten	172
6.12.6	Anwendungsgrenzen von ZTU-Diagrammen	138	7.2.4	Vergütungstiefe	173
6.12.7	Einfluss von Legierungselementen auf die Austenitumwandlung	138	7.2.5	Anlassschaubilder für das Vergüten	175
6.13	Zeit-Temperatur-Austenitisierungsdiagramme (ZTA-Diagramme)	140	7.2.6	Vergütungsstähle	175
6.13.1	Kontinuierliche ZTA-Diagramme	141	7.2.6.1	Verwendung von Vergütungsstählen	176
6.13.1.1	Austenitisieren untereutektoider Stähle	141	7.2.6.2	Normung von Vergütungsstählen	176
6.13.1.2	Austenitisieren übereutektoider Stähle ..	143	7.2.6.3	Legierungselemente in Vergütungsstählen	181
6.13.2	Isotherme ZTA-Diagramme	145	7.2.7	Sonderverfahren des Vergütens	182
6.13.2.1	Austenitisieren untereutektoider Stähle	145	7.2.7.1	Bainitisieren	182
6.13.2.2	Austenitisieren übereutektoider Stähle ..	145	7.2.7.2	Patentieren	184
6.13.3	Ermittlung und Genauigkeit von ZTA-Diagrammen	146	8	Verfahren des Oberflächenhärtens	
6.13.4	Praktische Hinweise für das Austenitisieren	146	8.1	Einteilung der Oberflächenhärtungsverfahren	186
6.14	Härteprüfverfahren	147	8.2	Randschichthärten	186
6.14.1	Einteilung der Härteprüfverfahren	147	8.2.1	Verfahren des Randschichthärtens	186
6.14.2	Härteprüfverfahren nach Brinell	148	8.2.1.1	Tauchhärten	187
6.14.3	Härteprüfverfahren nach Vickers	150	8.2.1.2	Flammhärten	188
6.14.4	Härteprüfverfahren nach Rockwell	152	8.2.1.3	Induktionshärten	189
6.14.5	Vergleich der Härteprüfverfahren	155	8.2.1.4	Laserstrahlhärten	192
6.14.6	Umwertung von Härtewerten	156	8.2.1.5	Elektronenstrahlhärten	192
6.15	Prüfung der Härtebarkeit – der Stirnabschreckversuch	157	8.2.1.6	Vergleich der Randschichthärtungsverfahren	193
7	Anlassen und Vergüten		8.2.2	Prüfgrößen beim Randschichthärten	194
7.1	Anlassen	160	8.2.3	Werkstoffe für das Randschichthärten ..	195
7.1.1	Sinn und Zweck des Anlassens	160	8.3	Einsatzhärten	197
7.1.2	Innere Vorgänge beim Anlassen	161	8.3.1	Einführung in das Einsatzhärten	197
7.1.3	Anlassen der unlegierten Stähle	164	8.3.2	Prinzip des Einsatzhärtens	197
7.1.3.1	Einfluss der Anlasstemperatur	164	8.3.3	Aufkohlen	198
7.1.3.2	Einfluss der Anlassdauer	164	8.3.3.1	Prinzip des Aufkohlens	198
7.1.4	Anlassen der legierten Stähle	165	8.3.3.2	Aufkohlungstiefe	199
7.1.4.1	Anlassen von Stählen mit nicht Carbid bildenden Elementen	166	8.3.3.3	Aufkohlen und Entkohlen	199
7.1.4.2	Anlassen von Stählen mit Carbid bildenden Elementen	166	8.3.3.4	Aufkohlungsmedien und Aufkohlungsverfahren	200
			8.3.4	Carbonitrieren	205
			8.3.4.1	Prinzip des Carbonitrierens	205
			8.3.4.2	Behandlungsmittel für das Carbonitrieren	206
			8.3.4.3	Verfahren des Carbonitrierens	207
			8.3.4.4	Vor- und Nachteile des Carbonitrierens ..	208
			8.3.5	Härten der Randschicht	209

8.3.5.1	Härtetemperatur	209
8.3.5.2	Oberflächenhärte	210
8.3.5.3	Härteverfahren	210
8.3.6	Einsatzhärtungstiefe	213
8.3.7	Tiefkühlen	213
8.3.8	Anlassen	214
8.3.9	Einsatzstähle	214
8.3.9.1	Eigenschaften von Einsatzstählen	214
8.3.9.2	Normung von Einsatzstählen	214
8.3.9.3	Legierungselemente in Einsatzstählen ...	216
8.4	Nitrieren und Nitrocarburieren	217
8.4.1	Einführung in das Nitrieren und Nitrocarburieren	217
8.4.2	Aufbau von Nitrierschichten	218
8.4.2.1	Verbindungsschicht	218
8.4.2.2	Diffusionsschicht	220
8.4.3	Härteverlaufskurven und Nitrierhärte tiefe	222
8.4.3.1	Härte der Verbindungsschicht	222
8.4.3.2	Härte der Diffusionsschicht	223
8.4.3.3	Nitrierhärte tiefe	223
8.4.4	Nitrierverfahren	224
8.4.4.1	Gasnitrieren	224
8.4.4.2	Plasmanitrieren	225
8.4.5	Nitrocarburierverfahren	226
8.4.5.1	Pulvernitrocarburiere n	227
8.4.5.2	Salzbadnitrocarburiere n	227
8.4.5.3	Gasnitrocarburiere n	228
8.4.5.4	Plasmanitrocarburiere n	228
8.4.6	Vergleich der Nitrier- und Nitrocarburiere nverfahren	229
8.4.7	Vorteile und Nachteile des Nitrierens und Nitrocarburiere n	229
8.4.8	Anwendung des Nitrierens und Nitrocarburiere n	231
8.4.9	Nitrierstähle	232
8.5	Borieren	233
8.5.1	Einführung in das Borieren	233
8.5.2	Aufbau und Dicke von Boridschichten	233
8.5.2.1	Verbindungsschicht	233
8.5.2.2	Diffusionszone	234
8.5.2.3	Schichtdicke beim Borieren	234
8.5.3	Härte werte und Härte verlaufskurven	235
8.5.4	Borierverfahren	235
8.5.4.1	Borieren in festen Medien	235
8.5.4.2	Borieren in flüssigen Medien	236
8.5.4.3	Borieren in gasförmigen Medien	236
8.5.5	Werkstoffe für das Borieren	236
8.5.6	Vor- und Nachteile des Borierens	237
8.5.7	Hinweise zur boriergerechten Gestaltung von Werkstücken	238
8.6	Weitere Oberflächenhärteverfahren (Metall-Diffusionsverfahren)	238

9	Verhaltensregeln und Vorsichtsmaßnahmen zum Schutz der Gesundheit	
10	Wärmebehandlungsangaben in technischen Produktspezifikationen	
10.1	Anwendung und Gültigkeit der Symbolik	242
10.2	Wort- und Zustandsangaben	242
10.2.1	Wärmebehandlungsverfahren	242
10.2.2	Oberflächenhärte	242
10.2.3	Härte tiefe	243
10.2.4	Aufkohlungstiefe (CD)	244
10.2.5	Verbindungsschichtdicke (CLT)	244
10.3	Kenngößen wärmebehandelter Werkstücke	245
10.3.1	Randschichthärten	245
10.3.2	Randschichtschmelzhärten	246
10.3.3	Einsatzhärten	247
10.3.4	Nitrieren und Nitrocarburiere n	248
10.4	Zeichnerische Darstellung von Wärmebehandlungsangaben	249
10.4.1	Wärmebehandlung des gesamten Werkstücks	249
10.4.2	Örtlich begrenzte Wärmebehandlung	249
10.4.3	Kennzeichnung von Härteprüfstellen	250
10.5	Wärmebehandlungsbilder	251
10.6	Wärmebehandlungsanweisung und Wärmebehandlungsplan	251
10.7	Zusammenfassung	252
11	Wärmebehandlung von Stahl in der Praxis	
11.1	Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramm	254
11.2	Normalglühen	254
11.2.1	Normalglühen des unlegierten Einsatzstahles C15E	255
11.2.2	Normalglühen des unlegierten Vergütungsstahles C45E	256
11.2.3	Normalglühen des unlegierten Vergütungsstahles C60E	258
11.3	Härten	258
11.3.1	Härten von C15E	259
11.3.2	Härten von C45E	260
11.3.3	Härten von C60E	263
11.4	Vergüten	264
11.4.1	Einfluss der Anlasstemperatur beim Vergüten	264
11.4.2	Vergüten des unlegierten untereutektoiden Einsatzstahles C15E	265

11.4.3	Vergüten des unlegierten untereutektoiden Vergütungstahles C45E	267
11.4.4	Vergüten des unlegierten untereutektoiden Vergütungstahles C60E	268
11.4.5	Vergüten legierter Vergütungstähle	270
11.5	Wärmebehandlungsfehler	274
11.5.1	Einfluss der Austenitisierungstemperatur und der Haltezeit auf das Gefüge	274
11.5.2	Gefüge bei zu niedriger Austenitisierungstemperatur	274
11.5.3	Gefüge bei zu hoher Austenitisierungstemperatur	276
11.5.4	Gefüge bei zu hoher Austenitisierungstemperatur und zu langer Haltezeit	279

12 Englische Fachausdrücke

Deutsch-Englisch	282
-------------------------------	------------

13 Aufgabensammlung

Aufgaben zu Kapitel 1	287
Aufgaben zu Kapitel 2	292
Aufgaben zu Kapitel 3	293
Aufgaben zu Kapitel 4	293
Aufgaben zu Kapitel 5	294
Aufgaben zu Kapitel 6	297
Aufgaben zu Kapitel 7	303
Aufgaben zu Kapitel 8	305
Aufgaben zu Kapitel 9	308
Aufgaben zu Kapitel 10	309
Ergänzende und weiterführende Literatur	314
Verzeichnis der zitierten Normen	317
Bildquellenverzeichnis	318
Sachwortverzeichnis	319

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 Metalles 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 zusammentreten.

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 Materieteilchen, entdeckte der englische Physiker **Joseph John Thomson** im Jahre 1897 Teilchen, die klei-

i Information

Atomvorstellung von Demokrit

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

i 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.

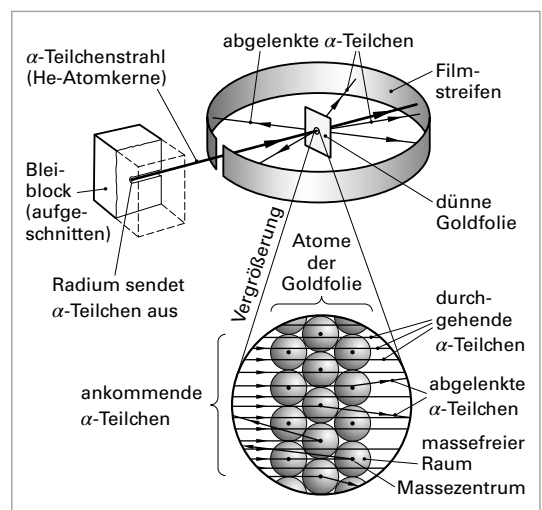


Bild 1.1: Blattgoldversuch von Rutherford (1911)

ner und leichter waren, als das leichteste Atom, das Wasserstoffatom. Diese 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 geschwärzt 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 100 000ste 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 Entladungsröhre 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 handelte. Die Existenz der Neutronen wurde allerdings bereits 1920 von Rutherford postuliert. Von **W. D. Harkins** wurde hierfür 1921 der Name Neutron vorgeschlagen.

Elektronen, Protonen und Neutronen sind **Elementarteilchen**, die am Atomaufbau beteiligt sind (Bild 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.

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
Ruhemasse ¹⁾	$9,11 \cdot 10^{-31}$ kg $= 0,00055 u$	$1,6725 \cdot 10^{-27}$ kg $= 1,00728 u$	$1,6748 \cdot 10^{-27}$ kg $= 1,00867 u$

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