

HANSER



Leseprobe

zu

Werkstofftechnik

Werkstoffe – Eigenschaften – Prüfung – Anwendung

von Wolfgang W. Seidel und Frank Hahn

ISBN (Buch): 978-3-446-45415-6

ISBN (E-Book): 978-3-446-45688-4

© 2018 Carl Hanser Verlag, München

Vorwort des Herausgebers

Was können Sie mit diesem Buch lernen?

Wenn Sie dieses Lernbuch durcharbeiten, dann erwerben Sie umfassende Kenntnisse über Werkstoffe, die Sie bei der Entwicklung von Projekten und für die Lösung produktionstechnischer Aufgaben benötigen.

Der Umfang dessen, was wir Ihnen anbieten, orientiert sich an

- den Studienplänen der Hochschulen und Berufsakademien für Technik,
- den Lehrplänen der Fachschulen für Technik in den Bundesländern.

Jeder Problemkreis wird in praxisgerechter, dem Stand der Technik entsprechender Form aufgearbeitet.

Das heißt, Sie können dabei stets folgenden Fragen nachgehen:

- Welches werkstofftechnologische Problem stellt sich dar?
- Welche Struktur und Eigenschaften der Werkstoffe liegen vor?
- Wo liegen die Lösungsmöglichkeiten und Grenzen?
- Welche Prüfverfahren sind einzusetzen?

Wer kann mit diesem Buch lernen?

Jeder, der

- sich weiterbilden möchte,
- elementare Kenntnisse in der Mathematik und den Naturwissenschaften besitzt,
- grundlegende Kenntnisse in der Mechanik erworben hat.

Das können sein:

- Studierende an Fachhochschulen und Berufsakademien und Ingenieure,
- Studierende an Fachschulen für Technik und Techniker,
- Schüler an beruflichen Gymnasien, Berufsoberschulen und Berufsfachschulen,
- Facharbeiter, Gesellen und Meister während und nach der Berufsausbildung,
- Umschüler und Rehabilitanden,
- Teilnehmer an Fort- und Weiterbildungskursen,
- Autodidakten

vor allem im Bereich der Maschinenbautechnik.

Wie können Sie mit diesem Buch arbeiten?

Ganz gleich, ob Sie mit diesem Buch in Schule, Betrieb, Lehrgang oder zu Hause im „stillen Kämmerlein“ arbeiten, es wird Ihnen endlich Freude machen.

Warum?

Ganz einfach, weil Ihnen hierzu, unseres Wissens, zum ersten Male in der technischen Literatur ein Buch vorgelegt wird, das bei der Gestaltung die Gesetze des menschlichen Lernens zur Grundlage machte. Deshalb werden Sie in jedem Kapitel zuerst mit dem bekanntgemacht, was Sie am Ende können sollen: mit den Lernzielen.

– Ein Lernbuch also! –

Danach beginnen Sie, sich mit dem Lerninhalt, dem Lernstoff, auseinanderzusetzen. Schrittweise dargestellt, ausführlich beschrieben in der linken Spalte des Buches und umgesetzt in die technisch-wissenschaftliche Darstellung auf der rechten Seite des Buches. Die eindeutige Zuordnung des behandelten Stoffes in beiden Spalten macht das Lernen viel leichter, umblättern ist nicht mehr nötig. Zur Vertiefung stellen Ihnen die Autoren Beispiele vor.

– Ein unterrichtsbegleitendes Lehrbuch. –

Jetzt können und sollten Sie sofort die Übungsaufgaben durcharbeiten, um das Gelernte so abzusichern, festzumachen. Den wesentlichen Lösungsgang und das Ergebnis der Übungen haben die Autoren am Ende des Buches für Sie aufgeschrieben.

– Also auch ein Arbeitsbuch mit Lösungen. –

Sie wollen sicher sein, dass Sie richtig und vollständig gelernt haben. Deshalb bieten Ihnen die Autoren nun einen lernzielorientierten Test an, zur Lernerfolgskontrolle. Ob Sie richtig geantwortet haben, sagt Ihnen die Testauflösung am Ende des Buches.

– Ein lernzielorientierter Test mit Lösungen. –

Trotz intensiven Lernens über Beispiele und Übungen und der Bestätigung des Gelernten im Test als erste Wiederholung verliert sich ein Teil des Wissens und Könnens wieder, wenn Sie nicht bereit sind, am Anfang oft und dann in immer längeren Zeiträumen zu wiederholen!

Das wollen Ihnen die Autoren erleichtern.

Sie haben die jeweils rechten Spalten des Buches auch noch so geschrieben, dass hier die wichtigsten Lerninhalte als Satz, stichwortartig, als Formel oder als Skizze zusammengefasst sind. Sie brauchen deshalb beim Wiederholen und auch Nachschlagen meistens nur die rechten Buchspalten zu lesen.

– Schließlich noch Repetitorium! –

Diese Arbeit ist notwendigerweise mit dem Aufsuchen der entsprechenden Kapitel oder gar dem Suchen von bestimmten Begriffen verbunden. Dafür verwenden Sie bitte das Inhaltsverzeichnis am Anfang und das Sachwortverzeichnis am Ende des Buches.

– Selbstverständlich mit Inhalts- und Sachwortverzeichnis. –

Sicherlich werden Sie durch die intensive Arbeit mit dem Buch „Ihre Bemerkungen zur Sache“ unterbringen wollen, um es so zum individuellen Arbeitsmittel zu machen, das Sie auch später gern benutzen. Deshalb haben wir für Ihre Notizen auf den Seiten Platz gelassen.

– Am Ende ist „Ihr“ Buch entstanden. –

Möglich wurde dieses Lernbuch für Sie durch die Bereitschaft der Autoren und die intensive Unterstützung durch den Verlag und seine Mitarbeiter. Beiden sollten wir herzlich danken.

Nun darf ich Ihnen viel Freude und Erfolg beim Lernen wünschen!

Manfred Mettke

Vorwort

Die Eigenschaften von Bauteilen für Maschinen, Anlagen, Geräte, Fahrzeuge, Apparate usw. hängen sehr wesentlich davon ab, ob der richtige Werkstoff verwendet wird. Für technische Berufe sind deshalb Kenntnisse über Werkstoffe unerlässlich.

Das vorliegende *Lernbuch* folgt dem Wunsch, angehenden Technikern, Studenten technischer Fachrichtungen und Teilnehmern von Fortbildungsveranstaltungen das Studium werkstofftechnischer Grundlagen nach einer bewährten didaktischen Konzeption zu ermöglichen. In leicht erlernbarer Form vermittelt die zweispaltige Darstellung die chemischen und physikalischen Grundlagen der Werkstoffe, die daraus abzuleitenden Eigenschaften und deren Prüfung sowie die Verarbeitbarkeit und die Anwendungsmöglichkeiten. Werkstoffgruppen, einzelne Werkstoffe und Verfahren zur gezielten Beeinflussung der Werkstoffeigenschaften sind *exemplarisch* beschrieben.

Vordergründig wird der Zusammenhang zwischen Struktur, Gefüge und den Eigenschaften und deren mögliche Beeinflussung (Wärmebehandlung, Veredlung etc.) deutlich gemacht. Neben wichtigen Konstruktionswerkstoffen einschließlich der *Verbundwerkstoffe* sind die Themen *Werkstoffprüfung* sowie *Korrosion* und *Korrosionsschutz* Gegenstand des Buches. Einteilung und Bezeichnung der Werkstoffe erfolgen in Anlehnung an das gültige Normenwerk.

Besonderer Dank gilt Frau Angela Bergner, Hochschule Mittweida, für ihre Unterstützung bei der weiteren Aktualisierung der grafischen Darstellungen, Frau Ute Eckardt, Frau Christine Fritsch und Frau Katrin Wulst vom Verlag für die kontinuierliche Förderung des Buches.

Chemnitz und Mittweida, im Sommer 2018

Die Autoren

Inhaltsverzeichnis

Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen	15
1 Struktur und Eigenschaften der Metalle	19
1.0 Überblick	19
1.1 Metallbindung und Gitterstruktur	19
1.1.0 Übersicht	19
1.1.1 Wechselwirkung zwischen Atomen	20
1.1.2 Kristallstruktur der Metalle	25
1.1.2.1 Der kristalline Zustand (Idealkristall)	25
1.1.2.2 Gittertypen	28
1.1.2.3 Realstruktur	32
1.1.2.4 Gitterstruktur und technische Eigenschaften	36
1.2 Kristallisation	39
1.2.0 Übersicht	39
1.2.1 Phasenumwandlungen	40
1.2.2 Thermische Analyse	42
1.2.3 Übergang flüssig–kristallin	43
1.3 Elastische und plastische Verformung	48
1.3.0 Übersicht	48
1.3.1 Mechanische Beanspruchung	48
1.3.2 Elastische Verformung	49
1.3.3 Plastische Verformung	50
1.4 Thermisch aktivierte Vorgänge	56
1.4.0 Übersicht	56
1.4.1 Gittervorgänge unter Temperatureinfluss	57
1.4.2 Diffusion	57
1.4.3 Erholung und Rekristallisation	61
Lernzielorientierter Test zu Kapitel 1	67
2 Legierungen	69
2.0 Überblick	69
2.1 Aufbau der Legierungen	69
2.1.0 Übersicht	69
2.1.1 Mischkristall	70
2.1.2 Überstruktur	71
2.1.3 Intermetallische Verbindungen	72
2.1.4 Gefügebau der Legierungen	73
2.2 Zustandsdiagramme	74
2.2.0 Übersicht	74
2.2.1 Begriffe, Einstoffsystem	75

2.2.2	Zweistoffsysteme (binäre Systeme)	76
2.2.2.0	Einführung	76
2.2.2.1	Völlige Löslichkeit im festen Zustand	78
2.2.2.2	Unlöslichkeit im festen Zustand	79
2.2.2.3	System mit begrenzter Löslichkeit im festen Zustand – eutektisches System	79
2.2.2.4	System mit begrenzter Löslichkeit im festen Zustand – peritektisches System	82
2.2.3	Das Lesen der Zweistoffdiagramme	83
2.2.3.1	Regeln	83
2.2.3.2	Beispiele	83
2.3	Legierungseigenschaften	86
2.3.0	Übersicht	86
2.3.1	Tendenzen	87
	Lernzielorientierter Test zu Kapitel 2	90
3	Eisen-Kohlenstoff-Legierungen	91
3.0	Überblick	91
3.1	Reines Eisen	91
3.2	Komponente Kohlenstoff	93
3.3	Allgemeines zum System Eisen-Kohlenstoff	94
3.4	System Eisen-Eisencarbid ($\text{Fe-Fe}_3\text{C}$)	95
3.5	Die Gefügearten des Systems Eisen-Eisencarbid	99
3.6	Einteilung der Eisenwerkstoffe	103
3.7	Stabiles System Eisen-Kohlenstoff (Fe-C)	104
	Lernzielorientierter Test zu Kapitel 3	106
4	Wärmebehandlung der Eisenwerkstoffe	108
4.0	Überblick	108
4.1	Grundlagen der Wärmebehandlung	108
4.1.0	Übersicht	109
4.1.1	Erwärmung in das Austenitgebiet (Austenitisierung)	111
4.1.2	Abkühlung aus dem Austenitgebiet	113
4.2	Thermische Verfahren	126
4.2.0	Übersicht	126
4.2.1	Glühen	126
4.2.1.1	Diffusionsglühen	128
4.2.1.2	Grobkornglühen	128
4.2.1.3	Normalglühen	129
4.2.1.4	Glühen auf kugelige Carbide	130
4.2.1.5	Spannungsarmglühen	132
4.2.1.6	Rekristallisationsglühen	133
4.2.2	Härten und Anlassen	135
4.2.3	Vergüten	139
4.2.4	Randschichthärten	143

4.3	Thermochemische Verfahren	147
4.3.0	Übersicht	147
4.3.1	Einsatzhärten	149
4.3.2	Nitrieren	153
4.4	Thermomechanische Verfahren	157
4.4.0	Übersicht	157
4.4.1	Verfahrensgrundlagen	158
4.4.2	Verfahrensvarianten	159
	Lernzielorientierter Test zu Kapitel 4	161
5	Eisengusswerkstoffe	163
5.0	Überblick	163
5.1	Erstarrung und Gefügeausbildung von Eisengusswerkstoffen	163
5.1.0	Übersicht	163
5.1.1	Einteilung der Eisengusswerkstoffe	164
5.1.2	Schwindung, Lunker, Gasblasen und Seigerung	165
5.1.3	Gefügeausbildung bei Eisengusswerkstoffen	169
5.1.3.1	Stabile und metastabile Erstarrung	169
5.1.3.2	Grundgefüge	170
5.1.3.3	Der Einfluss von Abkühlgeschwindigkeit und Wandstärke des Gussteiles	172
5.1.3.4	Graphitformen bei Gusseisen	174
5.2	Gusseisen mit Lamellengraphit	177
5.2.0	Übersicht	177
5.2.1	Erschmelzung und chemische Zusammensetzung	177
5.2.2	Wärmebehandlung	179
5.2.3	Eigenschaften und Anwendung	180
5.3	Grauguss mit Kugelgraphit	183
5.3.0	Übersicht	183
5.3.1	Erschmelzung und chemische Zusammensetzung	183
5.3.2	Wärmebehandlung	185
5.3.3	Eigenschaften und Anwendung	188
5.4	Weitere Eisengusswerkstoffe	190
	Lernzielorientierter Test zu Kapitel 5	195
6	Eisenknetwerkstoffe	197
6.0	Überblick	197
6.1	Stähle – Einteilung und Bezeichnungssysteme	197
6.1.0	Übersicht	197
6.1.1	Stahl – Definition	198
6.1.2	Einteilung der Stähle	201
6.1.3	Eisenbegleiter und Legierungselemente	204
6.1.4	Bezeichnung der Stähle	209
6.2	Stahlgruppen	216
6.2.0	Übersicht	216
6.2.1	Baustähle	216

6.2.2	Baustähle für bestimmte Wärmebehandlungen	222
6.2.3	Nichtrostende Stähle	226
6.2.4	Werkzeugstähle	231
6.2.4.1	Unlegierte und legierte Kaltarbeitsstähle	234
6.2.4.2	Warmarbeitsstähle	236
6.2.4.3	Schnellarbeitsstähle	237
	Lernzielorientierter Test zu Kapitel 6	240
7	Nichteisenmetalle (NE-Metalle)	241
7.0	Überblick	241
7.1	Allgemeines zur Werkstoffbezeichnung	242
7.1.0	Übersicht	242
7.1.1	Werkstoff- und Zustandsbezeichnungen nach EN	242
7.2	Aluminium, Aluminiumlegierungen	244
7.2.0	Übersicht	244
7.2.1	Reinaluminium	245
7.2.1.1	Eigenschaften	245
7.2.1.2	Anwendung	246
7.2.2	Aluminiumlegierungen	246
7.2.2.1	Einteilung, Eigenschaften	246
7.2.2.2	Wirkung der Legierungselemente	247
7.2.2.3	Aushärten	249
7.2.3	Legierungstyp, technische Anwendung	252
7.3	Kupfer, Kupferlegierungen	256
7.3.0	Übersicht	256
7.3.1	Reinkupfer	256
7.3.2	Kupfer-Zink-Legierungen (Messing)	258
7.3.3	Kupfer-Zinn-Legierungen	261
7.4	Magnesium, Magnesiumlegierungen	262
7.4.0	Übersicht	262
7.4.1	Reinmagnesium	263
7.4.2	Magnesiumlegierungen	263
7.5	Titan, Titanlegierungen	264
7.5.0	Übersicht	264
7.5.1	Reintitan	265
7.5.2	Titanlegierungen	266
	Lernzielorientierter Test zu Kapitel 7	266
8	Sinterwerkstoffe	268
8.0	Überblick	268
8.1	Grundlagen der Sintertechnik	268
8.1.0	Übersicht	269
8.1.1	Pulverherstellung	269
8.1.2	Formgebung	269
8.1.3	Sintern	270
8.1.4	Nachbehandlung	272

8.2	Eigenschaften, Anwendungsgebiete	272
8.2.0	Übersicht	273
8.2.1	Sintermetalle	273
8.2.2	Gesinterte Carbidhartmetalle (Hartmetalle)	274
8.2.3	Oxid- und Mischkeramik	274
8.2.4	Nichtoxidkeramik	276
	Lernzielorientierter Test zu Kapitel 8	277
9	Korrosion und Korrosionsschutz	278
9.0	Überblick	278
9.1	Grundlagen	278
9.1.0	Übersicht	278
9.1.1	Ursachen der Korrosion	279
9.1.2	Chemische Korrosion	279
9.1.3	Elektrochemische Korrosion	280
9.1.4	Passivierung	282
9.2	Korrosionsarten	283
9.2.0	Übersicht	283
9.2.1	Korrosionsarten ohne mechanische Beanspruchung	284
9.2.1.1	Gleichmäßige und ungleichmäßige Flächenkorrosion	284
9.2.1.2	Lochkorrosion	284
9.2.1.3	Spaltkorrosion	285
9.2.1.4	Bimetallkorrosion (Kontaktkorrosion)	285
9.2.2	Korrosionsarten mit mechanischer Beanspruchung	286
9.2.2.1	Spannungskorrosion/Spannungsrissskorrosion	286
9.2.2.2	Schwingungsrissskorrosion	286
9.2.2.3	Erosions- und Kavitationskorrosion	287
9.3	Korrosionsschutz	288
9.3.0	Übersicht	288
9.3.1	Aktiver Korrosionsschutz	289
9.3.1.1	Werkstoffauswahl	289
9.3.1.2	Korrosionsschutzgerechtes Konstruieren	290
9.3.1.3	Katodischer Korrosionsschutz	290
9.3.1.4	Beeinflussung des Korrosionsmediums	291
9.3.2	Passiver Korrosionsschutz	292
9.3.2.1	Vorbereitung der Oberfläche	292
9.3.2.2	Organische Beschichtungen	292
9.3.2.3	Metallische Überzüge	294
	Lernzielorientierter Test zu Kapitel 9	297
10	Kunststoffe	298
10.0	Überblick	298
10.1	Struktur von Kunststoffen	298
10.1.0	Übersicht	299
10.1.1	Entstehung der Makromoleküle	299
10.1.2	Räumliche Anordnung der Makromoleküle	302
10.1.3	Hilfs- und Zusatzstoffe	306

10.2	Eigenschaften und Verarbeitung von Kunststoffen	307
10.2.0	Übersicht	307
10.2.1	Allgemeine Eigenschaften	308
10.2.2	Thermisch mechanische Eigenschaften von Kunststoffen	310
10.2.2.1	Einfluss von Struktur und Temperatur	310
10.2.2.2	Einfluss der Belastungsdauer/-geschwindigkeit	317
10.3	Verarbeitung von Kunststoffen	319
10.4	Ausgewählte Kunststoffe	321
10.4.0	Übersicht	322
10.4.1	Thermoplaste	322
10.4.1.1	Polyethylen PE	322
10.4.1.2	Polypropylen PP	323
10.4.1.3	Polystyrol PS	324
10.4.1.4	Polyvinylchlorid PVC	324
10.4.1.5	Polyethylenterephthalat PET	325
10.4.1.6	Weitere technische Thermoplaste	326
10.4.2	Duroplaste	327
10.4.2.1	Epoxidharz EP	327
10.4.2.2	Ungesättigtes Polyesterharz UP	328
10.4.2.3	Polyurethan (vernetzt) PUR	329
10.4.3	Elastomere	330
10.4.3.1	Naturkautschuk NR	330
10.4.3.2	Styrol-Butadien-Kautschuk SBR	331
	Lernzielorientierter Test zu Kapitel 10	332
11	Verbundwerkstoffe	333
11.0	Überblick	333
11.1	Die Struktur von Verbundwerkstoffen	333
11.1.0	Übersicht	333
11.1.1	Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde	334
11.1.2	Verbundwerkstoffe – ihre Einsatzziele	338
11.2	Teilchen- und faserverstärkte Verbundwerkstoffe	339
11.2.0	Übersicht	339
11.2.1	Teilchenverstärkte Verbundwerkstoffe	340
11.2.2	Faserverstärkte Verbundwerkstoffe	344
	Lernzielorientierter Test zu Kapitel 11	351
12	Werkstoffprüfung	352
12.0	Überblick	352
12.1	Grundlagen der Werkstoffprüfung	352
12.1.0	Übersicht	352
12.1.1	Werkstoffbeanspruchung	353
12.1.2	Werkstoffprüfung – Begriff, Aufgaben und Einteilung der Werkstoffprüfverfahren	355
12.2	Mechanische Werkstoffprüfung	358
12.2.0	Übersicht	358

12.2.1	Zugversuch	358
12.2.1.0	Übersicht	358
12.2.1.1	Prüfprinzip	359
12.2.1.2	Versuchsauswertung, Kenngrößen	362
12.2.1.3	Werkstoffverhalten unter Zugbeanspruchung	369
12.2.2	Härteprüfung	374
12.2.2.0	Übersicht	374
12.2.2.1	Härteprüfung nach Brinell	376
12.2.2.2	Härteprüfung nach Vickers	378
12.2.2.3	Härteprüfung nach Rockwell (HRC)	380
12.2.2.4	Instrumentierte Eindringprüfung – Martenshärte	382
12.2.2.5	Umwerten von Härtewerten	384
12.2.3	Zähigkeitsprüfung	385
12.2.3.0	Übersicht	385
12.2.3.1	Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy	387
12.2.4	Bruchmechanische Werkstoffprüfung	392
12.2.4.1	Linear elastische Bruchmechanik LEBM	394
12.2.4.2	Fließbruchmechanik FBM	397
12.2.5	Dauerschwingprüfung	402
12.2.5.0	Übersicht	402
12.2.5.1	Dynamische Beanspruchung und Werkstoffverhalten	403
12.2.5.2	Dauerschwingversuch	405
12.2.5.3	Das Dauerfestigkeitsdiagramm nach Smith	414
12.3	Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung	418
12.3.0	Übersicht	418
12.3.1	Durchstrahlungsprüfung	419
12.3.2	Ultraschallprüfung	423
12.3.3	Magnetische Prüfverfahren	428
12.3.3.1	Einführung	428
12.3.3.2	Magnetpulverprüfung	429
12.3.3.3	Wirbelstromprüfung	432
12.4	Gefügeanalyse – Materialographie	436
12.4.0	Überblick	436
12.4.1	Makroskopische Untersuchungen	436
12.4.2	Lichtmikroskopie	437
12.4.3	Rasterelektronenmikroskopie	442
12.4.4	Transmissionselektronenmikroskopie	445
	Lernzielorientierter Test zu Kapitel 12	446
	Lösungsteil	448
	Weiterführende Literatur	464
	Auskunfts- und Beratungsstellen	464
	Sachwortverzeichnis	465

2 Legierungen

2.0 Überblick

Metallische Werkstoffe begegnen uns überwiegend als Legierungen. Reine Metalle (technisch rein, d. h. mit bestimmten zulässigen Mengen an Verunreinigungen) finden sehr begrenzt, für spezielle Fälle Verwendung. Nachdem im Kapitel 1 die reinen Metalle in ihrem prinzipiellen Aufbau beschrieben und wichtige, daraus abzuleitende Eigenschaften erklärt wurden, wenden wir uns nun der Struktur realer technischer Werkstoffe zu. Neben Metallen können auch Nichtmetalle in Legierungen enthalten sein. Diese spielen für die Eigenschaften teilweise eine große Rolle. Anhand von Zweistofflegierungen wird in diesem Kapitel ein Überblick über den *Legierungsaufbau*, die so genannten *Zustandsdiagramme* und die *Eigenschaften der Legierungen* gegeben.

Sie lernen in diesem Kapitel Zusammenhänge kennen, die für das Verständnis metallurgischer Prozesse (Herstellung der Legierungen), von Aushärtévorgängen bei Leichtmetall-Legierungen, der Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen u. a. Vorgänge erforderlich sind.

2.1 Aufbau der Legierungen

Lernziele

Der Lernende kann ...

- erklären, was „im festen Zustand löslich“ bedeutet,
- alle in Legierungen möglichen Phasen nennen und beschreiben,
- Beispiele für typische Mischkristallbildung nennen,
- intermetallische Phasen erklären (typische Kristallstruktur und Eigenschaften),
- das Gelernte prinzipiell auf Mehrstoffsysteme (Mehrstofflegierungen) übertragen.

2.1.0 Übersicht

Aufbau und Eigenschaften metallischer Werkstoffe lassen sich einfach beschreiben, indem zunächst die möglichen Phasen betrachtet werden, die allein oder nebeneinander existieren. Verschiedene Elemente können je nach Gittertyp, Gitterparameter und Atomradius gemeinsame Gitterstrukturen bilden.

Der Grad der Mischbarkeit oder Löslichkeit im festen Zustand und die Fähigkeit, gemeinsam Phasen zu bilden, unterscheidet die *Legierungssysteme*. Man kennt Einlagerungs- und Austauschmischkristalle, Überstrukturen und intermetallische Phasen. Liegen Kristallite der beteiligten Komponenten bzw. verschiedene Legierungsphasen im Gesamtgefüge nebeneinander vor, so spricht man von einem *Kristallgemisch* (Kristallgemenge).

Legierungen sind Stoffsysteme, die aus mindestens zwei Komponenten (Atome/Ionen von mindestens zwei verschiedenen Elementen) bestehen und überwiegend metallischen Charakter haben.

2.1.1 Mischkristall

Häufig sind Metalle bereits bei der Erstarrung fähig, andere Elemente (Metalle oder Nichtmetalle) im kristallinen Gitter mit einzubauen. Es entstehen *atomare Mischungen* oder *festе Lösungen*.

Im Gegensatz zu valenzmäßig abgesättigten chemischen Verbindungen kann das Mischungsverhältnis in weiten Grenzen variabel sein. Man unterscheidet *Austausch-* oder *Substitutionsmischkristalle* und *Einlagerungsmischkristalle*, s. Abschnitt 1.1.2.3.

Substitution = Austausch

- *Austausch- oder Substitutionsmischkristalle* (Bild 2.1-1)

Die Atome beider Elemente nehmen die gleichen Gitterplätze ein. Diese Phase kann sich nur bilden, wenn sich die Atomradien wenig unterscheiden. Es sind ausschließlich Metalle beteiligt, und man spricht von echten Legierungen.

Löslichkeit oder Mischbarkeit im festen Zustand ist das Vermögen eines Elements, fremde Elemente im kristallinen Gitter mit einzubauen (während der Erstarrung oder durch Diffusion bei hohen Temperaturen).

Beispiele für Mischkristallbildung (Mk-Bildung)

Cu-Ni, γ -Fe-Ni, Ag-Au	lückenlose
	Mk-Reihen
Cu-Ag, Cu-Zn, Ni-Ag	begrenzte
	Mischbarkeit

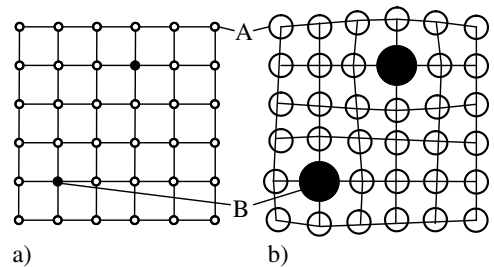


Bild 2.1-1 Austauschmischkristall (Substitutionsmischkristall)

A, B verschiedene Atomarten

a) Gittermodell

b) Kugelmodell (unterschiedliche Atomgröße bewirkt Gitterverzerrungen)

- *Einlagerungsmischkristalle* (Bild 2.1-2)

Atome des Zusatzelements (Metalle oder Nichtmetalle) lagern sich auf Zwischengitterplätzen des Wirtsgitters (Gitter des Grundmetalls) ein. Eingelagert werden kleinere Atome (Wasserstoff, Stickstoff, Kohlenstoff). Der α -, γ - und δ -Mischkristall im System Eisen-Kohlenstoff sind technisch wichtige Beispiele für diese Legierungsart.

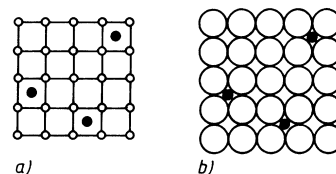


Bild 2.1-2 Einlagerungsmischkristall (ohne Gitterverzerrungen)

a) Gittermodell

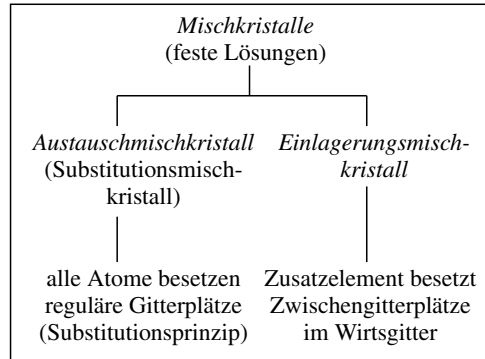
b) Kugelmodell

Bei Mischkristallphasen bleibt das Gitter erhalten. Die substituierten oder eingelagerten Atome verursachen, schon allein durch die Unterschiede im Atomdurchmesser, Gitteraufweitungen. Diese Verzerrungen führen zu Eigenschaftsänderungen. Man erhält z. B. durch die Blockierung der Gleitebenen einen deutlich erhöhten *Verformungswiderstand* (*Mischkristallverfestigung*). Auch andere, physikalische Eigenschaften ändern sich deutlich. Darauf wird im Abschnitt 2.3 näher eingegangen.

Die Verteilung der Fremdatome B in einem Grundgitter von A kann sehr unterschiedlich sein.

Verteilung gleichmäßig: *Homogener* Mischkristall

Verteilung ungleichmäßig: *Inhomogener* Mischkristall



Mischkristalle werden mit griechischen Buchstaben bezeichnet.

Verwechslungsmöglichkeiten:

- a) polymorphe Metalle, z. B. α -Fe, γ -Fe
- b) bestimmte intermetallische Phasen, z. B. ϑ oder Θ , für Al_2Cu

2.1.2 Überstruktur

Überstrukturen (Bild 2.1–3b) sind Ordnungsphasen. Sie sind eine Sonderform des Austauschmischkristalls. Bei einem bestimmten Mengenverhältnis und in einem bestimmten Temperaturintervall stellt sich eine gleichmäßige und symmetrische Atomverteilung ein, ohne dass sich der Gittertyp ändert.

Die Bildung derartiger Ordnungsphasen führt teilweise zu sprunghaften Änderungen der elektrischen und magnetischen Eigenschaften in den betreffenden Werkstoffbereichen.

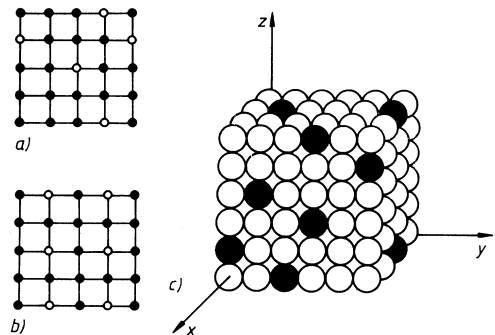


Bild 2.1–3 Atomanordnungen im Austauschmischkristall (ohne Gitterverzerrungen)

- a) Mischkristall (Fremdatome zufällig im Gitter verteilt)
- b) Überstruktur (geordnete Struktur der substituierten Atome)
- c) räumliche Darstellung eines Austauschmischkristalles

Überstrukturen sind Ordnungsphasen mit charakteristischen Eigenschaften.

Beispiele für Überstrukturen:

AuCu , AuCu_3 , Fe_3Al , FeCo , Ni_3Fe

2.1.3 Intermetallische Verbindungen

Einige Metalle bilden miteinander oder mit Nichtmetallen Verbindungen mit metallischem Charakter. Man spricht auch von *intermetallischen Phasen* oder *intermediären Kristallarten* (Bilder 2.1–4 bis 2.1–6). Die Atome der Stoffe A und B sind darin im definierten Verhältnis $m : n$ eingebaut. Jede intermetallische Verbindung A_mB_n kristallisiert, abweichend vom Gittertyp des reinen Stoffs A oder B, in einem eigenen typischen Gitter.

Das Gitter ist meist kompliziert. Intermetallische Phasen weisen neben der metallischen Bindung auch ionische Bindungsanteile auf. Sie sind deshalb thermisch und mechanisch sehr stabil. Viele von ihnen sind hart und spröde.

Sie werden mit der Formel A_mB_n wie klassische chemische Verbindungen bezeichnet. Wertigkeiten, nicht exakt stöchiometrische Zusammensetzungen und Gitterstruktur (keine Molekülstruktur im Sinne der Chemie) unterscheiden intermetallische Phasen von chemischen Verbindungen.

Beachten Sie!

Griechische Buchstaben werden in der Werkstofftechnik mit unterschiedlicher Bedeutung verwendet:

- Achsenwinkel zur Darstellung des Raumgitters und der Elementarzelle
- Gittermodifikationen reiner Metalle (polymorphe Metalle, z. B. α -Fe, γ -Fe, δ -Fe)
- Bezeichnung fester Phasen, z. B. Mischkristalle, Überstrukturen, Intermetallische Phasen

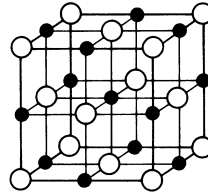


Bild 2.1–4 Intermetallische Phase, NaCl-Typ (z. B. Hartstoffe TiC, TiN, VC, NbC, TaC und in verschiedenen aushärtbaren Legierungen)

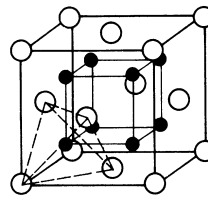


Bild 2.1–5 Intermetallische Phase, Mg_2Pb -Typ (z. B. Mg_2Si , Mg_2Pb , Al_2Cu)

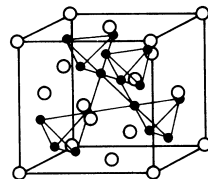


Bild 2.1–6 Intermetallische Phase, $MgCu_2$ -Typ (z. B. $CuBe_2$, $MgCu_2$, aushärtbare Legierungen)

Intermetallische Verbindungen (Metall/Metall) oder *intermediäre Verbindungen* (Metall/Nichtmetall) zeichnen sich durch eine eigene, meist komplizierte Gitterstruktur aus. Dazu gehören die harten und spröden *Carbide* (z. B. WC, W_2C , Mo_2C , VC, TiC) und *Nitride* (z. B. TiN, Mo_2N , Fe_4N). Die Schmelztemperaturen und die Mikrohärtewerte dieser Phasen liegen hoch.

2.1.4 Gefügeaufbau der Legierungen

Erstarrt eine Schmelze, in der zwei Atomarten (A + B) als *homogene Lösung* vorliegen, so können je nach Art der beteiligten Elemente

- a) Mischkristalle oder intermetallische Phasen (einzeln oder nebeneinander) oder
- b) reine Kristalle der beteiligten Elemente (nebeneinander oder mit Phasen nach a) gemischt auftreten.

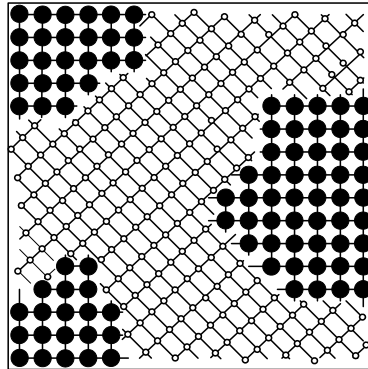
Besteht der Werkstoff nur aus Kristallen einer einzigen Phase, so weist er ein homogenes Gefüge auf.

Existieren verschiedene Phasen als Kristallite in einer Legierung nebeneinander, so spricht man von einem heterogenen Gefüge bzw. einem *Kristallgemisch* (Bild 2.1–7). Praktische Bedeutung:

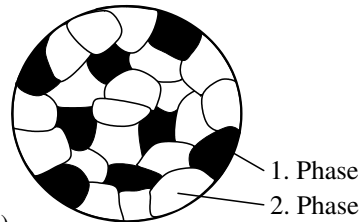
- *Homogene Mischkristalle* werden z. B. bei korrosionsbeständigen Stählen gefordert.
- *Heterogene Gefüge* (harte und weiche Kristallite nebeneinander) sind z. B. bei verschiedenen Lagerwerkstoffen erwünscht.

Legierungen können im festen Zustand folgende *Phasen* enthalten:

- reine Kristalle von A und B
- Austauschmischkristalle, Überstrukturen
- Einlagerungsmischkristalle
- intermetallische Phasen



a)



b)

Bild 2.1–7 Kristallgemisch (heterogenes Gefüge)

a) Kugelmodell (2 Atomarten)

b) Gefüge (2 beliebige, verschiedene feste Phasen)

In einem *Kristallgemisch* (Kristallgemenge) existieren mindestens zwei Phasen (nicht mischbar) im Gefüge nebeneinander (*heterogenes Gefüge*).

Übung 2.1–1

Welche Mischkristallarten kennen Sie?

Übung 2.1–2

Welche Haupteigenschaften haben intermetallische Phasen?

Übung 2.1–3

Was ist ein Kristallgemisch?

des Rohstahles werden in 250 mm dicken und 1500 mm ... 2000 mm breiten endlosen Strängen (Brammen) *vergossen*. Der restliche Teil des *Stahles* wird zu Blöcken, Dünnbrammen oder dünnen Bändern vergossen. Nach dem Vergießen schließt sich zwingend das Walzen oder Schmieden an. Bild 6.1–1 gibt schematisch einen Überblick über den Prozess der Stahlherstellung.

Übung 6.1–1

Was ist Roheisen?

Übung 6.1–2

Welche Aufgabe hat der Prozessschritt Frischen bei der Stahlherstellung?

Übung 6.1–3

Warum müssen die Stähle ausgiebig entschwefelt werden?

Übung 6.1–4

Welche Ziele werden mit der Warmumformung verfolgt?

6.1.2 Einteilung der Stähle

In der DIN EN 10 020 werden die *Stähle* unterteilt nach *chemischer Zusammensetzung* und *Hauptgüteklassen*. Nicht genormt, aber in der Praxis häufiger angewandt, ist die Einteilung nach Verwendungszweck, Weiterverarbeitung oder bestimmten chemischen oder physikalischen Eigenschaften der *Stähle*.

- a) Einteilung nach der chemischen Zusammensetzung
- unlegierte Stähle
 - legierte Stähle
 - nichtrostende Stähle

Wird der in Tabelle 6.1–1 aufgeführte Grenzgehalt nicht überschritten, ist der Stahl unlegiert. Weist mindestens ein Element einen größeren Anteil auf, handelt es sich um einen legierten Stahl. Überschreitet der Chromgehalt 10,5 % und der Kohlenstoffanteil ist kleiner als 1,2 %, dann ist der Werkstoff der Gruppe der nichtrostenden Stähle zuzuordnen.

b) Einteilung nach Hauptgüteklassen

- *Edelstähle* (legiert und unlegiert)
- *Qualitätsstähle* (legiert und unlegiert)

Edelstähle haben einen Phosphor- und Schwefelgehalt der Schmelzenanalyse von $\leq 0,02\%$ und weisen einen besonders niedrigen Gehalt an nichtmetallischen Einschlüssen auf. Durch ihre hohe Reinheit und homogene Zusammensetzung sind *Edelstähle* besonders gut für Randschichthärtung und Vergüten geeignet. Es gibt legierte und unlegierte *Edelstähle*. Um ein gleichmäßiges Ansprechen auf ein Wärmebehandlungsverfahren zu garantieren, muss der Anteil der Legierungselemente exakt eingehalten werden.

Qualitätsstähle müssen Mindestanforderungen an Zähigkeit, Korngröße und/oder Umformbarkeit erfüllen, dürfen aber einen höheren Phosphor- und Schwefelanteil als die *Edelstähle* aufweisen und haben allgemein einen geringeren Reinheitsgrad.

c) Einteilung nach Verwendungszweck, Weiterverarbeitung, nachfolgenden Wärmebehandlungsverfahren, besonderen chemischen, physikalischen und thermischen Eigenschaften

Bei der Konstruktion oder Verwendung zeigt sich, dass eine praxisnahe Einteilung der *Stähle* nach ihrem Verwendungszweck, bestimmten Verarbeitungsverfahren oder Eigenschaften sinnvoll ist. Es werden *Stähle* für konstruktive Aufgaben zur Aufnahme und Übertragung von Kräften und Momenten (Baustähle) und *Stähle* zur Bearbeitung anderer Werkstoffe (Werkzeugstähle) unter-

Tabelle 6.1–1 In DIN EN 10 020 festgelegte Grenzgehalte zwischen unlegierten und legierten Stählen

Element	Grenzgehalt in Masse-Prozent
Aluminium	0,30
Bor	0,0008
Bismut	0,10
Cobalt	0,30
Chrom	0,30
Kupfer	0,40
Lanthan und die im Periodensystem nachfolgenden 14 Elemente (einzeln gewertet)	0,10
Mangan	1,65
Molybdän	0,08
Niob	0,06
Nickel	0,30
Blei	0,40
Selen	0,10
Silicium	0,60
Tellur	0,10
Titan	0,05
Vanadium	0,10
Wolfram	0,30
Zirkonium	0,05
Sonstige (mit Ausnahme von Kohlenstoff, Phosphor, Schwefel, Stickstoff) (jeweils)	0,10

Edelstähle weisen einen maximalen Phosphor- und Schwefelgehalt von 0,02 % auf. Der zulässige Anteil an nichtmetallischen Einschlüssen ist sehr gering.

Qualitätsstähle dürfen einen höheren Phosphor- und Schwefelanteil enthalten.

schieden. Diese teilen sich dann in weitere Untergruppen auf. Wird beispielsweise ein Werkstoff im Bauwesen für Tragkonstruktionen (z. B. Stahlbauhallen) gesucht, so sind die *Stähle* mit den infrage kommenden Verarbeitungs- und Einseitseigenschaften unter der Gruppe „*Stahl* für den Stahlbau“ (genauer: „unlegierte Baustähle“ und „schweißgeeignete Feinkornbaustähle“ zu finden. Soll der *Stahl* für eine Schmiedematrize eingesetzt werden, wird ein Werkzeugstahl benötigt, der auch höheren Temperaturen standhält. Infrage kommt daher in erster Linie ein Stahl aus der Gruppe der „Warmarbeitsstähle“.

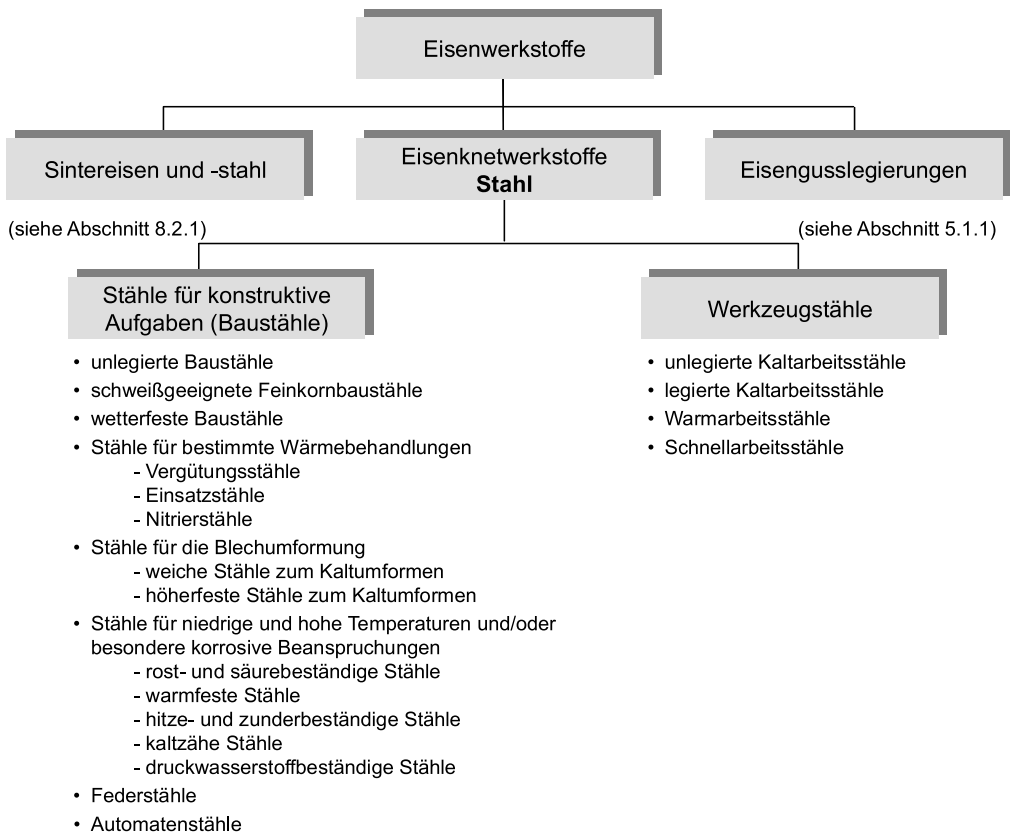


Bild 6.1–2 Einteilung der Eisenwerkstoffe und Stähle

Übung 6.1–5

Ist ein Stahl mit 1,5 % Mangan ein legierter Stahl?

Übung 6.1–6

Welche Vorteile hat ein Edelstahl gegenüber einem Qualitätsstahl?

6.1.3 Eisenbegleiter und Legierungselemente

Stähle enthalten neben Eisen und Kohlenstoff immer noch weitere Elemente. Die *Stahlbegleitelemente* (C, Mn, Si, S, P) kommen über den Hochofenprozess durch Erze bzw. den Energielieferanten Koks oder Zugabe von Schrott in den *Stahl*. Außerdem reichern sich beim *Frischen* und durch den Kontakt mit der Atmosphäre in der Stahlschmelze Sauerstoff, Stickstoff und Wasserstoff an. Sauerstoff und Schwefel können außerdem Verbindungen eingehen, die im Stahl als unerwünschte nichtmetallische Einschlüsse zu finden sind. Um die Eigenschaften des *Stahles* gezielt zu verändern, können *Legierungselemente* in genauer Dosierung zugegeben werden.

Die Wirkung der *Begleit-* und *Legierungselemente* ist recht unterschiedlich und zum Teil äußerst komplex. So beeinflussen einige Elemente das Gleichgewicht der Phasen, die Löslichkeit von Kohlenstoff in den Mischkristallen und die Umwandlungspunkte im Zustandssystem Fe-Fe₃C (Bild 6.1–3). Elemente wie Cr, Al, Ti, Ta, Si, Mo, W und V erweitern das Ferritgebiet (Bild 6.1–4a) und können bei hoher Dosierung dafür sorgen, dass die $\alpha - \gamma$ -Umwandlung unterbleibt (ferritische *Stähle*). Bei einem hohen Anteil an Ni, Co, Mn und N kann die Ferritbildung komplett unterdrückt werden (austenitische *Stähle*, Bild 6.1–4b).

Bild 6.1–4 Einfluss der Legierungselemente auf die Gitterstruktur der Stähle (hochlegiert)

- a) γ -Gebiet eingeschnürt (ferritischer Stahl)
- b) γ -Gebiet erweitert (austenitischer Stahl)

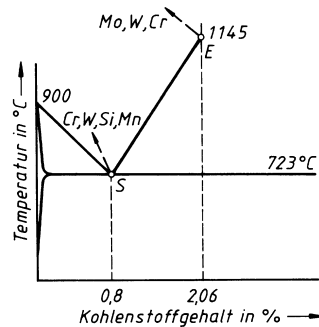
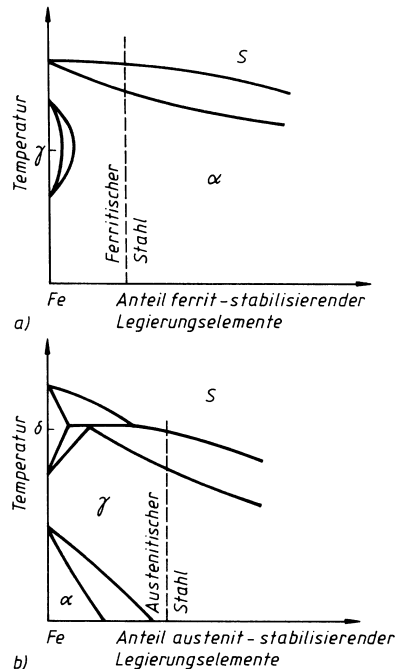


Bild 6.1–3 Verschiebung der Punkte S und E im System Fe-Fe₃C durch Legierungselemente



Wie bereits im Abschnitt 4.1 dargestellt, beeinflussen die *Legierungselemente* das Umwandlungsverhalten bei beschleunigter Abkühlung, d.h. vereinfacht: Alle Legierungselemente vermindern die obere und untere kritische Abkühlgeschwindigkeit. Demzufolge verbessern sie die Einhärbarkeit der *Stähle*. Auf der anderen Seite senken die Elemente C, Mn, Cr, Ni, Mo und V die Martensitstarttemperatur M_s , was einen höheren Restaustenitgehalt beim Härten zur Folge haben kann. Co und Al dagegen erhöhen die M_s -Temperatur.

Die Elemente Cr, Mo, V, W, Nb und Ta sind wichtige Carbidbildner. Nitride werden von den Elementen Al, Cr, Mo und V gebildet. Sind die Carbide und Nitride klein und fein verteilt, hat das eine hohe Festigkeit, Warmfestigkeit und Härte bei gleichzeitig ausreichender Zähigkeit zur Folge.

In Tabelle 6.1–2 sind die wichtigsten *Begleit- und Legierungselemente* unter Berücksichtigung ihrer Wirkung und Anwendung zusammengefasst.

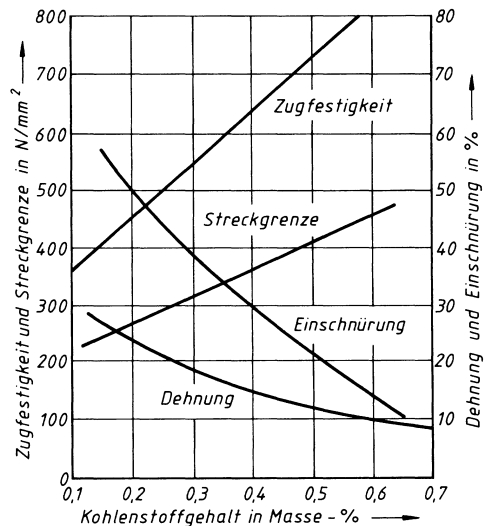


Bild 6.1–5 Mechanische Eigenschaften unlegierter Stähle (warmgewalzt) in Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt