

Günter Schulze

Die Metallurgie des Schweißens

Eisenwerkstoffe –
Nichteisenmetallische Werkstoffe

4., neu bearbeitete Auflage

 Springer

VDI

Die Metallurgie des Schweißens

Günter Schulze

Die Metallurgie des Schweißens

Eisenwerkstoffe - Nichteisenmetallische
Werkstoffe

4., neu bearbeitete Auflage

 Springer

Professor Dr.-Ing. Günter Schulze
dokschu@t-online.de

ISBN 978-3-642-03182-3 ISBN 978-3-642-03183-0 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-642-03183-0
Springer Heidelberg Dordrecht London New York

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Einbandentwurf: WMXDesign GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier

Springer ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.com)

Vorwort zur vierten Auflage

Ein Schwerpunkt der Neubearbeitung war die extrem mühsame und langwierige Anpassung an neue europäische (EURO-Normen) und internationale Normen, soweit sie für Deutschland Bedeutung haben bzw. wichtig sind. Man merkt den Normen vielfach an, dass sehr viele Nationen und Fachleute an ihrer Bearbeitung beteiligt sind. Daher ist eine gewisse Inkonsequenz in vielen Normen – vor allem der »wichtigen« – nicht zu übersehen. Außerdem ist die Vielzahl und der extrem gesteigerte Umfang der neuen bzw. der überarbeiteten Normen für den in der Praxis stehenden Ingenieur häufig verwirrend. Ihre Anwendung ist daher oft unangemessen und mühsam. Von der angestrebten Harmonisierung im europäischen Raum kann also noch längere Zeit nicht die Rede sein.

Neuere Normen sind bis etwa Juli 2009 berücksichtigt worden.

Neu hinzugekommen sind Hinweise zu

- verschiedenen neueren Stahlnormen (Baustähle nach DIN EN 10025, Vergütungsstähle nach DIN EN 10025-6 und DIN EN 10083, verschiedene hochlegierte Stähle nach DIN EN 10088),
- Zusatzwerkstoffen zum Schweißen von Stählen nach DIN EN ISO 2560. Hier wurde erstmals in der Schweißtechnik die Systematik des »Kohabitationsgesetzes« angewendet. Ebenso findet man Hinweise zu Zusatzwerkstoffen zum Schweißen von Aluminium und seinen Legierungen, Kupfer und Kupferlegierungen,
- Fülldrähten zum Schweißen für das UP-Verfahren und die Schutzgasschweißverfahren,
- sowie zu Zusatzwerkstoffen zum Auftragschweißen (DIN EN 14700).
- Unregelmäßigkeiten der Schweißverbindung und Empfehlungen für die Auswahl von Bewertungsgruppen nach DIN EN ISO 5817.

Außerdem wurden verschiedene sachliche Fehler, Schreibfehler und sprachliche Ungenauigkeiten sowie Formulierungsschwächen beseitigt. Schließlich wurde eine große Anzahl von Bildern und Tabellen um- bzw. neu gezeichnet.

Berlin, Juli 2009

G. Schulze

Vorwort zur ersten Auflage

Mit dem vorliegenden Buch sollen dem Studenten des Maschinenbaus wesentliche Grundlagen des ständig an Bedeutung zunehmenden Fügeverfahrens Schweißen in einer möglichst anschaulichen Form präsentiert werden. Darüber hinaus wird es auch dem bereits in der Praxis stehenden Ingenieur helfen, theoretische Grundlagen aufzufrischen und zu vertiefen. Wegen der Vielfalt und des Umfangs der beteiligten Wissensgebiete musste der Stoff auf wichtige Themen begrenzt werden. Die Auswahl ist damit naturgemäß subjektiv. Die Verfasser haben sich bemüht, in einem Band die erforderlichen Grundlagen in einer dem Studenten angemessenen und verständlichen Form darzustellen. Dabei wurden gewisse Redundanzen bewusst in Kauf genommen, die nach der Erfahrung der Autoren den Lernerfolg in vielen Fällen günstig beeinflussen.

Die Autoren strebten eine anschauliche und nicht übermäßig theoretische Darstellung an, die im Bereich der Bruchmechanik zwangsläufig nur teilweise gelang. Diesem Ziel dienen u. a. eine große Anzahl Skizzen, Schaubildern und Tabellen sowie ein sehr ausführliches und aufwändiges Sachwortverzeichnis. Gefügebildungen sind i. Allg. in einer Größe abgebildet, die ein Verständnis des Bildinhalts ermöglicht bzw. erleichtert. Die sehr ausführlichen Bildlegenden erlauben in den meisten Fällen eine sofortige Interpretation der Darstellung. Für weitergehende Informationen des Lesers dient ausgewähltes Schrifttum, das am Ende des jeweiligen Kapitels aufgeführt ist.

Als Problem während der Bearbeitung erwies sich die Umstellung der nationalen auf die häufig erheblich geänderten europäischen Normen. Aus redaktionellen Gründen konnten lediglich die bis Ende 1991 als Weißdruck erschienenen EURO-Normen berücksichtigt werden. Die häufig fehlenden Querverbindungen zu anderen (noch nationalen) Normen führten in einigen Fällen zu einer inkonsistenten Darstellungsweise.

Entsprechend der Tatsache, dass »der Werkstoff die Schweißbedingungen diktiert«, wird den werkstofflichen Grundlagen beim Schweißen der größte Platz eingeräumt. Erfahrungsgemäß bereiten die Besonderheiten der Schweißmetallurgie der verschiedenen (Stahl-)Werkstoffe dem Lernenden oft Schwierigkeiten. Um den Umfang des Buches in Grenzen zu halten, ist nur die Metallurgie der Stahlschweißung ausführlicher behandelt. Eine Beschränkung, die mancher Leser vielleicht bedauernd zur Kenntnis nehmen mag. Die Beschreibungen über das Verhalten der unlegierten, legierten und hochlegierten Stähle beim Schweißen sind um knappe, einführende Kapitel zur klassischen Werkstoffkunde ergänzt. In ihnen werden im wesentlichen einige zum Verständnis der Schweißmetallurgie der Stähle erforderliche wichtige Grundlagen besprochen, die in der vergleichbaren Literatur meist nicht mit dem wünschenswerten Bezug zur Schweißtechnik abgehandelt sind.

Gemäß der Zielsetzung wurde nur eine begrenzte Anzahl typischer schweißmetallurgischer Probleme behandelt, diese aber verhältnismäßig ausführlich. Dazu gehören die Schweiß-eignung, die Zusatzwerkstoffe, der Einfluss der Wärmequelle auf die Eigenschaften der Verbindung und die Schweißmetallurgie der wichtigsten Stähle.

Im Kapitel 5 werden wichtige technologische Einflussgrößen auf die Tragfähigkeit geschweißter Bauteile untersucht, weil die Auswahl der Schweißelemente neben der Gebrauchsfähigkeit hauptsächlich aufgrund einer ausreichenden Tragfähigkeit erfolgt. Unter Berücksichtigung der Grundprinzipien der Gestaltung gelingen dem Anwender so leichter »tragfähige« Entwürfe geschweißter Konstruktionen.

Aus der Vielzahl der gegenwärtig vorhandenen Berechnungsverfahren für geschweißte Bauteile sind die aktuellsten der beiden wichtigsten Vorschläge, die DIN 18800-1 (November 1990) und die DIN 15018-1 (November 1984), in der gebotenen Kürze dargestellt und ihre Anwendung mit einfachen Berechnungsbeispielen erklärt.

Die Darstellung der Prüfung von Schweißverbindungen und ihrer praktischen Anwendung im Kapitel 6 ist als Ergänzung zu den Grundkenntnissen der Werkstoffprüfung für den Studenten und Ingenieur und als Nachschlagewerk für den Schweißpraktiker gedacht. Wegen des begrenzten Umfangs wurden nur einige und besonders wichtige Prüfverfahren ausgewählt. Im wesentlichen sind dies Verfahren zur Werkstoff- und Strukturanalyse, die mechanisch-technologischen Prüfverfahren und schließlich einige bruchmechanische Prüfverfahren und Versagenskonzepte. Besonders hervorgehoben sind die Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen.

Die Vielfältigkeit und der Umfang der Werkstoffprüftechnik erforderten vielfach die Beantwortung von Fragen zu Details durch die Fachkollegen von Herrn *Dr. Krafka* in der Bundesanstalt für Materialprüfung und -forschung Berlin (BAM). Dem Präsidenten der BAM, Herrn Prof. *Dr. rer. nat. G. W. Becker* danken der Verfasser und der Herausgeber für die Erlaubnis, diesen Abschnitt schreiben und Bild- und Untersuchungsmaterial der BAM verwenden zu dürfen. Herr *Dr. Krafka* dankt besonders seinen Kollegen, den Herren Dipl.-Ing. *K. Wilken* und *Dr. V. Neumann*, die ihm Unterlagen überließen und für Diskussionen zur Verfügung standen. Frau *Ball* dankt er für die Anfertigung zahlreicher metallografischer Aufnahmen und Herrn Dipl.-Ing. *B. Abassi* für die Herstellung der Zeichnungen zu diesem Kapitel.

Ganz besonderen Dank schuldet der Herausgeber Herrn Dipl.-Ing. *I. Tanyildiz*, dem Geschäftsführer der OTA-Gruppe Berlin, für die großzügige finanzielle und sachliche Unterstützung dieses Projektes.

Berlin, April 1992

G. Schulze

InhaltHäufig benutzte Symbole
AbkürzungenXVIII
XX

1	Grundlagen der Werkstoffkunde und der Korrosion	1
1.1	Schweißtechnik erfordert die Werkstoffkunde	1
1.2	Aufbau metallischer Werkstoffe	2
1.2.1	Bindungsformen der Metalle	2
1.2.1.1	Metallische Bindung	4
1.2.1.2	Ionenbindung (heteropolare Bindung)	5
1.2.1.3	Atombindung (kovalente Bindung)	5
1.2.2	Gitteraufbau der Metalle	6
1.2.2.1	Gitterbaufehler (Realkristalle)	7
1.2.3	Gefüge, Korn, Kristallit, Korngröße	12
1.3	Mechanische Eigenschaften der Metalle	15
1.3.1	Verformungsvorgänge in Idealkristallen	15
1.3.2	Verformungsvorgänge in technischen Metallen	16
1.3.3	Verfestigung der Metalle	18
1.3.4	Einfluss der Korngrenzen	19
1.4	Phasenumwandlungen	22
1.4.1	Phasenumwandlung flüssig-fest	24
1.4.1.1	Primärkristallisation von (reinen) Metallen	24
1.4.1.2	Primärkristallisation von Legierungen	27
1.4.2	Phasenumwandlungen im festen Zustand	30
1.4.2.1	Diffusionskontrollierte Phasenumwandlungen	32
	Ausscheidungsumwandlung	32
	Ordnungsumwandlung	33
	Massivumwandlung	33
	Polymorphe Umwandlung	34
1.4.2.2	Diffusionslose Phasenumwandlungen (Martensitbildung)	34
1.5	Thermisch aktivierte Vorgänge	38
1.5.1	Diffusion	38
1.5.1.1	Nichtstationäre Diffusionsvorgänge	40
1.5.2	Erholung und Rekristallisation	42
1.5.3	Warmverformung	45
1.6	Grundlagen der Legierungskunde	46
1.6.1	Aufbau und Eigenschaften der Phasen	46
1.6.1.1	Mischkristalle	46
	Substitutionsmischkristalle	46
	Einlagerungsmischkristalle	48

1.6.1.2	Intermediäre Verbindungen	48
1.6.2	Zustandsschaubilder	49
1.6.2.1	Zustandsschaubild für vollkommene Löslichkeit im flüssigen und festen Zustand	50
1.6.2.2	Eutektische Systeme	51
1.6.2.3	Systeme mit begrenzter Löslichkeit	53
1.6.2.4	Systeme mit intermediären Phasen	53
1.6.2.5	Systeme mit Umwandlungen im festen Zustand	55
1.6.3	Nichtgleichgewichtszustände	55
1.6.3.1	Kristallseigerung	55
1.6.3.2	Entartetes Eutektikum	57
1.6.4	Aussagefähigkeit und Bedeutung der Zustandsschaubilder für das Schweißen	57
1.6.4.1	Abschätzen des Schweißverhaltens	57
1.6.4.2	Mechanische Güterwerte	58
1.6.5	Dreistoffsysteme	59
1.6.5.1	Ternäre Schaubilder in ebener Darstellung	61
	Isothermische Schnitte	61
	Vertikalschnitte	62
	Quasibinäre Schnitte	62
1.7	Grundlagen der Korrosion	63
1.7.1	Definitionen und Begriffe	64
1.7.2	Elektrochemische Vorgänge	65
1.7.3	Korrosionsmechanismen in wässrigen Lösungen	68
1.7.3.1	Wasserstoffkorrosion (Säurekorrosion)	69
1.7.3.2	Sauerstoffkorrosion	70
1.7.3.3	Das Korrosionsverhalten beeinflussende Faktoren	71
	Ionenkonzentration	71
	Sauerstoffgehalt	74
	Elektrolyttemperatur	75
	Strömungsgeschwindigkeit	76
	Medienkonzentration	77
1.7.4	Elektrochemische Polarisierung	77
1.7.4.1	Stromdichte-Potenzial-Kurven	78
1.7.4.2	Aktivierungspolarisation	78
1.7.4.3	Konzentrationspolarisation	80
1.7.5	Passivität	81
1.7.6	Korrosionsarten	83
1.7.6.1	Korrosionsarten ohne mechanische Beanspruchung	83
1.7.6.1.1	Kontaktkorrosion	84
1.7.6.1.2	Lochkorrosion (Lochfraß)	84
1.7.6.1.3	Spaltkorrosion (Berührungskorrosion)	86
1.7.6.1.4	Selektive Korrosion	87
1.7.6.1.5	Korrosionsvorgänge in besonderen Umgebungen	88
	Atmosphärische Korrosion	88
	Mikrobiologische Korrosion	90
1.7.6.2	Korrosionsarten mit mechanischer Beanspruchung	91
1.7.6.2.1	Spannungsrissskorrosion (SpRK)	91
1.7.6.2.2	Kavitation(skorrosion)	93
1.7.6.2.3	Erosion(skorrosion)	94
1.7.6.2.4	Reibkorrosion (»Fressen«)	94

1.7.7	Gestaltungsrichtlinien; Werkstoffwahl	94
1.7.7.1	Spalt-, Berührungskorrosion	98
1.7.7.2	Konzentrationselemente	98
1.7.7.3	Wasserlinienkorrosion, atmosphärische Korrosion	98
1.7.7.4	Kontaktkorrosion	99
1.7.7.5	Spannungsrissskorrosion (SpRK)	99
1.7.7.6	Besonderheiten beim Schweißen	100
1.7.8	Hinweise zum Korrosionsschutz	101
1.7.8.1	Aktive Schutzverfahren	101
	Inhibitoren	101
	Kathodischer Korrosionsschutz	103
	Anodischer Korrosionsschutz	105
1.7.8.2	Passive Schutzverfahren	106
	Organische Beschichtungen	106
	Anorganische Überzüge	106
	Metallische Überzüge	107
1.8	Aufgaben zu Kapitel 1	110
1.9	Schrifttum	121
2	Stähle – Werkstoffgrundlagen	123
2.1	Allgemeines	123
2.2	Einteilung der Stähle	124
2.3	Stahlherstellung	125
2.3.1	Erschmelzungsverfahren	125
2.3.1.1	Sekundärmetallurgie	128
2.3.2	Vergießungsverfahren; Desoxidieren	130
2.3.2.1	Vergießen und Erstarren des Stahles	131
2.3.2.2	Unberuhigt vergossener Stahl; Kennzeichen FU (U)	132
2.3.2.3	Beruhigt vergossener Stahl; Kennzeichen (R)	132
2.3.2.4	Besonders beruhigt vergossener Stahl; Kennzeichen FF (RR)	133
2.4	Das Eisen-Kohlenstoff-Schaubild (EKS)	133
2.5	Die Wärmebehandlung der Stähle	136
2.5.1	Glühbehandlungen	138
2.5.1.1	Spannungsarmglühen	138
2.5.1.2	Normalglühen	139
2.5.2	Härten und Vergüten	140
2.5.2.1	Härten	140
2.5.2.2	Vergüten	143
2.5.3	Die Austenitumwandlung im ZTU- und ZTA-Schaubild	145
2.5.3.1	ZTU-Schaubilder für kontinuierliche Abkühlung	148
2.5.3.2	ZTU-Schaubilder für isothermische Wärmeführung	150
2.5.3.3	Möglichkeiten und Grenzen der ZTU-Schaubilder	150
2.5.3.4	Anwendbarkeit der ZTU-Schaubilder auf Schweißvorgänge	152
	Allgemeines Verfahren	154

	Isothermisches Schweißen	154
	Stufenhärtungsschweißen	155
2.5.3.5	ZTA-Schaubilder	155
	Isothermische ZTA-Schaubilder	156
	Kontinuierliche ZTA-Schaubilder	157
2.6	Festigkeitserhöhung metallischer Werkstoffe	157
2.6.1	Prinzip der Festigkeitserhöhung	157
2.6.2	Abschätzen der maximalen Festigkeit	158
2.6.2.1	Theoretische Schubfestigkeit	158
2.6.2.2	Theoretische Kohäsionsfestigkeit	159
2.6.3	Methoden zum Erhöhen der Festigkeit	159
2.6.3.1	Kaltverfestigung	159
2.6.3.2	Mischkristallverfestigung	160
2.6.3.3	Ausscheidungshärtung	161
2.6.3.4	Korngrenzenhärtung	165
2.6.3.5	Martensithärtung	165
2.6.3.6	Thermomechanische Behandlung	167
2.7	Unlegierte und (niedrig-)legierte Stähle	167
2.7.1	Wirkung der Legierungselemente	167
2.7.2	Unlegierte Baustähle nach DIN EN 10025-2	168
2.7.3	Stähle für den Maschinen- und Fahrzeugbau	171
2.7.3.1	Vergütungsstähle	174
2.7.3.2	Einsatzstähle	175
2.7.4	Warmfeste Stähle	177
2.7.5	Kaltzähe Stähle	182
2.7.6	Feinkornbaustähle	184
2.7.6.1	Normalgeglühte Feinkornbaustähle	188
	Terrassenbruch	189
2.7.6.2	Thermomechanisch gewalzte Feinkornbaustähle	190
	Metallkundliche Grundlagen; Stahlherstellung	191
	Eigenschaften und Verarbeitung	192
2.7.6.3	Vergütete Feinkornbaustähle	197
2.8	Korrosionsbeständige Stähle	200
2.8.1	Erzeugen und Erhalten der Korrosionsbeständigkeit	200
2.8.2	Korrosionsverhalten der Stähle in speziellen Medien	202
	Korrosion in Wässern	202
	Korrosion durch chemischen Angriff	202
2.8.3	Werkstoffliche Grundlagen	203
2.8.3.1	Die Zustandsschaubilder Fe-Cr, Fe-Ni	203
2.8.3.2	Das Zustandsschaubild Fe-Cr-Ni	204
2.8.3.3	Einfluss wichtiger Legierungselemente	205
	Nickel	205
	Kohlenstoff	206
	Stickstoff	206
	Molybdän	207
	Silicium	207
	Wasserstoff	207
2.8.3.4	Ausscheidungs- und Entmischungsvorgänge	208
2.8.3.4.1	Interkristalline Korrosion (IK)	208

	Gegenmaßnahmen	210
2.8.3.4.2	Sigma-Phase (σ -Phase)	210
2.8.3.4.3	475 °C-Versprödung	211
2.8.4	Einteilung und Stahlsorten	214
2.8.4.1	Martensitische Chromstähle	215
2.8.4.2	Ferritische Chromstähle	215
2.8.4.3	Austenitische Chrom-Nickel-Stähle	217
	Stickstofflegierte austenitische Stähle	220
2.8.4.4	Austenitisch-ferritische Stähle (Duplexstähle)	221
2.9	Aufgaben zu Kapitel 2	224
2.10	Schrifttum	235
3	Einfluss des Schweißprozesses auf die Eigenschaften der Verbindung	237
3.1	Schweißbarkeit – Begriff und Definition	237
3.1.1	Schweißeignung	238
3.1.2	Schweißsicherheit	238
3.1.3	Schweißmöglichkeit	238
3.1.4	Bewertung und Folgerungen	239
3.2	Schweißeignung der Stähle	239
3.2.1	Unlegierte Stähle	239
3.2.1.1	Erschmelzungs- und Vergießungsart	239
3.2.1.2	Chemische Zusammensetzung	240
3.2.2	Legierte Stähle	243
3.3	Wirkung der Wärmequelle	244
3.3.1	Temperatur-Zeit-Verlauf	245
3.3.2	Eigenspannung; Schrumpfung, Verzug	249
3.3.2.1	Querschrumpfung	252
3.3.2.2	Winkelschrumpfung	252
3.3.2.3	Längsschrumpfung	253
3.3.2.4	Hauptinflüsse auf Schrumpfungen und Spannungen	253
	Wärmemenge und Schweißverfahren	253
	Werkstoffeinfluss	254
	Konstruktionseinfluss	254
3.3.3	Metallurgische Wirkungen des Temperatur-Zeit-Verlaufs	254
3.3.3.1	Sauerstoff	256
3.3.3.2	Stickstoff	257
3.3.3.3	Wasserstoff	258
3.4	Das Sprödbruchproblem	261
3.4.1	Werkstoffmechanische Grundlagen	261
3.4.2	Probleme konventioneller Berechnungskonzepte	263
3.4.3	Sprödbruchbegünstigende Faktoren	265
3.4.3.1	Werkstoffliche Faktoren	266
3.4.3.2	Konstruktive Faktoren	267
3.4.4	Maßnahmen zum Abwenden des Sprödbruchs	268

3.5	Fehler in der Schweißverbindung	268
3.5.1	Metallurgische Fehler	269
3.5.1.1	Die Wirkung der Gase	270
	Verhindern der Gasaufnahme	271
3.5.1.2	Fehler beim Schweißbeginn und Schweißende	271
3.5.1.3	Probleme des Einbrands	273
3.5.1.4	Einschlüsse; Schlacken	274
3.5.1.5	Zündstellen	275
3.5.1.6	Rissbildung im Schweißgut und in der WEZ	276
3.5.2	Bewertung der Fehler	286
3.6	Aufgaben zu Kapitel 3	289
3.7	Schrifttum	296
4	Schweißmetallurgie der Eisenwerkstoffe	299
4.1	Aufbau der Schweißverbindung	299
4.1.1	Vorgänge im Schweißbad	300
4.1.1.1	Die Primärkristallisation der Schweißschmelze	300
4.1.1.2	Massentransporte im Schweißbad	307
4.1.2	Werkstoffliche Vorgänge in der Wärmeeinflusszone	309
4.1.3	Die WEZ in Schweißverbindungen aus umwandlungsfähigen Stählen	310
4.1.3.1	Der Einfluss des Nahtaufbaus; Einlagen-, Mehrlagentechnik	316
4.1.3.2	Eigenschaften und mechanische Gütewerte	318
	Härteverteilung	319
	Mechanische Eigenschaften des Schweißguts	322
	Mechanische Eigenschaften der Wärmeeinflusszone	325
4.1.3.3	Vorwärmen der Fügeiteile	327
4.1.3.4	Einfluss der Stahlherstellungsart und der chemischen Zusammensetzung	333
	Seigerungen	333
	Alterungsprobleme	334
4.1.4	Verbinden unterschiedlicher Werkstoffe	334
4.2	Zusatzwerkstoffe und Hilfsstoffe zum Schweißen unlegierter Stähle und von Feinkornbaustählen	336
4.2.1	Konzepte der Normung	336
4.2.2	Metallurgische Betrachtungen	337
4.2.3	Schweißzusätze für Stähle mit einer Mindeststreckgrenze bis 500 N/mm ²	337
4.2.3.1	Umhüllte Stabelektroden für das Lichtbogenhandschweißen (DIN EN ISO 2560)	337
4.2.3.1.1	Aufgaben der Elektrodenumhüllung	338
4.2.3.1.2	Metallurgische Grundlagen	339
4.2.3.1.3	Eigenschaften der wichtigsten Stabelektroden	341
	Sauer-umhüllte Stabelektroden (A)	341
	Rutil-umhüllte Stabelektroden (R)	342
	Basisch-umhüllte Stabelektroden (B)	342
	Zellulose-umhüllte Stabelektroden (C)	344

4.2.3.1.4	Bedeutung des Wasserstoffs	344
4.2.3.1.5	Normung der umhüllten Stabelektroden	349
4.2.3.2	Schweißzusätze für das Schutzgasschweißen	353
	WIG-Schweißen	353
	MSG-Schweißen	355
4.2.3.3	Schweißzusätze für das UP-Schweißen	363
4.2.3.3.1	Drahtelektroden	363
4.2.3.3.2	Schweißpulver	366
	Schmelzpulver	368
	Agglomerierte Pulver	368
	Metallurgisches Verhalten der Schweißpulver	369
4.2.4	Schweißzusätze für Stähle mit einer Mindeststreckgrenze über 500 N/mm ²	374
4.3	Schweißen der wichtigsten Stahlsorten	374
4.3.1	Unlegierte niedriggekohlte C-Mn-Stähle	374
4.3.1.1	Baustähle nach DIN EN 10025-2	379
	Gütegruppen (Stahlgütegruppen)	382
	Wahl der Gütegruppe	383
4.3.2	Feinkornbaustähle; normalgeglüht und thermomechanisch behandelt	384
4.3.2.1	Allgemeine Konzepte	384
4.3.2.2	Einfluss der Abkühlbedingungen auf die mechanischen Gütewerte der Verbindung	385
4.3.2.3	Fertigungstechnische Hinweise	389
	Nahtvorbereitung	389
	Wärmebehandlung	390
	Schweißtechnologie	392
	Risserscheinungen	392
4.3.2.4	Schweißzusatzwerkstoffe	393
	Stabelektroden	393
	Drahtelektroden; Schweißpulver (UP-Schweißen)	395
	Drahtelektroden; Schutzgase (MSG-Schweißen)	398
4.3.3	Feinkornbaustähle; vergütet	398
4.3.4	Höhergekohlte Stähle	402
4.3.5	Warmfeste Stähle	406
4.3.5.1	Ferritische Stähle (ferritisch-perlitisch)	407
4.3.5.2	Ferritische Stähle (ferritisch-bainitisch)	407
4.3.5.3	Ferritische Stähle (martensitisch)	409
4.3.5.4	Austenitische Stähle	411
4.3.5.5	Versprödungs- und Rissmechanismen	411
	Wiedererwärmungsriß (Ausscheidungsriß)	411
	Anlassversprödung	412
4.3.6	Kaltzähe Stähle	413
4.3.7	Korrosionsbeständige Stähle	414
4.3.7.1	Einfluss der Verarbeitung auf das Korrosionsverhalten	414
4.3.7.2	Konstitutions-Schaubilder	417
4.3.7.3	Martensitische Chromstähle	422
4.3.7.4	Ferritische und halferritische Stähle	425
4.3.7.5	Austenitische Chrom-Nickel-Stähle	431
	Primärkristallisation	433
	Heißrißbildung	433

	Messerlinienkorrosion	436
	Metallurgie des Schweißens	437
4.3.7.6	Austenitisch-ferritische Stähle (Duplexstähle)	440
4.3.8	Verbinden/Auftragen unterschiedlicher Werkstoffe	446
4.3.8.1	Austenit-Ferrit-Verbindungen	446
4.3.8.2	Schweißplattieren	448
4.3.8.3	Schweißpanzern	451
4.4	Eisen-Gusswerkstoffe	456
4.4.1	Stahlguss (G, GS, GE, GX)	456
4.4.1.1	Stahlguss für allgemeine Verwendung	456
	Fertigungsschweißen	457
	Instandsetzungsschweißen	460
	Konstruktionsschweißen	460
4.4.1.2	Hochfester schweißgeeigneter Stahlguss	460
4.4.1.3	Legierter Stahlguss	462
4.4.2	Gusseisen (EN-GJL, alt: GG; EN-GJS, alt: GGG; ISO/JV, alt: GJV)	462
4.4.2.1	Gusseisen mit Lamellengrafit (EN-GJL, alt: GG)	463
	Artgleiches Schweißen (Gusseisenwarmschweißen)	466
	Artfremdes Schweißen (Gusseisenkaltschweißen)	467
4.4.2.2	Gusseisen mit Kugelgrafit (EN-GJS, alt: GGG)	467
	Artgleiches/artähnliches Schweißen	471
	Artfremdes Schweißen	471
	Schweißverfahren	471
	Legiertes (austenitisches) Gusseisen mit Kugelgrafit	473
4.4.3	Temperguss (EN-GJMW, alt: GTW; EN-GJMB, alt: GTS)	474
4.4.3.1	Weißer Temperguss (EN-GJMW, alt: GTW)	474
4.4.3.2	Schwarzer Temperguss (EN-GJMB, alt: GTS)	475
4.5	Aufgaben zu Kapitel 4	478
4.6	Schrifttum	495
5	Schweißmetallurgie der nichteisenmetallischen Werkstoffe	503
5.1	Die WEZ in Schweißverbindungen aus Nichteisenmetallen	503
5.1.1	Einphasige Werkstoffe	504
5.1.2	Mehrphasige Werkstoffe	505
5.1.3	Ausscheidungshärtende Legierungen	505
5.1.4	Hochreaktive Werkstoffe	507
5.1.5	Kaltverfestigte Werkstoffe	508
5.2	Schwermetalle	508
5.2.1	Kupfer und Kupferlegierungen	509
5.2.1.1	Hinweise zum Schweißen	511
5.2.1.1.1	Kupfer	511
5.2.1.1.2	Kupferlegierungen	515
	Kupfer-Zink-Legierungen (Messinge)	516
	Kupfer-Zinn-Legierungen (Zinnbronzen)	518
	Kupfer-Aluminium-Legierungen (Aluminiumbronzen)	518
	Kupfer-Nickel-Legierungen	519

5.2.2	Nickel und Nickellegierungen	520
5.2.2.1	Einfluss der Legierungselemente auf das Schweißverhalten	524
5.2.2.2	Schweißmetallurgie	525
5.2.2.2.1	Allgemeine Werkstoffprobleme	525
	Nickel-Chrom-(Eisen-)Legierungen	526
	Molybdänhaltige Nickelbasis-Legierungen	526
	Ausscheidungshärtende Nickelbasis-Legierungen	527
5.2.2.3	Schweißpraxis	529
5.3	Leichtmetalle	531
5.3.1	Aluminium und Aluminiumlegierungen	531
5.3.1.1	Lieferformen	533
5.3.1.2	Bezeichnungsweise	533
5.3.1.3	Metallurgisch bedingte Schweißnahtdefekte	535
	Heißrisse	535
	Spannungsrisse	536
	Poren	536
5.3.1.4	Aluminium-Knetlegierungen	536
5.3.1.5	Aluminium-Gusslegierungen	537
5.3.1.6	Ausscheidungshärtende Aluminiumlegierungen	537
5.3.1.7	Aluminium-Sonderlegierungen	543
	Aluminium-Lithiumlegierungen	543
	Aluminium-Druckgusslegierungen	543
	Dispersionshärtende Aluminiumlegierungen	544
5.3.1.8	Schweißzusatzwerkstoffe	545
5.3.1.9	Schweißpraxis	547
5.3.1.9.1	Vorbereitende Maßnahmen	547
5.3.1.9.2	Schweißverfahren	548
	Wolfram-Inertgasschweißen (WIG)	548
	Metall-Inertgasschweißen (MIG)	550
	Laserschweißen	550
5.3.2	Magnesium und Magnesiumlegierungen	551
5.3.3	Beryllium	553
5.4	Hochschmelzende und hochreaktive Werkstoffe	553
5.4.1	Titan und Titanlegierungen	554
5.4.1.1	Eigenschaften und Schweißverhalten der Titanwerkstoffe	556
	Unlegiertes Titan	557
	Alpha- und Nah-Alpha-Legierungen	557
	Alpha-Beta-Legierungen	558
	Beta-Legierungen	559
	Titan-Sonderlegierungen	559
5.4.1.2	Metallurgisch bedingte Schweißnahtdefekte	560
5.4.1.3	Schweißpraxis	561
5.4.2	Molybdän und Molybdänlegierungen	562
5.4.3	Zirkonium und Zirkoniumlegierungen	563
5.4.4	Tantal und Tantallegierungen	564
5.5	Aufgaben zu Kapitel 5	566
5.6	Schrifttum	574

6	Anhang (spezielle Werkstoffprüfverfahren)	579
6.1	Prüfung auf Heibrissanfälligkeit	579
6.1.1	Verfahren mit Selbstbeanspruchung der Probe	580
6.1.2	Verfahren mit Fremdbeanspruchung der Probe	580
6.2	Prüfung auf Kaltrissanfälligkeit	583
6.2.1	Implant-Test	583
6.2.2	Der <i>Pellini</i> -Versuch	586
6.3	Der Kerbschlagbiegeversuch (DIN EN 10045)	587
	Prüfung von Proben mit Schweißnaht	591
6.4	Der instrumentierte Kerbschlagbiegeversuch	591
6.5	Das COD-Konzept von <i>Cottrell</i> und <i>Wells</i>	594
6.6	Schrifttum	596
7	Sachwortverzeichnis	597

Häufig benutzte Symbole

a	Gitterkonstante
$2a$ bzw. a	Risslänge ($2a$) bzw. halbe Risslänge (a)
a_k	Kerbschlagzähigkeit
A	Bruchdehnung
A	Aufschmelzgrad
A_w	Schweißnahtquerschnitt
α	Wärmeausdehnungskoeffizient
a_k	Formzahl (auch elastischer Spannungskonzentrationsfaktor K_s genannt)
b	<i>Burgers</i> -Vektor
c	Konzentration
c	spezifische Wärme
\bar{d}	mittlerer (»quadratischer«) Korndurchmesser nach DIN EN ISO 643
d	Korndurchmesser
d	Werkstückdicke (auch t und s)
D_0	Diffusionskonstante
D	Diffusionskoeffizient
$\Delta\phi_0$	Urspannung
E	Elastizitätsmodul
E	Potenzial einer elektrochemischen Reaktion (allgemein)
E	Streckenenergie ($E = U \cdot I / v$)
E_0	Standardpotenzial (gemessen gegen die Standardwasserstoffelektrode)
ε	Dehnung (allgemein)
F	<i>Faraday</i> konstante
F	Kraft (allgemein)
F	Anzahl der Freiheitsgrade in einem metallurgischen System
F	Grenzlast einer gekerbten oder ungekerbten Probe (Bauteil)
F_k^f	Kohäsionskraft
G	Schubmodul
G	freie Enthalpie
G	Korngrößen-Kennzahl
G	Temperaturgradient
H	Enthalpie
η	Überspannung ($\eta = E - E_0$)
ϕ	Verformungsgrad
γ	Oberflächenenergie
k	thermischer Wirkungsgrad
k	Korngrößenwiderstand
K	Anzahl der Komponenten eines metallurgischen Systems
K	Kerbschlagarbeit (allgemein)
K_f	größte Abkühlzeit, unterhalb der sich nach der Austenitumwandlung kein Ferrit mehr gebildet hat
K_m	größte Abkühlzeit, unterhalb der aus dem Austenit vollständig Martensit gebildet wird
K_p	kleinste Abkühlzeit, oberhalb der aus dem Austenit ausschließlich Gefüge der Perlitstufe (Ferrit und Perlit) entstehen
KU	Kerbschlagarbeit, gemessen mit <i>Charpy</i> -U-Proben
KV	Kerbschlagarbeit, gemessen mit <i>Charpy</i> -V-Proben
λ	Wärmeleitfähigkeit
λ	mittlerer Teilchenabstand (Ausscheidungshärtung)
M	Mehrsigkeitsgrad der Spannungen

ν	Querkontraktionszahl (<i>Poissonsche Zahl</i>)
p	Druck (allgemein)
P	Anzahl der Phasen in einem metallurgischen System
Q_A	Aktivierungsenergie
Q	Wärmeeinbringen beim Schweißen ($Q = k \cdot E$)
r	Keimradius
r_k	Keimradius kritischer Größe
R	Gaskonstante
R	Kristallisationsgeschwindigkeit
R_E	Ausbringung, effektive
R_{eH}	Streckgrenze
R_m	Zugfestigkeit
R_p	Dehngrenze (allgemein)
$R_{p0,2}$	0,2%-Dehngrenze
ρ	Kerbradius, Rissradius
ρ	Dichte
s	Werkstückdicke (auch d und t)
S	Abschmelzleistung
S	Entropie
S	Querschnittsfläche
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Hauptnormalspannungen ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$)
σ	Normalspannung
σ_f	Bruchspannung (auch R_{Br})
σ_F	Fließgrenze
t	Zeit
t	Werkstückdicke (auch d und s)
$t_{8/5}$	Abkühlzeit zwischen 800 °C und 500 °C
$t_{12/8}$	Abkühlzeit zwischen 1200 °C und 800 °C
T	Temperatur (allgemein)
T_A	Austenitisierungstemperatur
T^H	Haltetemperatur
T_i^m	Zwischenlagentemperatur
T_i	Rekristallisationstemperatur
T_{Rk}	Schmelztemperatur
T_S	Schmelztemperatur
T^p	Vorwärmtemperatur zum Schweißen (in Gleichungen auch T_0)
τ	Schubspannung
ν, ν_{ab}	Abkühlgeschwindigkeit (allgemein)
ν_{ok}, ν_{uk}	obere bzw. untere kritische Abkühlgeschwindigkeit des Austenits
ν_{um}	Umwandlungsgeschwindigkeit des Austenits
x_m	mittlerer Diffusionsweg
Z	Brucheinschnürung (Zugversuch)

Abkürzungen

A	Austenit
α	α -Ferrit (allgemein metallografische Phasen)
B	Bainit
δ	δ -Ferrit (allgemein metallografische Phasen)
EKS	Eisen-Kohlenstoff-Schaubild
EMK	Einlagerungsmischkristall
ESZ	ebener Spannungszustand
EVZ	ebener Verzerrungszustand
F	Ferrit
FF	vollberuhigter Stahl (Bezeichnung nach DIN EN 10027-1)
FN	nicht unberuhigter Stahl (nach DIN EN 10027-1, nach DIN 17006 unbekannt)
FU	unberuhigter Stahl (Bezeichnung nach DIN EN 10027-1)
hdP	hexagonal dichteste Packung
HB	<i>Brinell</i> härte
HV	<i>Vickers</i> härte
γ	Austenit (allgemein metallografische Phasen)
iV	intermediäre Verbindung (auch V)
IK	interkristalline Korrosion
kfz	kubisch-flächenzentriert
krz	kubisch-raumzentriert
M	Martensit
M_s, M_f	Martensitstart- bzw. Martensitfinishing-Temperatur
N	normalgeglüht (Bezeichnung nach DIN 17006)
P	Perlit
R	beruhigter Stahl (alte Bezeichnung nach DIN 17006, nach DIN 10027-1 unbekannt)
REM	Rasterelektronenmikroskop
RR	besonders beruhigter Stahl (alte Bezeichnung nach DIN 17006, neue: FF)
RT	Raumtemperatur
SMK	Substitutionsmischkristall
SpRK	Spannungsrisskorrosion
SRC	Stress Relief Cracking (Wiedererwärmungsriß)
trz	tetragonal-raumzentriert
TEM	Transmissionselektronenmikroskop
TM	thermomechanische Behandlung
U	unberuhigter Stahl (alte Bezeichnung nach DIN 17006, neue: FU)
V	intermediäre Verbindung (auch iV)
WEZ	Wärmeeinflusszone
ZTA	Zeit-Temperatur-Ausscheidungs-Schaubild
ZTA	Zeit-Temperatur-Austenitisierungs-Schaubild
ZTU	Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Schaubild

1 Grundlagen der Werkstoffkunde und der Korrosion

1.1 Schweißtechnik erfordert die Werkstoffkunde

Vor allem bei Schmelzschweißprozessen entstehen im

- Schweißgut und in der
- Wärmeeinflusszone (WEZ)

die vielfältigsten Werkstoffänderungen. Das Schweißverfahren und die Schweißparameter bestimmen weitestgehend die Ausdehnung und die Eigenschaften der WEZ. Die Zähigkeit der WEZ nimmt praktisch immer ab, oft verbunden mit einer höheren Festig-

keit und Härte. Sie ist die für die Bauteilsicherheit geschweißter Konstruktionen wichtigste Eigenschaft. Art und Umfang der Änderungen sind wie bei jeder Wärmebehandlung von deren Temperatur-Zeit-Führung abhängig. Für ein tieferes Verständnis ist allerdings die Einsicht nötig, dass die Temperatur-Zeit-Verläufe bei den unterschiedlichen Schweißverfahren z. T. beträchtlich von denen üblicher technischer Wärmebehandlungen abweichen, Bild 1-1.

Die Aufheizgeschwindigkeiten beim Schweißen mit den unterschiedlichen Verfahren betragen etwa 400 K/s bis 1000 K/s, die Abkühlgeschwindigkeiten einige 100 K/s und die Haltedauer (Abschn. 4.1.2, S. 309) beträgt nur wenige Sekunden. Die Wärmeeinflusszone wird also nur höchstens einige zehn Sekunden thermisch beeinflusst. Bei technischen Wärmebehandlungen bleibt das Werkstück aber mindestens mehrere zehn Minuten auf der erforderlichen Temperatur. Die werkstofflichen Änderungen beim Schweißen laufen also immer in Richtung extremer Ungleichgewichtszustände.

Daher sind Vorhersagen über die zu erwartenden Gefüge, Gefügeänderungen bzw. die mechanischen Güterwerte mit Methoden der »konventionellen« Werkstoffprüfung oft ungenau. Die Gefüge der Schweißverbindung weichen aus diesem Grunde häufig und in überraschender Weise von denen des unbeeinflussten Grundwerkstoffs ab. In den meisten Fällen bildet die Wärmeeinflusszone ein Kontinuum unterschiedlichster Gefüge und Eigenschaften. Für eine fachgerechte Beurteilung der Schweißnahtverbindung ist die Kenntnis dieser Zusammenhänge wichtig. In Abschn. 4.1, S. 299, werden die Eigenschafts- und Gefügeänderungen in der WEZ und des Schweißgutes ausführlicher besprochen.

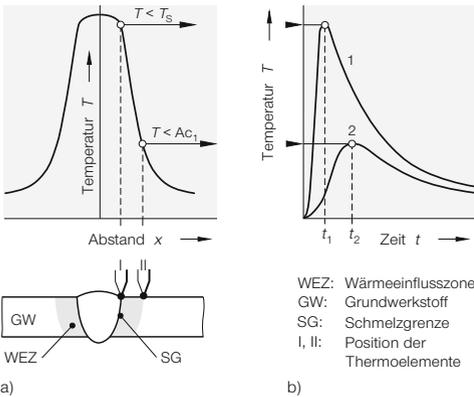


Bild 1-1

Temperaturverteilung in der Schweißverbindung, gemessen während des Schweißens mit Thermolementen, die an verschiedenen Stellen (I, II) im Abstand x von Schweißnahtmitte angebracht wurden.

- a) Verlauf der jeweils erreichten Maximaltemperatur in Abhängigkeit vom Abstand x von Schweißnahtmitte, T_s = Schmelztemperatur.
- b) Verlauf der Temperatur an bestimmten Orten neben der Schweißnaht (Kurve 1 und 2). Beachte, dass die Maximaltemperaturen an den verschiedenen Punkten nach unterschiedlichen Zeiten erreicht werden: $t_1 < t_2$!

Das Gefüge des Schweißguts (Abschn. 4.1.1.1, S. 300) ist wegen der extrem raschen Abkühlung typisch transkristallin (anisotrop). Die Gefügeausbildung in der Wärmeeinflusszone (WEZ) ist außerdem abhängig von der chemischen Zusammensetzung des Grundwerkstoffs und meistens sehr komplex und unübersichtlich. Die Gefüge der Wärmeeinflusszone sind bei den unterschiedlichen Werkstoffen durch verschiedene Besonderheiten gekennzeichnet:

- Als Folge der großen Wärmeleitfähigkeit metallischer Werkstoffe kühlt der schmelzgrenznahe Bereich der WEZ z. T. sehr schnell ab. Daher besteht z. B. bei der Werkstoffgruppe »umwandlungsfähiger (und höhergekohlter, legierter) Stahl« die Gefahr, dass sich harte, spröde, d. h. rissanfällige Gefügebestandteile bilden (höhergekohlter Martensit). Durch *Vorwärmen* (Abschn. 4.1.3.3, S. 327) der Fügeteile oder (und) erhöhte Energiezufuhr beim Schweißen muss die Abkühlgeschwindigkeit soweit verringert werden, dass möglichst kein *Martensit* entsteht bzw. die Bauteilsicherheit gewährleistet ist.
- Die hohe Temperatur begünstigt z. B. die Bildung eines grobkörnigen Gefüges, das i. Allg. eine deutlich geringere Zähigkeit besitzt als der Grundwerkstoff.
- Ausscheidungen aller Art im Schweißgut und vor allem in der WEZ setzen die mechanischen Gütewerte herab und verringern die Korrosionsbeständigkeit.
- Einige Werkstoffe, in erster Linie die sog. hochreaktiven Metalle, wie z. B. Titan, Tantal, Molybdän, Zirkonium, nehmen schon bei Temperaturen über etwa 300 °C atmosphärische Gase (H_2 , O_2 , N_2) auf, die die Schweißverbindung völlig verspröden können. Die über 300 °C erwärmten Bereiche der Schweißverbindung müssen daher beim Schweißen großflächig vor einem Luftzutritt geschützt werden.
- Verbindungs- und Auftragschweißungen unterschiedlicher Werkstoffe sind komplexe metallurgische Prozesse. Es entstehen häufig und oft in unvorhergesehenem Umfang Gefüge mit extremer Härte und Sprödigkeit. Die Sicherheit des Bauteils bzw. seine Gebrauchseigenschaften sind dann nicht gewährleistet.

Die sich beim Schweißen ergebenden werkstofflichen Änderungen sind praktisch immer das Ergebnis einer extremen metallurgischen *Ungleichgewichtsreaktion*. Die Beschreibung und Deutung dieser Vorgänge ist mit dem Instrumentarium der »üblichen« Werkstoffkunde nicht einfach. In den meisten Fällen sind zusätzliche schweißspezifische Kenntnisse erforderlich.

1.2 Aufbau metallischer Werkstoffe

1.2.1 Bindungsformen der Metalle

In einem Metall sind die Atome periodisch regelmäßig nach einem geometrischen »Muster« *kristallin* angeordnet. Das Gefüge der Metalle besteht aus Kristallen (genauer *Kristalliten*). Flüssigkeiten, Gläser und z. T. die Kunststoffe sind im Gegensatz zu den Metallen *amorph*, ihre Atome bzw. Moleküle sind also *regellos* angeordnet.

Die Art des Atomaufbaus (Mikrostruktur) sowie die Bindungsart bestimmen die Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften. Die unterschiedlichen Mechanismen der atomaren Bindung hängen von der Atomart, bzw. von ihrer Elektronegativität ab.

Für ein erstes Verständnis dieser komplizierten Einzelheiten ist die *Bohrsche* Theorie hinreichend. Danach besteht jedes Atom aus einem positiv geladenen Kern, um den eine negativ geladene Atomhülle angeordnet ist, in der sich die Elektronen nach bestimmten Gesetzmäßigkeiten auf bis zu sieben räumlichen Schalen (Energieniveaus) befinden. Die Schalen werden von innen nach außen als 1., 2., 3., ... n. Schale (Schale der Hauptquantenzahl $n = 1, 2, 3, \dots$) oder mit den Buchstaben K, L, M, N, ... bezeichnet. Jede Schale kann maximal $2 \cdot n^2 = 2$ Elektronen aufnehmen, die K-Schale also $2 \cdot 1^2$, die L-Schale $2 \cdot 2^2 = 8$ Elektronen. Die Anzahl der Elektronen auf der äußersten Schale kann nur zwischen 1 und 8 liegen.

Die Eigenschaften eines Festkörpers sind durch seine Bindungsart vorgegeben. Die

elektrische Anziehung zwischen negativ geladenen Elektronen und den positiv geladenen Atomkernen ist die einzige Ursache für den Zusammenhalt des Festkörpers. Sie bestimmt daher in der Hauptsache sein Verhalten bei mechanischer Beanspruchung. Die wichtigsten Eigenschaften eines Festkörpers, wie das chemische Reaktionsverhalten, die Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften werden von diesen Außenelektronen bestimmt.

Die periodische Wiederkehr vieler Eigenschaften ermöglicht die Einordnung der Elemente in das *Periodensystem*. Die Elemente lassen sich in acht große *Gruppen* (senkrechte Spalten) einteilen. Die Gruppennummer (*I* bis *VIII*) gibt die Zahl der Außenelektronen an, die der positiven Kernladung *Z* (Protonenzahl) entspricht. Innerhalb einer Gruppe sind wegen der gleichen Zahl der Außenelektronen jeweils chemisch ähnliche Elemente angeordnet. In den sieben *Perioden* (waagerechte Reihen) werden die Schalen aufgefüllt. Die Außenelektronen befinden sich hier aber immer auf der gleichen Schale. Die Ziffer der jeweiligen Periode entspricht damit der Anzahl der Elektronenschalen des betreffenden Elements.

Die Außenelektronen der Metalle sind relativ locker an das Atom gebunden, da bei ihnen die Anziehungskraft des Atomkerns am kleinsten ist. Der leichte Verlust dieser Elektronen ist die Ursache für die geringe Korrosionsbeständigkeit der Gebrauchsmetalle. Das chemische Verhalten der Elemente wird durch Zahl und Anordnung der Außenelektronen bestimmt. Die Systematik des Periodensystems gibt diese Besonderheit sehr deutlich und anschaulich wieder.

Der metallische Charakter nimmt innerhalb der Perioden von rechts nach links, innerhalb der Gruppen von oben nach unten zu. Die typischen **Metalle** findet man daher im Periodensystem links unten, die typischen **Nichtmetalle** rechts oben. Diese Tatsachen beruhen darauf, dass innerhalb einer Periode der Atomradius wegen der wachsenden Anziehung des positiven Kerns auf die Elektronenhülle mit zunehmender Kernladung abnimmt. Innerhalb einer Gruppe nimmt dagegen der Atomradius von oben nach unten zu, da jeweils eine Elektronenschale hinzukommt. Der metallische Charakter ist also bei Elementen mit großem Atomdurchmesser und geringer Ladung des Atomrumpfes besonders ausgeprägt. Bild 1-2 zeigt diese Zusammenhänge sehr anschaulich.

Das (unter »normalen« Bedingungen vorhandene) Unvermögen der Edelgase, chemische Verbindungen einzugehen, beruht auf der besonders großen Stabilität der mit acht Außenelektronen besetzten Schalen. Danach lassen sich chemische Reaktionen anschaulich durch ihr Bestreben verstehen, Verbindungen mit äußeren Elektronenschalen zu bilden, die die stabile »Edelgaskonfiguration« besitzen.

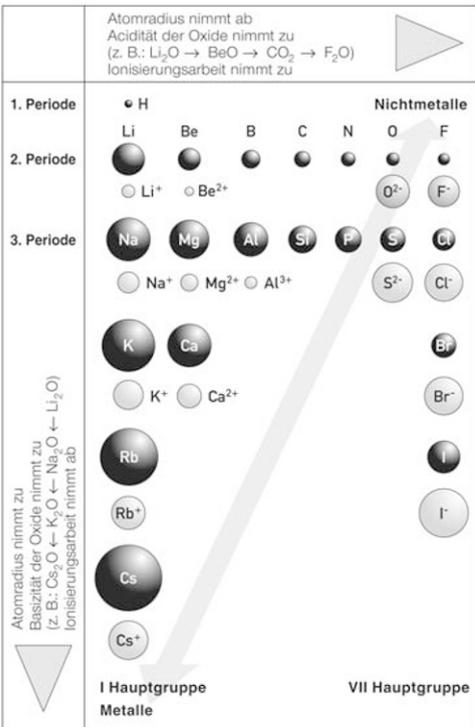


Bild 1-2
Atomaufbau (Anordnung der Elektronenschalen, Atomdurchmesser) ausgewählter Elemente im Periodensystem (3. Periode). Der metallische Charakter nimmt von rechts nach links und von oben nach unten zu, der nichtmetallische von links nach rechts und von unten nach oben. Beachte, dass die Atomdurchmesser der Metallionen kleiner, die der Nichtmetallionen aber größer sind als die der Elemente!

Bild 1-2 zeigt schematisch, dass die im Periodensystem linksstehenden Elemente Elektronen abgeben, rechtsstehende Elemente Elektronen aufnehmen, um den stabilen Edelgaszustand zu erreichen. Der hierfür notwendige Elektronenausgleich kann daher grundsätzlich auf drei verschiedene Arten erreicht werden, je nachdem ob die Bindung zwischen zwei Elementen erfolgen soll, die

- beide links,
- beide rechts,
- eins links, eins rechts im Periodensystem stehen.

Die Festigkeit eines Werkstoffes, d. h., auch die chemische Affinität beruht auf den anziehenden (und abstoßenden) Kräften zwischen den Atomen. Bild 1-3 zeigt schematisch den Verlauf der Kräfte (bzw. der potenziellen Energie) zwischen zwei Atomen, in Abhängigkeit von ihrem Abstand. Danach ergeben sich die resultierenden Kräfte (potenzielle Energien) aus dem Gleichgewicht der anziehenden und der abstoßenden Kräfte (potenzielle Energien). Die anziehenden Kräfte, die den Atomverband erzeugen, wirken im Wesentlichen zwischen dem Atomkern und der Elektronenhülle des anderen Atoms. Bei genügender Annäherung zieht also der Kern nicht nur seine Elektronenschale an, sondern auch die des benachbarten Atoms. In bestimmten Fällen können locker gebundene Elektronen eines Atoms dann vollständig vom anderen gebunden werden.

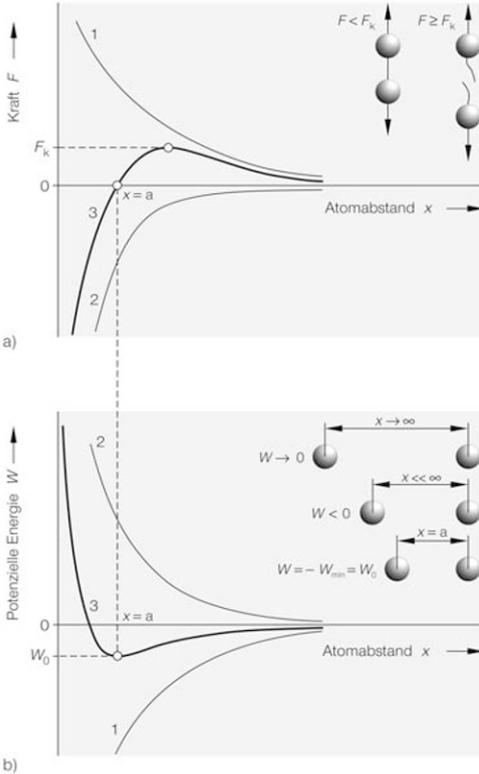


Bild 1-3
Verlauf der Kräfte (a) bzw. potenziellen Energien (b) in einem aus zwei Atomen bestehenden System in Abhängigkeit von ihrem Abstand.

- a) 1 = Anziehende Kräfte zwischen zwei Atomen.
- 2 = Abstoßende Kräfte der sich zunehmend nähernden positiv geladenen Atomkerne.
- 3 = Resultierende Kräfte F , F_k = Kohäsionskraft.
- b) 1 = Verlauf der potenziellen Energie der zwei sich zunehmend nähernden Atome (alleinige Wirkung der anziehenden Kräfte).
- 2 = Energieverlauf als Folge der abstoßenden Wirkung der Atomkerne.
- 3 = Resultierender Verlauf der potenziellen Energie, W_0 = Energie, die zum vollständigen Trennen der beiden Atome erforderlich ist.

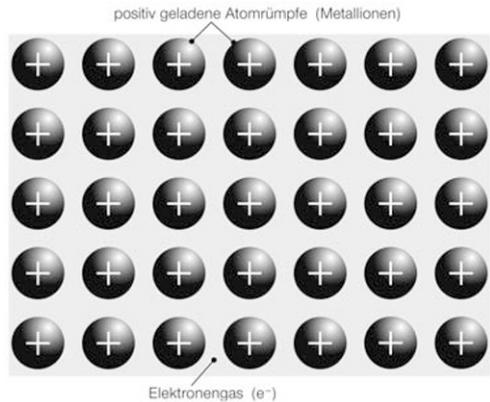


Bild 1-4
Metallische Bindung, schematisch.

1.2.1.1 Metallische Bindung

Metalle besitzen nur eine geringe Anzahl schwach gebundener Außenelektronen, die im Metallverband praktisch frei beweglich sind (Valenzelektronen). Die Metallbindung entsteht durch die Coulombsche Anziehungskraft zwischen den negativen Elektronen und den positiven Metallionen, wie in Bild 1-4 gezeigt wird.

Die anziehenden Kräfte sind nicht gerichtet, d. h. nicht nur auf zwei Atome beschränkt, sie erfassen vielmehr den gesamten Atomverband. Als Folge dieser allseitig wirkenden Kräfte ordnen sich die Atomrümpfe in einem dicht gepackten nach geometrischen Gesetzmäßigkeiten aufgebauten Gitterverband an. Da die einzelnen Atomrümpfe völlig gleichwertig sind, erzeugt ihre gegenseitige Verschiebung keine wesentlichen Änderungen des Gitterzusammenhangs. Metalle können daher plastisch verformt werden, ohne dass die metallische Bindung zerstört wird. Eine weitere Konsequenz dieser Bindungsart ist die Möglichkeit, zwei oder mehr Atomsorten in einem Metallgitter zu »verbinden«. Es muss also nicht ein bestimmtes charakteristisches Atomverhältnis vorliegen wie bei einer »echten« chemischen Verbindung. Diese Tatsache ist die Grundlage der »Legierungsbildung« (Abschn. 1.6).

1.2.1.2 Ionenbindung (heteropolare Bindung)

Diese Art der Bindung ist typisch für die Reaktion eines Metalles mit einem Nichtmetall. Der stabile Edelgaszustand der Außenschalen wird erreicht, indem die wenigen schwach gebundenen Valenzelektronen des Metalls von dem sehr stark elektronegativen Nichtmetall angezogen werden, Bild 1-5. Das Metall wird also durch Elektronenabgabe negativ geladen. Die elektrostatische Anziehung der

unterschiedlich geladenen Teilchen (Ionen) bewirkt ihren Zusammenhalt. Daher wird diese Bindungsform auch *heteropolar* genannt.

Die von den Ionen ausgehenden Kräfte wirken *allseitig*. Die Ionen sind daher wie bei der Metallbindung regelmäßig in einem *Ionen-gitter* angeordnet, Bild 1-5b. Heteropolar gebundene Stoffe können nicht plastisch verformt werden, da sich bei Verschiebungen um nur einen Atomabstand gleichnamig geladene Teilchen gegenüber stünden. Die entstehenden großen abstoßenden Kräfte würden den Kristall ohne jede plastische Verformung trennbruchartig zerstören.

1.2.1.3 Atombindung (kovalente Bindung)

Bei dieser Form der Bindung, die vor allem bei Nichtmetallen und Gasen auftritt, kann der Edelgaszustand der Außenschale weder durch Elektronenaufnahme noch -abgabe erreicht werden. Den im Periodensystem rechts stehenden Nichtmetallen fehlen nur wenige Elektronen, um die stabile Edelgasschale bilden zu können. Die Bindung ist möglich, indem sich zwei Atome ein Elektron oder mehrere Elektronen gemeinsam teilen, je nachdem wieviel Elektronen zum Auffüllen der Außenschale fehlen.

Bei der Atombindung gleicher Atome fällt der Schwerpunkt der negativen und positiven Ladung zusammen. Bei unterschiedlichen Atomen wird die Atomsorte mit der größeren positiven Ladung die gemeinsamen Elektronen stärker anziehen als die andere und gleichzeitig dessen positiven Kern stärker abstoßen. Das Molekül wird *polar*, (*Dipol*) d. h., die Atombindung hat dann heteropolare Anteile.

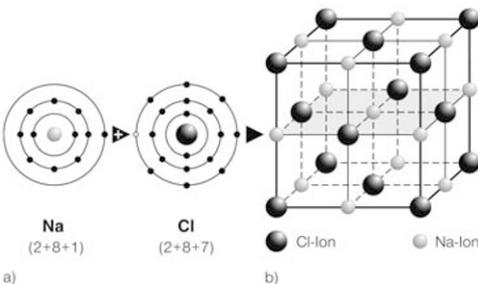


Bild 1-5

Entstehung der Ionenbindung. Die in Klammern stehenden Werte geben die Anzahl der Elektronen auf der K-, L- und M-Schale von Na bzw. Cl an.

- Durch Elektronenabgabe ($\text{Na} \rightarrow \text{Na}^+ + e^-$) und Elektronenaufnahme ($\text{Cl} + e^- \rightarrow \text{Cl}^-$) entsteht die Verbindung durch die Wirkung der Coulombschen Anziehungskräfte.
- Anordnung der Ionen im NaCl-Gitter.

Eine genauere Untersuchung zeigt, dass bei den meisten Stoffen derartige Übergangsbindingen vorliegen. Die Bindungen entstehen also in den meisten Fällen durch die gemeinsame Wirkung der Atom-, Ionen- und Metallbindung. Die durch diese Bindungsformen entstehenden Stoffe werden auch *intermediäre Verbindungen* genannt. Damit wird ausgedrückt, dass die vorliegende Bindungs-

form zwischen (engl. *intermediate*) der Atom- und der Ionenbindung liegt.

Man beachte, dass die plastische Verformbarkeit eines Werkstoffes mit zunehmendem metallischem Bindungsanteil größer, und mit zunehmendem Anteil der Ionen- bzw. Atombindung kleiner wird.

1.2.2 Gitteraufbau der Metalle

Die zwischen den Metallionen und der sie umgebenden Elektronenwolke herrschenden allseitig wirkenden *Coulombschen* Anziehungskräfte erzwingen eine regelmäßige räumliche Anordnung der Atome. Diese Gruppierung nennt man *Raum- oder Kristallgitter*. Das kleinste Element, das die Art des Gitteraufbaus eindeutig kennzeichnet, ist die *Elementarzelle*.

Bild 1-6 zeigt die für Metalle wichtigsten Gittertypen. Das *kubisch-flächenzentrierte Gitter (kfz)* und das Gitter mit der *hexagonal dichtesten Packung (hdP)* unterscheiden sich bei allerdings unterschiedlicher Packungsdichte nur durch die Reihenfolge der sie aufbauenden »Schichten« (Netz- oder Atomebenen). Dieser scheinbar geringfügige Unterschied ist die Ursache für die große Anzahl dichtest gepackter Netzebenen im kfz Gitter und das Vorhandensein nur einer einzigen (Basisebene) im hdP Gitter. Die hervorragende Verformbarkeit und die grundsätzlich gute Schweißneigung der kfz Werkstoffe, z. B. Aluminium, Kupfer, Nickel, lassen sich wenigstens z. T. damit erklären.

Der Gitteraufbau einiger Metalle weicht erheblich von der für Metalle typischen kubischen Packungsanordnung ab. Antimon, Bismut und Gallium z. B. kristallisieren in der

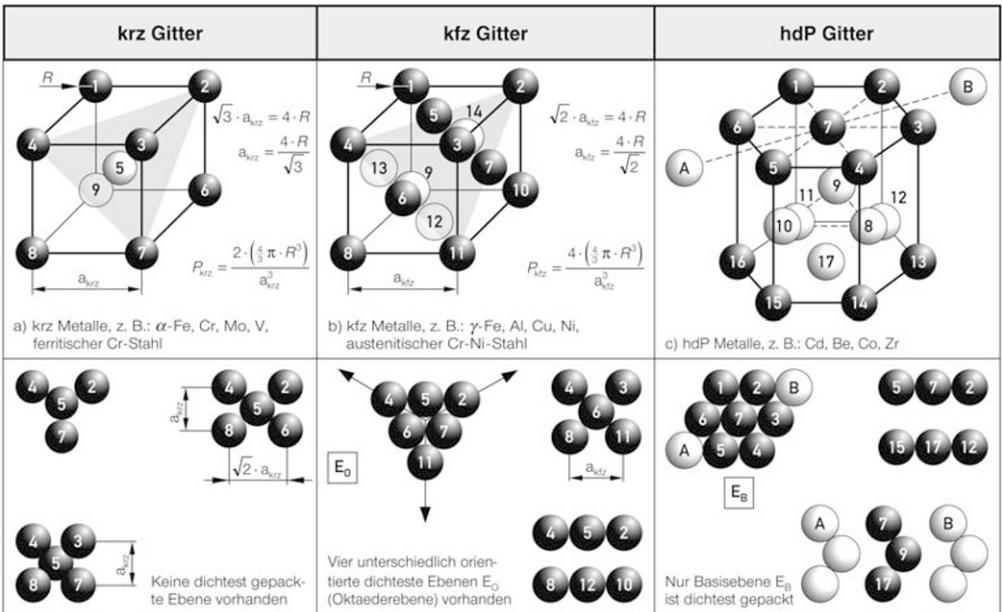


Bild 1-6
 Die wichtigsten Arten von Elementarzellen bei Metallen und ausgewählte Gitterebenen. a_{krz} , a_{kfz} = Gitterkonstanten des krz bzw. kfz Gitters, R = Atomradius, V_{Atom} = Atomvolumen: $V_{Atom} = 4\pi \cdot R^3 / 3$.
 a) Kubisch-raumzentriert: krz, Packungsdichte $P_{krz} = 2 \cdot V_{Atom} / a_{krz}^3 = 0,68$, s. a. Aufgabe 1-2 und 1-3, S. 110;
 b) kubisch-flächenzentriert: kfz, Packungsdichte $P_{kfz} = 4 \cdot V_{Atom} / a_{kfz}^3 = 0,74$;
 c) hexagonal dichteste Packung: hdP.

Beachte die sehr unterschiedliche Massenbelegung (»Packungsdichte«) der herausgehobenen Gitterebenen! Nur die vier zueinander nicht parallelen »Oktaederebenen« des kfz Gitters und eine Basisebene des hdP Gitters sind dichtest gepackt. G_1 , G_2 , G_3 sind bevorzugte Gleitrichtungen in dichtest gepackten Gitterebenen.

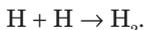
sog. *offenen Struktur*. Mit dieser Bezeichnung wird angedeutet, dass die theoretische dichteste Packung nicht annähernd erreicht wird. Bei diesen Metallen ist daher z. B. auch das spezifische Volumen im flüssigen Zustand kleiner als im festen.

Der fehlerfreie aus Elementarzellen aufgebaute Kristall wird *Idealkristall* genannt. Diese Anordnung ist bei technischen Werkstoffen nicht vorhanden. Diese sind vielmehr in bestimmter Art »*fehlgeordnet*«, d. h., sie enthalten verschiedene Gitterbaufehler mit einem unterschiedlichen Energiegehalt, die die Eigenschaften der Werkstoffe entscheidend ändern. Mit Hilfe der Vorstellung des idealen, fehlerfreien Gitters lassen sich die *strukturunempfindlichen* Eigenschaften (z. B. *E*-Modul, Schmelzpunkt, Dichte, Anisotropie) erklären, die *strukturempfindlichen* (z. B. Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften) nur, wenn der Einfluss bestimmter Unregelmäßigkeiten im Aufbau des Gitters berücksichtigt wird.

1.2.2.1 Gitterbaufehler (Realkristalle)

Jede Abweichung vom *Idealkristall* wird Gitterbaufehler genannt. Die Gesamtheit aller möglichen Defekte im Gitter ist das *Fehlordnungssystem*. Die Defekte verspannen das Gitter in ihrer näheren Umgebung in einer für sie charakteristischen Weise, wodurch der Energiegehalt der Kristallite zunimmt. Gitterstörungen können im Gefüge durch verschiedene Prozesse erzeugt werden. Die wichtigsten sind:

- Kristallisationsvorgänge,
- elastische und vor allem plastische Verformung,
- Kernstrahlung (z. B. Neutronenbeschuss),
- Aufheiz- und Abkühlbedingungen, die während der Herstellung oder Weiterverarbeitung (z. B. Schweißen) der Werkstoffe zu ausgeprägten Gleichgewichtsstörungen führen,
- Reaktionen im Festkörper, z. B. die Wasserstoffrekombination:



Nach der räumlichen Ausdehnung und der Anordnung der Atome im Bereich der Gitterfehler unterscheidet man, Bild 1-7:

- **0-dimensionale (Punktfehler):**
z. B. Leerstellen, Fremdatome, Einlagerungs-, Substitutionsatome,
- **1-dimensionale (Linienfehler):**
z. B. Versetzungen,
- **2-dimensionale (Flächenfehler):**
z. B. Korngrenzen, Zwillingsgrenzen,
- **3-dimensionale (räumliche Fehler):**
z. B. Poren, »Löcher«, Ausscheidungen.

Die Anzahl der *Leerstellen* (nicht besetzte Gitterplätze) nimmt mit der Temperatur stark zu. Ihre Dichte beträgt bei Raumtemperatur etwa 10^{-12} , d. h., von einer Billion Gitterplätzen (das ist etwa eine 1 mm^2 große Gitterebene!) ist ein Platz nicht besetzt. Im Bereich der Schmelztemperatur steigt sie aber auf 10^{-3} bis 10^{-4} . Leerstellen *können* sich im Kristall im thermodynamischen Gleichgewicht befinden. Durch rasches Abkühlen bleibt die große Leerstellenkonzentration aber weitgehend erhalten, wodurch Gleitbewegungen

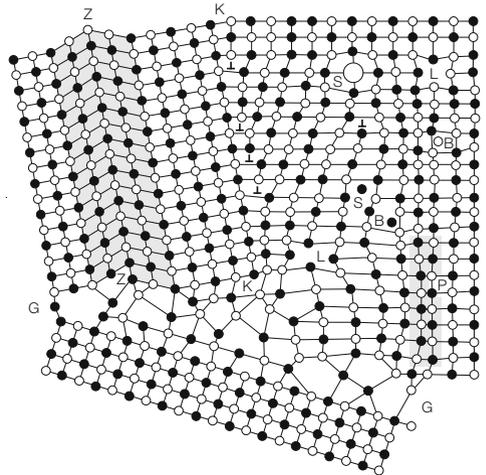


Bild 1-7

Die wichtigsten mikrostrukturellen Gitterbaufehler, dargestellt in einem Gefüge geordneter Substitutionsmischkristalle, schematisch nach Hornbogen und Petzow.

Es bedeuten: L = Leerstelle, B = Zwischengitteratom, S = Fremdatome, ⊥ = Versetzung, Z-Z = Zwillingsgrenze, K-K = Kleinwinkelkorngrenze, G-G = Großwinkelkorngrenze, P = kohärente Phasengrenze, entstanden durch Scherung.

merklich erschwert werden. *Defektreiche* Gefüge sind daher härter und weniger verformbar als die *defektarmeren*, gleichgewichtsnahen Gefüge, s. a. Beispiel 5-1, S. 513.

Die Zahl der Leerstellen n steigt exponentiell mit der Temperatur T gemäß einer einfachen *Arrhenius-Funktion*:

$$n = N \cdot \exp\left(-\frac{Q_L}{RT}\right) \quad [1-1]$$

In Gl. [1-1] bedeuten N die Anzahl der Gitterplätze in m^3 , Q_L die (*Aktivierungs-*)*Energie* zum Erzeugen einer Leerstelle und R die Gaskonstante (= 8,31 J/mol · K).

Leerstellen beeinflussen entscheidend den Ablauf und das Ergebnis der diffusionsgesteuerten Platzwechselvorgänge z. B. bei

- Wärmebehandlungen (Rekristallisation, Glühbehandlungen) oder
- Hochtemperaturbeanspruchungen (Kriechen).

Interstitielle Defekte entstehen, wenn andere Atome in bestimmte Positionen im Gitter (Tetraeder- oder Oktaederlücken, s. Abschn. 1.6.1.1) eingefügt werden. Die Folge sind z. T. extreme Gitterverzerrungen, die meistens zu einer erheblichen Härtezunahme und nahezu immer zu einer außerordentlich großen Zähigkeitsabnahme führen. Kohlenstoff und Wasserstoff sind wegen ihres kleinen Atomdurchmessers typische Elemente, die diese Defektart erzeugen. Man beachte, dass der Begriff »Defekt« lediglich auf einen *geometrisch* nicht exakten Gitteraufbau hinweist. Keinesfalls ist mit dieser Bezeichnung ein »mangelhaftes« Gefüge bzw. »unbrauchbarer« Werkstoff oder Gefügestand gemeint. Allerdings *können* verunreinigende Elemente verschiedene Werkstoffeigenschaften sehr verschlechtern, absichtlich als Legierungselement zugesetzte diese aber erheblich verbessern, s. genauer Abschn. 1.6.

Substitutionelle Defekte entstehen, wenn Gitteratome (= Matrixatome) durch andere Atome *ausgetauscht* werden. Die Gitterverspannungen sind im Allgemeinen wesentlich geringer als die, die durch interstitielle Defekte hervorgerufen werden. Auch hier muss

zwischen verunreinigenden und damit die Werkstoffeigenschaften nachteilig beeinflussenden Elementen und absichtlich zugesetzten (= güteverbesserndes Legierungselement) unterschieden werden.

Versetzungen sind linienförmige Gitterfehler unterschiedlicher Bauart (Stufen- und Schraubenversetzungen) im Kristall. Sie sind für das Verständnis der Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften von großer Bedeutung. Der Rand einer in den Kristall eingeschobenen Halbebene, E-F in Bild 1-8a, wird als *Versetzung*, genauer als *Stufenversetzung* bezeichnet. Die zweite Form ist die *Schraubenversetzung*. Der Kristall besteht im Bereich

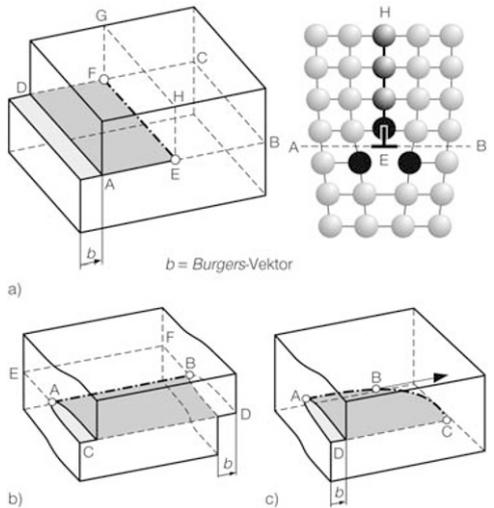


Bild 1-8
 Schematische Darstellung von Versetzungen.
 a) **Reine Stufenversetzung (E-F)**, Symbol \perp . Das ist die Spur E-F der eingeschobenen Halbebene E-F-G-H; $b \perp V$. Der Gleitschritt beträgt b .
 Es wird die Anordnung der Atome im Bereich der eingeschobenen Halbebene E-F-G-H gezeigt. In der Gleitebene A-B-C-D wurde der über ihr liegende Werkstoffbereich um den Betrag des Burgers-Vektors b plastisch verformt.
 b) **Reine Schraubenversetzung (A-B)**, Symbol \parallel . Die Verformung erfolgt auf der zufälligen Gleitebene A-B-C-D; $b \parallel V$. Der Gleitschritt beträgt b .
 c) **Gemischte Versetzung (A-B-C)**, bei A ist es eine reine Schraubenversetzung ($b \parallel V$), bei C eine reine Stufenversetzung ($b \perp V$). Man beachte, dass die Verformung immer parallel zur Richtung des Burgers-Vektors verläuft.

der Versetzungslinie nicht aus parallel aufgebauten Netzebenen, sondern aus einer Ebene, die sich *spiralförmig* um die Versetzungslinie windet, Bild 1-8b.

Ein Maß für die Größe und Richtung der durch die Versetzung erzeugten Gitterverzerrung ist der *Burgers-Vektor* b . Bild 1-9 enthält Einzelheiten für seine Ermittlung. Danach steht bei der Stufenversetzung der *Burgers-Vektor* b senkrecht auf der Versetzungslinie V ($b \perp V$), bei der Schraubenversetzung liegt b parallel zu ihr ($b \parallel V$). Versetzungen können nur an der Oberfläche bzw. an geeigneten Störstellen im Inneren des Kristalls enden (z. B. Ausscheidungen, Poren, verankerte Versetzungen). Es können auch geschlossene Ringe bzw. netzförmige Anordnungen entstehen.

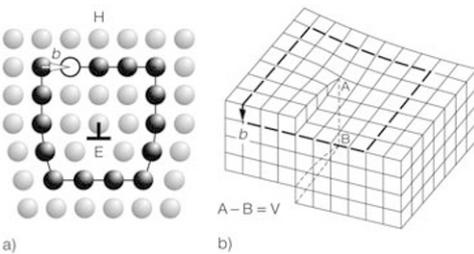


Bild 1-9
Zur Bestimmung des Burgers-Vektors.

- a) Der Gefügebereich, der die Stufenversetzung enthält (\perp), wird mit gleichen Beträgen auf gegenüberliegenden Seiten umlaufen. Das für einen vollständigen Umlauf fehlende Wegstück ist der Burgers-Vektor b . Er steht senkrecht auf der Versetzungslinie $V = E - F$; $b \perp V$, Bild 1-8a.
- b) Bei der Schraubenversetzung ergibt ein ähnlicher Umlauf, dass b parallel zu der Versetzungslinie V ($V = A - B$, s. a. Bild 1-8b) liegt: $b \parallel V$. Man beachte, dass bei der Stufenversetzung die Gleitebene die durch b und V aufgespannte Ebene ist. Bei der Schraubenversetzung ist wegen $b \parallel V$ eine bestimmte Gleitebene nicht definierbar, d. h., die Anzahl der Gleitrichtungen ist beliebig groß.

Die *Versetzungsdichte* wird als Länge der Versetzungslinien je Volumeneinheit angegeben. In einem gleichgewichtsnahen Gefüge beträgt sie etwa $10^{5...6}$ cm/cm³, nach einer Kaltverformung steigt sie auf $10^{10...12}$ cm/cm³ (Abschn. 1.3 und 1.5.2). Durch die große Anzahl der Versetzungen wird die Gitterenergie deutlich erhöht. Außerdem entstehen cha-

rakteristische Wechselwirkungen zwischen den von ihnen erzeugten Spannungsfeldern, die von großer Bedeutung für die Werkstoffeigenschaften sind.

Eine Versetzung entsteht, wenn eine Halbebene in das Gitter eingeschoben wird. Oberhalb der *Gleitebene* $G - G$ erzeugt die Versetzung daher Druck- unterhalb Zugspannungen, Bild 1-10. Das Bild zeigt die Richtungen der Kräfte in den einzelnen Quadranten, die eine Stufenversetzung auf *gleichartige* Versetzungen als Folge der Wechselwirkung ihrer Spannungsfelder ausüben. Danach können sich bei Versetzungen, die in den Sektoren B angeordnet sind, die Druck- und Zugspannungen annähernd ausgleichen. Wenn genügend Energie zugeführt wird, dann nähern sich die Versetzungen. Sie ordnen sich dabei etwa »senkrecht« übereinander an, weil durch diese Versetzungsumlagerung der Energieinhalt des Gefüges abnimmt. Diese metallphysikalischen Vorgänge spielen auch bei der Vorstufe der *Rekristallisation*, Abschn. 1.5.2 – der *Polygonisation* – eine wichtige Rolle.

Versetzungslinien sind meistens beliebig gekrümmt, d. h., sie enthalten alle Übergänge zwischen reinen Stufen- und reinen Schraubenversetzungen, Bild 1-8c. Ihre wichtigste Eigenschaft ist die sehr leichte Beweglichkeit in der durch den *Burgers-Vektor* und der Gleitebene aufgespannten Fläche, Abschn. 1.3.2. Die Bewegung einer Schraubenversetzung ist *nicht* an eine bestimmte Ebene

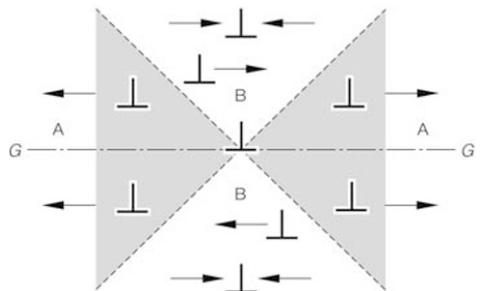


Bild 1-10
Kraftwirkungen zwischen gleichartigen Versetzungen als Folge ihrer wechselwirkenden Spannungsfelder.

- Felder A:** Die Versetzungen stoßen sich ab.
- Felder B:** Die Versetzungen ziehen sich an und können sich übereinander anordnen.

ne gebunden, da in diesem Fall ($b \parallel V$) keine definierte Ebene beschrieben wird. Die Bewegung kann daher in jeder beliebigen Ebene erfolgen.

Der wichtigste zweidimensionale Gitterbaufehler ist die **Korngrenze**. Je nach dem Grad der Kohärenz zwischen den sie trennenden Kristallbereichen unterscheidet man die folgenden Varianten:

- Zwillingsgrenzen,
- Kleinwinkelkorngrenzen,
- Großwinkelkorngrenzen.

Die *Zwillingsgrenze* ($Z-Z$ in Bild 1-11) ist frei von Gitterverzerrungen. Die beiden Kristallbereiche liegen spiegelsymmetrisch zu ihr. Die Zwillingsgrenze ist kohärent, weil die Gitter dieser Bereiche gleichartig sind. Bild 1-11 zeigt, dass die für die Zwillingbildung erforderlichen Verschiebungen der Atome nur sehr klein sind. Diese Bewegung kann also im Gegensatz zum Abgleitprozess sehr rasch erfolgen.

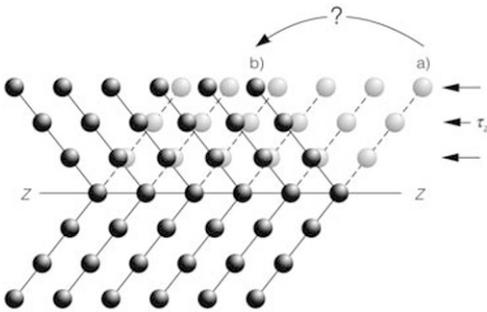


Bild 1-11
Schematische Darstellung der Zwillingbildung. Man beachte die nur geringe erforderliche Verschiebung der Atome in den drei gezeichneten Netzebenen. Ein Umklappen von a) nach b) ist also keinesfalls notwendig. τ_z = Die zum Erzeugen von Zwillingen erforderliche Schubspannung.

- = Position der Atome vor,
- = Position der Atome nach der Zwillingbildung.

Zwillinge können durch mechanische (meist schlagartige) Verformung (*Verformungszwillinge*) entstehen oder nach dem Glühen eines kaltverformten Werkstoffes. Die *Glühzwillinge*, Bild 1-12, sind breiter und i. Allg. gerade verlaufend, im Gegensatz zu den meistens gekrümmten Verformungszwillingen.

Da durch die Zwillingbildung eine Orientierungsänderung der Kristallbereiche entsteht, können neue zur angreifenden Kraft günstiger verlaufende Gleitebenen aktiviert werden, die ein weiteres Abgleiten ermöglichen bzw. erleichtern. Das bekannte »Zinn-geschrei« beruht z. B. auf einer spontanen Bildung von (Verformungs-)Zwillingen.

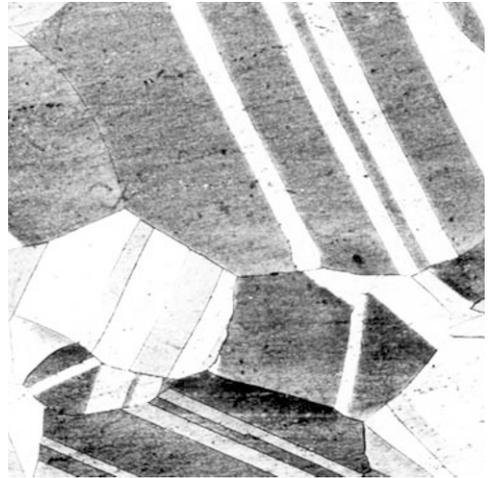


Bild 1-12
Glühzwillinge in Kupfer, $V=200:1$.

Die meisten Metalle bestehen aus Kristalliten, die voneinander durch Korngrenzen getrennt sind (Abschn. 1.4.2). Das sind Bereiche mit einer relativ großen Fehlanpassung der Atome, Bild 1-7. Als Folge der hohen Fehlstellendichte (insbesondere Leerstellen und Versetzungen) ist hier die Konzentration gelöster Atome, z. B. Verunreinigungen aller Art, besonders groß. Die Phasengrenzflächen »Korngrenzen« befinden sich in einem nicht stabilen Zustand, weil die der Oberfläche angehörenden Atome nicht wie die im Kristallinneren allseitig von Nachbaratomen umgeben sind. An der Oberfläche fehlen die nach außen gerichteten Kräfte. Die Folge ist eine in Richtung des Kristallinneren weisende resultierende Kraft F_{res} , die die Oberfläche »zusammenhält«. Kenngröße dieser Eigenschaft ist die *Oberflächenenergie* γ (genauer freie Enthalpie) bei festen Grenzflächen, bei flüssigen Grenzflächen wird sie auch *Oberflächen-spannung* genannt. Ihr Wert wird meistens in J/cm^2 angegeben.