

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 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, Verbindungs- phasen und Intermetallische Phasen 42		
	1.6.2.1 Einteilung der Legierungs- phasen 42		
	1.6.2.2 Eigenschaften inter- metallischer Phasen 43		
	1.6.2.3 Einteilung der inter- metallischen Phasen 43		
	1.6.3 Zustandsdiagramme mit Verbindungsbildung 45		
	1.6.3.1 Zustandsdiagramme mit „offenem“ Schmelzpunkt- maximum 45		
	1.6.3.2 Zustandsdiagramme mit „verdecktem“ Schmelzpunkt- maximum 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-Zustands- diagramm 54		
	2.3.1 Erstarrungsformen von Eisen- Kohlenstoff-Legierungen 55		
	2.3.2 Aufbau des metastabilen Eisen-Kohlenstoff-Zustands- diagramms 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
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 Glühetemperatur	88
5.4.6.2	Abhängigkeit der Korngröße von der Glühetemperatur 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	6.11.2	Kenngrößen von Abschreck- mitteln und ihre Bestimmung	124
5.6.2	Verfahren	95	6.11.3	Abschreckmittel	126
5.6.3	Innere Vorgänge	96			
6	Härten	98	6.12	Zeit-Temperatur-Umwand- lungsdiagramme (ZTU-Dia- gramme)	128
6.1	Sinn und Zweck des Härtens	98	6.12.1	Zustandsdiagramm der unlegierten Stähle	128
6.2	Prinzip des Härtens	98	6.12.2	Bedeutung der ZTU-Diagramme	129
6.3	Härtetemperatur	99	6.12.3	Kontinuierliche ZTU- Diagramme	129
6.4	Abkühlgeschwindigkeit und Gefügeausbildung	100	6.12.3.1	Aufbau kontinuierlicher ZTU-Diagramme	129
6.4.1	Umwandlungen in der Perlitstufe	101	6.12.3.2	Ablesebeispiele	131
6.4.1.1	Sehr langsame Abkühlung in der Perlitstufe	101	6.12.3.3	Erstellung kontinuierlicher ZTU-Diagramme	132
6.4.1.2	Beschleunigte Abkühlung in der Perlitstufe	102	6.12.4	Isotherme ZTU-Diagramme ..	133
6.4.2	Umwandlungen in der Bainitstufe	103	6.12.4.1	Aufbau isothermer ZTU-Diagramme	134
6.4.3	Umwandlungen in der Martensitstufe	105	6.12.4.2	Ablesebeispiele	134
6.5	Martensit	107	6.12.4.3	Erstellung isothermer ZTU-Diagramme	135
6.5.1	Grundlagen der Martensitbildung	107	6.12.5	ZTU-Diagramme über- eutektoider Stähle	136
6.5.2	Erscheinungsformen des Martensits	109	6.12.6	Anwendungsgrenzen von ZTU-Diagrammen	137
6.5.3	Kristallographie der Martensitbildung	110	6.12.7	Einfluss von Legierungs- elementen auf die Austenitumwandlung	138
6.5.4	Elementarzelle des Martensits	113	6.13	Zeit-Temperatur-Austeniti- sierungsdiagramme (ZTA-Diagramme)	140
6.5.5	Kritische Abkühlgeschwin- digkeit	115	6.13.1	Kontinuierliche ZTA-Diagramme	141
6.5.5.1	Unlegierte Stähle	115	6.13.1.1	Austenitisieren unter- eutektoider Stähle	141
6.5.5.2	Legierte Stähle	115	6.13.1.2	Austenitisieren über- eutektoider Stähle	143
6.5.5.3	Zusammenfassung	116	6.13.2	Isotherme ZTA-Diagramme ..	145
6.6	Kohlenstofflöslichkeit des Austenits	117	6.13.2.1	Austenitisieren unter- eutektoider Stähle	145
6.7	Temperaturbereich der Martensitbildung	117	6.13.2.2	Austenitisieren über- eutektoider Stähle	145
6.8	Restaustenit und Tiefkühlung	119	6.13.3	Ermittlung und Genauigkeit von ZTA-Diagrammen	146
6.9	Abschreckhärte	120	6.13.4	Praktische Hinweise für das Austenitisieren	146
6.10	Härtesspannungen	121	6.14	Härteprüfverfahren	147
6.11	Abschrecken und Abschreckmittel	124	6.14.1	Einteilung der Härteprüf- verfahren	147
6.11.1	Grundlagen des Abschreck- vorgangs	124			

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 Anlassdauer	164
7.1.4	Anlassen der legierten Stähle ..	165
7.1.4.1	Anlassen von Stählen mit nicht Carbid bildenden Elementen ..	166
7.1.4.2	Anlassen von Stählen mit Carbid bildenden Elementen	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 Oberflächen- härteverfahren	185
8.2	Randschichthärten	186
8.2.1	Verfahren des Randschicht- härtens	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 Randschicht- härteverfahren	193
8.2.2	Prüfgrößen beim Rand- schichthärten	194
8.2.3	Werkstoffe für das Rand- schichthärten	195
8.3	Einsatzhärten	197
8.3.1	Einführung in das Einsatz- härten	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	Härteverfahren	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	8.6	Weitere Oberflächenhärteverfahren (Metall-Diffusionsverfahren) . .	238
8.3.9.3	Legierungselemente in Einsatzstählen	216	9	Verhaltensregeln und Vorsichtsmaßnahmen zum Schutz der Gesundheit	241
8.4	Nitrieren und Nitrocarburieren	217	10	Wärmebehandlungsangaben in Technischen Zeichnungen	242
8.4.1	Einführung in das Nitrieren und Nitrocarburieren	217	10.1	Anwendung und Gültigkeit der Symbolik	242
8.4.2	Aufbau von Nitrierschichten . .	218	10.2	Wort- und Zustandsangaben . .	242
8.4.2.1	Verbindungsschicht	218	10.2.1	Wärmebehandlungsverfahren .	242
8.4.2.2	Diffusionsschicht	220	10.2.2	Oberflächenhärte	242
8.4.3	Härteverlaufskurven und Nitrierhärte tiefe	222	10.2.3	Härte tiefe	243
8.4.3.1	Härte der Verbindungsschicht .	222	10.2.4	Aufkohlungstiefe (CD)	244
8.4.3.2	Härte der Diffusionsschicht . .	223	10.2.5	Verbindungsschichtdicke (CLT)	244
8.4.3.3	Nitrierhärte tiefe	223	10.3	Kenngößen wärmebehandelter Werkstücke	245
8.4.4	Nitrierverfahren	224	10.3.1	Randschichthärtungstiefe	245
8.4.4.1	Gasnitrieren	224	10.3.2	Schmelzhärtungstiefe	246
8.4.4.2	Plasmanitrieren	225	10.3.3	Einsatzhärtungstiefe	247
8.4.5	Nitrocarburierverfahren	226	10.3.4	Nitrierhärte tiefe	248
8.4.5.1	Pulvernitrocarburieren	227	10.4	Zeichnerische Darstellung von Wärmebehandlungsangaben . .	249
8.4.5.2	Salzbadnitrocarburieren	227	10.4.1	Wärmebehandlung des gesamten Werkstücks	249
8.4.5.3	Gasnitrocarburieren	228	10.4.2	Örtlich begrenzte Wärmebehandlung	249
8.4.5.4	Plasmanitrocarburieren	228	10.4.3	Kennzeichnung von Messstellen	250
8.4.6	Vergleich der Nitrier- und Nitrocarburierverfahren	229	10.5	Wärmebehandlungsbilder	251
8.4.7	Vorteile und Nachteile des Nitrierens und Nitrocarburierens	229	10.6	Wärmebehandlungsanweisung und Wärmebehandlungsplan .	251
8.4.8	Anwendung des Nitrierens und Nitrocarburierens	231	10.7	Zusammenfassung	252
8.4.9	Nitrierstähle	232	11	Englische Fachausdrücke	254
8.5	Borieren	233	12	Aufgabensammlung	259
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	Härte werte und Härteverlaufskurven	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			