

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 Sub- stitutionsatome	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 Legierungs- bildung	27
1.6.1	Zustandsdiagramme von Zweistoffsystemen (binäre Legierungssysteme).	28
1.6.1.1	Erstellung von Zustands- diagrammen.	28
1.6.1.2	Thermische Analyse reiner Metalle und Metalllegierungen .	28
1.6.1.3	Grundtypen binärer Zustands- diagramme.	29
1.6.1.4	Lesen binärer Zustands- diagramme	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	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 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 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	Verbindungsphasen (Zementit und ε -Carbid)	53
2.2.3	Stabile Phase (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 Phasen- gebiete	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 Automaten- stähle)	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 Legie- rungsgehalten mindestens eines Elements \geq 5%	67
3.4	Schnellarbeitsstähle	68
3.5	Zusatzsymbole	69

4 **Einführung in die Wärmebehand- lung der Stähle. 70**

4.1	Ziele einer Wärmebehandlung von Stählen	70
4.2	Einteilung der Wärme- behandlungsverfahren.	70
4.3	Prinzip einer Wärmebe- handlung	72

5 **Glühen 74**

5.1	Grobkornglühen (Hochglühen) . 74	74
5.1.1	Sinn und Zweck	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 Grobkorn- glühens	77

5.2	Spannungsarmglühen	77
5.2.1	Eigenspannungen	77
5.2.1.1	Arten von Eigenspannungen . . .	77
5.2.1.2	Entstehung von Eigen- spannungen	77
5.2.1.3	Auswirkungen von Eigen- spannungen	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 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
5.5	Normalglühen von Stählen	92
5.5.1	Anwendung	92
5.5.2	Verfahren und innere Vorgänge	93
5.5.3	Haltedauer beim Normal- glühen	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.	98
6.1	Sinn und Zweck des Härten.	98
6.2	Prinzip des Härten.	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
6.5.4	Elementarzelle des Martensits	113
6.5.5	Kritische Abkühlgeschwindigkeit.	115
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	Restaustenit 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
6.12.3	Kontinuierliche ZTU-Diagramme	129
6.12.3.1	Aufbau kontinuierlicher ZTU-Diagramme	129
6.12.3.2	Ablesebeispiele	131
6.12.3.3	Erstellung kontinuierlicher ZTU-Diagramme	132
6.12.4	Isotherme ZTU-Diagramme. .	133
6.12.4.1	Aufbau isothermer ZTU-Diagramme	134
6.12.4.2	Ablesebeispiele	134
6.12.4.3	Erstellung isothermer ZTU-Diagramme	135
6.12.5	ZTU-Diagramme über-eutektoider Stähle	136
6.12.6	Anwendungsgrenzen von ZTU-Diagrammen	137
6.12.7	Einfluss von Legierungselementen auf die Austenitumwandlung	138
6.13	Zeit-Temperatur-Austenitierungsdiagramme (ZTA-Diagramme)	140
6.13.1	Kontinuierliche ZTA-Diagramme	141
6.13.1.1	Austenitisieren unter-eutektoider Stähle	141
6.13.1.2	Austenitisieren über-eutektoider Stähle	143
6.13.2	Isotherme ZTA-Diagramme. .	145
6.13.2.1	Austenitisieren unter-eutektoider Stähle	145
6.13.2.2	Austenitisieren über-eutektoider Stähle	145
6.13.3	Ermittlung und Genauigkeit von ZTA-Diagrammen	146
6.13.4	Praktische Hinweise für das Austenitisieren.	146
6.14	Härteprüfverfahren	147
6.14.1	Einteilung der Härteprüfverfahren	147

6.14.2	Härteprüfverfahren nach Brinell	148
6.14.3	Härteprüfverfahren nach Vickers	150
6.14.4	Härteprüfverfahren nach Rockwell	152
6.14.5	Vergleich der Härteprüf- verfahren	155
6.14.6	Umwertung von Härtewerten	155
6.15	Prüfung der Härtebarkeit – der Stirnabschreckversuch	156

7 Anlassen und Vergüten 160

7.1	Anlassen.	160
7.1.1	Sinn und Zweck des Anlassens	160
7.1.2	Innere Vorgänge beim Anlassen	161
7.1.3	Anlassen der unlegierten Stähle	164
7.1.3.1	Einfluss der Anlass- temperatur	164
7.1.3.2	Einfluss der Anlassedauer	164
7.1.4	Anlassen der legierten Stähle .	165
7.1.4.1	Nicht carbidbildende Elemente	166
7.1.4.2	Carbidbildende Elemente	166
7.1.5	Versprödungserscheinungen beim Anlassen von Stählen . . .	167
7.1.5.1	300°C-Versprödung	167
7.1.5.2	500°C-Versprödung (Anlassversprödung)	168
7.1.6	Volumenänderungen durch das Anlassen	169
7.1.7	Anlassschaubilder	170
7.1.8	Zusammenfassung Anlassen. .	170
7.2	Vergüten	171
7.2.1	Sinn und Zweck des Vergütens	171
7.2.2	Prinzip des Vergütens	172
7.2.3	Innere Vorgänge beim Vergüten	172
7.2.4	Vergütungstiefe	173
7.2.5	Anlassschaubilder für das Vergüten	175
7.2.6	Vergütungsstähle	175
7.2.6.1	Verwendung von Vergütungsstählen	176
7.2.6.2	Normung von Vergütungsstählen	176

7.2.6.3	Legierungselemente in Vergütungsstählen	181
7.2.7	Sonderverfahren des Vergütens	182
7.2.7.1	Bainitisieren	182
7.2.7.2	Patentieren	184

8 Verfahren des Oberflächenhärtens . . 185

8.1	Einteilung der Oberflächenhärtungsverfahren	185
8.2	Randschichthärten	186
8.2.1	Verfahren des Randschichthärtens	186
8.2.1.1	Tauchhärten	187
8.2.1.2	Flammhärten	188
8.2.1.3	Induktionshärten	189
8.2.1.4	Laserstrahlhärten	192
8.2.1.5	Elektronenstrahlhärten	192
8.2.1.6	Vergleich der Randschichthärtungsverfahren	193
8.2.2	Prüfgrößen beim Randschichthärten	194
8.2.3	Werkstoffe für das Randschichthärten	195
8.3	Einsatzhärten	197
8.3.1	Einführung in das Einsatzhärten	197
8.3.2	Prinzip des Einsatzhärtens	197
8.3.3	Aufkohlen	198
8.3.3.1	Prinzip des Aufkohlens	198
8.3.3.2	Aufkohlungstiefe	199
8.3.3.3	Aufkohlen und Entkohlen	199
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	Härtungsverfahren	210
8.3.6	Einsatzhärtungstiefe	213
8.3.7	Tiefkühlen	213
8.3.8	Anlassen	213
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 Nitro- carburieren	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	Pulvernitrocarburieren	227
8.4.5.2	Salzbadnitrocarburieren	227
8.4.5.3	Gasnitrocarburieren	228
8.4.5.4	Plasmanitrocarburieren	228
8.4.6	Vergleich der Nitrier- und Nitrocarburierverfahren	229
8.4.7	Vorteile und Nachteile des Nitrierens und Nitro- carburierens	229
8.4.8	Anwendung des Nitrierens und Nitrocarburierens	231
8.4.9	Nitrierstähle	232

8.5	Borieren	233
8.5.1	Einführung in das Borieren . . .	233
8.5.2	Aufbau und die 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	Härtewerte 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 Oberflächenhärte- verfahren (Metall-Diffusionsverfahren) . .	238

9	Verhaltensregeln und Vorsichts- maßnahmen zum Schutz der Gesundheit	241
----------	--	-----