

Hornbogen · Jost

Fragen und Antworten zu Werkstoffe



5. Auflage

 Springer

E. Hornbogen · N. Jost

Fragen und Antworten zu **Werkstoffe**

5., aktualisierte Auflage

Mit 103 Abbildungen



Springer

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Erhard Hornbogen (em.)
Universität Bochum
Fakultät für Maschinenbau
Lehrstuhl für Werkstoffwissenschaft
Universitätsstraße 150
44801 Bochum
Deutschland
e-mail: erhard.hornbogen@rz.ruhr-uni-bochum.de

Prof. Dr.-Ing., Dipl.-Wirt.-Ing. Norbert Jost
Hochschule Pforzheim
Fakultät Technik
Maschinenbau/Werkstoffkunde
Tiefenbronner Str. 65
75175 Pforzheim
Deutschland
e-mail: norbert.jost@fh-pforzheim.de

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

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

ISBN 3-540-23902-2 Springer Berlin Heidelberg New York
ISBN 3-540-43855-6 4. Aufl. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York

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.

Springer ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media

springer.de

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2002, 2005
Printed in Germany

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.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuziehen.

Satz und Herstellung: LE-TeX Jelonek, Schmidt & Vöckler GbR, Leipzig
Einbandgestaltung: *design & production* GmbH, Heidelberg
Gedruckt auf säurefreiem Papier SPIN: 10972564 7/3141YL - 5 4 3 2 1 0

Vorwort zur fünften Auflage

Die vierte Auflage hat wieder erfreulich raschen Absatz gefunden. Deshalb konnten wir uns bei der vorliegenden Neuauflage auf einige Aktualisierungen und eine intensive Durchsicht beschränken. Insbesondere wurden alle verwendeten Werkstoffbezeichnungen nunmehr an die neuen internationalen Normen angepasst. Nicht zuletzt wurde die Kompatibilität zur sechsten und siebten Auflage des Stammwerkes „Werkstoffe“ weiter optimiert.

Bochum und Wiernsheim im Dezember 2004

E. Hornbogen, N. Jost

Vorwort zur vierten Auflage

Die dritte Auflage war früher vergriffen als erwartet, trotz des starken und für die Zukunft unseres Landes sicher sehr nachteiligen Rückgangs der Zahl der Studenten aller Ingenieurwissenschaften im letzten Jahrzehnt.

Die systematische und wissenschaftliche Lehre über die Werkstoffe ist während des gerade vergangenen 20. Jahrhunderts entstanden und zu gewisser Reife gelangt. Die neue Auflage berücksichtigt den neuesten Stand, kann dabei in wesentlichen Teilen auf der dritten Auflage aufbauen. Folgende Änderungen und Ergänzungen sind bemerkenswert:

1. Fragen, die mit der Rolle von Werkstoffen bei Erzeugung, Speicherung und Umwandlung von Energie zu tun haben.
2. Fragen, die den Kreislauf der Werkstoffe zwischen Rohstoff und Recycling betreffen.
3. Fragen über Werkstoffe für Sensoren

Dazu kommen eine größere Zahl kleinerer Korrekturen.

Die Zahl der Begriffe, die im Anhang erläutert werden, wurde stark erweitert, die Stichworte ins Englische übersetzt. Erfahrungsgemäß haben die Hörer der Anfängervorlesungen Schwierigkeiten mit der Vielzahl von neuen Begriffen, die für das Verständnis unseres Fachgebietes nötig sind, und auf die sie in anderen (Schul-)Fächern nicht vorbereitet wurden.

Schließlich wurde das Verzeichnis der werkstoffnahen Fachzeitschriften auf neuen Stand gebracht. Es besteht weiterhin ein direkter Bezug zur sechsten Auflage des Lehrbuchs „Werkstoffe“. Gleiches gilt für die 2002 zu erwartende siebte Auflage.

Leider musste Dr.-Ing. Holger Haddenhorst wegen starker beruflicher Belastung bei der Firma ALCOA aus dem Autorenteam ausscheiden.

VIII Vorwort

Wir bedanken uns bei cand. ing. Susanne Mittag und Sidonie Engels für Vorbereitung und Fertigstellung des Manuskriptes für diese 4. Auflage.

Bochum und Wiernsheim, im Sommer 2002

E. Hornbogen
N. Jost

Vorwort zur ersten Auflage

Die Werkstoffwissenschaft bildet neben Mechanik, Thermo- und Fluidodynamik und anderen Teilgebieten von Physik und Chemie eines der Grundlagenfächer für Studenten der Ingenieurwissenschaften. Im Gegensatz dazu hat sich die Werkstoffwissenschaft erst in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts als ein einheitliches Sachgebiet profiliert. Den Kern dieses Fachs bildet die Mikrostruktur des Werkstoffs, die zu den gewünschten verbesserten oder gar ganz neuen technischen Eigenschaften führt. Die Werkstoffwissenschaft behandelt vergleichend alle Werkstoffgruppen: Metalle, Halbleiter, Keramik, Polymere und die aus beliebigen Komponenten zusammengesetzten Verbundwerkstoffe. Diese Grundlage erlaubt dem konstruierenden Ingenieur am besten, den für einen bestimmten Zweck günstigsten Werkstoff auszuwählen.

In diesem Sinne soll dieses Buch eine Hilfe gewähren für die Einführung in die Werkstoffwissenschaft. Im Rahmen der dazu notwendigen Grundlagen und Systematik ist eine größere Zahl von Begriffen zu definieren, mit denen dann in der Praxis gearbeitet werden kann. Dies bereitet den Studenten der Ingenieurwissenschaft erfahrungsgemäß am Anfang gewisse Schwierigkeiten. Ziel dieses Buches ist es, eine Hilfe beim Erlernen der Grundbegriffe der Werkstoffwissenschaft zu leisten. Der Text und Inhalt sind abgestimmt mit dem Buch "Werkstoffe", 4. Aufl., Springer 1987. Dort sind auch ein den Inhalt dieses Buches weiter vertiefender Text sowie ausführliche Hinweise auf spezielle Literatur zu finden.

Die Form von "Fragen und Antworten" macht das Buch besonders zum Selbststudium oder zum Erneuern älteren Wissens geeignet. Die mit "*" gekennzeichneten Fragen behandeln spezielle Aspekte, die nicht unbedingt Prüfungsstoff eines ingenieurwissenschaftlichen Vordiploms sind. Sie können beim ersten Durcharbeiten übergangen werden. Im Anhang sind dann noch die wichtigsten Fachzeitschriften zum Thema Werkstoffe zusammengestellt. Dies soll dem Leser vor allen Dingen ein schnelles Auffinden der Zeitschriften in Bibliotheken sowie ein weiter vertiefendes Literaturstudium ermöglichen.

Die Autoren möchten Herrn cand. ing. L. Kahlen und Frau cand. phil. G. Fries für die Hilfe bei der Fertigstellung des Manuskriptes danken. Doch auch viele unge-

X Vorwort

nannte Studenten haben mit Ihren Fragen und Anregungen zum Inhalt des vorliegenden Buches beigetragen.

Bochum, im August 1987

E. Hornbogen
N. Jost
M. Thumann

Inhaltsverzeichnis

Fragen

0	Überblick	3
0.1	Die Werkstoffgruppen	3
0.2	Bezeichnung der Werkstoffe	3
0.3	Eigenschaften der Werkstoffe	4
1	Aufbau einphasiger fester Stoffe	5
1.1	Atome	5
1.2	Elektronen.	5
1.3	Bindung der Atome	6
1.4	Kristalle	6
1.5	Baufehler des Kristallgitters.	8
1.6	Flächenförmige Baufehler	9
1.7	Gläser und Quasikristalle.	10
2	Aufbau mehrphasiger Stoffe	13
2.1	Mischphasen und Phasengemische	13
2.2	Ein- und zweiphasige Zustandsdiagramme.	13
2.3	Das System Al-Si.	16
2.4	Das metastabile Zustandsdiagramm Fe-Fe ₃ C	18
2.5	Keimbildung und Erstarrung	19
3	Grundlagen der Wärmebehandlung.	21
3.1	Wärmebehandlung	21
3.2	Diffusion	22
3.3	Rekristallisation.	24
3.4	Aushärtung	24
3.5	Martensitische Umwandlung	25
3.6	Wärmebehandlung und Fertigung.	26
4	Mechanische Eigenschaften.	29
4.1	Arten der Beanspruchung	29
4.2	Elastizität	29
4.3	Formänderung	30
4.4	Zugversuch	31

XII Inhaltsverzeichnis

4.5	Härtungsmechanismen	31
4.6	Kerbschlagarbeit, Bruchzähigkeit	32
4.7	Kriechen, Schwingfestigkeit, Ermüdung	33
4.8	Bruchmechanismen	35
4.9	Viskosität, Viskoelastizität	37
4.10	Technologische Prüfverfahren	37
5	Physikalische Eigenschaften	39
5.1	Werkstoffe im Kernreaktorbau	39
5.2	Elektrische Leiter	39
5.3	Ferromagnetische Werkstoffe	40
5.4	Halbleiter	40
5.5	Thermische Ausdehnung	41
5.6	Werkstoffe der Energietechnik	41
5.7	Werkstoffe für Sensoren	42
6	Chemische und tribologische Eigenschaften	43
6.1	Korrosion	43
6.2	Elektrochemische Korrosion	43
6.3	Spannungsrißkorrosion	44
6.4	Reibung und Verschleiß	44
7	Keramische Werkstoffe	47
7.1	Allgemeine Kennzeichnung	47
7.2	Nicht-oxidische Keramik	47
7.3	Oxidkeramik	48
7.4	Zement-Beton	49
7.5	Oxidgläser	50
8	Metallische Werkstoffe	53
8.1	Metalle allgemein und reine Metalle	53
8.2	Mischkristallegierungen	53
8.3	Ausscheidungshärtbare Legierungen	56
8.4	Umwandlungshärtung	56
9	Polymerwerkstoffe	59
9.1	Molekülketten	59
9.2	Kunststoffgruppen	60
9.3	Mechanische Eigenschaften I	60
9.4	Mechanische Eigenschaften II	60
10	Verbundwerkstoffe	63
10.1	Herstellung von Phasengemischen	63
10.2	Faserverstärkte Werkstoffe	63
10.3	Stahl- und Spannbeton	64
10.4	Schneidwerkstoffe	65
10.5	Oberflächenbehandlung	65
10.6	Holz	65

11	Werkstoff und Fertigung	67
11.1	Halbzeug und Bauteile	67
11.2	Urformen	67
11.3	Umformen	68
11.4	Trennen, Spanen und Schleifen	68
11.5	Fügen	69
11.6	Nachbehandlung	69
11.7	Werkstoffaspekte bei Fertigung und Gebrauch von Kraftfahrzeugen	69
11.8	Lasermaterialbearbeitung	70
12	Der Kreislauf der Werkstoffe	71
12.1	Rohstoff und Energie	71
12.2	Auswahl und Dimensionierung	71
12.3	Gebrauch und Versagen	72
12.4	Rückgewinnung und Abfallbeseitigung	72
12.5	Recyclingfragen am Beispiel Kraftfahrzeug	74

Antworten

0	Überblick	77
0.1	Die Werkstoffgruppen	77
0.2	Bezeichnung der Werkstoffe	78
0.3	Eigenschaften der Werkstoffe	80
1	Aufbau einphasiger fester Stoffe	83
1.1	Atome	83
1.2	Elektronen	85
1.3	Bindung der Atome	87
1.4	Kristalle	90
1.5	Baufehler des Kristallgitters	96
1.6	Flächenförmige Baufehler	98
1.7	Gläser und Quasikristalle	101
2	Aufbau mehrphasiger Stoffe	103
2.1	Mischphasen und Phasengemische	103
2.2	Ein- und zweiphasige Zustandsdiagramme	104
2.3	Das System Al-Si	109
2.4	Das metastabile Zustandsdiagramm Fe-Fe ₃ C	112
2.5	Keimbildung und Erstarrung	113
3	Grundlagen der Wärmebehandlung	117
3.1	Wärmebehandlung	117
3.2	Diffusion	119
3.3	Rekristallisation	123
3.4	Aushärtung	125

XIV Inhaltsverzeichnis

3.5	Martensitische Umwandlung.	129
3.6	Wärmebehandlung und Fertigung.	133
4	Mechanische Eigenschaften.	135
4.1	Arten der Beanspruchung.	135
4.2	Elastizität.	136
4.3	Formänderung.	140
4.4	Zugversuch.	143
4.5	Härtungsmechanismen.	146
4.6	Kerbschlagarbeit, Bruchzähigkeit.	148
4.7	Kriechen, Schwingfestigkeit, Ermüdung.	154
4.8	Bruchmechanismen.	158
4.9	Viskosität, Viskoelastizität.	160
4.10	Technologische Prüfverfahren.	161
5	Physikalische Eigenschaften.	163
5.1	Werkstoffe im Kernreaktorbau.	163
5.2	Elektrische Leiter.	165
5.3	Ferromagnetische Werkstoffe.	166
5.4	Halbleiter.	168
5.5	Thermische Ausdehnung.	170
5.6	Werkstoffe der Energietechnik.	171
5.7	Werkstoffe für Sensoren.	175
6	Chemische und tribologische Eigenschaften.	177
6.1	Korrosion.	177
6.2	Elektrochemische Korrosion.	178
6.3	Spannungsrißkorrosion.	179
6.4	Reibung und Verschleiß.	181
7	Keramische Werkstoffe.	183
7.1	Allgemeine Kennzeichnung.	183
7.2	Nicht-oxidische Keramik.	184
7.3	Oxidkeramik.	184
7.4	Zement-Beton.	186
7.5	Oxidgläser.	187
8	Metallische Werkstoffe.	189
8.1	Metalle allgemein und reine Metalle.	189
8.2	Mischkristalllegierungen.	190
8.3	Ausscheidungshärtbare Legierungen.	191
8.4	Umwandlungshärtung.	194
9	Polymerwerkstoffe.	197
9.1	Molekülketten.	197
9.2	Kunststoffgruppen.	198
9.3	Mechanische Eigenschaften I.	199
9.4	Mechanische Eigenschaften II.	200

10	Verbundwerkstoffe.	203
10.1	Herstellung von Phasengemischen	203
10.2	Faserverstärkte Werkstoffe	203
10.3	Stahl- und Spannbeton.	208
10.4	Schneidwerkstoffe.	208
10.5	Oberflächenbehandlung	209
10.6	Holz.	210
11	Werkstoff und Fertigung	213
11.1	Halbzeug und Bauteile.	213
11.2	Urformen	213
11.3	Umformen	215
11.4	Trennen, Spanen und Schleifen	218
11.5	Fügen.	219
11.6	Nachbehandlung	220
11.7	Werkstoffaspekte bei Fertigung und Gebrauch von Kraftfahrzeugen	221
11.8	Lasermaterialbearbeitung.	222
12	Der Kreislauf der Werkstoffe.	225
12.1	Rohstoff und Energie.	225
12.2	Auswahl und Dimensionierung.	226
12.3	Gebrauch und Versagen.	226
12.4	Rückgewinnung und Abfallbeseitigung.	227
12.5	Recyclingfragen am Beispiel Kraftfahrzeug	228

Anhang

A.1	Begriffe aus Werkstoffwissenschaft und -technik	233
A.2	Fachzeitschriften.	253

Fragen

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

0 Überblick

0.1 Die Werkstoffgruppen

1. In welche vier großen Gruppen teilt man die Werkstoffe ein?
2. Wie unterscheidet sich der mikrostrukturelle Aufbau von Metallen, Keramiken und Polymeren?
3. In welche Untergruppen können
 - a) Keramiken,
 - b) Metalle,
 - c) Polymereeingeteilt werden?

0.2 Bezeichnung der Werkstoffe

1. Welche Möglichkeiten der Werkstoffbezeichnung gibt es?
2. Wie ist die vollständige normgerechte Werkstoffbezeichnung nach DIN EN 10027 (alt: DIN 17006) aufgebaut?
3. Welchen Zweck haben die Multiplikatoren bei den Werkstoffbezeichnungen niedrig legierter Stähle? Zählen Sie die wichtigsten Legierungselemente mit ihren jeweiligen Multiplikatoren auf!
4. Schlüsseln Sie folgende Werkstoffkurzbezeichnungen vollständig auf:
 - a) C 45,
 - b) S 235,
 - c) X 120 Mn 12,
 - d) GL SnPb 20,
 - e) 75 CrMoNiW 6 7 ?
5. Geben Sie für folgende Werkstoffzusammensetzungen die entsprechenden Werkstoffkurzbezeichnungen an (alle Mengenangaben in Gewichts-%):
 - a) Eisenbasis-Legierung mit 0,05 % C, 18 % Ni, 8 % Cr und 5 % Mo,

- b) Bronze mit 6 % Sn und einer Mindestzugfestigkeit von 627 MPa,
 - c) Al-Gußlegierung mit 12 % Si, kleinen Anteilen an Mg, warmausgehärtet
 - d) Stahl für den allgemeinen Stahlbau und einer Mindeststreckgrenze von 460 MPa,
 - e) Stahl mit 0,3 % C, 2,25 % Cr, sowie kleinen Anteilen an Mo und V.
6. Wie wird ein graues Gußeisen mit Kugelgraphit und einer Mindestzugfestigkeit von 1000 MPa bezeichnet?
7. Was bedeuten die Werkstoffbezeichnungen
- a) CuZn 40,
 - b) CuZn 37 Pb 2 F 44

0.3 Eigenschaften der Werkstoffe

1. Wie ist das Eigenschaftsprofil von Werkstoffen definiert?
2. Was muß bei der Anwendung von Werkstoffen außerdem Eigenschaftsprofil noch beachtet werden?
3. Zählen Sie je drei Fertigungs- und Gebrauchseigenschaften von Werkstoffen auf!
4. Wie unterscheiden sich Struktur- und Funktionswerkstoffe? Nennen Sie Beispiele für beide Gruppen.
5. Viele Naturgesetze sind lineare Gleichungen, die Ursache und Wirkung verknüpfen. Zeigen Sie am Beispiel von elektrischer und thermischer Leitfähigkeit, Elastizität und Fließen von Flüssigkeiten die Struktur solcher Gesetzmäßigkeiten und kennzeichnen Sie die Werkstoffeigenschaften, die Ursache mit Wirkung verknüpft!
6. Nennen Sie zwei Beispiele mit jeweils kurzer Beschreibung, bei denen neue Werkstoffkonzepte bzw. -anwendungen aus der Natur „abgeschaut“ wurden.

1 Aufbau einphasiger fester Stoffe

1.1 Atome

1. Warum besitzen Elemente mit der Ordnungszahl $Z \sim 28$ und den relativen Atommassen $A_r \sim 60$ (Fe, Ni) die stabilsten Atomkerne?
- 2.a) Welche Werkstoffeigenschaften werden durch den Atomkern bestimmt?
b) Welche Werkstoffeigenschaften werden durch die Valenzelektronen bestimmt?
3. Die Elemente Blei (Pb) und Aluminium (Al) besitzen eine kubisch-flächenzentrierte Kristallstruktur (kfz), während α -Eisen kubisch raumzentriert (krz) ist. Berechnen Sie die Dichte ρ aus der Anzahl der Atome in der Elementarzelle, den relativen Atommassen und den Gitterkonstanten!

Gegeben:

Atomgewicht:

$$A_{\text{Pb}} = 207,19 \text{ g mol}^{-1}$$

$$A_{\text{Al}} = 26,98 \text{ g mol}^{-1}$$

$$A_{\alpha\text{-Fe}} = 55,85 \text{ g mol}^{-1}$$

Gitterkonstante:

$$a_{\text{Pb}} = 0,495 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

$$a_{\text{Al}} = 0,4049 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

$$a_{\alpha\text{-Fe}} = 0,2866 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

1.2 Elektronen

1. Bild F1.1 zeigt die für Wasserstoffelektronen möglichen Energieniveaus. Welche Wellenlänge besitzt ein Photon, das beim Übergang eines Elektrons von der 2. zur 1. Schale emittiert wird?
- 2.a) Geben Sie die Bezeichnung für die Elektronenstruktur des Fe-Atoms an!
b) Warum gehört das Eisen zu den Übergangselementen (-metallen)?
- 3.a) Skizzieren Sie den qualitativen Verlauf der Dichte ρ und der Schmelztemperatur T_{kf} über dem Ordnungsbereich $Z = 20\text{-}30$!
b) Diskutieren Sie diese Kurven in bezug auf die Elektronenstruktur der betroffenen Elemente!

F 6 1 Aufbau einphasiger fester Stoffe

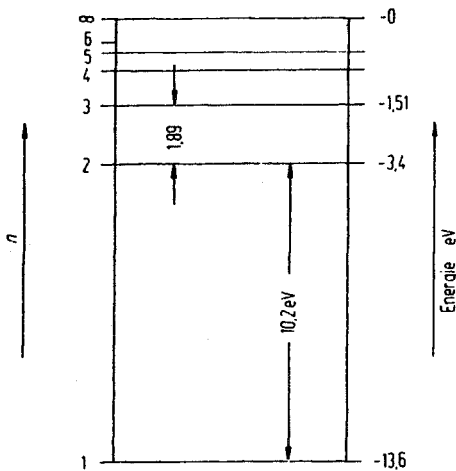


Bild F 1.1

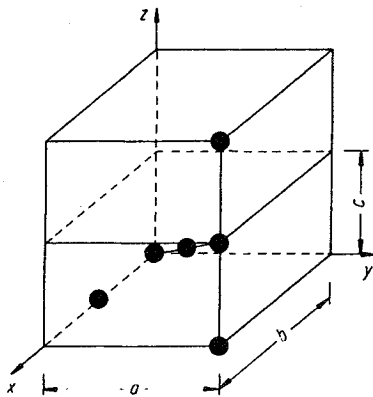
1.3 Bindung der Atome

1. Beschreiben Sie die wesentlichen Merkmale der vier Bindungstypen in der Reihenfolge abnehmender Bindungsenergie!
2. Die drei Werkstoffgruppen mit ihren jeweiligen charakteristischen Eigenschaften konstituieren sich aus der Art ihrer Bindungstypen. Beschreiben Sie, die Zusammenhänge.
3. Was versteht man unter der Koordinationszahl (K)? Skizzieren Sie die Kristallgitter für $K = 4, 6, 8, 12$!
4. Bei der thermischen Ausdehnung fester Stoffe nimmt das Volumen mit steigender Temperatur zu. Beschreiben Sie die Ursache dieses Effektes!
5. Kohlenstoff wird als Werkstoff in drei verschiedenen Strukturen angewandt. Skizzieren Sie diese Strukturtypen und geben Sie jeweils eine charakteristische Eigenschaft an!

1.4 Kristalle

1. Wie unterscheiden sich die Strukturen von metallischen Kristallen, Flüssigkeiten und Gläsern?

2. Was versteht man unter den folgenden Begriffen:
- Kristallstruktur,
 - Glasstruktur,
 - Elementarzelle,
 - Kristallsystem?
3. Das Bild F 1.2 zeigt eine orthorhombische Kristallstruktur, in die Atome in unterschiedlicher Lage eingezeichnet sind. Geben Sie
- die Ortsvektoren dieser Atome und
 - die Kristallrichtungen an, die man erhält, wenn man vom Ursprung aus Geraden durch diese Atome legt!



$$a \neq b \neq c$$

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

Bild F 1.2

4. Wie groß ist der Winkel in einem kubischen Kristall zwischen den Richtungen:
- $[111]$ und $[001]$,
 - $[111]$ und $[\bar{1}\bar{1}1]$?
5. Geben Sie die Millerschen Indizes der in Bild F1.3 schraffiert eingezeichneten Kristallebenen an!
- 6.a) Geben Sie die Millerschen Indizes (hkl) der dichtest gepackten Ebenen im kfz- und krz-Kristallgitter an!
- b) Berechnen Sie den Netzebenenabstand d der dichtest gepackten Ebenenscharen in Cu und α -Fe ($a_{\text{Cu}} = 0,3615 \text{ nm}$; $a_{\alpha\text{-Fe}} = 0,2866 \text{ nm}$)!
- c) Welche speziellen Ebenen gehören zum Ebenentyp $\{100\}$, $\{111\}$ und $\{110\}$?

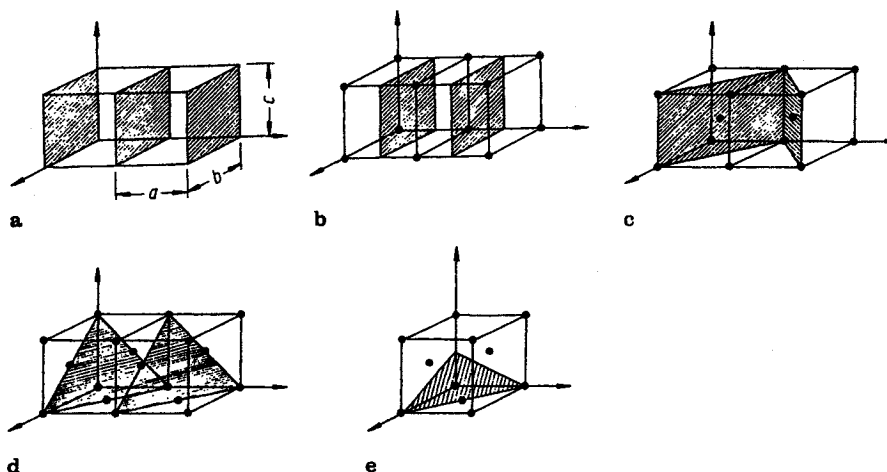


Bild F 1.3

7. Die hexagonal dichteste (hdp) und die kubisch dichteste (kfz) Kugelpackung besitzen die gleiche dichtestmögliche Packungsdichte. Worin besteht dennoch ein Unterschied zwischen den beiden?
8. Ein tetragonal raumzentriertes (trz) Gitter von Fe-C-Martensit hat die Gitterkonstante $a = 0,28 \text{ nm}$ und $c/a = 1,05$. Wie groß sind die kleinsten Atomabstände x in folgenden Richtungen $[111]$, $[110]$, $[101]$?
9. Warum sind Al-Legierungen viel besser verformbar als Mg-Legierungen?
10. Nennen Sie zwei Anwendungen in der Technik, für die Einkristalle als Bauteil eingesetzt werden!
11. Berechnen Sie die Packungsdichte von Werkstoffen mit kubisch-flächenzentriertem Kristallsystem!

1.5 Baufehler des Kristallgitter

1. In welcher Weise wirken Gitterbaufehler grundsätzlich auf die Eigenschaften von Metallen?
2. Welche Ebenen der mikroskopischen Struktur sind in Metallen zu unterscheiden?

3. Nennen Sie mindestens je ein Beispiel für 0-, 1-, 2-dimensionale Baufehler sowie die Dimension ihrer Dichte (Konzentration)!
4. Unter welchen Bedingungen können Leerstellen in Kristallstrukturen entstehen?
5. Worauf beruht die Mischkristallfestigkeit?
6. Bild F1.4 ist eine elektronenmikroskopische Aufnahme von γ -Fe. Bestimmen Sie aus diesem Bild die Versetzungsdichte (Dicke der Folie $d = 100 \text{ nm}$)!

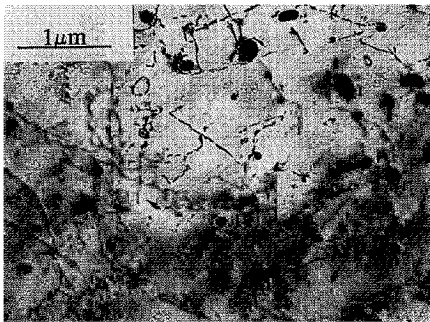


Bild F 1.4

7. Gegeben sind folgende Burgersvektoren von Versetzungen im kubisch flächenzentrierten Gitter:
 $b_1 = a [100]$, $b_2 = a/3 [111]$, $b_3 = a/6 [211]$, $b_4 = a/2 [110]$
 Welches sind vollständige, welches Teilversetzungen, welches ist die wahrscheinlichste Gleitversetzung?
8. Welche Baufehler können mit Hilfe eines Lichtmikroskopes sichtbar gemacht werden?

1.6 Flächenförmige Baufehler

- 1.a) Ermitteln Sie den mittleren Korndurchmesser d aus der lichtmikroskopischen Aufnahme (Bild F1.5)!
- b) Ist der ermittelte Wert größer oder kleiner als die wirkliche Korngröße (Begründung)?

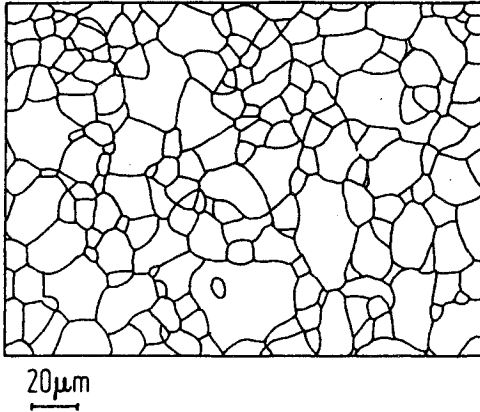


Bild F 1.5

2. Welcher Zusammenhang besteht zwischen Korngrenzendichte (Korngröße) und dem Kriechverhalten (Warmfestigkeit) von Legierungen? Welcher metallische Werkstoff zeigt das beste Kriechverhalten?
3. Kennzeichnen Sie (einfache Skizze) die Struktur von einer
 - a) Großwinkelkorngrenze,
 - b) Kleinwinkelkorngrenze,
 - c) Zwillingskorngrenze!
4. Nennen Sie das geometrische Prinzip für die Beschreibung der Kornorientierungsverteilung in gewalzten Blechen!
5. Kennzeichnen Sie den Begriff Stapelfehler mit Hilfe der Stapelfolge von (111)-Ebenen des kubisch flächenzentrierten Gitters!
6. Ihnen werden zwei sonst vollständig identische Werkstoffe vorgelegt, die sich lediglich in ihren Korngrößen unterscheiden. Werkstoff A hat einen mittleren Korndurchmesser von $D = 100 \mu\text{m}$, Werkstoff B von $D = 10 \mu\text{m}$. Geben Sie die jeweiligen Faktoren an, mit denen sich die Streckgrenze verändert. Bei welchem Werkstoff ist demnach eine höhere Streckgrenze zu erwarten?

1.7 Gläser und Quasikristalle

1. In welchen Werkstoffgruppen können Glasstrukturen erzeugt werden?
2. Unter welchen Bedingungen entstehen metallische Gläser?
3. Welche Möglichkeiten für Glasstrukturen gibt es in hochpolymeren Werkstoffen?

4. Erläutern Sie die Begriffe:
 - a) Isotropie,
 - b) Anisotropie,
 - c) Quasiisotropieam Beispiel von Gläsern und Vielkristallen (Kristallhaufwerken)!
5. Warum dürfen ideale Kristallstrukturen keine fünfzählige Symmetrie aufweisen?
6. Wie sind Quasikristalle aufgebaut?
7. Nennen Sie drei Verfahren zur Herstellung derartiger Strukturen durch ultraschnelles Abkühlen von Metallen!

2 Aufbau mehrphasiger Stoffe

2.1 Mischphasen und Phasengemische

1. Definieren Sie die Begriffe: Phase, Komponente, Phasengemisch, Mischphase (Mischkristall)!
2. Welche beiden Arten von Mischkristallen werden unterschieden? Wodurch unterscheiden Sie sich?
3. Welche Voraussetzungen müssen für die vollständige Mischbarkeit in Kristallen erfüllt sein?
4. Wodurch ist die Mischkristallhärtungswirkung eines bestimmten Elementes begrenzt?
5. Nennen Sie 5 Werkstoffe die aus Phasengemischen aufgebaut sind!
6. Nennen Sie 3 Methoden zur Herstellung von Phasengemischen!
7. Gegeben sind folgende Atomradien R:

α -Fe :	0,1241 nm
Nb:	0,1430 nm
Co (hcp):	0,1253 nm
Ni:	0,1246 nm
Mo:	0,1363 nm

Welche Reihenfolge der Löslichkeit dieser Elemente in α -Fe (Ferrit) ist zu erwarten?

2.2 Ein- und zweiphasige Zustandsdiagramme

1. Welche drei Möglichkeiten zur quantitativen Kennzeichnung der chemischen Zusammensetzung eines Werkstoffes gibt es?

2. Zeichnen Sie das Zustandsdiagramm von reinem Eisen für $p = \text{const.} = 1 \text{ bar}$.
3. Warum werden in der praktischen Werkstoffkunde fast nur isobare Zustandsdiagramme benutzt?
4. Skizzieren Sie schematisch die fünf Grundtypen von binären Zustandsdiagrammen:
 - a) Völlige Unmischbarkeit im flüssigen und festen Zustand der Komponenten!
 - b) Völlige Mischbarkeit im kristallinen und flüssigen Zustand der Komponenten!
 - c) Ein eutektisches System!
 - d) Ein peritektisches System!
 - e) Die Bildung einer Verbindung!
5. Wovon hängt die Einstellung des Gleichgewichtszustandes in Legierungen ab? Sagt das Zustandsdiagramm etwas über die Gleichgewichtseinstellung aus?
6. Welche Informationen liefert das Zustandsdiagramm für die Wärmebehandlung von Werkstoffen?
7. Welche Darstellungsmöglichkeiten für ternäre Zustandsdiagramme gibt es?
8. Wie ist das thermodynamische Gleichgewicht definiert?
9. Welche Faktoren begünstigen die Entstehung von Gefügen entsprechend dem metastabilen Gleichgewicht?
10. Was lehrt die Gibb'sche Phasenregel hinsichtlich eines Dreiphasengleichgewichtes in einem isobaren System aus zwei Komponenten?
11. Nennen Sie zwei metallische Elemente, die in verschiedene Kristallstrukturen umwandeln (Polymorphie)!
12. Nennen Sie einige Anwendungen für Zustandsdiagramme in der Technik!
13. Gegeben ist das Zustandsdiagramm Cu-Mg (Bild F 2.1)
 - a) Kennzeichnen Sie alle auftretenden
 - Mischkristallphasen
 - intermetallische Verbindungen
 - Eutektika
 - b) Wieviel Kupfer ist in Magnesium maximal löslich? Wieviel Magnesium in Kupfer?
 - c) Wie lautet die Reaktionsgleichung der eutektischen Reaktion der Legierung mit 57,9 at-% Mg?

- d) In welchem Konzentrationsbereich ist mit einer Primärkristallisation von Mg_2Cu zu rechnen?
- e) In welchem Bereich des Zustandsdiagrammes ist eine Ausscheidungshärtung zu erwarten?

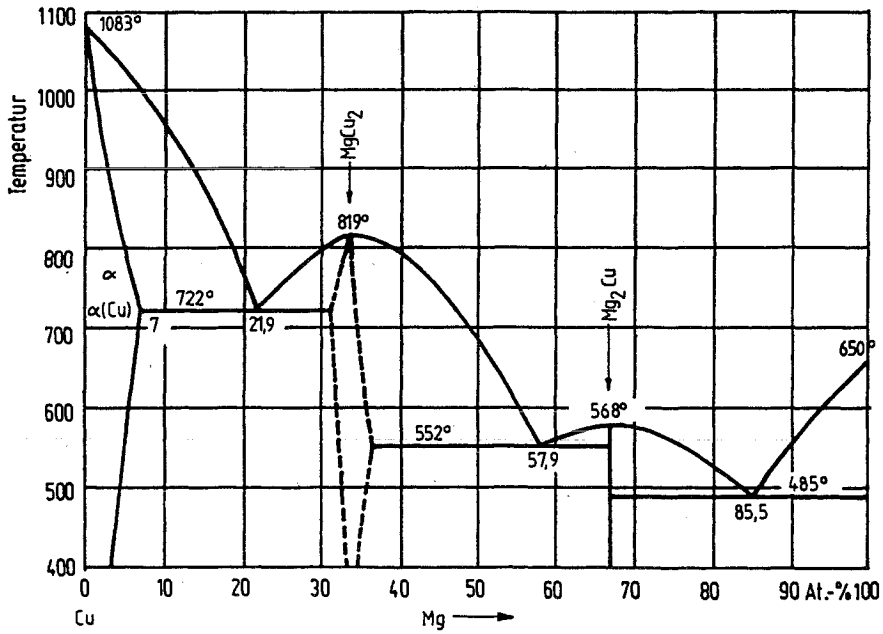


Bild F 2.1

14. Bei der thermischen Analyse eines metallischen Werkstoffes wird ein „Haltepunkt“ festgestellt. Was schließen Sie daraus für den untersuchten Werkstoff?

2.3 Das System Al-Si

Gegeben ist das Zustandsdiagramm Al-Si (Bild F2.2).

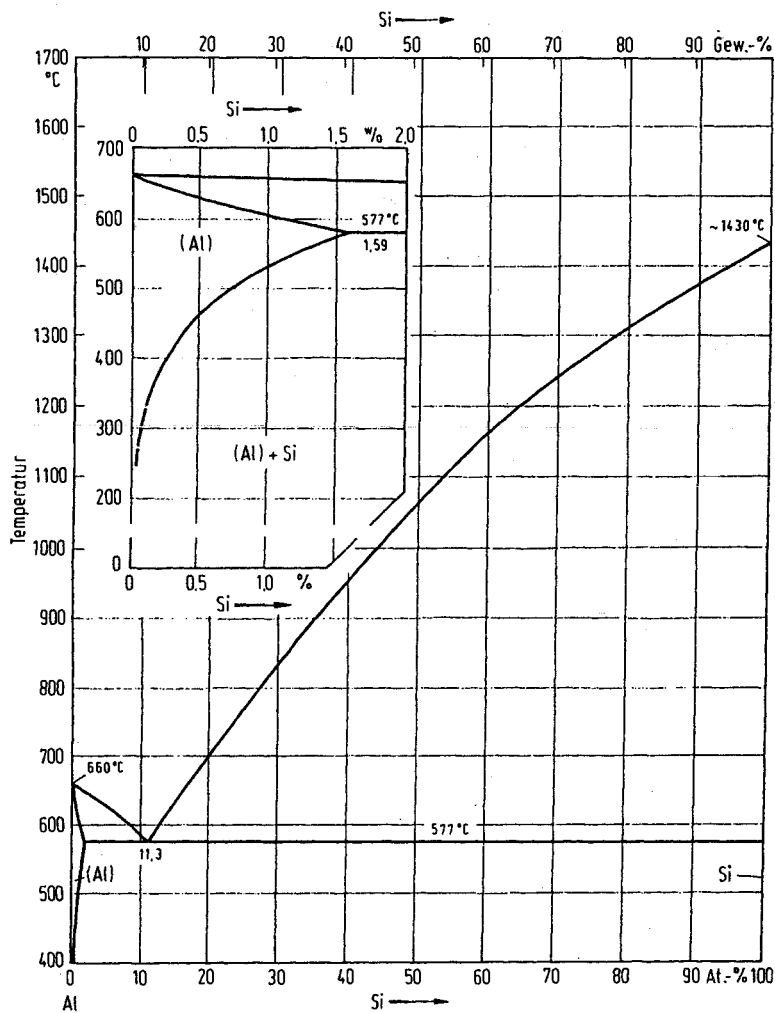


Bild F 2.2

1. Wie groß ist die maximale Löslichkeit von Si in Al und Al in Si?
2. Silumin ist der Handelsname einer Al-Si Gusslegierung. Geben Sie die günstigste Zusammensetzung in At.% für diese Legierung an und begründen Sie Ihre Antwort mit dem Zustandsdiagramm, insbesondere, warum gerade diese Zusammensetzung für eine Gusslegierung geeignet ist!
3. Bilden Al und Si chemische Verbindungen?
- 4.a) Woraus besteht die Legierung AlSi 0,5 bei einer Temperatur von $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$?
- b) Bestimmen Sie für die Legierungszusammensetzung 50 At.% Al-50 At.% Si die Mengenanteile der festen und flüssigen Phase bei $T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Hebelgesetz)!
5. Begründen Sie mit der Gibb'schen Phasenregel, wieso die eutektische Reaktion nur bei einer bestimmten Temperatur und nicht in einem ganzen Intervall erfolgt!
6. Bild. F2.3 zeigt eine rasterelektronenmikroskopische Aufnahme des Gefüges einer Aluminium-Silizium Legierung. Die Mikrohärtte verschiedener Gefügebereiche ist untersucht worden. Geben Sie den ungefähren Silizium-Gehalt der Legierung an und begründen Sie Ihre Antwort!

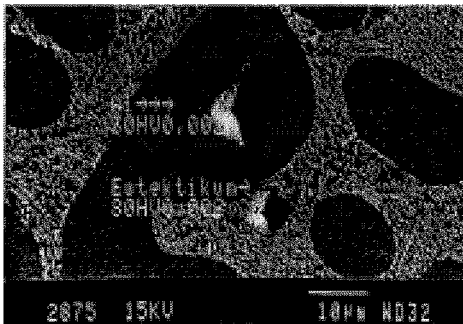


Bild F 2.3

7. Erweitern Sie das Zustandsdiagramm Aluminium-Silizium zu höheren Temperaturen und tragen Sie in dieses Diagramm das Siedeverhalten ein! Siedetemperaturen: Al $2455\text{ }^{\circ}\text{C}$, Si $2350\text{ }^{\circ}\text{C}$.
8. Bei welchen technischen Prozessen ist Sieden von Bedeutung?

2.4 Das metastabile Zustandsdiagramm Fe-Fe₃C (Bild F2.4)

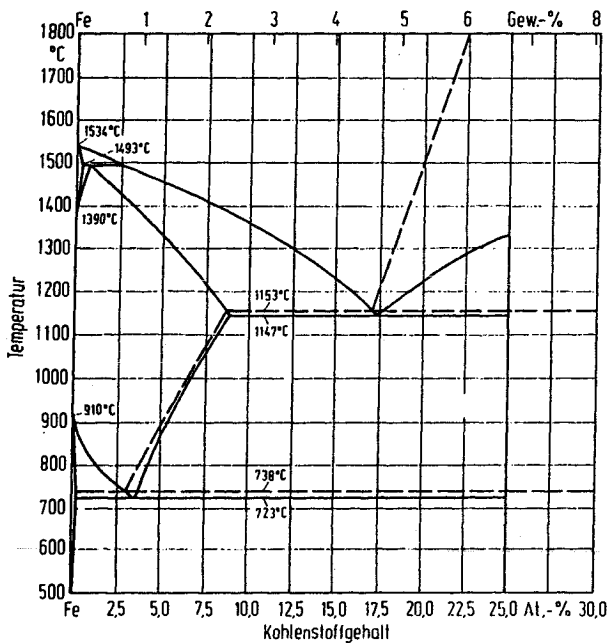


Bild F 2.4

1. Kennzeichnen Sie
 - a) die im Zustandsdiagramm enthaltenen Phasen (auch mit den technischen Namen) und
 - b) die auftretenden 3-Phasengleichgewichte.
2. Wie und warum unterscheidet sich die Löslichkeit von C in α -Fe und γ -Fe?
3. Zeichnen Sie unter das metastabile Fe-Fe₃C Diagramm ein Schaubild für die nach langsamer Abkühlung auftretenden Gefügeanteile (metastabil)!
4. In welchem Bereich liegt die chemische Zusammensetzung von
 - a) Baustählen,
 - b) Werkzeugstählen,
 - c) Gusseisen?

2.5 Keimbildung und Erstarrung

1. In welchen Aggregatzuständen können Metalle auftreten?
2. Aus welchen Aggregatzuständen kann direkt ein massiver Werkstoff gewonnen werden? Geben Sie jeweils ein technisches Beispiel an!
3. Welchen Verlauf hat das Temperatur-Zeit-Diagramm beim Abkühlen von geschmolzenem Aluminium (Abkühlungskurve)?
4. Definieren Sie den Begriff "unterkühlte Schmelze"!
5. Was versteht man unter
 - a) homogener,
 - b) heterogener Keimbildung; (Gleichung)?
6. Welches Gefüge erhält man durch gerichtete eutektische Erstarrung und für welche Legierungen wird dieser Prozess angewandt?
7. Beschreiben Sie die so genannte Schmelzüberhitzung am Beispiel eines karbidhaltigen Stahls!
8. Was versteht man unter dem Impfen einer Schmelze?
9. Was ist die Ursache für die Ausbildung eines dendritischen Gefüges?
10. Unter welchen Bedingungen erhält man beim Abkühlen aus dem flüssigen Zustand
 - a) ein feinkörniges Gefüge,
 - b) einen Einkristall?
11. Skizzieren Sie schematisch die Entstehung von
 - a) Lunkern,
 - b) Poren
 beim Erstarren einer Gußlegierung in einer
 - a) offenen,
 - b) geschlossenen Kokille!
12. In welchen technischen Bereichen liegen Anwendungsmöglichkeiten von Vielstoffeutektika?

3 Grundlagen der Wärmebehandlung

3.1 Wärmebehandlung

1. Nennen Sie einige technisch wichtige, diffusionsbestimmte Festkörperreaktionen!
2. Was geschieht bei einer Wärmebehandlung metallischer Werkstoffe und was soll durch sie grundsätzlich erreicht werden?
3. Nennen Sie vier Beispiele für Wärmebehandlungen metallischer Werkstoffe mit ihrem jeweiligen Ziel.
4. Wie unterscheiden sich Umwandlung und Ausscheidung?
5. Beschreiben Sie qualitativ das Entstehen von Eigenspannungen in einem zylinderförmigen Werkstück (Skizze) beim schnellen Abkühlen von einer Wärmebehandlungstemperatur von 800 °C für
 - a) Kupfer,
 - b) Jenaer Glas,
 - c) Werkzeugstahl mit 0,8 Gew.% C!
6. Leiten Sie den Begriff "Schweißbarkeit" aus der Struktur und den mechanischen Eigenschaften der Wärmeeinflußzone in der Umgebung einer Schweißnaht ab für
 - a) Stähle,
 - b) Aluminium!

3.2 Diffusion

1. Welche Möglichkeiten für die Bildung atomarer (molekularer) Phasen gibt es im gasförmigen, flüssigen und kristallinen Zustand der Komponenten?

2. Beschreiben Sie kurz den Vorgang der Diffusion! Wie kann sie quantitativ beschrieben werden?
3. Warum unterscheidet sich die Diffusion von C-Atomen in α -Fe (krz) und γ -Fe (kfz)?
4. Die lichtmikroskopische Untersuchung der aufgekohlten Schicht (Dicke Δx) eines Einsatzstahls (z.B. C15) führt bei einer Temperatur von $T = 850^\circ\text{C}$ und einer Glühdauer von $t = 0,5\text{ h}$ zu einer Einhärtetiefe von $x = 0,3\text{ mm}$. Die Einsattiefe soll nun verdreifacht werden.
Geg.: Für C in γ -Fe: $D_0 = 0,2 \cdot 10^{-4}\text{ m}^2/\text{s}$, $Q = 130\text{ kJ/mol}$, $R = 8,314\text{ J/molK}$.
 - a) Wie lange muß gegläht werden, wenn die Glühtemperatur gleich bleibt?
 - b) Wie stark muß die Glühtemperatur angehoben werden, wenn die Glühdauer unverändert bleiben soll?
5. Erörtern Sie die Struktur und die Eigenschaften der beim Einsatzhärten, Nitrieren und Borieren erzeugten Schichten anhand der Zustandsdiagramme Fe-Fe₃C, Fe-N, Fe-B (Bild F3.1 siehe nächste Seite)! Welche Rolle spielt Al als Legierungselement in Nitrierstählen?
6. Ein Einsatzstahl C10 soll in der Oberfläche auf einen C-Gehalt von 0,8 Gew.% aufgekocht werden. Das zur Verfügung stehende Aufkohlungsmittel (AM) hat eine wirksame Kohlenstoffkonzentration von $C_{\text{AM}} = 1,6\text{ Gew}\% \text{ C}$. Berechnen und zeichnen Sie den Konzentrationsverlauf über der Eindringtiefe für die Glühzeiten $t_1 = 10^4\text{ s}$ und $t_2 = 10^5\text{ s}$ bei einer Glühtemperatur von $T = 940^\circ\text{C}$ und unter der Voraussetzung, daß sowohl das Glühmedium als auch das Bauteil als einseitig unendliche Halbräume vorausgesetzt werden können (siehe Bild F3.2)! Der Diffusionskoeffizient $D_{940^\circ} = 5 \cdot 10^{-11}\text{ m}^2/\text{s}$ soll unabhängig von der Konzentration sein.

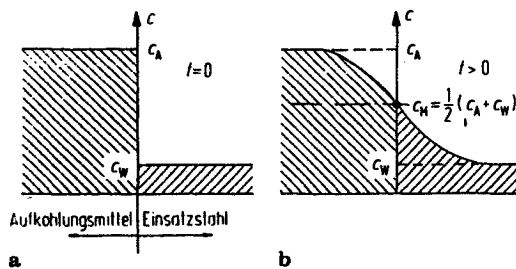


Bild F. 3.2

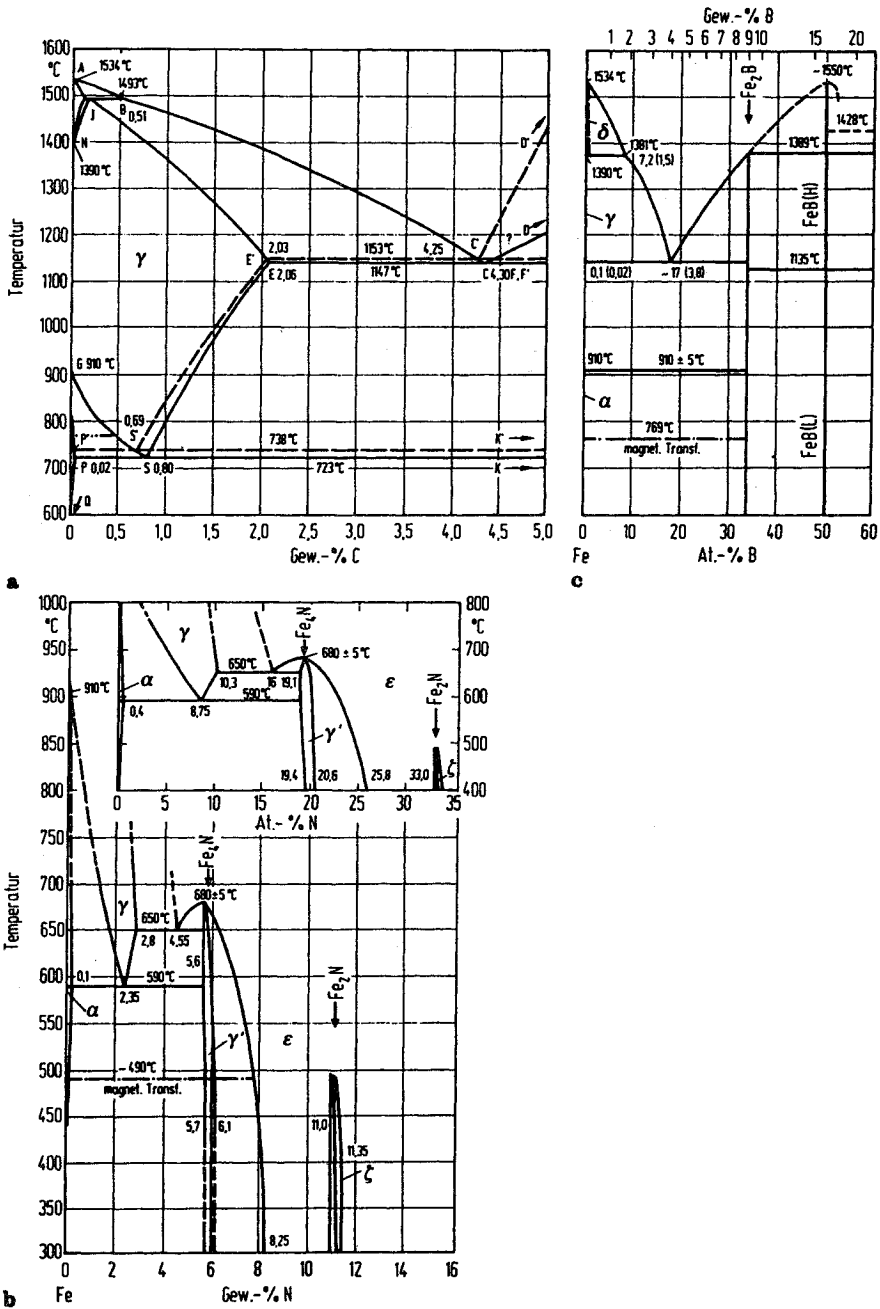


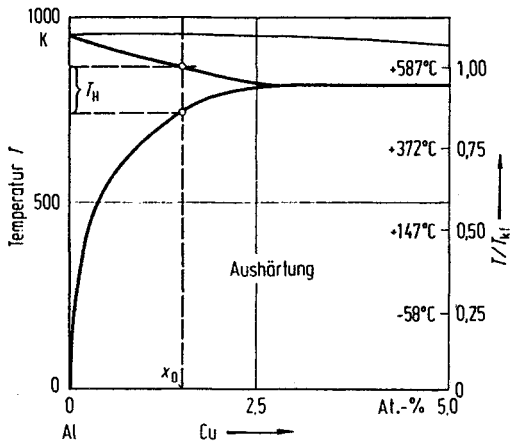
Bild F 3.1

3.3 Rekristallisation

1. Welches sind die Voraussetzungen für das Auftreten der Rekristallisation?
2. Nennen Sie drei Ziele, die mit der Rekristallisationsglühung angestrebt werden können!
3. Nennen Sie drei mögliche Orte in einer Mikrostruktur, an denen die Rekristallisation beginnen kann!
4. Welche Möglichkeiten zur Erzeugung von feinkörnigen Gefügen kennen Sie?
5. Das Weichglühen eines Stahls ist bei $T = 600\text{ °C}$ nach einer Zeit von $t_1 = 3\text{ h}$ abgeschlossen. Bei welcher Temperatur muß gegläht werden, wenn die Wärmebehandlung nach $t_2 = 0,5\text{ h}$ abgeschlossen sein soll? ($R = 8,314\text{ J/molK}$, $Q_{sd} = 240\text{ kJ/mol}$)

3.4 Aushärtung

1. Kennzeichnen Sie kurz folgende Reaktionstypen im festen Zustand:
 - a) Erholung,
 - b) Entmischung,
 - c) Umwandlung!
2. Beschreiben Sie den Verlauf der Ausscheidung, der im Zustandsdiagramm Al-Cu gestrichelt eingezeichneten Legierung (Bild F3.3) an Hand eines Zeit-Temperatur-Diagramms.
3. Welche Gleichung beschreibt die Temperaturabhängigkeit des Beginns der Ausscheidung?
4. Welches Gefüge wird zum Herbeiführen der Ausscheidungshärtung angestrebt, welches sind ungünstige Gefüge?
5. In welchem Bereich des Zustandsdiagramms (T, c) können feindisperse Gefüge hergestellt werden?
6. Beschreiben Sie die Wärmebehandlung zur Herbeiführung der Ausscheidungshärtung mit Hilfe des T-c- und T-t-Diagramms!

**Bild F 3.3**

7. Erläutern Sie den Begriff der thermo-mechanischen Behandlung und beschreiben Sie ausführlich die zwei Beispiele des Austenitformhärtens und der martensitaushärtenden Stähle!
8. Erläutern Sie die Vorgänge, die beim isothermen Anlassen eines übersättigten Mischkristalls ablaufen!
9. Wie wirken sich die verschiedenen Gitterabmessungen der Kristallstrukturen von Ausscheidung und Matrix aus? Nennen Sie Beispiele!

3.5 Martensitische Umwandlung

1. Nennen Sie drei wichtige Anwendungen der martensitischen Umwandlung!
2. Nennen Sie zwei wichtige Kennzeichen der martensitischen Phasenumwandlung!
3. Welche Kristallstruktur entsteht durch die martensitische Umwandlung der kfz-Phase (Austenit) von Fe-C-Legierungen?
4. Erläutern Sie die Martensit-Start-Temperatur M_s mit Hilfe des Freie-Energie-Temperatur Diagramms!
5. Wo erscheint die martensitische Umwandlung im ZTU-Diagramm (Skizze) eines untereutektoiden Fe-C-Stahls?

6. Wodurch kann die Martensit-Start-Temperatur beeinflusst werden?
7. Warum ist für die martensitische Umwandlung eine Unterkühlung notwendig?
8. Welches sind die Voraussetzungen für die Herstellung eines Stahls mit austenitischer Kristallstruktur?
9. Wie ändert sich der Mengenanteil der martensitisch umgewandelten Phase in Abhängigkeit von der Temperatur? Zeichnen Sie die M_s -, M_f -, A_s -, A_f - Temperaturen ein und erklären Sie, was sie bedeuten.
10. Erläutern Sie das in Bild F 3.4 dargestellte Gefüge! Wie ist es entstanden?

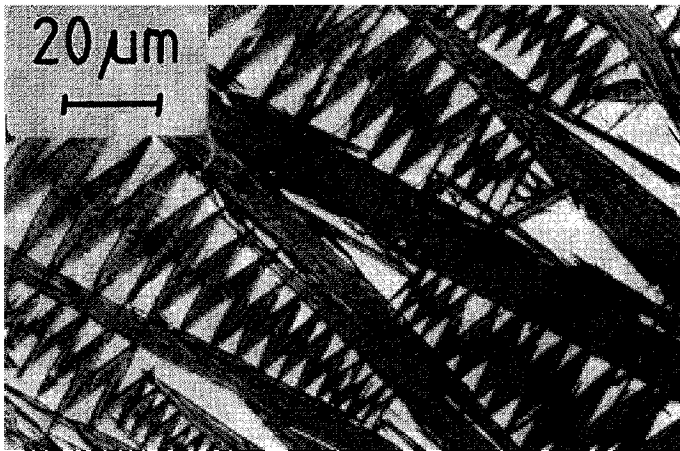


Bild F 3.4

3.6 Wärmebehandlung und Fertigung

1. Nennen Sie mindestens je ein Beispiel für die Erwärmung eines Werkstoffes in
 - a) der Fertigung und
 - b) im Gebrauch,die einmal beabsichtigt und einmal unbeabsichtigt ist!

2. Geben Sie für die in der Frage 1 auftretenden Fälle an, welche absichtlichen oder unabsichtlichen Gefüge- und Eigenschaftsänderungen eintreten!
3. Nennen Sie vier Beispiele für Fertigungsverfahren, bei denen Reaktionen im festen Zustand eine wichtige Rolle spielen!
4. Welche Grundtypen zweiphasiger Gefüge sind Ihnen bekannt?

4 Mechanische Eigenschaften

4.1 Arten der Beanspruchung

1. Kennzeichnen Sie qualitativ die Art der Beanspruchung des Werkstoffes unter folgenden Betriebsbedingungen:
 - a) Stahlseil eines Förderkorbes
 - b) Rotorblatt eines Hubschraubers,
 - c) Gleitlagerschale,
 - d) Generatorwelle (horizontale Lagerung),
 - e) Hüllrohr eines Reaktorbrennelementes,
 - f) Gasturbinenschaufel!
2. Kennzeichnen Sie qualitativ die Beanspruchung des Werkstoffes bei der Fertigung:
 - a) Schneiden eines Werkzeugs bei spanabhebender Bearbeitung
 - b) Walzen beim Kalt- und Warmwalzen,
 - c) Drahtwerkstoff beim Ziehen,
 - d) Werkstoff beim Streck- und Tiefziehen,

4.2 Elastizität

1. Erläutern Sie (Skizze) folgende Begriffe:
 - a) linear elastisches Verhalten,
 - b) Gummielastizität,
 - c) Viskoelastizität,
 - d) Elastizitätsgrenze!
2. Eine Al-Legierung hat die Dehngrenze $R_{p0,2} = 300 \text{ MPa}$, den Elastizitätsmodul $E = 72.000 \text{ MPa}$ und die Querkontraktionszahl $\nu = 0,34$. Wie groß ist
 - a) der elastische Verformungsgrad,
 - b) Gesamtverformungsgrad,bei einachsiger Zugbeanspruchung mit $\sigma = R_{p0,2}$ parallel und senkrecht zu dieser Beanspruchungsrichtung bei Isotropie?

3. Wieviele Konstanten sind zur Beschreibung eines isotropen Werkstoffes notwendig und welches sind die vier in der Technik benutzten Konstanten?
4. Berechnen Sie den E-Modul eines Faserverbundwerkstoffs parallel und quer zur Faserrichtung:
 $E_{\text{Duromer}} = 50 \cdot 10^2 \text{ MPa}$
 $E_{\text{Kohlefaser}} = 50 \cdot 10^4 \text{ MPa}$
 $f_{\text{Kohlefaser}} = 0,2 \text{ (Volumenanteil)}$
5. Beschreiben Sie das elastische Verhalten von grauem Gusseisen mit lamellarem Graphit!

4.3 Formänderung

1. Beschreiben Sie die mikrostrukturellen Vorgänge bei der plastischen Verformung eines kristallinen Werkstoffs!
2. Bis zu welchem nominellen Verformungsgrad ϵ kann auf die Anwendung der wahren Verformung ϕ verzichtet werden, wenn 1% Genauigkeit verlangt wird?
3. Die Querkontraktionszahl beträgt $\nu = 0,33$ für einen Stahl mit der Streckgrenze $R_p = 300 \text{ MPa}$. Wie groß ist die Volumenänderung unter einer Zugspannung von $\sigma_a = 0,8 R_p$ ($E = 215 \cdot 10^3 \text{ MPa}$)?
4. Wie unterscheiden sich die Querkontraktion bei plastischer Verformung von der bei elastischer Verformung?
5. Wie groß ist die Volumenänderung bei einer plastischen Verformung von $\phi = +2$?
6. Definieren Sie die Begriffe:
 - a) elastische Verformung,
 - b) plastische Verformung,
 - c) Gleichmaßdehnung,
 - d) Bruchdehnung,
 - e) Brucheinschnürung!
7. Wie ist der ebene Dehnungs- und wie der ebene Spannungszustand definiert?
8. Welche zwei Möglichkeiten einer thermischen Ausdehnung kennen Sie?
9. Definieren Sie die Begriffe Kriechen und Superplastizität!
10. Nennen Sie Möglichkeiten zur Verbesserung der Kriechfestigkeit!

4.4 Zugversuch

1. Erläutern Sie die Begriffe (Gleichungen):
 - a) Elastizitätsmodul,
 - b) Querkontraktionszahl,
 - c) Streckgrenze,
 - d) Zugfestigkeit!
2. Erläutern Sie das Auftreten einer maximalen Zugkraft F_{\max} beim Zerreißversuch eines verfestigenden Werkstoffs!
3. Definieren Sie
 - a) den Verfestigungskoeffizienten,
 - b) den Verfestigungsexponenten!
4. Skizzieren Sie die Spannungs-Dehnungs-Kurve von Werkstoffen mit folgenden Eigenschaften (Beispiel):
 - a) ideal spröde und linear elastisch,
 - b) spröde und nicht-linear elastisch,
 - c) niedrige Streckgrenze und bei plastischer Verformung stark verfestigend,
 - d) hohe Streckgrenze und bei plastischer Verformung wenig verfestigend,
 - e) ideal plastisch!
5. In einem Zugversuch wurden folgende Werkstoffkennwerte ermittelt:

Elastizitätsgrenze	$R_e = 750 \text{ MPa}$
Zugfestigkeit	$R_m = 1.100 \text{ MPa}$
E-Modul	$E = 210.000 \text{ Mpa}$
Gleichmassdehnung	$\epsilon_g = 6 \%$
Bruchdehnung	$A_g = 11 \%$

 - a) Welcher Werkstoff wurde geprüft?
 - b) Wie hoch ist die Dehnung bei Belastung bis zur Elastizitätsgrenze?
 - c) Was sagt Ihnen A_g ?
 - d) Was passiert mit der Probe bei Dehnungen größer ϵ_g ?
 - e) Was passiert mit der Probe, wenn sie auf eine Spannung $R_e < \sigma < R_m$ belastet und dann vollständig entlastet wird?
 - f) Angenommen, mit der nach e) behandelten Probe wird erneut ein Zugversuch durchgeführt. Ist die hierbei gemessene Elastizitätsgrenze gleich der ursprünglichen oder hat sie sich verändert? Erläutern Sie Ihre Antwort.

4.5 Härtungsmechanismen

1. Erklären Sie mit Hilfe von Gitterversetzungen (Skizze) das Entstehen von Gleitstufen!

2. Erläutern Sie die Ursache einer ausgeprägten Streckgrenze bei vielen Baustählen (z.B. S 235)!
3. Welche Möglichkeiten zur Erhöhung der Streckgrenze von Metallen (Härtungsmechanismen) gibt es?
4. Berechnen Sie die Festigkeitssteigerung $\Delta\tau_T$ durch eine Dispersion von kleinen Teilchen nach der Orowan-Beziehung ($G = 28.000 \text{ MPa}$, $b = 0,4 \text{ nm}$ $D_T = 0,2 \text{ nm}$)!
5. Definieren Sie die theoretische Schubfestigkeit τ_{th} und die theoretische Reißfestigkeit σ_{th} ! Wie können diese beiden Werte abgeschätzt werden?
6. Welche Bedingung muß erfüllt sein, um die theoretische Schubspannung τ_{th} in Metallkristallen erreichen zu können?
7. Wovon hängt es ab, ob ein Kristall bei Belastung spröde reißt oder vorher abgeleitet?

4.6 Kerbschlagarbeit, Bruchzähigkeit

- 1.a) Wie ist die Kerbschlagarbeit definiert?
b) Was läßt sich über das Bruchverhalten eines Werkstoffes mit einer hohen oder mit einer niedrigen Kerbschlagarbeit aussagen?
2. Nennen Sie Beispiele, für die Ihnen der Kerbschlagbiegeversuch als ein geeignetes mechanisches Prüfverfahren erscheint!
3. Warum benutzt man beim Kerbschlagbiegeversuch gekerbte Proben und warum wird dieser Versuch bei unterschiedlichen Prüftemperaturen durchgeführt?
4. Das Bild F4.1 zeigt eine Kraft-Rißaufweitungskurve, wie sie in einem K_{IC} - Versuch an einem Vergütungsstahl (55 Cr 3) gemessen wurde. Sie sollen diesen Versuch auswerten und dabei folgende Fragen beantworten:
 - a) Was versteht man unter der Bruchzähigkeit eines Werkstoffes?
 - b) Geben Sie die allgemeine Gleichung für die Spannungsintensität K an und erläutern Sie deren Bedeutung!
 - c) Beschreiben Sie die wesentlichen Merkmale des Versuchsaufbaues, der Probenform und der Versuchsdurchführung eines K_{IC} -Versuches!
 - d) Das Diagramm in Bild F4.1 wurde an einer CT (compact tension) - Probe ermittelt, für die die kritische Spannungsintensität nach folgender Formel berechnet wird:

$$K = \frac{F}{d\sqrt{B}} \cdot \frac{\left(2 + \frac{a}{B}\right)}{\left(1 - \frac{a}{B}\right)^{3/2}} \left[0,886 + 4,64 \frac{a}{B} - 1332 \left(\frac{a}{B}\right)^2 + 1472 \left(\frac{a}{B}\right)^3 - 5,6 \left(\frac{a}{B}\right)^4 \right]$$

(nach: ASTM E 399-78).

Geg:

$a_c = 24,595 \text{ mm}$

$D = 12,570 \text{ mm}$

$B = 50 \text{ mm}$

$R_{p0,2} = 1.460 \text{ MPa}$

Berechnen Sie die Spannungsintensität K_{Ic}

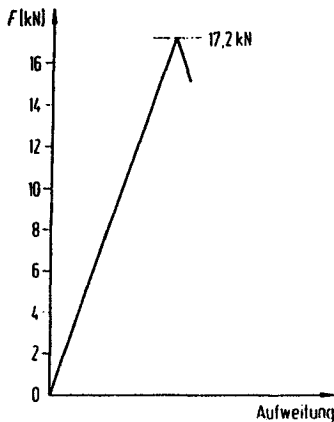


Bild F 4.1

- e) Wie hängt die Spannungsintensität von der Dicke d der Probe ab (Skizze)?
 - f) Überprüfen Sie mit dem Dickenkriterium, ob die in d) ermittelte Spannungsintensität ein Werkstoffkennwert ist!
5. Stellen Sie eine Energiebetrachtung für eine instabile Rißausbreitung nach Griffith an und erklären Sie die Bedeutung der Energiefreisetzungsrate (Rißausbreitungskraft) $G = [\text{Jm}^{-2}]$

4.7 Kriechen, Schwingfestigkeit, Ermüdung

1. Geben Sie die drei möglichen dynamischen Belastungsfälle für Laborermüdungsversuche in einem σ - t Diagramm an und kennzeichnen Sie folgende Größen: σ_o , σ_u , σ_m , σ_a und R !

2. Wie ist ein Zeitstandsschaubild aufgebaut?
3. Zeichnen Sie ein Wöhlerdiagramm und kennzeichnen Sie folgende Größen: R_m , Wechselfestigkeit, Zeit- und Dauerfestigkeitsbereich!
4. Welche Größen werden in einem
 - a) spannungs- und
 - b) dehnungskontrollierten
 Ermüdungsversuch konstant gehalten?
5. Zug/Druck-Ermüdungsversuche können spannungs- oder verformungskontrolliert durchgeführt werden. Zeichnen Sie gemäß den Angaben in a-d jeweils ein zyklisches Spannungs-Dehnungs-Diagramm, das den prinzipiellen Kurvenverlauf vom ersten Lastwechsel bis zur Sättigung wiedergibt. Zeichnen Sie zusätzlich für jeden Fall jeweils drei Einzeldiagramme für σ_a , ϵ_{ges} ($= \epsilon_{el} + \epsilon_{pl}$) und ϵ_{pl} über der Lastwechselzahl N ($\sigma_m = 0$):
 - a) $\sigma_a = \text{konst.}$, $\epsilon_{pl} = 0$,
 - b) $\sigma_a = \text{konst.}$, Werkstoff entfestigt,
 - c) $\epsilon_{pl} = \text{konst.}$, Werkstoff verfestigt,
 - d) $\epsilon_{ges} = \text{konst.}$, Werkstoff verfestigt!
6. Gegeben ist ein Wöhlerdiagramm für einen warmfesten austenitischen Stahl (X5 NiCrTi 26 15), (Bild F4.2). Welche Restlebensdauer bis zum Bruch ergibt sich nach der linearen Schadensakkumulationshypothese, wenn eine Probe bereits durch zwei Lastkollektive
 - $\sigma_{a1} = 500 \text{ MPa}$, $n_1 = 10^4 \text{ LW}$,
 - $\sigma_{a2} = 350 \text{ MPa}$, $n_2 = 4,9 \cdot 10^5 \text{ LW}$
 belastet worden ist und unter der Spannung $\sigma_{a3} = 400 \text{ MPa}$ weitergefahren werden soll?

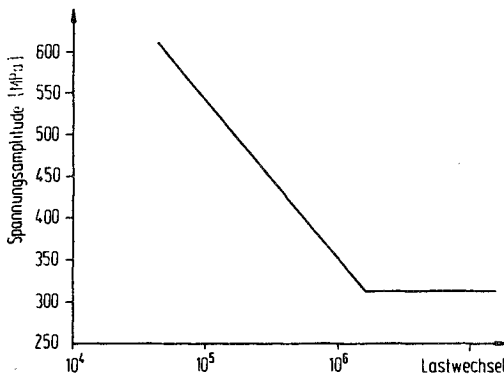


Bild F 4.2

4.8 Bruchmechanismen

1. Beschreiben Sie die einzelnen Stadien bis zum Bruch eines Bauteils, das infolge einer schwingenden Beanspruchung versagt!
2. Warum tritt bei einer schwingenden Beanspruchung eines Bauteils die Rißbildung bevorzugt an der Oberfläche auf?
3. Was versteht man unter Schwingstreifen? Skizzieren Sie ihre Entstehung!
4. Das Bild F4.3 zeigt den typischen Kurvenverlauf eines bruchmechanischen Rißausbreitungsversuchs:
 - a) Wie ermittelt man die Rißgeschwindigkeit da/dN ?
 - b) Ist ΔK während des Versuchs konstant?
 - c) Welche Gleichung beschreibt den nahezu linearen Verlauf der Kurve im Bereich II?
 - d) Gegen welche Grenzwerte strebt die Kurve für eine immer kleiner und immer größer werdende Rißgeschwindigkeit?

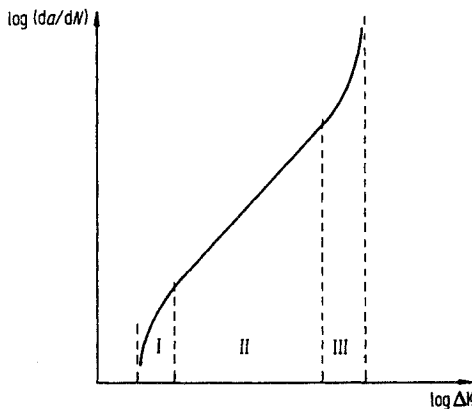


Bild F 4.3

5. Beschreiben Sie die in Bild F 4.4 dargestellten Brüche! Welches Bild zeigt einen duktilen, welches einen spröden und welches einen Ermüdungsbruch?

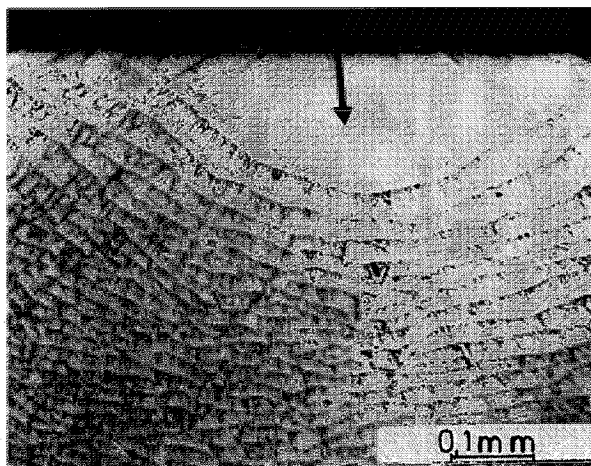


Bild F 4.4 a

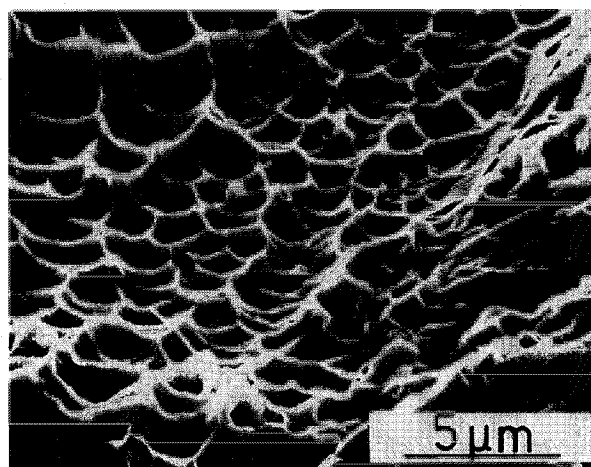


Bild F 4.4 b

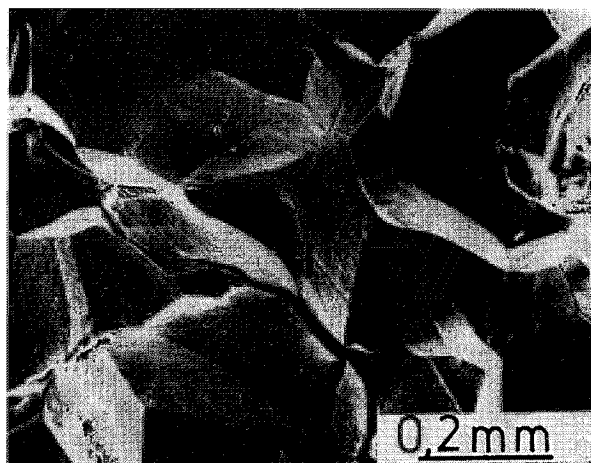


Bild F 4.4 c

4.9 Viskosität, Viskoelastizität

1. Kennzeichnen Sie den Unterschied von viskosem und viskoelastischem Verhalten (z. B. anhand eines Verformungs-Zeit-Diagramms)!
2. Welches Fließgesetz gilt für
 - a) Metallschmelzen,
 - b) Polymerschmelzen,
 - c) nassen Ton?
3. Wie wird die Dämpfungsfähigkeit eines Werkstoffs gemessen?
4. Welche sind die Ursachen der Dämpfung von Schwingungen in Metallen, Hochpolymeren?

4.10 Technologische Prüfverfahren

1. Definieren Sie die Härte eines Werkstoffs für a) Metalle
b) Gummi
2. Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Härte und dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm?
3. Durch welche drei maßgeblichen Faktoren wird der Reibungskoeffizient bestimmt?
4. Definieren Sie die Begriffe Verschleißsystem, Verschleißrate, Verschleißkoeffizient!
5. Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Härte und dem Verschleißwiderstand?

5 Physikalische Eigenschaften

5.1 Werkstoffe im Kernreaktorbau

1. Skizzieren Sie die wichtigsten Bauteile eines wassergekühlten Kernreaktors und geben Sie die Funktion der jeweiligen Werkstoffgruppen an!
2. Definieren Sie den
 - a) mikroskopischen,
 - b) makroskopischen Wirkungsquerschnitt!
3. Welche Arten von Wirkungsquerschnitten spielen im Kernreaktor eine Rolle?
4. Beschreiben Sie das Beanspruchungsprofil des Hüllrohrs eines Brennelements und begründen Sie die Wahl der dafür geeigneten Werkstoffe!
- 5.a) Welche Art von Defekten (Strahlenschäden) entstehen in Werkstoffen, die der Neutronenbestrahlung im Kernreaktor ausgesetzt sind?
 - b) Welche mechanische Eigenschaft wird dadurch verschlechtert?

5.2 Elektrische Leiter

1. Wie unterscheidet sich für Leiter und Isolatoren
 - a) die Bandstruktur,
 - b) der elektrische Widerstand,
 - c) dessen Temperaturkoeffizient?
2. Silber (bester Leiter) wird durch gleiche Stoffmengenanteile an Fe und Al verunreinigt. Wie ändert sich die elektrische Leitfähigkeit (Fe unlöslich, Al löslich in Ag)?
3. Es besteht die Aufgabe, einen Werkstoff mit hoher Leitfähigkeit und gleichzeitig hoher Härte (z. B. für einen Stromabnehmer mit hohem Verschleißwi-

derstand) zu entwickeln. Welchen prinzipiellen Aufbau sollte der Werkstoff haben?

- 4 a) Welche Werkstoffeigenschaft bestimmt den Abstand zwischen zwei Masten einer Al-Überlandleitung?
- b) Leiten Sie daraus die geforderte Eigenschaftskombination für derartige Werkstoffanwendungen (Überlandleitungen) ab.

5.3 Ferromagnetische Werkstoffe

1. Definieren Sie anhand der Magnetisierungskurve die Begriffe hartmagnetische und weichmagnetische Werkstoffe!
2. Nennen Sie jeweils drei Anwendungen für diese beiden Werkstoffgruppen!
3. Begründen Sie die Wahl der chemischen Zusammensetzung und der Mikrostruktur für die Optimierung der Eigenschaften von Transformatorenblechen.
4. Beschreiben Sie den Aufbau von Magnetspeichern!
5. In welchen Atomarten und Phasen tritt Ferromagnetismus auf?
6. Was versteht man unter der magnetischen Härtung? Welches sind ihre mikrostrukturellen Voraussetzungen bzw. Kennzeichen?

5.4 Halbleiter

1. Wie unterscheidet sich ein Halbleiter (Beispiele) von Isolator und Leiter?
2. Definieren Sie (mit Hilfe der Kristallstruktur und des Bandmodells) die n- und p-Leitung!
3. Werkstoffe für Halbleiter müssen Einkristalle von höchstem Reinheitsgrad sein ($1 \text{ Fremdatom pro } 10^{10} \text{ Eigenatome} \hat{=} 99,99999999 \text{ At.-%}$). Diesen hohen Reinheitsgrad erreicht man durch das Zonenschmelz-Verfahren. Beschreiben Sie mit Hilfe eines schematischen Zustandsdiagramms das Prinzip dieses Verfahrens!
4. Erläutern Sie Aufbau und Wirkungsweise einer Halbleiterdiode!
5. Wie werden hochintegrierte Schaltkreise hergestellt?

5.5 Thermische Ausdehnung

1. Wie unterscheidet sich die Wärmeleitfähigkeit von
 - a) Baustahl (z.B. S 235),
 - b) austenitischem Stahl (X 5 Cr Ni 18 8),
 - c) reinem Eisen?
2. Erläutern Sie die Anomalien bei der thermischen Ausdehnung von Eisen!
3. Erläutern Sie:
 - a) den Einweg-Formgedächtnis-Effekt,
 - b) den Zweiweg-Formgedächtnis-Effekt,
 - c) superelastisches Verhalten!
4. Nennen Sie drei Beispiele für die Anwendung von Formgedächtnislegierungen!

5.6 Werkstoffe der Energietechnik

1. Nennen Sie (mindestens) ein Beispiel für die Rolle von Werkstoffen bei
 - a) der Erzeugung,
 - b) der Speicherung und
 - c) dem Transport von Energie
- 2.a) Beschreiben Sie Aufbau und Wirkungsweise von Solarzellen (Photovoltaik).
 - b) Welche Mikrostrukturen kommen für Si-Platten in Frage?
 - c) Welche anderen Werkstoffe liefern Alternativen?
- 3.a) Beschreiben Sie Aufbau und Wirkungsweise einer Brennstoffzelle.
 - b) Welche Werkstoffeigenschaften sind entscheidend für deren Langzeitstabilität?
 - c) Welche Werkstoffeigenschaften sind entscheidend für die Struktur und für Anwendungen von Perowskit-Keramiken auf anderen Gebieten?
- 4.a) Wie ist der thermodynamische Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine definiert?
 - b) Welcher Zusammenhang besteht dabei mit den Werkstoffeigenschaften?
 - c) Welche Faktoren bestimmen die obere Grenze der Gebrauchstemperatur einer Gasturbinenschaufel?
- 5.a) Beschreiben Sie kurz den Aufbau einer Batterie zur Speicherung elektrischer Energie?
 - b) Welche Materialsysteme kommen dafür in Frage?
 - c) Nennen Sie jeweils Vor- und Nachteile.

5.7 Werkstoffe für Sensoren

1. Welches ist die wesentliche Eigenschaft eines Sensorwerkstoffes?
 2. Beschreiben Sie den Aufbau eines Dehnungsmessstreifens.
 3. Welche (anderen) Möglichkeiten (Werkstoffe) gibt es, um eine Kraft in ein anderes (nichtmechanisches) Signal umzuwandeln?
 4. Was ist unter passiver und aktiver mechanischer Dämpfung zu verstehen?
-

6 Chemische und tribologische Eigenschaften

6.1 Korrosion

1. Erläutern Sie kurz die Begriffe:
 - a) Korrosion,
 - b) Spannungsrisskorrosion,
 - c) Rosten,
 - d) Korrosionsermüdung,
 - e) Wasserstoffversprödung!
2. Welches sind die drei wichtigsten Vorgänge, die das Leben von Werkstoffen/Bauteilen beenden?
3. Welche Werkstoffgruppe zeigt
 - a) bevorzugt
 - b) niemalsKorrosionserscheinungen?
4. Erläutern Sie den Begriff des "korrosionsgerechten Konstruierens" anhand des Elektrodenpotentials der Metalle!

6.2 Elektrochemische Korrosion

1. Gegeben sind die Al-Legierungen
 - Al Cu Zn und
 - Al Zn Mg.Bei welchem Werkstoff ist die größere Korrosionsbeständigkeit zu erwarten?
2. Beschreiben Sie die Wirkungsweise eines "Lokalelements" anhand eines Fe-Cu Sinterwerkstoffes!
3. Welche Prozesse treten an der Oberfläche von Fe in

- a) feuchter und
 - b) trockener
Luft auf?
4. Erläutern Sie den Begriff der Passivierung von Werkstoffen!
 5. Beschreiben Sie die anodische Oxidation von Aluminium und deren Wirkung!
 6. Nennen Sie mindestens vier verschiedene Verfahren für den Korrosionsschutz von Eisen/Stahl!
 7. Leiten Sie das Verzunderungsgesetz (Zusammenhang: Schichtdicke, Zeit, Temperatur) für eine festhaftende Schicht ab!

6.3 Spannungsrißkorrosion (SRK)

1. Definieren Sie den Begriff Spannungsrißkorrosion!
2. Welche Werkstoffe sind empfindlich gegen SRK?
3. Wie kann die SRK-Empfindlichkeit eines Werkstoffes im Experiment festgestellt werden?
4. Beschreiben Sie die Versuchsanordnung und Auswertung der Ergebnisse der bruchmechanischen Prüfung der SRK!
5. Welches sind die beiden wichtigsten Möglichkeiten für den Verlauf eines SRK-Risses im Gefüge metallischer Werkstoffe?

6.4 Reibung und Verschleiß

1. Skizzieren Sie ein tribologisches System!
2. Welche Energiebilanz an der Grenzfläche zweier Stoffe wird
 - a) für eine Klebeverbindung,
 - b) für möglichst geringe Reibung (Lager) angestrebt?
3. Wie kann die Oberflächenenergie eines Stoffes ermittelt werden?
4. Definieren Sie die Begriffe "Reibung" und "Verschleiß"!
5. Wie wird Verschleiß gemessen?

6. Nennen Sie technische Anwendungen, in denen die folgenden tribologischen Eigenschaften angestrebt werden!
- a) geringe Reibung und geringer Verschleiß,
 - b) hohe Reibung bei geringem Verschleiß,
 - c) hoher Verschleiß trotz geringer Reibung.

7 Keramische Werkstoffe

7.1 Allgemeine Kennzeichnung

1. In welche drei Untergruppen werden die keramischen Stoffe in der Technik eingeteilt?
2. Nennen Sie einige Anwendungsgebiete für jede dieser Gruppen!
3. Wie sind metallische von keramischen Werkstoffen klar zu unterscheiden?
4. Nennen Sie drei kennzeichnende Eigenschaften keramischer Stoffe (bei 20 °C)!
5. Wie hängen Struktur und Toxizität von Asbest zusammen?
6. Nennen Sie einige Anwendungsbeispiele für Keramik im Maschinenbau!

7.2 Nicht-oxidische Keramik

1. Nennen Sie die vier strukturellen Formen, in denen Kohlenstoff als Werkstoff verwendet werden kann!
2. Wie lassen sich keramische Werkstoffe mit hoher Temperaturwechselbeständigkeit aus einer Kombination physikalischer Eigenschaften der Phasen ableiten?
3. Welche Voraussetzungen müssen zur Bildung von Phasen mit hohen Werten von E/ρ erfüllt sein (E Elastizitätsmodul, ρ Dichte)? Geben Sie die Gründe hierfür und einige Beispiele an!
4. Nennen Sie drei werkstofftechnische Anwendungen der Boride!

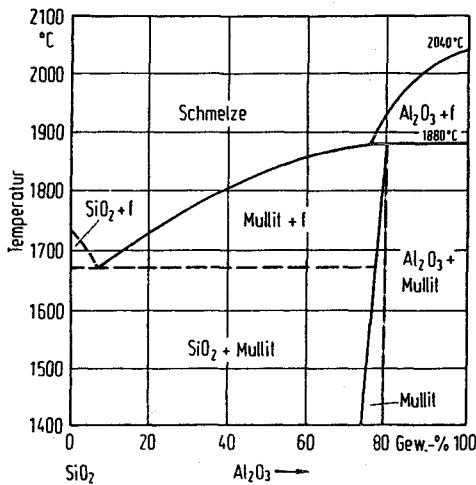
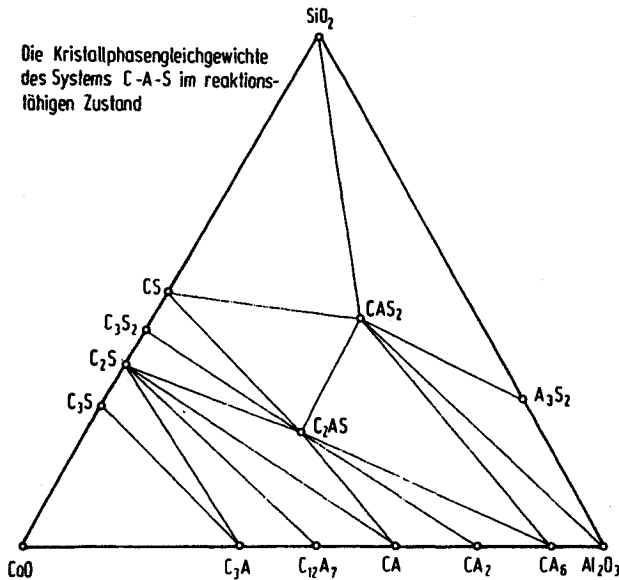


Bild F 7.1

7.3 Oxidkeramik

- Gegeben ist das Zustandsschaubild SiO_2 - Al_2O_3 (Bild F7.1)! Zeichnen Sie die oberen Verwendungstemperaturen der Werkstoffe ein, die aus diesen beiden Komponenten und deren Gemischen bestehen!
- Gegeben ist das Dreistoffsystem, in dem die Zusammensetzungen aller Mischungen der Komponenten CaO , SiO_2 , Al_2O_3 enthalten sind (Bild F7.2)! Zeichnen Sie den (ungefähren) Bereich für die Zusammensetzung folgender Stoffe ein:
 - Silikasteine,
 - Korundsteine,
 - Porzellan,
 - Portlandzement!
- Worauf beruht die plastische Verformbarkeit von
 - Metallen,
 - feuchtem Ton,
 - Oxidglas?
- Nennen Sie Vorteile und Nachteile der Verwendung von Keramiken als Hochtemperaturwerkstoffe!

**Bild F 7.2**

5. Worauf beruht die hohe Oxidationsbeständigkeit von
- Korund (Al_2O_3)
 - Polyäthylen
 - Chromstahl?

7.4 Zement-Beton

1. Wie unterscheiden sich hydraulische und nicht-hydraulische Zemente?
2. Gegeben ist ein Ausschnitt aus dem Zustandsschaubild SiO_2 - CaO (Bild F7.3). Leiten Sie daraus den technischen Prozeß für die Zementherstellung ab!
3. Beschreiben Sie den mikroskopischen Aufbau von Beton nach dem Erstarren.
4. Beschreiben Sie die Spannungs-Verformungskurve von Beton unter Zug- und Druckspannung!
5. Welche Eigenschaft wird zur Bezeichnung von Beton verwendet, z. B. Bn 200 (Dimension)?

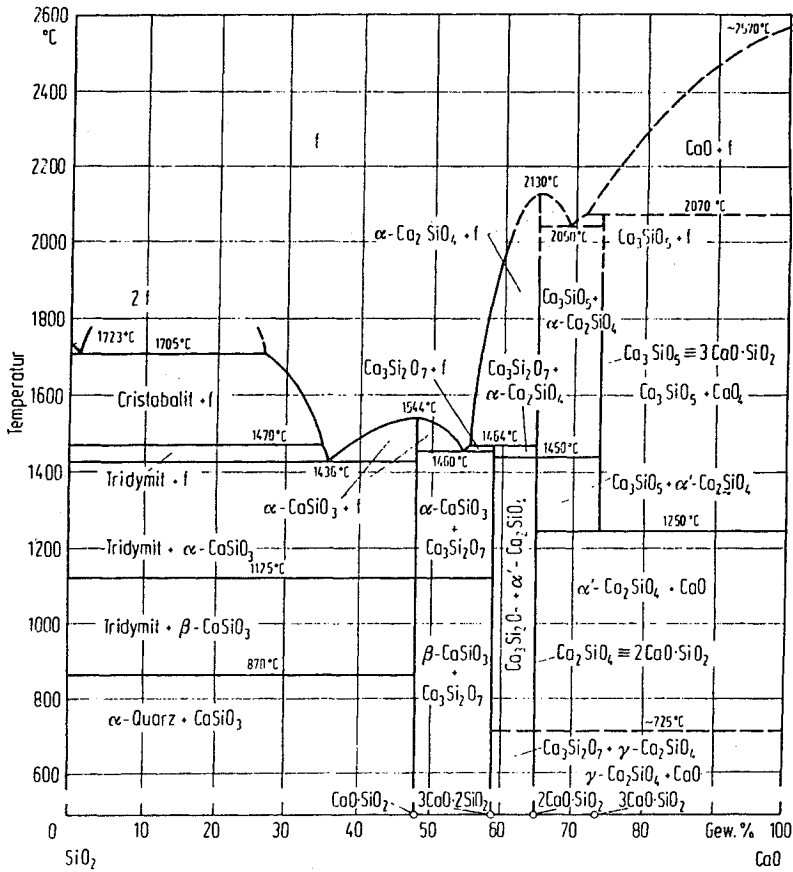
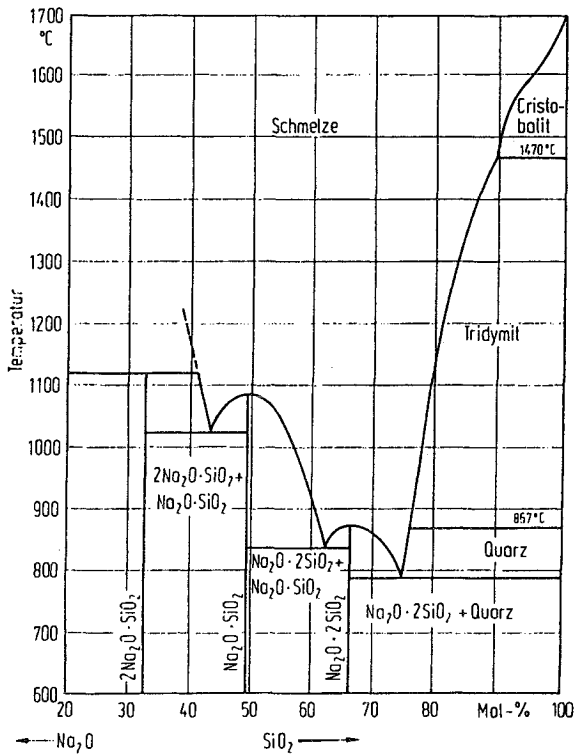


Bild F 7.3

7.5. Oxidgläser

1. Welches sind die Kennzeichen einer Glasstruktur und welche Werkstoffe können in dieser Form hergestellt werden?
2. Definieren Sie die Begriffe Schmelztemperatur T_{kf} und Glasübergangstemperatur T_g .
3. Gegeben ist das Zustandsschaubild $\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O}$ (Bild F7.4). Zeichnen Sie den Bereich des Fensterglases ein!

**Bild F 7.4**

4. Geben Sie die Gleichung an, mit der die kennzeichnende mechanische Eigenschaft von Oxidglas zwischen Verwendungstemperatur (20°C) and Formgebungstemperatur (800°C) beschrieben werden kann!
5. Skizzieren Sie den Aufbau eines Glasfaserstranges zur Lichtleitung!

8 Metallische Werkstoffe

8.1 Metalle allgemein und reine Metalle

1. Wie lassen sich Metalle grundsätzlich charakterisieren (Eigenschaften, die in Werkstoffen genutzt werden)?
2. Definieren Sie an zwei Beispielen den Unterschied zwischen Guß- und Knetlegierungen!
3. Welches sind wichtige Kennzeichen guter Gußlegierungen wie z.B. Gußeisen oder G-AlSi 12?
4. Welche Voraussetzung (periodisches System der Elemente) begünstigt einen sehr hohen oder niedrigen Schmelzpunkt reiner Metalle?
5. Gibt es metallische Werkstoffe, die keine Legierungen sind?
6. Welches Zweistoffsystem bildet die Grundlage für Stähle?
7. Wie kann man Stähle hinsichtlich ihres Kohlenstoffgehaltes einteilen? Ab welchem Kohlenstoffgehalt spricht man von Gußeisen?
8. Welche Typen Gußeisen werden unterschieden?
9. Nennen Sie die drei wichtigsten binären Legierungssysteme des Aluminiums!
10. Aus welchen Legierungselementen sind sogenannte Superleichtmetalle aufgebaut?

8.2 Mischkristallegierungen

1. Geben Sie in den Zustandsdiagrammen Cu-Zn, Cu-Sn und Cu-Al (Bild F 8.1a-c) die Existenzbereiche der α - und ($\alpha + \beta$)-Messinge und -Bronzen an!



Bi



Bi

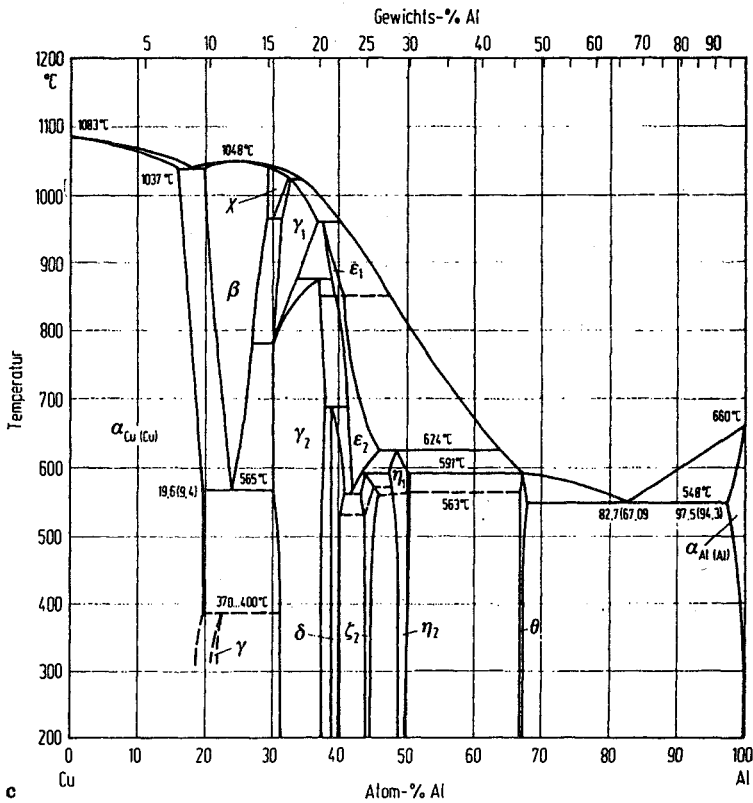


Bild F 8.1 c

2. Wie beeinflusst ein zunehmender Gehalt an gelösten Atomen
 - die Streckgrenze,
 - den Verfestigungskoeffizienten und
 - die Tiefziehfähigkeit
 von α -Messingen?

3. Zu α -Fe (Ferrit, $a = 0,2866 \text{ nm}$) wird jeweils 1 At.% (Stoffmengengehalt) folgender Elemente zulegiert:
 - a) Mo ($a = 0,3147 \text{ nm}$)
 - b) Al ($a = 0,4049 \text{ nm}$)
 - c) P ($a = 0,217 \text{ nm}$)
 Gesucht sind der Gehalt in Gew.% (Massengehalt) und die relative Erhöhung der Streckgrenze durch diese Elemente.

- Wie beeinflusst die Mischkristallbildung in Metallen die elektrische Leitfähigkeit, die Streckgrenze und die Schmelztemperatur?

8.3 Ausscheidungshärtbare Legierungen

- Wo sind in Zustandsdiagrammen ausscheidungshärtbare Legierungen zu finden?
- Erläutern Sie die Maßnahmen zur Herbeiführung der Ausscheidungshärtung anhand des Zustands- und des Zeit-Temperatur-Diagramms!
- In einem mikrolegierten Baustahl existieren NbC-Teilchen im Abstand von $d_T = 100 \text{ nm}$. Wie groß ist die Erhöhung der kritischen Schubspannung $\Delta\tau$?
- Was versteht man unter der Überalterung einer ausscheidungshärtbaren Legierung?
- Wieviele Nb muß zu einer 100 kg Stahlschmelze mindestens hinzugefügt werden, um eine Erhöhung der kritischen Schubspannung von 500 MPa durch NbC-Teilchen zu erzielen?

Geg.:

$$\begin{aligned} G_{\alpha\text{-Fe}} &= 84.000 \text{ MPa} \\ b_{\alpha\text{-Fe}} &= 0,2482 \text{ nm} \\ c &= 0,5 \\ \rho_{\alpha\text{-Fe}} &= 7,88 \text{ Mg/m}^3 \\ \rho_{\text{NbC}} &= 7,78 \text{ Mg/m}^3 \end{aligned}$$

$$\frac{d_T}{D_T} = c \cdot f_{\text{NbC}}^{\frac{1}{2}}$$

$$d_T = 5 \text{ nm.}$$

- Erläutern Sie die Ursache und mikromechanischen Konsequenzen von teilchenfreien Zonen an Korngrenzen in ausscheidungsgehärteten Legierungen!

8.4 Umwandlungshärtung

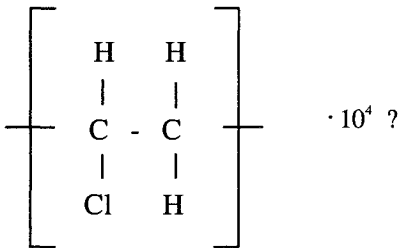
- Nennen Sie vier Metalle mit Phasenumwandlungen im festen Zustand!
- Beschreiben Sie anhand des Zustands- und des Zeit-Temperatur-Diagramms die Maßnahmen zur Härtung eines übereutektoiden Werkzeugstahls!

3. Erläutern Sie die Begriffe:
 - a) Normalisieren,
 - b) Vergüten,
 - c) Anlassen,
 - d) Anlaßversprödung,
 - e) Anlaßbeständigkeit,
 - f) Durchhärbarkeit!
4. Was sind die Ursachen für die Warmfestigkeit folgender Werkstoffe und wodurch ist die obere Verwendungstemperatur beschränkt?
 - a) ferritische Stähle,
 - b) austenitische Stähle,
 - c) Nickelbasislegierungen!
5. Wie unterscheidet sich eine eutektoide Umwandlung von einer diskontinuierlichen Ausscheidung? Kennzeichnen Sie schematisch die Mechanismen der Reaktionen!

9 Polymerwerkstoffe

9.1 Molekülketten

1. Aus welchen Rohstoffen können die Molekülketten der Kunststoffe hergestellt werden?
2. Wie groß ist das (mittlere) Molekulargewicht von



3. Was bedeuten die Werkstoffbezeichnungen
 - a) PP,
 - b) PTFE,
 - c) PA
4. Definieren Sie die Begriffe
 - a) Konfiguration,
 - b) Konformation,
 - c) Symmetrie,
 - d) Taktizität einer Molekülkette!
5. Was versteht man unter dem Polymerisationsgrad?

6. Was ist ein Kopolymer?
7. Erläutern Sie die Kristallisation von Polymeren!

9.2 Kunststoffgruppen

1. In welche drei großen Gruppen lassen sich die (unverstärkten) hochpolymeren Werkstoffe einteilen?
2. Wie unterscheiden sich diese Werkstoffgruppen in ihrer Molekülstruktur voneinander?
3. Ordnen Sie diese drei Werkstoffgruppen in der Reihenfolge zunehmender
 - a) Elastizitätsmoduli,
 - b) Zugfestigkeit,
 - c) plastischer Verformbarkeit bei Raumtemperatur,
 - d) plastischer Verformbarkeit bei erhöhter Temperatur!
4. Wie unterscheidet sich (qualitativ) die Temperaturabhängigkeit des E-Moduls eines Polymerwerkstoffs mit hohem Kristallanteil von einem Polymerglas?

9.3 Mechanische Eigenschaften I

1. Zeichnen Sie eine typische Kraft-Verlängerungs-, und wahre Spannungs-Dehnungs-Kurve eines unvernetzten, streckfähigen Polymers (z.B. PE bei 20 °C).
2. Beschreiben Sie die molekularen Umordnungsvorgänge in den einzelnen Stadien des Zugversuches!
3. Wie ändert sich die Zähigkeit (Bruchzähigkeit, Kerbschlagarbeit) eines solchen Werkstoffes bei tieferen Temperaturen?
4. Wie kann die Schlagfestigkeit von Polymergläsern (z.B. PS) erhöht werden?

9.4 Mechanische Eigenschaften II

1. Beschreiben Sie Herstellung und Mikrostruktur von Schaumstoffen!
2. Wie läßt sich der Elastizitätsmodul näherungsweise berechnen (siehe Verbundwerkstoffe)?

3. Welche Polymere haben einen
 - a) besonders niedrigen und
 - b) besonders hohentrockenen Reibungskoeffizienten (Beispiele und Begründung)?
4. Welcher Zusammenhang besteht zwischen dem Reibungskoeffizienten und dem Verschleiß (trockener Gleitverschleiß, Abrasion) der Kunststoffe?
5. Nennen Sie Anwendungen von hochpolymeren Werkstoffen, bei denen es primär auf folgende Eigenschaften ankommt:
 - a) geringer E-Modul,
 - b) hoher E-Modul,
 - c) hoher Reibungskoeffizient,
 - d) hoher Verschleißwiderstand,
 - e) chemische Beständigkeit,
 - f) hohe Dämpfungsfähigkeit!
6. Beschreiben Sie die Begriffe Adhäsion und Kohäsion im Zusammenhang mit einer Klebung! Welche Stoffe können am geeignetesten Adhäsion verhindern?

10.1 Herstellung von Phasengemischen

1. Definieren Sie den Begriff Verbundwerkstoff!
2. Nennen Sie vier Möglichkeiten zur Herstellung von Fasergefügen!
3. Welche Phasengemische sind
 - a) im stabilen,
 - b) im metastabilen und
 - c) nicht im thermodynamischen Gleichgewicht?Bitte nennen Sie je ein Beispiel!
4. Wie werden glasfaserverstärkte Duomere hergestellt?

10.2 Faserverstärkte Werkstoffe

1. Kupfer soll durch Kohlefasern auf eine uniaxiale Zugfestigkeit von 1.000 MPa verstärkt werden.
 - a) Welcher Volumenanteil ist nötig?
 - b) Welchen E-Modul hat der Werkstoff in Zugrichtung?
 - c) Was ist über die mechanischen Eigenschaften quer zur Faserrichtung zu sagen?

Geg.:

R_{mCu}	=	300	MPa
R_{mC}	=	2.000	MPa
E_{Cu}	=	127.000	MPa
E_C	=	350.000	MPa.

- 2.a) Durch welche Faserarten und in welchem Umfang kann Stahl verstärkt werden?
- b) Welche interessanten Eigenschaften könnten sich hieraus ableiten?

3. Geben Sie die Gleichung zur Berechnung der kritischen Faserlänge l_c eines Verbundwerkstoffes an!
4. Welche Faserlänge l_c ist zur Verstärkung eines Thermoplasten (α) mit Glasfasern (β) notwendig? Folgende Größen sind gegeben, ($r_{\beta 1,2}$ = Faserradius):
 - a) $r_{\beta 1} = 10 \mu\text{m}$, $\tau_{\alpha\beta} = 250 \text{ MPa}$, $R_{m\beta} = 2.000 \text{ MPa}$;
 - b) $r_{\beta 2} = 1 \mu\text{m}$, sonst wie a)
5. Die Festigkeit von Fasern metallischer Werkstoffe auf der Grundlage von Al, Be, Cu, Fe, Ti, und W wird bis zu 50 % der theoretischen Grenze gesteigert.
 - a) Welcher Werkstoff erreicht die höchste Festigkeit?
 - b) Wie ändert sich die Reihenfolge, wenn das Verhältnis von Festigkeit zu Gewicht maximiert werden soll?
 - c) Nennen Sie Anwendungen, bei denen diese Eigenschaftskombinationen gefordert werden!
 - d) Vergleichen Sie diese Werkstoffe mit keramischen und hochpolymeren Phasen!
6. Leiten Sie den Begriff der Reißlänge ab und beurteilen Sie die Qualität der wichtigsten hochfesten Werkstoffe nach ihrer Reißlänge!

$$\frac{\sigma_{\beta}}{\rho} = \left[\frac{N \cdot \text{cm}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{g}} \right]$$

7. Wie kann ein Faserverbund unter einachsigen Zug versagen? Was ist die kritische Faserlänge?
8. Sie haben die Aufgabe, einen Faserverbundwerkstoff herzustellen, der einen E-Modul von $E_v = 170.000 \text{ MPa}$ und ein Modulverhältnis zwischen Faser- und Matrixwerkstoff von $E_f / E_m = 7$ aufweisen soll. Der zur Verfügung stehende Matrixwerkstoff hat einen E-Modul von $E_m = 50.000 \text{ MPa}$. Berechnen Sie den notwendigen Matrixvolumenanteil v_m unter der Voraussetzung linear-elastischen Werkstoffverhaltens und eines ideal dichten Verbundes.

10.3 Stahl- und Spannbeton

1. Welche Funktion hat die Stahlbewehrung
 - a) im Beton und
 - b) im Spannbeton?
2. Ein Spannbeton enthält $f_{\beta} = 0,05$ Stahlfasern, die mit $0,5 R_p$ gespannt wurden.
 - a) Wie groß ist die Druckeigenspannung im Beton? (geg.: $R_{pSt} = 1.200 \text{ MPa}$)
 - b) Welches sind die Ursachen der hohen Festigkeit von Spannstählen?

10.4 Schneidwerkstoffe

1. Kennzeichnen Sie kurz die chemische Zusammensetzung und den Aufbau von
 - a) unlegiertem Werkzeugstahl,
 - b) Schnellarbeitsstahl,
 - c) Hartmetall,
 - d) Schneidkeramik,
 - e) Cermet!
2. Wie werden Hartmetalle hergestellt?
3. Wodurch ist der Volumenanteil der Karbidphase bestimmt?
4. Vergleichen Sie Vor- und Nachteile von Hartmetall und Schneidkeramik!

10.5 Oberflächenbehandlung

1. Nennen Sie die drei grundsätzlichen Möglichkeiten zur Behandlung metallischer Oberflächen!
2. Nennen Sie Beispiele für chemische Oberflächenbehandlungen unter oxidierenden und reduzierenden Bedingungen!
3. Welche Möglichkeit gibt es für den Korrosionsschutz von Stahl (Bewerten Sie auch Ihre Antwort)?
4. Nennen Sie je ein Beispiel für Oberflächenschichten von: K auf M, M auf M, P auf M (K = Keramik, M = Metalle, P = Polymere)!

10.6 Holz

1. Beschreiben Sie die Mikrostruktur von Holz!
2. Bestimmen Sie mit Hilfe eines geeigneten Koordinatensystems die Symmetrie der Gefügeanisotropie!
3. Wieviele Werte der Zug- bzw. Druckfestigkeit sind zur vollständigen Kennzeichnung notwendig?
4. Analysieren Sie die Zugfestigkeit von Holz in Faserrichtung mit Hilfe der partiellen Eigenschaften der Komponenten des Verbundwerkstoffs!

5. Welchen Einfluß hat der Wassergehalt auf die Eigenschaften von Holz?
6. Wodurch kann die Eigenschaft unabhängig vom Wassergehalt werden?
7. Bild F 10.1 zeigt eine lichtmikroskopische Aufnahme eines Holzes im Querschliff. Erläutern Sie das Gefüge und bestimmen Sie die mittlere Zellgröße ($V = 320\times$)!

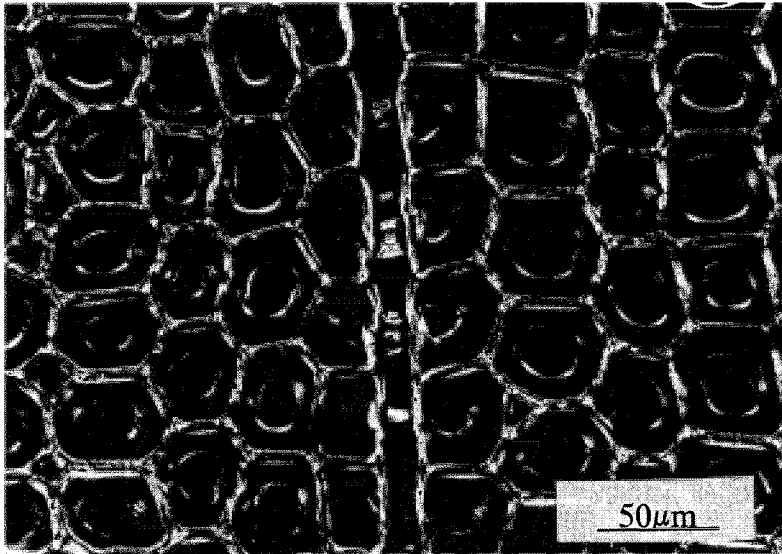


Bild F 10.1

11 Werkstoff und Fertigung

11.1 Halbzeug und Bauteile

1. Definieren Sie die Begriffe: Rohwerkstoff, Halbzeug, Formteil!
2. Welche Rolle spielt die Normung für Halbzeuge?
3. Wie werden die Fertigungsverfahren eingeteilt?

11.2 Urformen

1. Wodurch sind Urformverfahren grundsätzlich gekennzeichnet? Nennen Sie ein Beispiel!
2. Welche Eigenschaften des flüssigen Zustands spielen beim Urformverfahren „Gießen“ eine Rolle?
3. Was versteht man unter unberuhigtem und beruhigtem Stahl?
4. Nennen Sie Beispiele für die Behandlung der Schmelze vor dem Erstarren zur Erzielung günstiger Eigenschaften des Gußwerkstoffs!
5. Erläutern Sie die Grundvorgänge beim Sintern!
6. Beim Abkühlen von bestimmten Legierungen aus dem schmelzflüssigen Zustand ist die Gefahr von sogenannten Heissrissen sehr groß. Beschreiben Sie den Mechanismus der Rissbildung und grenzen Sie in geeigneter Weise die kritischen Legierungskonzentrationen ein.

11.3 Umformen

1. Kennzeichnen Sie kurz die Grundbeanspruchungen einachsiger Zug, einachsige Druckscherung und hydrostatischer Druck!
2. Beschreiben Sie die Beanspruchungen beim Biegen eines Stabes unter den Bedingungen von elastischer Verformung, teilweise plastischer Verformung und Bruch!
3. Beschreiben Sie die Beanspruchungstypen beim Strangpressen und beim Tiefziehen!
4. Beschreiben Sie den Materialfluß beim Vorwärts- und Rückwärtspressen im Strangpresswerkzeug, erläutern Sie die Vor- und Nachteile!
5. Welche Kräfte wirken auf den Werkstoff beim Walzen eines Bleches? Definieren Sie die Bedingungen für das Einziehen des Bleches in den Walzspalt!
- 6.a) Wie unterscheiden sich der Kalt- und Warmwalzprozeß voneinander ?
b) Wie unterscheiden sich die Gefüge des Werkstoffs (z.B. einer Aluminium-Legierung) nach Kalt- und Warmwalzen ?
7. Welche Materialeigenschaften liefern die Voraussetzung für die Herstellung von Hohlkörpern durch Blasen? In welchen Werkstoffgruppen wird dieses Verfahren angewandt?

11.4 Trennen, Spanen und Schleifen

1. Nennen Sie einige technische Trennvorgänge!
2. In welchen Bereichen der Technik sind Trennvorgänge erwünscht oder unerwünscht?
3. Definieren Sie den Begriff der Spanbarkeit!
4. Welche Werkstoffeigenschaften bestimmen hohe oder geringe, gute oder schlechte Zerspanbarkeit?
5. Nennen Sie Werkstoffe mit besonders guter Zerspanbarkeit!
6. Definieren Sie das Werkstoffsystem bei der spanenden Bearbeitung!

11.5 Fügen

1. Beschreiben Sie die drei Grundverfahren der Fügetechnik (Schweißen, Löten, Kleben) und grenzen Sie die Verfahren voneinander ab!
2. Beschreiben Sie grundsätzlich den Gefügebau einer Schweißnaht! Welche strukturellen Aspekte begünstigen die Schweißbarkeit?
3. Wie beeinflussen die physikalischen und chemischen Werkstoffeigenschaften die Schweißbarkeit? Nennen Sie zwei Beispiele!
4. Welche nichtmetallischen Werkstoffe können geschweißt werden?
5. Definieren Sie die Prozesse des Hartlötens und Weichlötens und erläutern Sie die Werkstoffeigenschaft Lötbarkeit.
- 6.a) Welche Vorgänge führen zum Festwerden eines Klebstoffs in der Klebverbindung?
 - b) Wie ist eine Klebverbindung zu gestalten?
 - c) Gibt es auch nichtorganische Klebstoffe ?

11.6 Nachbehandlung

1. Welche Ziele verfolgt eine Nachbehandlung des Werkstoffes am Ende des Fertigungsprozesses?
2. Nennen Sie Beispiele für die Nachbehandlung eines Gußwerkstoffes!

11.7 Werkstoffaspekte bei Fertigung und Gebrauch von Kraftfahrzeugen

1. Aus welchen Gründen benötigt ein Verbrennungsmotor zum Betrieb Öl?
2. Aus welchem Werkstoff werden i. d. R. Kolben gefertigt?
3. Welche Anforderungen werden an Kolben gestellt?
4. Wie hoch sind die höchsten und die niedrigsten an Kolben auftretenden Temperaturen? Was bedeuten sie für eine ausscheidungshärtbare Al-Legierung?

5. Warum werden Kolben mit einem zusätzlichen Schutz an ihren Laufflächen versehen? Aus welchen Werkstoffen besteht ein solcher Kolbenlaufflächen-schutz?
6. Aus welchen Werkstoffen werden im allgemeinen Kolbenringe hergestellt?
7. Warum werden in KFZ-Motoren sehr oft Graugußzylinder verwendet?
- 8.a) In welchen Motoren und warum werden Leichtmetallzylinder eingebaut?
b) Mit welchen Laufsichten können sie ausgerüstet werden?
9. Welche Anforderungen werden an Ventilwerkstoffe gestellt?
10. Welchen Wärmebelastungen sind Ventile ausgesetzt?
11. Welche Ventile werden gepanzert und warum?
12. Beschreiben Sie, was Sie unter
 - a) Einmetallventilen,
 - b) Bimetallventilen und
 - c) Hohlventilenverstehen.
13. Woraus werden Ventilsitzringe gefertigt?
14. Welchen Beanspruchungen sind Abgasanlagen von KFZ ausgesetzt?

11.8 Lasermaterialbearbeitung

1. Welche Fertigungsverfahren können mit dem Laserstrahl durchgeführt werden?
2. Welche Lasertypen werden bevorzugt in der Materialbearbeitung verwendet? Nennen Sie Ihre spezifischen Eigenschaften!
3. Wie unterscheidet sich eine Laserschweißnaht von einer herkömmlichen Schmelzschweißung?
4. Wie sieht das Gefüge eines Stahls aus, wenn die Oberfläche mit dem Laser kurzzeitig bis dicht an die Schmelztemperatur erhitzt wurde?
5. Welche Gefügetypen können bei verschiedenen Werkstoffen grundsätzlich auftreten, deren Oberfläche kurzzeitig aufgeschmolzen wurde?

12 Der Kreislauf der Werkstoffe

12.1 Rohstoff und Energie

1. Nennen Sie je ein Beispiel für
 - a) nachwachsende Rohstoffe,
 - b) nicht nachwachsende Rohstoffe,
 - c) natürliche Werkstoffe,
 - d) künstliche Werkstoffe!
2. Welches sind die
 - a) nicht rückgewinnbaren,
 - b) rückgewinnbaren Energieanteile, die im Verlauf des Kreislaufs eines Werkstoffs aufgebracht werden müssen?
3. Nennen Sie drei Beispiele für die Einsparung von Energie durch Verbesserung der Gebrauchseigenschaften von Werkstoffen!
- 4.a) Welche Stoffe sind zugleich Energie- und Werkstoff-Rohstoffe?
 - b) Welche chemische Eigenschaft bestimmt im Wesentlichen den Energiebedarf bei der Herstellung eines Metalls?
 - c) Wofür wird Energie bei der Herstellung von Portlandzement benötigt?

12.2 Auswahl und Dimensionierung

1. Definieren Sie die Begriffe
 - a) Beanspruchungsprofil und
 - b) Eigenschaftsprofilam Beispiel von Werkstoffen für Gasturbinenschaufeln!
2. Welche Kombination von Eigenschaften bestimmen die Auswahl von Werkstoffen für:
 - a) Flugzeugbeplankungen
 - b) Dauermagnete und
 - c) Küchenmesser?

12.3 Gebrauch und Versagen

- 1.a) Wie ist die Formzahl α_k definiert und welche Bedeutung hat sie für die Dimensionierung von Bauteilen?
- b) Wie unterscheidet sich davon die Kerbwirkungszahl β_k und welche Werte kann sie annehmen? Erläutern Sie den Zusammenhang anhand der Wöhlerkurve!
2. Erläutern Sie
 - a) den Begriff der Betriebsfestigkeit und
 - b) in diesem Zusammenhang die Hypothese der linearen Schadensakkumulation! (vgl. Aufg. 4.7.6)
3. Gegeben sind folgende bruchmechanische Kennwerte:
 - K_{IC} : Bruchzähigkeit
 - K_{ISRK} : Kritischer K-Wert bei Spannungsrißkorrosion
 - σ : Zugbeanspruchung
 - a : Länge des Anrisses
 - B : Wandstärke des Bauteils

Definieren Sie mit Hilfe eines σ - a -Diagramms die Bemessungsprinzipien folgender beider Sicherheitskriterien:

- a) Leck (d.h.: unterkritisches Rißwachstum) vor Gewaltbruch (leak before burst design),
 - b) Kritische Rißausbreitung (critical burst design)
4. Gegeben sind die Ergebnisse von 50 Zugversuchen eines S 235 St 37), (siehe Tabelle F 12.1).
 - a) Erreicht die mittlere Zugfestigkeit den vorgegebenen Wert von $R_m = 370$ MPa?
 - b) Wie hoch darf der Stahl belastet werden, wenn mehr als 97 % der Proben der Beanspruchung gewachsen sein sollen?

12.4 Rückgewinnung und Abfallbeseitigung

1. Welche Werkstoffe sind wegen des häufigen Vorkommens der für ihren Aufbau benötigten Atomart begünstigt?
- 2.a) Welche Werkstoffe sind zum Wiedereinschmelzen geeignet?
- b) Welche Werkstoffe sind zur Verbrennung geeignet?
- c) Beschreiben Sie die Struktur von PVC und die daraus folgenden Probleme bei der Rückgewinnung!
- d) Nennen Sie die Voraussetzungen für den biologischen Abbau von Werkstoffen! Geben Sie Beispiele für biologisch abbaubare und nicht abbaubare Polymere!

Tabelle F 12.1: Auswertung von 50 Zugversuchen

Zugfestigkeit von S 235					
Klassen-Nr.	R_m [MPa]	Anzahl n_i	Summe Σn_i	Summenhäufigkeit $\Sigma n_i / n \cdot 100[\%]$	relative Häufigkeit $n_i / n \cdot 100[\%]$
1	< 355	0	0	0	0
2	355-365	1	1	2	2
3	365-375	4	5	10	8
4	375-385	4	9	18	8
5	385-395	14	23	46	28
6	395-405	11	34	68	22
7	405-415	9	43	86	18
8	415-425	5	48	96	10
9	425-435	2	50	100	4
10	> 435	0	50	100	0

- e) Beschreiben Sie das Schredderverfahren zur Aufbereitung von Automobilschrott!
- Grenzen Sie die recyclingtechnischen Begriffe „Weiterverwendung“ und „Wiederverwertung“ gegeneinander ab.
 - Was ist unter stofflichem und energetischem Recycling zu verstehen?
 - Was ist ein Recyclinggift?
 - Gibt es Regeln für die Vorhersage der Toxizität (Giftigkeit) eines Werkstoffs?
 - Gibt es Regeln für die Vorhersage der biologischen Abbaubarkeit eines Polymerwerkstoffs?
 - Welche Stoffe tragen ganz wesentlich zur „Abbaubarkeit“ von biologisch abbaubaren Polymeren bei?

12.5 Recyclingfragen am Beispiel Kraftfahrzeug (KFZ)

1. Womit wird bei der Herstellung bzw. dem Betrieb eines KFZ der größte Teil an nicht erneuerbaren Rohstoffen verbraucht? Welcher ungefähre Anteil des jährlich verarbeiteten Rohöls wird für Brennstoffe, welcher für Werkstoffe (Polymere) verwendet?
- 2.a) Was versteht man unter originärer Wiederverwertung?
b) Welche Teile eines KFZ sind sowohl technisch als auch wirtschaftlich für das Recycling besonders geeignet?
3. Beschreiben Sie kurz die drei Stufen der Werkstoffverwertung!
4. In welchen Schritten erfolgt das Aufarbeiten von KFZ?
5. Welche Probleme treten bei der Wiederverwertung von Glas aus KFZ auf?
6. Aus welchen Gründen werden zum einen zunehmende Mengen und zum anderen so viele verschiedene Polymere in KFZ eingesetzt?
7. Erläutern Sie die Vorteile des geblasenen Kunststofftanks im KFZ gegenüber einer Ausführung aus tiefgezoogenem Stahl!
8. Nennen Sie einige Beispiele für recycelbare KFZ-Bauteile und ordnen Sie diese den verschiedenen Werkstoffgruppen zu.
9. Welche Anforderungen sollten bereits bei der Planung eines neuen KFZ im Hinblick auf seine spätere Recycelbarkeit beachtet werden? (Recyclinggerechte Konstruktion)

Antworten

0 Überblick

0.1 Die Werkstoffgruppen

1. Es ist sinnvoll, die Werkstoffe zunächst in drei große Gruppen mit jeweils charakteristischen Eigenschaften einzuteilen: Metallische, keramische und polymere oder (Kunst-) Stoffe. Als vierte Gruppe kommen die Verbundwerkstoffe hinzu, die durch Kombination von jeweils mindestens zwei Werkstoffen mit unterschiedlichen Eigenschaften entstehen. Man erhält dadurch Werkstoffe mit neuen Eigenschaften, welche diejenigen der einzelnen Bestandteile übertreffen.

Metalle sind gute elektrische Leiter, reflektieren Licht, sind auch bei tiefen Temperaturen plastisch verformbar und chemisch meist nicht sehr beständig. Keramische Stoffe sind schlechte elektrische Leiter, oft durchsichtig, nicht plastisch verformbar und chemisch sehr beständig. Sie schmelzen bei hohen Temperaturen.

Polymere (oder Kunststoffe) sind schlechte elektrische Leiter, bei tiefen Temperaturen spröde, aber bei erhöhter Temperatur plastisch verformbar, chemisch bei Raumtemperatur an Luft beständig, haben eine geringe Dichte und schmelzen oder zersetzen sich bei verhältnismäßig niedriger Temperatur.

2. Die Metalle, Keramiken und Polymere unterscheiden sich grundsätzlich durch ihren atomaren Aufbau:

Die Atome der Metalle streben eine möglichst dichte Packung von Kugeln an. Dem entspricht eine Anordnung von Schichten der Atome, die so gestapelt sind, daß die nächste Schicht sich jeweils auf den Lücken der darunter liegenden befindet. Diese Anordnung setzt sich periodisch im Raum fort. Ein solches Raumgitter von Atomen bildet einen Kristall. Fast alle Metalle sind kristallin.

Die Grundbausteine der keramischen Stoffe sind anorganische Verbindungen, am häufigsten Metallatom-Sauerstoff-Verbindungen. Durch periodische Anordnung dieser Bausteine im Raum entsteht ein Kristall. Die Grundbausteine können sich aber auch zu einem regellosen Netzwerk anordnen, es entsteht dann ein Glas.

Die Polymere schließlich sind aus großen Molekülketten aufgebaut, die aus Kohlenstoff und Elementen wie Wasserstoff, Chlor, Fluor, Sauerstoff und Stickstoff bestehen. Solche Moleküle entstehen aus meist gasförmigen Monomeren. Kettenförmige Moleküle können 10^3 bis 10^5 Monomere enthalten.

Das entspricht Fäden, die etwa 10^3 cm lang sind. Bei Raumtemperatur lagern sich diese Ketten entweder ungeordnet verknäult (als Glas) oder gefaltet (als Kristall) zusammen. Die meisten Kunststoffe bestehen aus einem Gemisch von Glas- und Kristallstruktur.

3.a) Keramiken werden unterschieden in:

- Oxidkeramik
 - Kristalline Oxidkeramik
 - Amorphe Oxidkeramik
 - Hydratisierte Silikate
- Nichtoxidische Verbindungen
 - Nitride
 - Karbide
 - Boride

b) Metalle werden unterschieden in:

- Eisen und seine Legierungen
 - Stahl
 - Gußeisen
- Nichteisenmetalle
 - Leichtmetalle
 - Buntmetalle
 - Schwermetalle
 - Edelmetalle

c) Polymere (Kunststoffe) werden unterschieden in:

- Plastomere (= Thermoplaste)
- Elastomere (= Gummi)
- Duromere (= Kunstharze)

0.2 Bezeichnung der Werkstoffe

1. Die Bezeichnung der Werkstoffe erfolgt nach einer Vielzahl von Prinzipien. Im folgenden sollen deshalb nur die wichtigsten Bezeichnungsverfahren aufgelistet werden:

- Nach DIN EN 10027 werden die Werkstoffe mit einer aus 7 Ziffern bestehenden Zahl bezeichnet. Dieses System eignet sich besonders für die elektronische Datenverarbeitung und erfaßt alle Werkstoffgruppen.
- Nach der DIN EN 10027, die nur für Stähle und Gußeisen gilt, wird ein Werkstoff anhand seines Einsatzfeldes, seiner Legierungselemente und seiner Eigenschaften bezeichnet. In den meisten Fällen werden einzelne Teile der Bezeichnung, wenn sie nicht zutreffend oder wesentlich sind, weggelassen. Für die Kennzeichnung von Nichteisenmetallen wird das chemische Symbol des Grundelements verwendet, dem die Symbole der Legierungselemente und Konzentrationsangaben in Gew.-% folgen. (z.B.: AlSi7Mg: Al-

Legierung mit 7 Gew.-% Silizium und geringen Beimengungen von Magnesium). Bei Rein- oder Reinstmetallen folgt die Konzentration des Grundelementes (z.B.: Al 99,99: Al-Gehalt mindestens 99,99 Gew.-%). Dazu können Herstellung oder Verwendungszweck durch einen vorangestellten Buchstaben gekennzeichnet werden. Buchstaben für besondere Eigenschaften werden angehängt.

Polymere Werkstoffe werden mit einer Abkürzung ihrer chemischen Bezeichnung benannt (z.B.: PTFE: Poly-tetra-fluor-ethylen).

Beton wird anhand seiner Druckfestigkeit bezeichnet, die er 28 Tage nach dem Abguss erreicht. (z.B.: Bn 120)

2. Die Bezeichnung der Werkstoffe auf Eisenbasis sollte nach DIN EN 10027 in folgender Reihenfolge geschehen (in den meisten Fällen werden einzelne Teile der Bezeichnung, wenn nicht zutreffend oder nicht wesentlich, weglassen):

- a) Hauptsymbol: Kennbuchstabe für Stahlguß (G),
- b) Hauptsymbol: Kennzeichnung hochlegierter Werkstoff (X),
- c) Hauptsymbol: Kennbuchstabe für die Stahlgruppe (S, E, ...),
- d) Hauptsymbol: Kennzeichnung von mechanischen Eigenschaften (Zahlen); C-Gehalt (Zahlen) und weiteren Legierungselementen (Buchstaben, Zahlen),
- e) Zusatzsymbole: Kennzeichnung der Kerbschlagarbeit, Wärmebehandlung und Verwendung (Buchstaben, Zahlen),

3. Die Multiplikatoren werden verwendet, um ganze Zahlen in der Werkstoffbezeichnung zu erhalten. Folgende Multiplikatoren werden verwendet:

4	für	Co, Cr, Mn, Ni, Si, W
10	für	Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr
100	für	C, Ce, N, P, S
1000	für	B

- 4.a) unlegierter Vergütungsstahl mit 0,45 Gew.-% Kohlenstoff,
 - b) Stahl für Stahlbau mit Mindeststreckgrenze von 235 MPa,
 - c) hochlegierter Stal mit 1,2 Gew.-% Kohlenstoff und 12 Gew.-% Mangan
 - d) NE-Metall, Gleitlagerwerkstoff mit 80 Gew.-% Zinn und 20 Gew.-% Blei,
 - e) Stahl der 0,75 Gew.-% Kohlenstoff, 1,5 Gew.-% Chrom, 0,7 Gew.-% Molybdän und geringe Zusätze an Nickel und Wolfram enthält.
- 5.a) X 5 NiCrMo 18 8 5
 - b) CuSn 6 F 64
 - c) G-AlSi 12 Mg wa
 - d) S 460
 - e) 30 CrMoV 9
6. GGG 1000 Graues Gußeisen mit globulitischem Graphit und 1000 MPa Mindestzugfestigkeit

- 7.a) Kupfer-Zink-Legierung (Messing) mit 40 Gew.-% Zink-Gehalt.
- b) Messing mit 37 Gew.-% Zink und 2 Gew.-% Blei, Mindestzugfestigkeit 430 MPa.

0.3 Eigenschaften der Werkstoffe

1. Ein Werkstoff besitzt verschiedene Gebrauchseigenschaften. Stellt man diese in Form eines Histogramms zusammen, so erhält man das charakteristische Eigenschaftsprofil eines Werkstoffes.
2. Neben guten Gebrauchseigenschaften sollte ein Werkstoff auch gute Fertigungseigenschaften besitzen, d.h. er sollte in die manchmal komplizierte Form zu bringen sein. Darüber hinaus ist es oft notwendig, einzelne Teile durch geeignete Fügeverfahren miteinander verbinden zu können. Die dritte Forderung heißt Wirtschaftlichkeit. Ein Stoff kann gute technische Eigenschaften haben und kommt trotzdem als Werkstoff nicht in Frage, wenn er zu teuer ist.
3. Beispiele für Fertigungs- und Gebrauchseigenschaften:

<i>Fertigungseigenschaften</i>	<i>Gebrauchseigenschaften</i>
Gießbarkeit	Zugfestigkeit
Spanbarkeit	Härte
Schweißbarkeit	Wärmeleitfähigkeit

4. Bei Strukturwerkstoffen kommt es vor allem auf die mechanischen Eigenschaften an. Sie werden für "tragende" Strukturen wie Brücken, Flugzeugtragflächen oder Pleuelstangen verwendet. Strukturwerkstoffe sollen eine hohe Festigkeit und hohe chemische Beständigkeit aufweisen. Bei den Funktionswerkstoffen stehen physikalische oder chemische Eigenschaften im Vordergrund, z.B. die Leitung von Elektrizität, Wärme oder Speicherung von Information.
5. Die Naturgesetze, die durch lineare Gleichungen gegeben sind, lassen sich alle in folgender Form darstellen:

Ursache · Koeffizient = Wirkung

Effekt	Ursache	Koeffizient	Wirkung
elektrische Leitung	elektrische Spannung	elektrische Leitfähigkeit	elektrischer Strom
Wärmeleitung	Temperaturdifferenz	Wärmeleitfähigkeit	Wärmestrom
Elastizität	mechanische Spannung	elastische Nachgiebigkeit	reversible Verformung
Fließen	Schubspannung	Viskositätsbeiwert	Fließgeschwindigkeit

Beim Koeffizienten handelt es sich immer um die maßgebliche Werkstoffeigenschaft. Natürlich sind die Zusammenhänge in vielen anderen Fällen nicht linear. Diese Werkstoffeigenschaften hängen dann stets in ganz spezifischer Weise mit dem Aufbau (Gefüge, Bindung) zusammen.

6. - Die Oberflächenstruktur der Haut von Haien sorgt für einen überaus niedrigen Strömungswiderstand. Bei hoher Vergrößerung in einem Rasterelektronenmikroskop zeigen sich winzige, in Strömungsrichtung orientierte und stromlinienförmig aufgebaute Erhebungen auf der Haut. Eine solche Oberflächenstrukturierung wird beispielsweise in Flugzeugen bei der Gestaltung von Kabinenaußenflächen oder auch der Tragflächen ausgenutzt. Die dadurch erzielbaren Treibstoffeinsparungen werden mit bis zu 10 % beziffert.
- Die Blattoberfläche der Lotuspflanze ist „mikrorauh“ strukturiert. Bei näherer Betrachtung mit dem Rasterelektronenmikroskop zeigen sich eine Vielzahl von mikrofeinen Spitzen, die aus dem Blatt herausragen. Auf diesen Spitzen kann kein Fremdkörper wie z.B. Staub oder sonstige Schmutzteilchen festhaften. Dieser Effekt wird zunehmend in der Gebäudetechnik in Form von Fassadenfarbe, Dachziegeln oder, noch in der Entwicklung, Glasscheiben ausgenutzt. Neuere Entwicklungen gibt es im Bereich von Porzellanprodukten wie z.B. Essservices oder auch Waschbecken.

1 Aufbau einphasiger fester Stoffe

1.1 Atome

1. Die Masse eines Atoms setzt sich zusammen aus der Ruhemasse der Protonen, Neutronen und Elektronen. Für das ^{12}C -Isotop gilt:

$$\begin{array}{lll} 6 \text{ Protonen} & \hat{=} 1,6726485 \cdot 10^{-27} \text{ kg} & = 1,0035891 \cdot 10^{-26} \text{ kg} \\ 6 \text{ Neutronen} & \hat{=} 1,6749543 \cdot 10^{-27} \text{ kg} & = 1,0049726 \cdot 10^{-26} \text{ kg} \end{array}$$

Zusammen ergibt dies:

$$\begin{array}{ll} \text{die Masse des Kerns} & = 2,0085617 \cdot 10^{-26} \text{ kg} \\ + 6 \text{ Elektronen} \hat{=} 9,109534 \cdot 10^{-31} \text{ kg} & = 5,4657200 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \end{array}$$

$$\text{die rechnerische Masse des } ^{12}\text{C}\text{-Isotops} = 2,0091083 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$$

$$\begin{array}{ll} \text{die massenspektroskopisch} & \\ \text{ermittelte Masse} & = 1,9922000 \cdot 10^{-26} \text{ kg} \end{array}$$

$$\text{Es ergibt sich eine Differenzmasse } \Delta m = 1,6908 \cdot 10^{-28} \text{ kg}$$

aus der Äquivalenz von Energie und Masse

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2,$$

wobei c die Lichtgeschwindigkeit ist ($c = 2,998 \cdot 10^9 \text{ ms}^{-1}$), folgt, daß Δm einer Energie $\Delta E = 1,519638 \cdot 10^{-11} \text{ J}$ entspricht. Diese Energie wird als γ -Strahlung frei, wenn sich der Kern bildet und führt so zu einem Massenverlust (Massendefekt).

Bild A1.1 zeigt, daß die Bindungsenergie pro Nukleon (Kernbaustein), über der relativen Atommasse A_r aufgetragen, bei $A_r \sim 60$ ein Maximum durchläuft. Elemente wie Eisen und Nickel besitzen daher die stabilsten Atomkerne, da weder durch Kernspaltung noch durch Kernfusion die Bindungsenergie gesteigert werden kann.

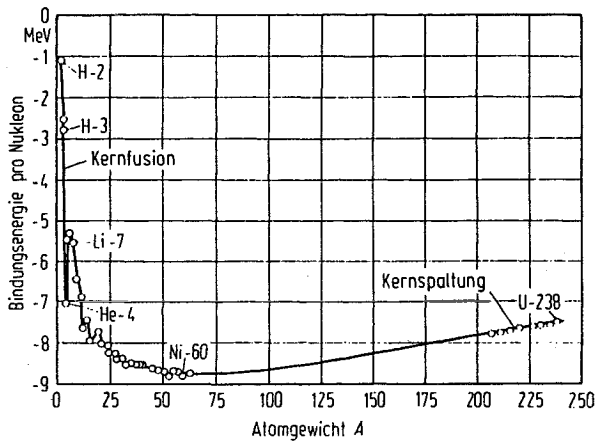


Bild A 1.1

- 2.a) Die Dichte, da fast die gesamte Masse des Atoms im Kern gespeichert ist, (s. auch A1.1.1).
- b) Die chemische Reaktionsfähigkeit, die mechanische Festigkeit, die elektrische Leitfähigkeit, das Auftreten von Ferromagnetismus und die optischen Eigenschaften.
3. Die Elementarzelle eines kubisch-flächenzentrierten Gitters (kfz) enthält vier Atome, die eines kubisch-raumzentrierten Gitters (krz) zwei Atome. Die Masse eines Atoms beträgt:

$$m_A = \frac{A}{N_A}$$

mit: A = Atomgewicht

und N_A = Avogadro'sche Zahl, ($N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ Atome/mol).

$$\text{Dichte} = \frac{\text{Masse der Atome / Elementarzelle}}{\text{Volumen der Elementarzelle}}$$

$$\rho_{Pb} = \frac{4 \cdot m_a}{a^3} \text{ g/m}^3 = \frac{4 \text{ Atome} \cdot 207,19 \text{ g mol}^{-1}}{6,02 \cdot 10^{23} \frac{\text{Atome}}{\text{mol}} \cdot (0,495 \cdot 10^{-9} \text{ m})^3}$$

$$\rho_{Pb} = 11,35 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3 = 11,35 \text{ Mg/m}^3 \quad (= \text{g/cm}^3)$$

$$\rho_{Al} = \frac{4 \text{ Atome} \cdot 26,98 \text{ g mol}^{-1}}{6,02 \cdot 10^{23} \frac{\text{Atome}}{\text{mol}} \cdot (0,4049 \cdot 10^{-9} \text{ m})^3}$$

$$\underline{\underline{\rho_{Al} = 2,70 \text{ Mg / m}^3 \quad (= \text{g / cm}^3)}}$$

$$\rho_{\alpha-Fe} = \frac{2 \text{ Atome} \cdot 55,85 \text{ g mol}^{-1}}{6,02 \cdot 10^{23} \frac{\text{Atome}}{\text{mol}} \cdot (0,2866 \cdot 10^{-9} \text{ m})^3}$$

$$\underline{\underline{\rho_{\alpha-Fe} = 7,88 \text{ Mg / m}^3 \quad (= \text{g / cm}^3)}}$$

1.2 Elektronen

1. Es gilt

$$E_2 - E_1 = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

(mit: h = Planck Konstante, c = Lichtgeschwindigkeit), so daß sich eine Wellenlänge λ für das emittierte Photon von

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E_2 - E_1} = 121,55 \text{ nm}$$

ergibt.

(Da die Energien in eV gegeben sind, müssen diese erst auf Joule umgerechnet werden: $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.)

$$2.a) \text{ } ^{26}\text{Fe} = \underbrace{1s^2}_{K-} \underbrace{2s^2 2p^6}_{L-} \underbrace{3s^2 3p^6}_{M-} \underbrace{3d^6}_{N\text{-Schale}} 4s^2$$

- b) Übergangselemente zeichnen sich dadurch aus, daß die nächst höhere Schale vor dem vollständigen Auffüllen der Unterschale besetzt wird. Im Fall des Fe-Atoms könnten in die M-Schale noch vier 3d-Elektronen aufgenommen werden. Stattdessen wird nach $3d^6$ bereits $4s^2$ besetzt.

3.a)

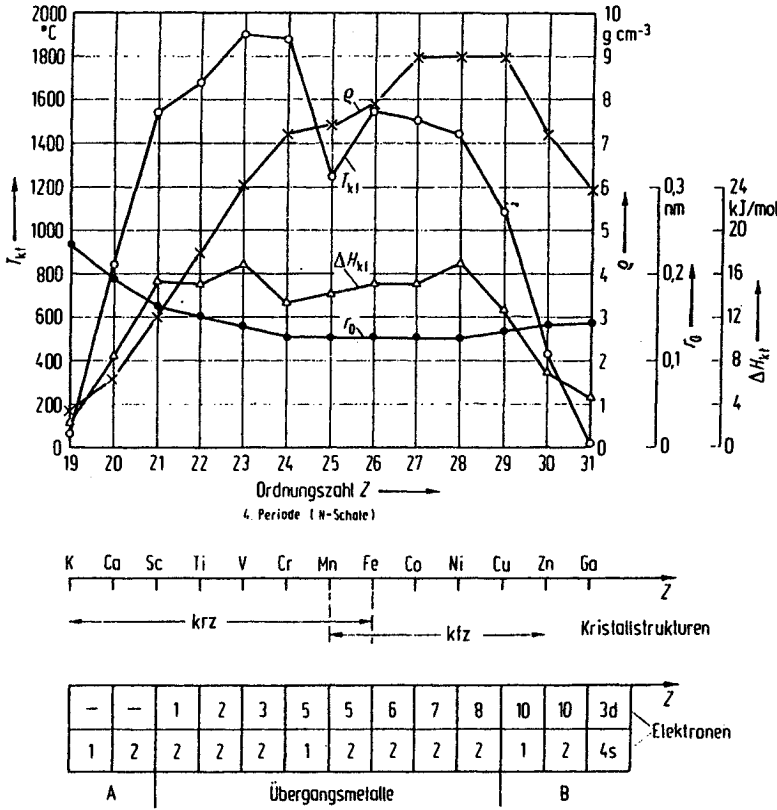


Bild A1.2

- b) Aufgrund der besonderen Elektronenstrukturen der Übergangsmetalle zeigen diese hervorragende Eigenschaften, wie hier die Verläufe der Schmelztemperaturen T_{kf} und der Dichte ρ zeigen. Darüber hinaus sind noch der Ferromagnetismus, Anomalien der elastischen Konstanten und der chemischen Bindung für die Nutzung dieser Elemente als Werkstoffe von besonderer Bedeutung.

1.3 Bindung der Atome

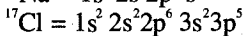
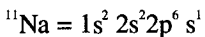
1. Kovalente Bindung (homöopolare Bindung)

Bindungstyp, bei dem die Oktettregel (abgeschlossene Achterschale) durch die gemeinsame Nutzung mehrerer Atome erfüllt wird. Beispiele dafür sind der Diamant oder das Wasserstoffmolekül (Bild A1.3 b,d): Hier fangen zwei Wasserstoffatome das $1s^1$ -Elektron des jeweils anderen Atoms als $1s^2$ mit ein, wobei die $1s$ -Elektronen aus quantenmechanischen Gründen einen entgegengesetzten Spin haben müssen.

Die kovalente Bindung ist eine gerichtete und sehr starke Bindung, weshalb der Diamant, eine nahezu rein kovalente Kohlenstoffverbindung in Tetraederform, der härteste bekannte Werkstoff ist.

Ionenbindung (heteropolare Bindung)

Dieser Bindungstyp tritt bevorzugt zwischen Elementen mit einer großen Elektronenaffinität (Elemente der VI und VII Gruppe im Periodensystem, die nur ein oder zwei Elektronen für die Bildung einer äußeren Achterschale aufnehmen müssen) und Elementen mit einer geringen Ionisierungsenergie (Elemente der I und II Gruppe im Periodensystem) auf. Ein Beispiel ist das Natriumchlorid (Bild A1.3a):



Das $3s^1$ -Elektron kann durch eine geringe Energiezufuhr vom Na abgelöst und als $3p^6$ -Elektron in das Chlor-Atom eingebaut werden. Das Cl-Atom wird dadurch zum Cl^- -Anion, während das Na-Atom zum Na^+ -Kation wird. Aufgrund der elektrostatischen Anziehungskraft zwischen ungleichnamigen Ladungen (Coulombsches Gesetz), lagern sich am Na^+ -Ion Cl^- -Ionen an. Die Ionenbindung oder auch heteropolare Bindung ist deshalb eine ungerichtete Bindung und Stoffe, die vorwiegend diesen Bindungstyp aufweisen, erscheinen nach außen elektrisch neutral. Außerdem sind alle Stoffe mit vorherrschender Ionenbindung schlechte Leiter für Elektrizität und Wärme aufgrund fehlender freibeweglicher Elektronen.

Metallische Bindung

Die einfachste Vorstellung über die Metallbindung ist die des "Elektronengases", die für die werkstofftechnischen Aspekte der Metallbindung genügen soll. Die Theorie geht davon aus, daß die Metallatome ihre Valenzelektronen abgeben und diese sich statistisch ungeordnet wie Gaspartikel im gesamten Kristall bewegen. Die elektropositiven Atomrümpfe bilden das Kristallgitter und werden von dem elektronegativen "Elektronengas" zusammengehalten (Bild A1.3c). Aus der freien Beweglichkeit der Elektronen im "Elektronengas" folgt, daß die metallische Bindung ungerichtet ist und daß Metalle eine gute elektrische und thermische Leitfähigkeit haben.

Zwischenmolekulare Bindung (Van-der-Waals-Bindung)

Der wichtigste Grund für Van-der-Waalsche Bindungskräfte liegt in der Polarisierung von Molekülen. Dabei kann die Polarisierung durch ein äußeres elektrisches Feld oder durch die unsymmetrische Ladungsverteilung des Moleküls selbst hervorgerufen werden. Durch die Ladungsverschiebung entsteht ein Dipolmoment, das zur Anziehung zwischen den Molekülen führt. Beispiele für Zwischenmolekulare Bindungen sind zwischen H_2O -Molekülen oder die Bindungskräfte, die zwischen den Molekülketten von Polyvinylchlorid (PVC) auftreten. In Thermoplasten ist sie verantwortlich für die Festigkeit.

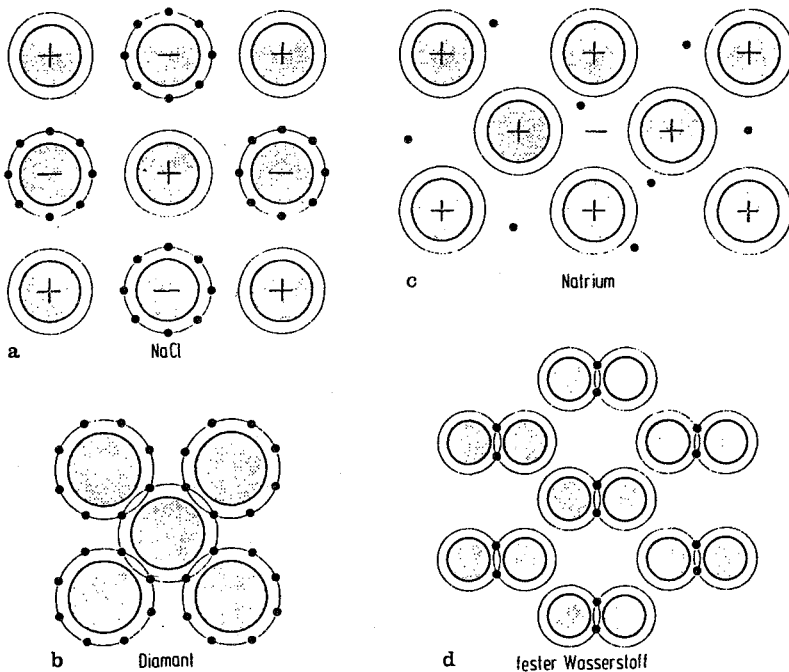


Bild A 1.3

2. Metalle: aus der metallischen Bindung folgt, daß sie gute elektrische und thermische Leiter, chemisch sehr reaktionsfähig und dicht gepackt (gleichmäßige Anordnung der Atome in alle Richtungen, da die Bindung ungerichtet ist) sind.

Keramische Stoffe: aus der kovalenten und ionischen Bindung folgen eine hohe chemische Beständigkeit, hohe Schmelztemperatur und Druckfestigkeit sowie eine schlechte elektrische Leitfähigkeit.

Polymere: Die Molekülketten sind kovalent gebunden, zwischen den Molekülketten herrschen Van-der-Waalsche Bindungskräfte. Daraus folgt eine schlechte elektrische Leitfähigkeit, geringe Dichte, geringe Schmelztemperatur sowie eine gute chemische Beständigkeit bei Raumtemperatur.

3. Die Koordinationszahl K gibt die Anzahl der nächstliegenden Nachbaratome um ein Zentralatom an (Bild A1.4). Mit steigender Koordinationszahl nimmt die Packungsdichte eines Kristallgitters zu.

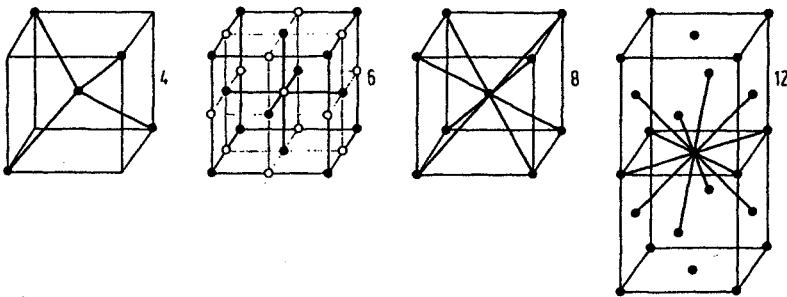


Bild A 1.4

4. Ursache für die Volumenänderung ist die Asymmetrie der Schwingungen der Atome, da deren Amplitude mit steigender Temperatur zunimmt und es so zu einer Vergrößerung der mittleren Atomabstände kommt. Die thermische Ausdehnung wird umso kleiner, je höher die Schmelztemperatur ist, da ein Stoff niedriger Schmelztemperatur infolge seiner schwächeren Atombindung bei einer bestimmten Temperatur mit größerer Amplitude schwingt als ein Stoff mit höherer Schmelztemperatur.
- 5.a) Kohlenstoff als Diamant (Bild A1.5a):
- kovalente Bindung
 - härtester Werkstoff
 - $K=4$.
- b) Kohlenstoff als Graphit (Bild A1.5b):
- $K=6$
 - Hexagonales Schichtgitter (Schichtkristall); C-Atome sind in der Basisebene in regelmäßigen Sechsecken angeordnet und kovalent gebunden. Senkrecht zur Basisebene existiert eine nur schwache Van-der-Waalsche Bindung, so daß die Basisebenen leicht gegeneinander verschoben werden können. Daher die Verwendung von Graphit als Schmiermittel.
- c) Kohlenstoff als Kohlefaser (Bild A1.5c):

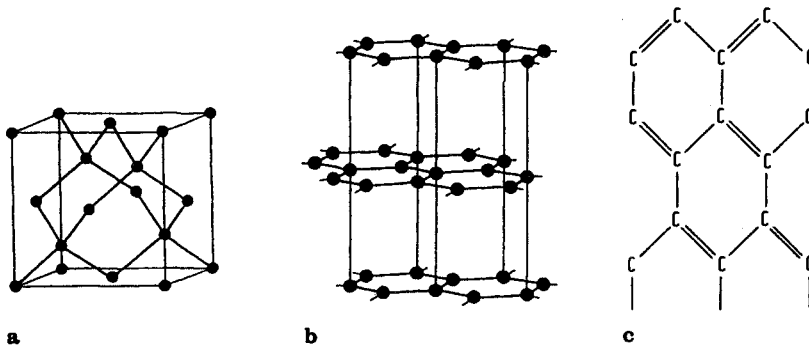


Bild A 1.5

- höchste Zugfestigkeit ($R_m = 12.000 \text{ MPa}$) bei geringer Dichte
- kovalente Bindung

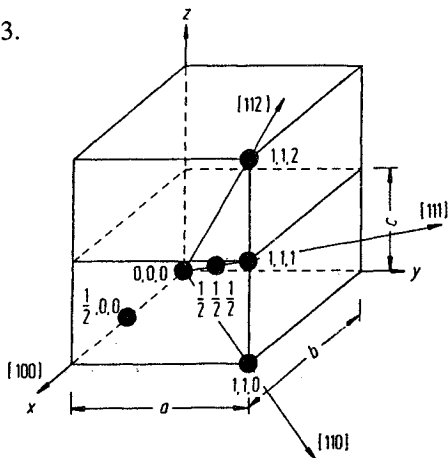
1.4 Kristalle

1.
 - Kristall: regelmäßige Anordnung und dichte oder dichteste Packung der Atome in einem Raumgitter
 - Flüssigkeit: annähernd regellose Verteilung der Atome
 - Glas: regellos dichte Kugelpackung der Atome (eingefrorener Zustand).
- 2.a) Unter Kristallstruktur versteht man die regelmäßige Anordnung von Atomen in einem Raumgitter.
- b) Im Gegensatz dazu zeichnet sich die Glasstruktur durch eine regellose Anordnung der Atome aus, ähnlich der von Flüssigkeiten.
- c) Die Elementarzelle ist die kleinste Einheit, durch deren Wiederholung im Raum ein Kristallgitter, hinsichtlich der Lage und des Abstandes der Atome zueinander, vollständig beschrieben werden kann.
- d) Kristallsystem: Die Koordinatensysteme zur Beschreibung der verschiedenen Kristalle sind gekennzeichnet durch die Winkel zwischen den Achsen und den Einheiten der Achsabschnitte (Tabelle A 1.1).

Tabelle A 1.1

Achsenwinkel	Achsenabschnitte	Bezeichnung
$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	$a = b = c$	kubisch
$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	$a = b \neq c$	tetragonal
$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	$a \neq b \neq c$	orthorhombisch
$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	$a = b = c$	rhomboedrisch
$\alpha = \beta = 90^\circ; \gamma = 120^\circ$	$a_1 = a_2 \neq c$	hexagonal
$\alpha \neq \beta \neq \gamma = 90^\circ$	$a \neq b \neq c$	monoklin
$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	$a \neq b \neq c$	triklin

3.



$$a = b = c$$

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

Bild A 1.6

Anmerkung: Die Indizierung der Atome erfolgt immer in den Einheiten der Einheitszelle

z.B.: $a/2, b/2, c/2, = 1/2, 1/2, 1/2,$

so daß die am weitesten entfernte Ecke der Einheitszelle stets [111] ist, unabhängig davon, ob es sich um ein kubisches, tetragonales, orthorhombisches usw. Kristallsystem handelt.

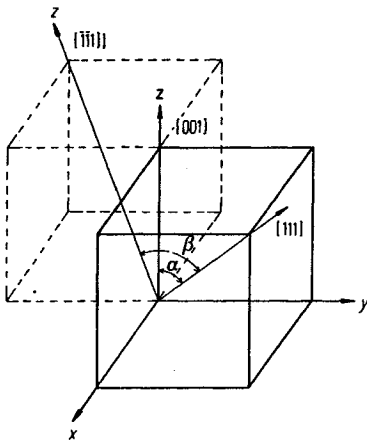


Bild A 1.7

4. Bild A1.7 gibt die kubische Elementarzelle mit den eingezeichneten Vektoren wieder.

a) Winkel zwischen $[001]$ und $[111]$:

$$\cos([001] \times [111]) = \frac{a}{a\sqrt{3}}$$

$$\alpha = \arccos \frac{1}{\sqrt{3}} = 54,74^\circ$$

b) Winkel zwischen $[111]$ und $[\bar{1}\bar{1}1]$:

Lösung durch die Rechenregel für Winkel zwischen zwei Vektoren:

$$\cos \beta = \frac{a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3}{\sqrt{a^2 + b^2}} = -\frac{1}{3}$$

$$\beta = \arccos\left(-\frac{1}{3}\right) = 109,5^\circ$$

Oder Sie erkennen, daß $[001]$ die Winkelhalbierende ist:

$$\beta = 2\alpha = 2 \cdot 54,74^\circ = 109,5^\circ$$

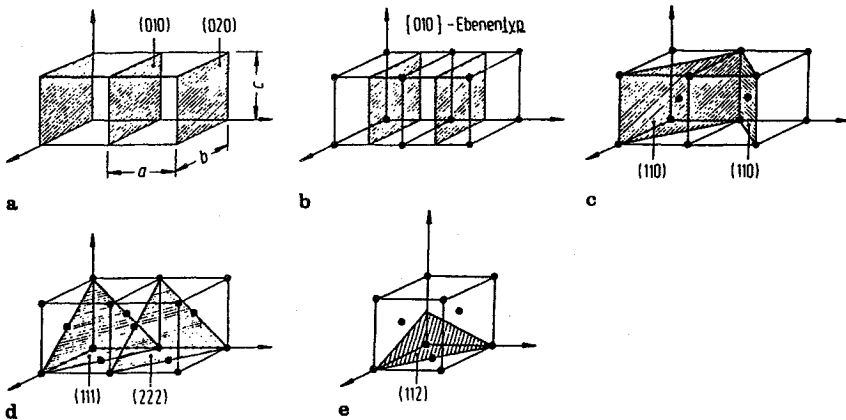


Bild A 1.8

5. Die Achsabschnitte (Einheiten der Einheitszelle) werden zunächst in der Reihenfolge a,b,c notiert. Danach werden jeweils die reziproken Werte gebildet, die dann auf einen Hauptnenner gebracht werden. Um ganzzahlige Werte zu erhalten, wird der Hauptnenner nun einfach weggelassen. In Bild A1.8 sind noch einmal die schraffierten Kristallebenen mit der vollständigen Indizierung gezeigt.

- 6.a) {111} im kfz-Gitter
 {110} im krz-Gitter

Anmerkung: Diese Ebenen sind von besonderem Interesse, da die bei der plastischen Verformung auftretende Gleitung in diesen Ebenen erfolgt.

$$b) d_{(hkl)} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

Cu: kfz-Kristallstruktur,
 dichtest gepackte Ebene vom Typ {111},

$$a_{\text{Cu}} = 0,3615 \text{ nm}$$

$$d_{(111)} = \frac{0,361}{\sqrt{1^2 + 1^2 + 1^2}} = 0,2087 \text{ nm}$$

α -Fe: krz-Kristallstruktur,
 dichtest gepackte Ebene vom Typ {110},

$$a_{\alpha, \text{Fe}} = 0,2866 \text{ nm}$$

$$\underline{d_{(110)} = \frac{0,2866}{\sqrt{1^2 + 1^2 + 0^2}} = 0,2027 \text{ nm}}$$

c) $\{100\} = 6 \text{ spezielle Ebenen} = (100)(010)(001)(\bar{1}00)(0\bar{1}0)(00\bar{1})$

$\{111\} = 8 \text{ spezielle Ebenen} = (111)(\bar{1}\bar{1}1)(1\bar{1}\bar{1})(11\bar{1})(\bar{1}\bar{1}\bar{1})(1\bar{1}\bar{1})$
 $(\bar{1}1\bar{1})(\bar{1}\bar{1}1)$

$\{110\} = 12 \text{ spezielle Ebenen} = (110)(101)(011)(110)(101)(011)$
 $(\bar{1}\bar{1}0)(\bar{1}0\bar{1})(0\bar{1}\bar{1})(\bar{1}\bar{1}0)(\bar{1}0\bar{1})(0\bar{1}\bar{1})$

7. kfz: Stapelfolge ABCABCAB...
 24 Gleitsysteme
 hdp: Stapelfolge ABABAB...
 6 Gleitsysteme

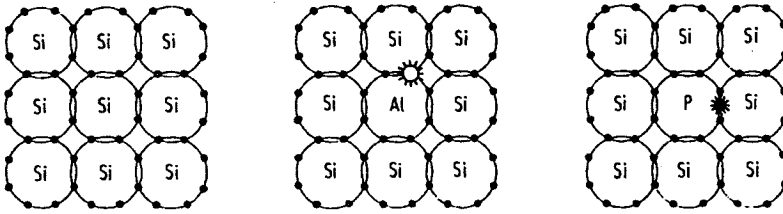
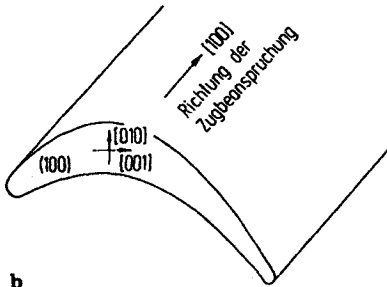
8. Für ein trz Gitter gilt:
 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
 $a = b = 0,28 \text{ nm}$
 $c/a = 1,05 \rightarrow c = 1,05 \cdot a = 0,294 \text{ nm}$

$[111]: \quad x = \frac{\sqrt{2a^2 + c^2}}{2} = \frac{\sqrt{2 \cdot 0,28^2 + 0,294^2}}{2} \quad \underline{x = 0,247 \text{ nm}}$

$[110]: \quad x = \sqrt{a^2 + a^2} = \sqrt{2 \cdot 0,28^2} \quad \underline{x = 0,396 \text{ nm}}$

$[101]: \quad x = \sqrt{a^2 + c^2} = \sqrt{0,28^2 + 0,294^2} \quad \underline{x = 0,406 \text{ nm}}$

9. Al kristallisiert im kfz Gitter, Mg im hdp Gitter. Da das kfz Gitter 24 Gleitsysteme gegenüber 6 Gleitsystemen des hdp Gitters besitzt, ist die Verformbarkeit von kfz Werkstoffen grundsätzlich besser.
10. - Dotierte Si-Einkristalle als Halbleiterwerkstoff in der Elektrotechnik, (Bild A1.9a).
 - Einkristallturbinschaufeln in Flugzeugtriebwerken, (Bild A1.9b).
 - Perfekte keramische Kristalle (Kalkspat CaCO_3) in der Optik, (Doppelbrechung)

**a****b****Bild A 1.9**

$$11. \quad PD_{kfz} = V_{\text{Atome}} / V_{\text{EZ}}$$

mit: PD_{kfz} = Packungsdichte, (Kugelmodell)

V_{Atome} = Volumen der beteiligten Atome

V_{EZ} = Volumen der Elementarzelle

$$V_{\text{EZ}} = a^3$$

$$V_{\text{Atome}} = 4 \text{ Atome} \cdot \pi d^3 / 6$$

mit: a = Gitterkonstante und

d = Atomdurchmesser

$$\Rightarrow PD_{kfz} = \frac{4 \cdot \pi d^3}{6 \cdot a^3}$$

Weiterhin gilt nach Pythagoras, da sich die Atome in den Flächendiagonalen der würfelförmigen Elementarzellen berühren:

$$\Rightarrow (2d)^2 = a^2 + a^2$$

$$\Rightarrow a = \sqrt{2} \cdot d$$

$$\Rightarrow \underline{\underline{PD_{kfz}}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot d^3}{6 \cdot (\sqrt{2} \cdot d)^3} = \frac{\pi}{3 \cdot \sqrt{2}} = 0,7401 \hat{=} 74,01 \%$$

1.5 Baufehler des Kristallgitters

1. Gitterbaufehler beeinflussen thermische und mechanische Vorgänge wie z.B. Diffusion, alle Ausscheidungs- und Umwandlungsvorgänge oder die Härte und die plastische Verformbarkeit.
2.
 - Elementarteilchen
 - Atom
 - Elementarzelle
 - Phase
 - Gefüge
 - Probe (Halbzeug).
- 3.

geometrische Dimension	Dimension der Dichte	
0	[m ³]	Leerstellen, gelöste Atome
1	[m ²]	Versetzungslinien
2	[m ⁻¹]	Korngrenzen, Stapelfehler

4. Strukturelle Leerstellen (im thermodynamischen Gleichgewicht), z.B.: Fe_{0,9}□_{0,1}O_{0,1} enthält 10 At.% Leerstellen.
Thermische Leerstellen (ebenfalls im thermodynamischen Gleichgewicht) entstehen immer beim Erwärmen von Kristallen.
 Durch Bestrahlung mit Neutronen (Frenkelpaare), oder durch plastische Verformung.
5. Aufgrund unterschiedlicher Atomgrößen existieren Verzerrungsfelder im Gitter, die die Versetzungsbewegung mehr oder weniger stark behindern. Hinzu kommt es durch die Legierungsatome zu einer örtlichen Änderung der elastischen Eigenschaften des Gitters (Moduleffekt).
6. Die Abbildung wird mit statistisch verteilten Linien der Länge l, überzogen (Kreise, Geraden) und die Anzahl der Schnittpunkte n_i mit den Versetzungs-

Linien ausgezählt. Die Versetzungsdichte berechnet sich dann aus der Formel:

$$\rho_v = \frac{2 \cdot N \cdot V}{L \cdot t}$$

mit:

$N \hat{=}$	Anzahl der Schnittpunkte der Versetzungslinien mit willkürlich gewählten Linien → auszählen ($N = \sum n_i$)
$V \hat{=}$	Vergrößerung der Abbildung → bekannt, in der Regel immer mit angegeben
$L \hat{=}$	Länge der willkürlich gewählten Linien → ausmessen ($L = \sum l_i$)
$t \hat{=}$	Foliendicke → bekannt, in der Regel immer mit angegeben
"2" $\hat{=}$	statistischer Faktor.

Die Auswertung der Originalaufnahme (Format 9 cm x 13 cm) erfolgte hier mit zwei Kreisen mit einem Durchmesser von je $d = 40,5$ mm.

Berechnung der Linienlänge:

$$U = L = 2 \pi d = 25,45 \text{ cm}$$

Ausgezählte Schnittpunkte

$$n_1 = 23$$

$$n_2 = 11$$

$$N = 34$$

Einsetzen:

$$\rho_v = \frac{2 \cdot 34 \cdot 26000}{25,45 \cdot 100 \cdot 10^{-7}}$$

$$\underline{\underline{\rho_v = 6,9 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}}}$$

Vorsicht! Es handelt sich immer nur um die abgebildeten Versetzungen. Die wirkliche Versetzungsdichte kann größer sein. Darüber hinaus ist diese Methode nur bei homogener Versetzungsverteilung und bei Versetzungsdichten bis $\rho_v = 10^8 - 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ anwendbar.

7. $a/2 [110]$ und $a [100]$ sind Gittervektoren des kfz-Gitters und daher mögliche Burgersvektoren (b) vollständiger Versetzungen; $a/2 [110]$ ist der kleinst-

mögliche b (niedrigste Energie), liegt in der Gleitebene (111) und ist daher der b einer Gleitversetzung, die anderen b 's sind Teilversetzungen, die örtlich die Kristallstruktur verändern.

Die Energie einer Versetzung ist proportional zu b^2 . Dies kann zur Bestimmung der Richtung von Versetzungsreaktionen verwendet werden, da die Richtung von der Summe der Energien der Anfangs- und Endzustände abhängt. Es wird immer der Zustand niedrigster Energie angestrebt.

$b^2 > b_1^2 + b_2^2 \quad \rightarrow \text{Aufspaltung.}$

$b^2 < b_1^2 + b_2^2 \quad \rightarrow \text{Vereinigung}$

8. - Korngrenzen
- Phasengrenzen
- grobe Ausscheidungen

1.6 Flächenförmige Baufehler

- 1.a) Das gebräuchlichste Verfahren zur Bestimmung von Korndurchmessern ist das Linienschnittverfahren (siehe auch Berechnung der Versetzungsdichte ρ_v).

Der mittlere Korndurchmesser berechnet sich dabei nach folgender Formel:

$$\bar{d} = \frac{L \cdot Z \cdot 10^3}{(n_k - 1) \cdot V} \quad [\mu m]$$

mit:

$L \hat{=}$ Länge einer Linie, (bekannt, Meßokular)

$Z \hat{=}$ Anzahl der Linien, (bekannt, Meßokular)

$n_k \hat{=}$ Anzahl der Schnittpunkte der Korngrenzen mit den Linien, (auszählen)

$V \hat{=}$ Vergrößerung, (bekannt, in der Regel immer mit angegeben).

- b) Der gemessene Wert d ist immer kleiner als der wirkliche Korndurchmesser, da die Körner nur zufällig und in den seltensten Fällen genau in ihrem größten Durchmesser geschnitten werden.
2. Mit zunehmender Temperatur wird der Anteil, den die Korngrenzen an der plastischen Verformung haben, immer größer. Die Kriechgeschwindigkeit $d\phi/dt$ nimmt mit abnehmender Korngröße stark zu. Warmfeste Legierungen sollten daher aus möglichst großen Kristallen bestehen. Das beste Kriechverhalten zeigen Einkristalle.

3.

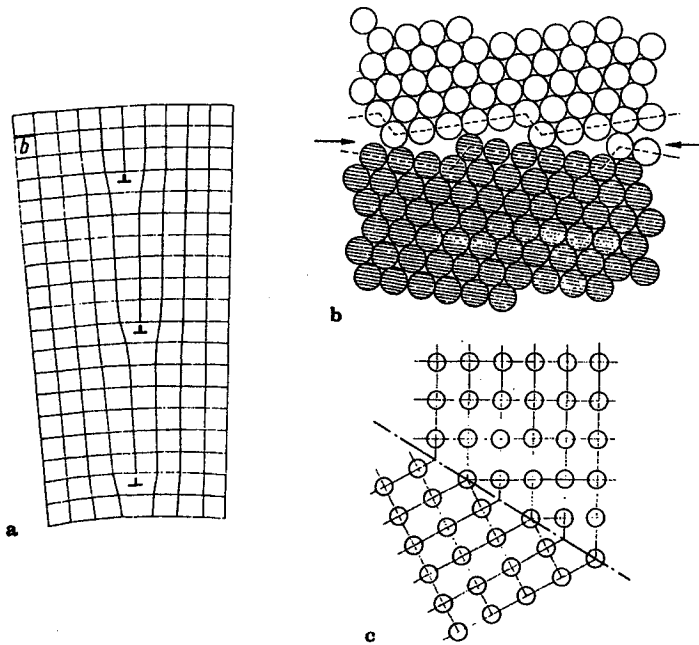


Bild A 1.10

4. Es wird die stereographische Projektion verwandt. Projektionsebene ist die Blechoberfläche, in der die Walz- und Querrichtung gekennzeichnet werden müssen. Die Darstellung wird als Polfigur bezeichnet (Bild A1.11).
5. Die Stapelfolge im kfz-Gitter ist A B C A B C A B C ...
Ein Stapelfehler A B C A B A B C A B C ... entspräche 2 Ebenen des hexagonal dichtest gepackten Gitters. Er ist durch Teilversetzungen vom Typ $b = a/2$ [211] begrenzt.
6. Für die Festigkeitssteigerung durch Korngrenzen gilt folgende Proportionalitätsgleichung:

$$\Delta\sigma_{\text{KG}} \sim D^{-1/2}$$

mit: D = mittlerer Korndurchmesser

→ Werkstoff A: $D^{-1/2} = 0,10$
Werkstoff B: $D^{-1/2} = 0,32$

→ Die höhere Streckgrenze ist demnach bei Werkstoff B zu erwarten.

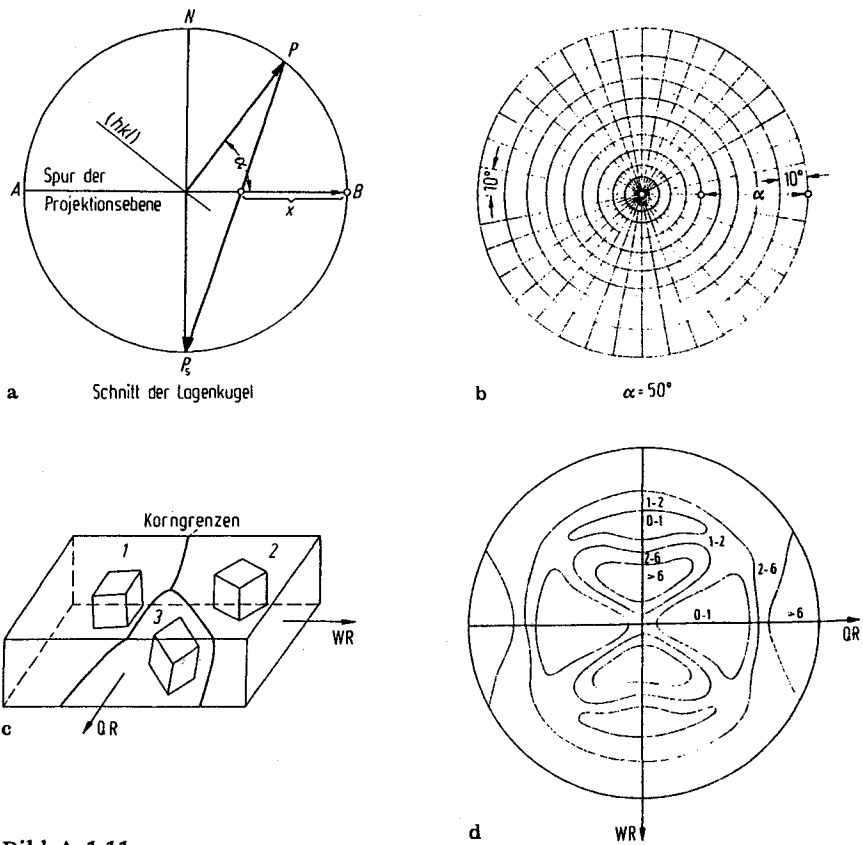


Bild A 1.11

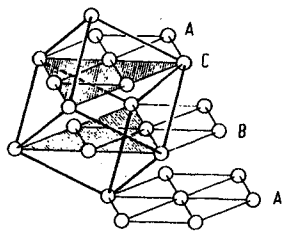


Bild A 1.12

1.7 Gläser und Quasikristalle

1. In allen, also in metallischen, keramischen und hochpolymeren, Werkstoffen sowie in Halbleitern.
2. - Infolge ihrer hohen Kristallisationsgeschwindigkeit entstehen metallische Gläser nur durch sehr schnelles Abkühlen von Schmelzen:
 $\dot{T} = dT/dt > 10^5 \text{ K/s}$.
 - Nicht in reinen Metallen, sondern nur in besonderen Legierungen wie z.B. Fe-B, Ni-Nb, Co-B, die ein gutes "Glasbildungsvermögen" besitzen.
3. Glasstrukturen bilden sich immer aus verknäuelten Molekülen
 - geringer vernetzt: Elastomere
 - stark vernetzt: Duromere
 Auch wenig oder nicht verknäuelte Moleküle können Gläser bilden, falls die einzelnen Moleküle nicht parallel, sondern regellos nebeneinander angeordnet sind: glasige, oder teilglasige Plastomere.
- 4.a) Isotropie $\hat{=}$ Richtungsunabhängigkeit,
 b) Anisotropie $\hat{=}$ Richtungsabhängigkeit,
 von Eigenschaften in einem Werkstoff. Die Eigenschaften von Gläsern sind isotrop, viele Kristalleigenschaften (Spaltbarkeit) anisotrop.
 c) Ein Haufwerk kleiner Kristalle zeigt bei regelloser Verteilung Quasiisotropie.
5. Kristallstrukturen können zwei-, drei-, vier- und sechszählige Symmetrie aufweisen, weil sich nur geometrische Körper dieser Form dicht in Raumgittern anordnen lassen.

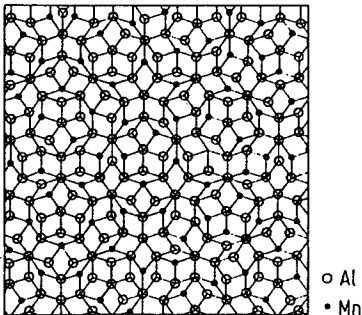


Bild A 1.13

6. Quasikristalle liegen zwischen den ungeordneten Strukturen der Gläser und den geordneten der Kristalle. Sie können, im Gegensatz zu Kristallen, aus

Bauelementen mit fünfzähliger Symmetrie aufgebaut werden, zeigen dabei eine langreichweitige Ordnung in einem Raumgitter aber keine Periodizität der Atompositionen. Ein ebenes Strukturmodell einer quasikristallinen Phase ist das Penrose-Muster (Bild A 1.13). Räumlich betrachtet sind Quasikristalle in einfachster Form Ikosaeder.

7. Metalle können grundsätzlich aus dem flüssigen oder dem gasförmigen Zustand schnell abgekühlt werden. Aus dem flüssigen Zustand geschieht es z.B. beim Schmelzspinnen mit einseitiger oder beim Schmelzwalzen mit zweiseitiger Abkühlung. Beim Aufdampfen geschieht die Abkühlung aus der Gasphase.

2 Aufbau mehrphasiger Stoffe

2.1 Mischphasen und Phasengemische

1. Eine Phase ist ein Bereich mit konstanter atomarer Struktur und chemischer Zusammensetzung, durch Phasengrenzen oder Oberflächen von der Umgebung getrennt. (z.B. ist eine Flüssigkeit eine Phase, deren atomare Struktur weniger geordnet ist als eine kristalline Phase.)
Eine Phase kann aus einer (reiner Stoff) oder mehreren Komponenten (Mischphase) bestehen. Komponenten sind Atomarten (z.B. sind Fe und C Komponenten), aber auch die Verbindung Fe_3C (Zementit), wenn sie eine genau stöchiometrische Zusammensetzung aufweisen.
Bei einem Phasengemisch existieren im flüssigen oder festen Zustand mehrere Phasen nebeneinander.
Anmerkung: im gasförmigen Zustand sind Atome und Moleküle immer völlig mischbar, d. h., dieser Zustand ist immer homogen und daher einphasig. Viele Werkstoffe bestehen aus Kristallgemischen, die dann ein mehrphasiges oder heterogenes Gefüge bilden.
In einer Mischphase sind Atome oder Moleküle einer anderen Art in einer Phase gelöst, d.h. atomar fein verteilt.
2. Es werden interstitielle und substituierte Mischkristalle unterschieden. In interstitiellen Mischkristallen wird die zweite Atomart auf Zwischengitterplätzen eingelagert (z.B.: Fe-C), in substituierten Mischkristallen ersetzt sie auf einigen Gitterplätzen Atome des Wirtsmaterials.
3. Vollständige Mischbarkeit von Kristallen setzt gleiche Kristallstruktur der Komponenten voraus und eine nicht zu starke Abweichung der Gitterparameter voneinander. (z.B.: Au - Cu, α -Fe - Cr, γ -Fe - Ni)
4. Die Härtungswirkung wird begrenzt durch die maximale Löslichkeit der Legierungsatome im Mischkristall, die wiederum durch die mehr oder weniger große Verzerrung des Grundgitters durch die Fremdatome beeinflusst wird.

5. - Stahl: α -Fe und Fe_3C
 - Beton: Kiesel und Sand, verklebt durch hydratisierten Zement
 - Holz: Zellulose und Lignin (Hohlräume)
 - GFK, CFK: Glas- bzw. Kohlefaser und Duromer
 - Grauguß: Perlit (α -Fe+ Fe_3C) und Graphit
 - Silumin: Al (kfz) und Si (Diamantstruktur)

6. Mischen von Phasen und nachfolgendes Sintern.
 Tränken einer festen mit einer flüssigen Phase, die dann erstarrt. Wärmebehandlung in einem Gebiet des Zustandsdiagramms, in dem zwei Phasen im Gleichgewicht sind.

7. Da die angegebenen Elemente alle zur Gruppe der Übergangsmetalle gehören, ist die Bindungsart für den Vergleich der Löslichkeit sekundär, so daß sie alleine von der Verzerrungsenergie abhängt. Diese wird mit zunehmenden Atomradien gegenüber dem des α -Fe größer, so daß sich folgende Reihe abnehmender Löslichkeit ergibt: Ni - Co - Mo - Nb. Ni und Co haben nur deshalb keine vollständige Löslichkeit mit α -Fe, weil sie selbst nicht im krz-Gitter kristallisieren.

2.2 Ein- und zweiphasige Zustandsdiagramme

1. - Den Massengehalt w (auch Gewichtsprozent $w \cdot 100$ Gew.%):

$$w_A = \frac{m_A}{\sum m_i}; \quad \sum w_i = 1.$$

- Den Stoffmengengehalt x (auch Atomprozent $x \cdot 100$ Gew.%):

$$x_A = \frac{n_A}{\sum n_i}; \quad \sum x_i = 1.$$

- Die Angabe von Konzentrationen c , die immer auf das Volumen bezogen werden:

$$c = \frac{n_A}{V}; \quad V \triangleq \text{Volumen}$$

2.

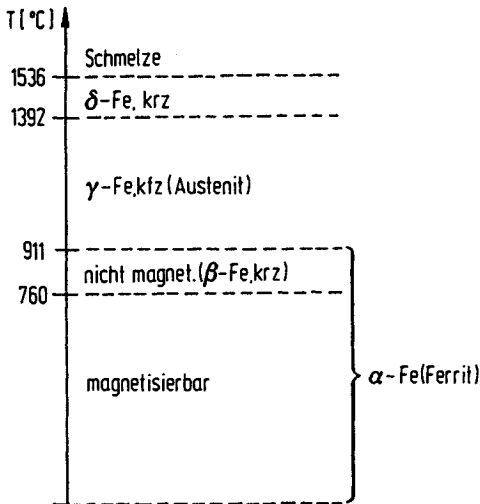


Bild A 2.1

3. Die meisten Werkstoffe werden unter Umgebungsdruck verwendet, so daß die Druckabhängigkeit vernachlässigt werden kann. Unter besonderen Bedingungen (Hochdruckanlagen) kann sie aber wichtig werden. Besonders bei den Geowissenschaften spielt die Druckabhängigkeit eine große Rolle, (z.B. Entstehung von Diamant).
4. Die 5 Grundtypen der Zustandsdiagramme sind Gleichgewichts-Diagramme, aus denen sich alle anderen Zustandsdiagramme aufbauen lassen:
 - a) (fast) völlige Unmischbarkeit im flüssigen und festen Zustand der Komponenten, z. B. Fe-Pb:

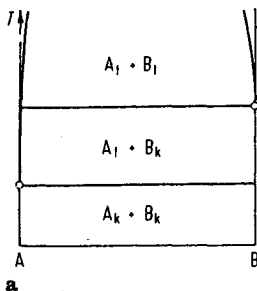
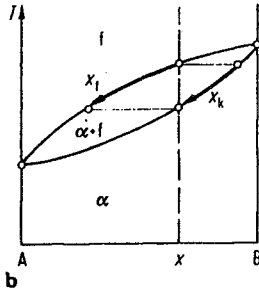


Bild A 2.2a

- b) völlige Mischbarkeit im kristallinen und flüssigen Zustand der Komponenten, z. B. Cu-Ni, Cu-Au,

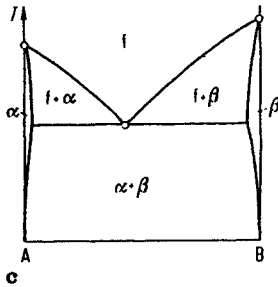
$\text{UO}_2\text{-PuO}_2$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ (eingezeichnet ist der Verlauf der Zusammensetzung einer Legierung x bei der Erstarrung).



x_l : Konzentrationsverlauf in der Flüssigkeit
 x_k : Konzentrationsverlauf im Mischkristall

Bild A2.2b

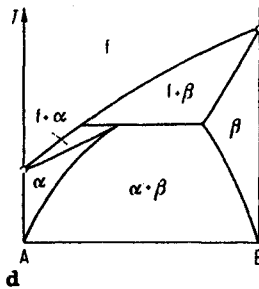
- c) begrenzte Mischbarkeit im kristallinen Zustand bei vollständiger Mischbarkeit im flüssigen Zustand (eutektisches System), z.B. Al-Si, Ag-Cu, Pb-Sb, Fe-C.



Dreiphasengleichgewicht: $f \rightarrow \alpha + \beta$

Bild A2.2c

- d) begrenzte Mischbarkeit im kristallinen Zustand bei vollständiger Mischbarkeit im flüssigen Zustand (peritektisches System), z.B. Ag-Pt, Cd-Hg, Cu-Al, Sn, Zn.



Dreiphasengleichgewicht: $f + \beta \rightarrow \alpha$

Bild A2.2d

e) Bildung einer Verbindung, z.B. Au-Pb, $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$

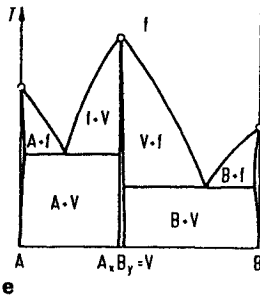


Bild A2.2e

5. Die Einstellung des Gleichgewichtes hängt davon ab, daß sich die Gleichgewichtsphasen auch bilden können, daß also genügend Energie für Keimbildung und Diffusion im System vorhanden ist. In der Regel ist dies nur bei einer sehr langsamen Abkühlung gegeben. Deshalb tritt oft in der Wirklichkeit kein Gleichgewichtszustand auf. Das Zustandsdiagramm gibt den Gleichgewichtszustand an, über den Grad seiner Einstellung sagt es nichts.
6. Das Zustandsdiagramm gibt die Schmelztemperatur oder den Schmelzbereich und damit die obere Verwendungstemperatur eines Werkstoffes an. Im festen Zustand gibt es in Abhängigkeit von der Temperatur und der chemischen Zusammensetzung die Art und Anzahl der Phasen an.
7. - räumliche Darstellung - Konzentrationsdreieck - quasibinärer Schnitt
- isothermer Schnitt (Projektion der Isothermen auf das Konzentrationsdreieck).
8. Das thermodynamische Gleichgewicht ist definiert als der Zustand des Minimums der freien Energie. Es umfaßt

- das mechanische Gleichgewicht	→	System ist in Ruhe,
- das thermische Gleichgewicht	→	keine Temperaturgradienten
- das chemische Gleichgewicht	→	keine Triebkraft für die Reaktionen.

Alle Stoffe streben diesen speziellen, durch das Zustandsschaubild angegebenen Zustand an.

9. Für das Auftreten von metastabilen Gleichgewichten ist neben der hohen Aktivierungsenergie zur Bildung der stabilsten Phase die Existenz einer weniger stabilen Phase notwendig. Infolge ihrer niedrigeren Aktivierungsenergie erfolgt die Bildung dieser Phase schneller.

10. Die Gibbsche Phasenregel besagt, daß die Anzahl der Variablen V aus der Anzahl der beteiligten Komponenten K und der auftretenden Phasen P sich nach folgender Formel errechnet:

$$V = K - P + 2$$

für den isobaren Fall gilt:

$$V = K - P + 1$$

Damit ergibt sich in diesem Fall: $V = 0$.

Die Gibbsche Phasenregel lehrt in diesem Falle Nonvarianz, d.h.: Zusammensetzung und Temperatur des Dreiphasengleichgewichtes liegen fest.

11. - Zinn: metallisches Zinn (β -Sn) ist nur oberhalb von 13 °C stabil (Zinnpest).
- Eisen: bei tiefen Temperaturen stellt das kubisch-raumzentrierte α -Fe die stabilste Phase dar.
12. - Schmelzen des Materials A in einem Tiegel aus B: Die beiden Stoffe dürfen nicht miteinander reagieren, die Schmelztemperatur des einen muß höher sein, als die des anderen (z.B.: Mg im Fe-Tiegel).
- Plattieren A auf B: Das Zustandsdiagramm gibt über Reaktionen an der Grenzfläche Auskunft (z.B.: Bildung einer spröden intermetallischen Verbindung).
- Wärmebehandlungen
- 13.a) Eine Mischkristallphase: α -Cu,
zwei intermetallische Verbindungen: $MgCu_2$ und Mg_2Cu ,
drei Eutektika: bei 21,9 At.-%, 57,9 At.-% und 85,5 At.-% Magnesium-Gehalt.
b) Kupfer ist in Magnesium unlöslich, Magnesium ist bis zu 7 At.-% in Kupfer löslich.
c) $f \rightarrow MgCu_2 + Mg_2Cu$
d) Primärkristallisation von Mg_2Cu tritt zwischen 57,9 At.-% und 85,5 At.-% Magnesium-Gehalt auf.
e) Ausscheidungshärtbar sind Legierungen zwischen ca. 3 At.-% und 7 At.-% Magnesium-Gehalt.
14. Ein Haltepunkt weist entweder auf den Schmelz- bzw. Erstarrungspunkt eines reinen Stoffes (Elementes) oder auf eine eutektische bzw. eutektoide Temperatur hin, (= non-variantes Gleichgewicht).

2.3 Das System Al-Si

1. Aus dem Zustandsdiagramm folgt für die Löslichkeit von
 - Si in Al: die größte Löslichkeit beträgt 1,59 At.% Si bei 577 °C,
 - praktisch keine Löslichkeit von Al in Si.
2. Die eutektische Zusammensetzung ist für Gußlegierungen am geeignetsten, da die Schmelztemperatur am niedrigsten ist und das eutektische Gefüge ein sehr gleichmäßiges Kristallgemisch sein kann. Wird für das Gußstück zusätzlich eine hohe Verschleißfestigkeit gefordert, so wählt man eine übereutektische Zusammensetzung, da sich dann Siliziumkristalle großer Härte ausscheiden (Kolbenlegierungen).
3. Nein.
- 4.a) Homogener α -Mischkristall; Die gesamten 0,5 % Si sind gelöst.
- b) Hebelgesetz, (die gefragte Legierungszusammensetzung Al 50 At.% Si wird mit einem "X" bezeichnet):

$$\frac{X_{\alpha}}{X_{\beta}} = \frac{X_{\beta} - X}{X - X_{\alpha}} \quad (1)$$

$$X_{\alpha} + X_{\beta} = 1 \quad (2)$$

aus dem Zustandsdiagramm wird abgelesen, (s. Aufgabenstellung):

$$X_f = 27 \text{ At.}\%$$

$$X_{Si} = 100 \text{ At.}\%$$

$$X = 50 \text{ At.}\%$$

Das Hebelgesetz besagt:

$$X_f (X - X_f) = X_{Si} (X_{Si} - X)$$

$$\frac{X_f}{X_{Si}} = \frac{X_{Si} - X}{X - X_f} = \frac{1,0 - 0,50}{0,5 - 0,27} = 2,17$$

$$X_f + X_{Si} = 1; \quad \text{beide Seiten multiplizieren mit } 1/X_{Si}$$

$$\frac{X_f}{X_{Si}} + 1 = \frac{1}{X_{Si}} ; \quad \text{einsetzen und auflösen nach } X_{Si}$$

$$2,17 + 1 = \frac{1}{X_{Si}} \quad \underline{X_{Si} = 0,315 = 31,5 \%} \quad \underline{X_{Al} = 0,685 = 68,5 \%}$$

5. Die Gibbsche Phasenregel gibt die Anzahl der Freiheitsgrade (x, T, p) in einem System mit K Komponenten und P Phasen an. Für kondensierte Phasen gilt $p \approx \text{const.}$

$$V = K - P + 1$$

K = Anzahl der Komponenten

P = Anzahl der Phasen

Bei der eutektischen Reaktion stehen 3 Phasen einer zweikomponentigen Legierung im Gleichgewicht:

$$V = 2 - 3 + 1 = 0$$

Da der Freiheitsgrad gleich Null ist, kann weder die Temperatur noch die Zusammensetzung frei gewählt werden.

6. Das Gefügebild zeigt eine untereutektische Al-Si Legierung, der Si-Gehalt beträgt 6 Gew.-%.

Begründung: Es finden sich zwei unterschiedliche Gefügetypen: das Eutektikum mit einer Härte von 80 HV und eine primär erstarrte Phase mit einer Härte von 30 HV. Diese Phase kann grundsätzlich entweder Si oder α (Al)-Mischkristall sein. Durch den niedrigen HärteWert wird diese Phase sicher als α (Al)-Mischkristall identifiziert und damit die Legierung als eine untereutektische. Aus den Flächenanteilen der beiden Gefügetypen läßt sich der ungefähre Si-Gehalt abschätzen.

7. Siehe Bild A 2.3

Sieden der Metallschmelze ist in folgenden Fällen von Bedeutung:

- Laserbearbeitung mit Temperaturen oberhalb der Siedetemperaturen einzelner Komponenten,
- Silberherstellung durch Verdampfung des Zn aus einer Zn-Ag-Legierung.

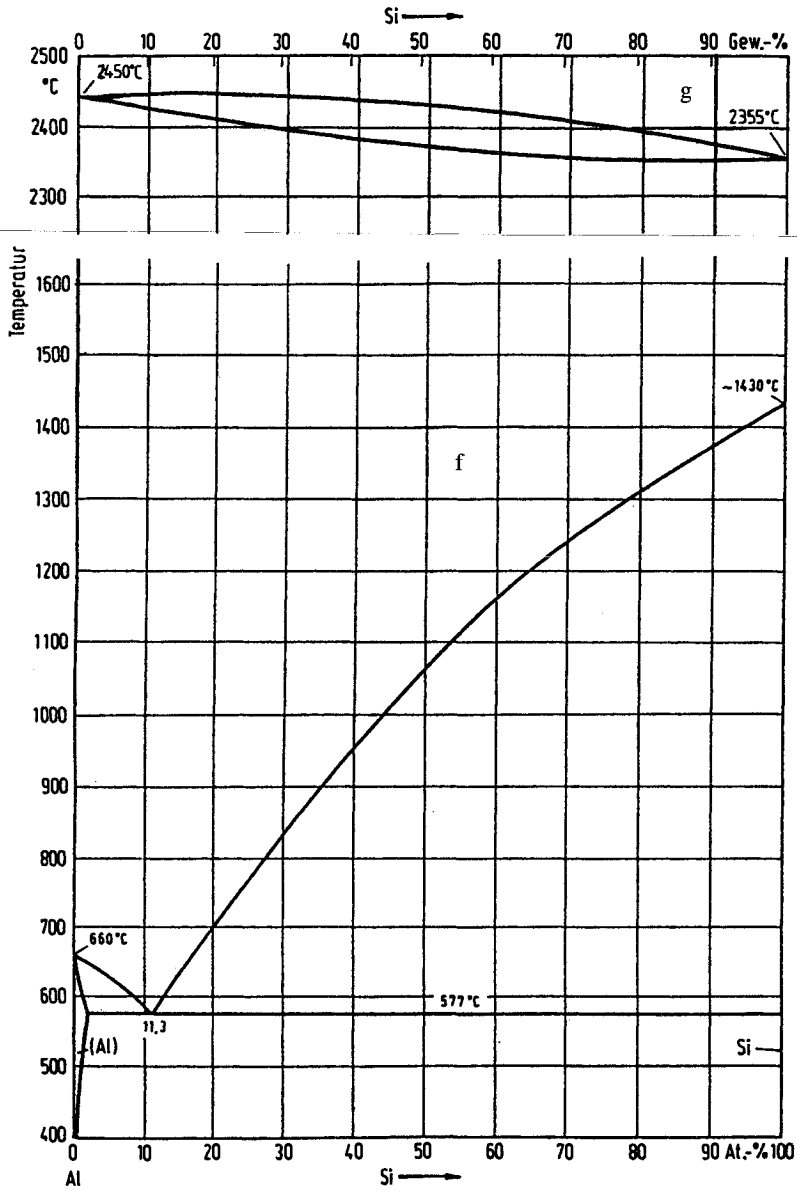


Bild A 2.3

2.4 Das metastabile Zustandsdiagramm Fe-Fe₃C

1.

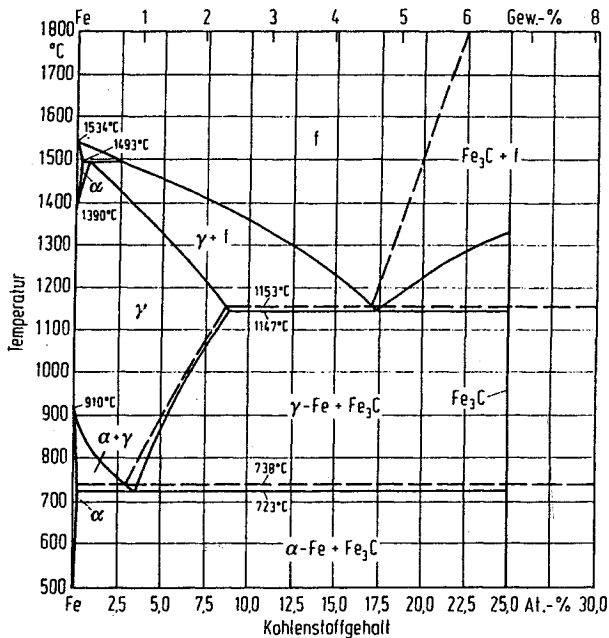


Bild A 2.4

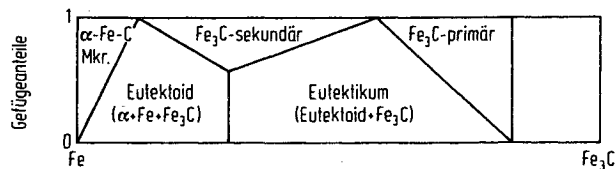


Bild A 2.5

- a) $\alpha - \text{Fe}$: $\hat{=}$ Ferrit
 $\gamma - \text{Fe}$: $\hat{=}$ Austenit
 Fe_3C : $\hat{=}$ Zementit
 $\alpha - \text{Fe} + \text{Fe}_3\text{C}$: $\hat{=}$ Perlit

Das Eutektikum des metastabilen Systems wird Ledeburit genannt. Die durchgezogenen Linien geben das metastabile System wieder.

- b) 3-Phasengleichgewichte:

Eutektikum: Schmelze $\rightarrow \gamma - \text{Fe} + \text{Fe}_3\text{C}$ (Ledeburit)

Bei weiterer Abkühlung wandelt $\gamma - \text{Fe}$ in Perlit um, so daß ein Ledeburit genanntes Gefüge aus $\alpha - \text{Fe} + \text{Fe}_3\text{C}$ vorliegt.

Eutektoid: $\gamma\text{-Fe} \rightarrow \alpha\text{-Fe} + \text{Fe}_3\text{C}$ (Perlit)
 Peritektikum: $\delta\text{-Fe} + \text{f} \rightarrow \gamma\text{-Fe}$ (Austenit)

2. $\gamma\text{-Fe}$ hat ein kubisch flächenzentriertes Gitter, in dem die Raummitte nicht besetzt ist. Diesen Platz nimmt das Kohlenstoffatom ein, so daß bei 1.153 °C eine maximale Löslichkeit von 2,08 Gew.% C auftritt. Im kubisch raumzentrierten $\alpha\text{-Fe}$ ist die Raummitte von einem Fe-Atom besetzt, so daß lediglich zwischen 700 und 800 °C eine sehr geringe Löslichkeit von 0,02 Gew.% für Kohlenstoff existiert (bei RT praktisch unlöslich!).
3. Siehe Bild A 2.5
- 4.a) Baustähle $\leq 0,2$ Gew.% C (nicht härtbar)
 b) Werkzeugstähle 0,3 -2,5 Gew.% C (härtbar)
 c) Gußeisen $\approx 4,3$ Gew.% C (Eutektikum)

2.5 Keimbildung und Erstarrung

1. - Plasma,
 - Gas,
 - Flüssigkeit,
 - Festkörper (kristallin, amorph).

Der Unterschied zwischen einem Plasma und einem Gas besteht darin, daß sich im Plasma die Atomkerne und die Elektronen unabhängig voneinander bewegen.

2. - Plasma \rightarrow Beschichten,
 - Gas \rightarrow Aufdampfen,
 - Flüssigkeit \rightarrow Gießen,
 - Festkörper \rightarrow Sintern, Umformen.
2. und 4.

Die im Bild A2.6 durchgezogene Linie gibt den idealen Verlauf bei der Abkühlung wieder: bei der Temperatur T_{kf} stehen die flüssige und feste Phase im Gleichgewicht, so daß nach dem Zustandsdiagramm bei weiterer Abkühlung unmittelbar die Kristallisation erfolgen müßte. Real (gestrichelte Linie) mißt man bei endlichen Abkühlungsgeschwindigkeiten für den Kristallisationsbeginn eine niedrigere Temperatur, da für die Kristallisation erst Keime gebildet werden müssen. Die Triebkraft der Keimbildung ist dabei proportional der Unterkühlung der Schmelze unter die Gleichgewichtstemperatur.

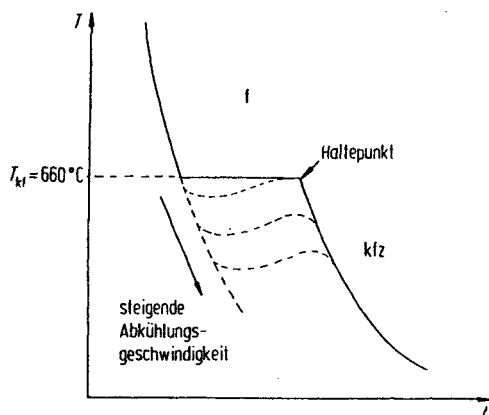


Bild A 2.6

5. Die Gesamtenergie ΔG_k für die Keimbildung setzt sich aus zwei Termen zusammen:

$$\Delta G_k = \underbrace{-\frac{4}{3}\pi r^3 \Delta g_{fk}}_{\text{Volumen einer kugelförmigen Zone}} + \underbrace{4\pi r^2 \sigma_{fk}}_{\text{Oberfläche einer kugelförmigen Zone}} [\text{J}]$$

Während der erste Term die aus der Unterkühlung resultierende, auf das Volumen bezogene freie Energie enthält, ist im zweiten Term die für die Bildung der Oberfläche des Keims notwendige Grenzflächenenergie σ_{fk} berücksichtigt.

- a) Bei der homogenen Keimbildung ist zur Bildung der neuen Phase eine gewisse Unterkühlung notwendig. Dabei treten in der unterkühlten Phase statistische Schwankungen der Atomanordnung auf. Dieser Vorgang kann mit dem Boltzmannschen Verteilungsgesetz beschrieben werden:

$$n_k = N \cdot \exp\left(-\frac{\Delta G_k}{k \cdot T}\right)$$

Dabei ist N die Gesamtzahl der Atome, n_k die Zahl der Schwankungen der Größe r_k (d. h. die Zahl der wachstumsfähigen Keime) und k die Boltzmannkonstante.

- b) Wird ein Teil der Grenzflächenenergie durch bereits existierende Grenzflächen wie z. B. die Formwand aufgebracht, beginnt an dieser die Keimbildung und damit das Kristallwachstum = heterogene Keimbildung. (Im Fall von absichtlich in die Schmelze gebrachten Kriställchen spricht man vom Impfen.)

6. Man erhält ein sehr feinlamellares Gefüge mit günstigen mechanischen Eigenschaften.
Die Anwendung erstreckt sich auf geeignete (Zustandsdiagramm) technische Gußlegierungen, um deren niedrige Schmelztemperatur und die feinverteilte Ausbildung der Komponenten des Eutektikums auszunutzen.
7. Die Schmelzüberhitzung wird grundsätzlich immer dann angewandt, wenn höher schmelzende Phasen vollständig aufgelöst werden müssen, um bei der anschließenden Erstarrung eine heterogene Keimbildung zu unterbinden.
Für den Stahl heißt dies, daß bei der Schmelztemperatur zunächst die metallische Matrix schmilzt, die Karbide jedoch unaufgelöst bleiben. Durch die Überhitzung der Schmelze werden jedoch auch die Karbide vollständig aufgelöst, so daß eine homogene schmelzflüssige Phase vorliegt.
8. Die heterogene Keimbildung wird durch das absichtliche Einbringen von Keimkristallen oder auch zusätzlichen Grenzflächen gezielt unterstützt. Einen Spezialfall stellt das Züchten von Einkristallen dar. Hier wird ein Impfkristall in die Schmelze gehalten und mit einer definierten Geschwindigkeit (Kristallisationsgeschwindigkeit) wieder herausgezogen, so daß die schmelzflüssige Phase als ein einzelner Kristall an diesem Stab kristallisieren kann.
9. Bei der dendritischen Erstarrung gibt es keine ebene Erstarrungsfront, sondern eine instabile Grenzfläche zwischen der flüssigen und der festen Phase. Voraussetzung für das Fortschreiten der Erstarrung ist, daß die freiwerdende Kristallisationswärme durch das flüssige Metall abgeführt wird. Darüber hinaus ist die Schmelze im Vergleich zu der kristallinen Phase unterkühlt (konstitutionelle Unterkühlung). Dies hat zur Folge, daß jede noch so kleine Unebenheit der Grenzfläche in ein Gebiet höherer Unterkühlung gelangt und im Vergleich zu anderen Teilen der Oberfläche wesentlich schneller wächst (Dendritenform).
- 10.a) Wird ein feinkörniges Gefüge angestrebt, ist bei dem Erstarrungsvorgang eine möglichst große Keimzahl notwendig. Die dazu erforderliche große Unterkühlung wird durch möglichst schnelles Abkühlen unterhalb der Gleichgewichtstemperatur erreicht.
b) Für die Herstellung eines Einkristalls muß die Unterkühlung beim Erstarren möglichst klein sein, so daß die Anzahl der wachstumsfähigen Keime idealerweise $n_k = 1$ ist, (isothermes Wachstum des Kristalls).
- 11.a) Lunkerbildung (offene Kokille), Bild A 2.7a
b) Porenbildung (geschlossene Kokille), Bild A 2.7b

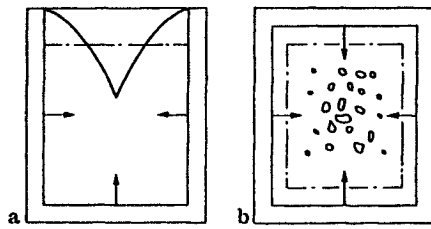


Bild A 2.7

12. Die Anwendungen von Vielstoffeutektika ergeben sich aus den in der Regel stark erniedrigten Schmelztemperaturen, Beispiele:
- Herstellung von Loten
 - Lettermetall in der Druckereitechnik.
 - metallische Kühlflüssigkeiten

3 Grundlagen der Wärmebehandlung

3.1 Wärmebehandlung

1.
 - Bildung von homogenen Mischkristallen oder geordneten intermetallischen Verbindungen.
 - Kristallerholung, Rekristallisation, Kornwachstum
 - Nitrieren, Aufkohlen
 - Bildung von Ausscheidungen
2. Eine Wärmebehandlung ist die Anwendung eines Verfahrens oder einer Kombination mehrerer Verfahren, bei denen ein Werkstoff im festen Zustand speziellen Temperaturänderungen unterworfen wird mit dem Ziel, ein bestimmtes Gefüge mit bestimmten Werkstoffeigenschaften zu erzeugen.
3. Stahlhärtung:
Steigerung von Härte durch Erhitzung im Austenit-Gebiet und anschließender schneller Abkühlung zur martensitischen Umwandlung.
Anlassen:
Nach der Härtungsbehandlung Erwärmung auf 200 bis 600 °C, um den spröden Martensit durch Abbau von inneren Spannungen und Ausscheidung von Karbiden in einen duktileren Zustand zu überführen.
Normalglühen:
Neubildung des Gefüges durch kurzzeitige Erhitzung ins Austenit-Gebiet und Abkühlung. Dadurch Kornneubildung, Beseitigung von Texturen und der Verfestigung.
Aushärtung:
Bildung von Ausscheidungen aus einem übersättigten Mischkristall zur Streckgrenzensteigerung.
4. Beide haben gemeinsam, daß eine neue Phase gebildet wird. Im Falle der Umwandlung verschwindet vollständig die alte Phase zugunsten der neuen, im Falle der Ausscheidung entsteht nur eine kleine Menge der neuen Phase, die in der alten dispergiert ist. Dabei muß die alte Phase ihre Zusammensetzung ändern.

5.

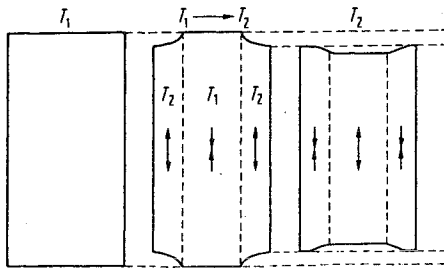


Bild A 3.1

Allgemein: Bei der Abkühlung des Zylinders von der Wärmebehandlungstemperatur kühlt der Rand zunächst schneller ab als der Kern. Bei positivem Wärmeausdehnungskoeffizient hat das zur Folge, daß der Rand schneller kontrahiert als der Kern und so diesen unter eine Druckspannung setzt (Bild A3.1). Aus dem Gleichgewicht der Kräfte folgt, daß dann der Rand unter einer Zugspannung steht. Mit fortschreitender Abkühlung werden, durch die nachfolgenden Kontraktionen des Kerns, die Druckspannungen zunehmend abgebaut und es tritt eine Spannungsumkehr ein. Nach dem völligen Erkalten steht der Randbereich unter einer Druck und der Kern unter einer Zugspannung.

- a) Kupfer; Ausdehnungskoeffizient $\alpha > 0$: Kupfer besitzt eine gute Wärmeleitfähigkeit, so daß der Temperaturgradient und damit die Eigenspannungen bei der Abkühlung gering sind. Bei sehr scharfer Abkühlung können die inneren Spannungen die Streckgrenze R_p überschreiten, so daß plastische Verformungen auftreten.
 - b) Jenaer-Glas (Hauptbestandteile: SiO_2 , Na_2O , Al_2O_3 , B_2O_3); Ausdehnungskoeffizient $\alpha \approx 0$: Das Zulegieren von Boroxid reduziert den Ausdehnungskoeffizient auf nahezu Null, so daß bei Temperaturwechseln nur geringe innere Spannungen auftreten.
 - c) Werkzeugstahl 0,8 Gew.-% C; $\alpha_{\alpha \rightarrow \gamma} < 0$: Bei hinreichend schneller Abkühlung eines Werkzeugstahls mit 0,8 Gew.-% C von der Homogenisierungstemperatur tritt bei ca. 730 °C eine Phasenumwandlung von Austenit zum Martensit ein. Dies ist mit einer Volumenzunahme verbunden, so daß sich der Kern des Zylinders gegen die bereits erkaltete Randschicht ausdehnen muß. Dies führt zu Zugspannungen im Randbereich, die gegebenenfalls die Zugfestigkeit überschreiten und zu Härterissen führen.
- 6.a) Stähle: In der Wärmeeinflußzone (WEZ) wird der zu schweißende Werkstoff wärmebehandelt und zwar mit Temperaturen, die, je nach Abstand von der Schweißnaht, zwischen der Schmelztemperatur der Legierung und Raumtemperatur liegen. Bei Stählen mit einem hohen Kohlenstoffgehalt führt die

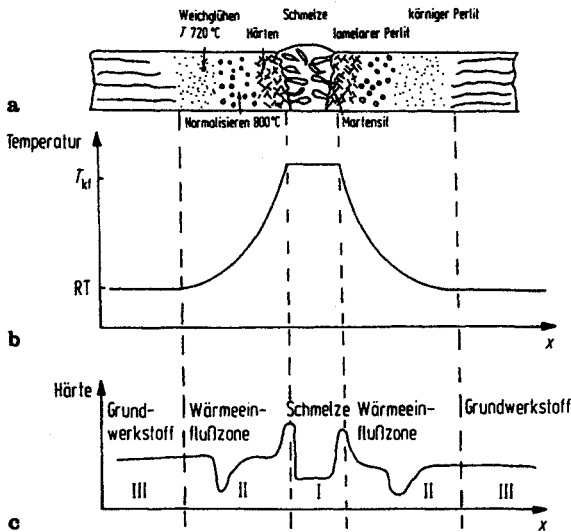


Bild A 3.2

se unbeabsichtigte Wärmebehandlung durch örtliche Martensitbildung zu einer unerwünschten Versprödung der WEZ und begrenzt deren Schweißbarkeit.

- b) Aluminium: Die hochschmelzende Passivschicht (Al_2O_3) auf Aluminium führt bei einer Schweißung durch ungenügende Benetzung zu mangelhafter Bindung, (Schutzgasschweißung notwendig).

3.2 Diffusion

1. - Gasförmiger und flüssiger Zustand: Konvektion und Diffusion.
- Fester Zustand: Diffusion, Ionenimplantation.
2. Diffusion ist der thermisch aktivierte Platzwechsel einzelner Atome. Dabei diffundieren substitutionell eingelagerte Atome durch Platzwechsel mit Leerstellen. Im Gegensatz dazu, können Zwischengitteratome (interstitiell eingelagert) unabhängig von Leerstellen auf benachbarte Zwischengitterplätze diffundieren. Quantitativ wird das Diffusionsverhalten durch den Diffusionskoeffizienten D_0 und die Aktivierungsenergie Q beschrieben:
$$D = D_0 \exp(-Q/RT).$$
3. γ -Fe hat zwar eine größere Packungsdichte (4 Atome/Elementarzelle) als α -Fe (2 Atome/Elementarzelle), aber eine sehr viel höhere Löslichkeit für C-

Atome als α -Fe. Daraus folgt, dass Aufkohlung durch Diffusion im γ -Fe geschehen muss. Im α - und γ -Fe läuft die Diffusion von C interstitiell über die Zwischengitterplätze ab.

4. Gegeben sind die

- Einsatztiefe: $x = 0,3 \text{ mm}$
- Glühdauer: $t = 0,5 \text{ h}$
- Glühtemperatur: $T = 850 \text{ }^\circ\text{C}$
- Diffusionskonstante für C in γ -Fe: $D_0 = 0,2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
- Aktivierungsenergie für C in γ -Fe: $Q = 130 \text{ kJ/mol}$
- allgemeine Gaskonstante: $R = 8,314 \text{ J/mol K}$

Die Aufkohlung erfolgt immer in der γ -Phase des Stahls, aufgrund der dort sehr viel höheren Kohlenstofflöslichkeit. Die mittlere Eindringtiefe Δx und der Diffusionskoeffizient D errechnen sich nach folgenden Gleichungen:

$$\overline{\Delta x} = \sqrt{D \cdot t} \quad (1)$$

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

Lösung:

a)

$$\overline{\Delta x_a} = 3\overline{\Delta x}, D_a = D$$

aus (1) folgt:

$$t = \frac{\overline{\Delta x}^2}{D}$$

$$\underline{\underline{t_a = \frac{\Delta x_a^2}{D_a} = \frac{9\overline{\Delta x}^2}{D} = 9t = 9 \cdot 0,5 \text{ h} = 4,5 \text{ h}}}$$

b)

$$\overline{\Delta x_b} = 3\overline{\Delta x} = 3 \cdot 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 0,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$t_b = t = 1,8 \cdot 10^3 \text{ s}$$

aus (1) folgt:

$$D_b = \frac{\overline{\Delta x_b^2}}{t_b} = \frac{0,81 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2}{1,8 \cdot 10^3 \text{ s}} = 0,45 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$$

aus (2) folgt:

$$T_b = \frac{Q}{R \cdot \ln \frac{D_b}{D_o}} = - \frac{130 \cdot 10^3 \text{ J/mol}}{8,314 \text{ J/molK} \cdot \ln \frac{0,45 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}}{0,2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}}} = 1461 \text{ K} \hat{=} 1188^\circ \text{C}$$

5. - Beim Einsatzhärten wird ein kohlenstoffarmer und daher nicht härtbarer Stahl durch einen Diffusionsprozeß in der Randschicht mit Kohlenstoff angereichert. Diese Aufkohlung erfolgt im γ -Gebiet, da hier eine höhere Kohlenstofflöslichkeit existiert. Von der Einsatztemperatur wird abgeschreckt, so daß die kohlenstoffangereicherte Randschicht martensitisch umwandelt.
 - Die Nitrierhärtung erfolgt über das Eindiffundieren von Stickstoffatomen im α -Fe. Zwar wäre auch hier die Löslichkeit von N im γ -Gebiet höher, aber das im Austenit entstandene Eisennitrid (Fe_3N) ist sehr spröde und neigt zum Abplatzen. Außerdem liegt ein Vorteil der Nitrierbehandlung gerade darin, daß die große Härte nicht durch eine martensitische Umwandlung und der damit einhergehenden Volumenänderung erzielt wird, sondern durch eine feine Verteilung der Nitridpartikel. Die Härte läßt sich durch das Zulegieren von Al noch steigern, da dieses eine hohe Affinität zu N besitzt und mit ihm ein Aluminiumnitrid (AlN mit Wurzitstruktur, ähnlich der Diamantstruktur) bildet.
 - Das Zustandsdiagramm Fe-B zeigt, daß Bor praktisch keine Löslichkeit im Eisen besitzt, so daß auch kein Diffusionsbereich mit abnehmender Bor-konzentration entsteht. Es bildet sich lediglich eine sehr harte Boridzweischenschicht aus (Fe_2B), die mit dem Grundwerkstoff "verzahnt" ist.
6. Lösung mit dem 2. Fick'schen Gesetz:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (1)$$

Die allgemeine Lösung der Differentialgleichung lautet

$$c(x, t) = A \Phi(\xi) + B \quad (2)$$

$$\Phi(\xi) = \int e^{-\xi^2} d\xi, \text{ (Gauß'sches Fehlerintegral)}$$

$$\xi = \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}}$$

A und B sind Konstanten, die durch Anfangs- und Randbedingungen ermittelt werden können:

$$A = -\frac{1}{\sqrt{\pi}}(c_A - c_u)$$

$$B = \frac{1}{2}(c_A - c_w) = c_M$$

$$c(x, t) = c_M - \frac{1}{2}(c_A - c_M) \Phi(\xi) \quad (3)$$

Der Konzentrationsverlauf kann nun mit (3) für beliebige Zeit- und Ortskoordinaten berechnet werden.

Für das hier vorliegende Problem soll eine Tabelle erstellt werden:

$$t_1 = 10^4 \text{ s} ; t_2 = 10^5 \text{ s}$$

$$\xi_1 = \frac{x_1}{2\sqrt{Dt_1}} = 707x ; \quad \xi_2 = \frac{x_2}{2\sqrt{Dt_2}} = 224x$$

Da gilt:

$$\Phi(-\xi) = -\Phi(\xi)$$

muß der Konzentrationsverlauf nur in einem Halbraum berechnet werden (Kurve ist punktsymmetrisch zu c_M).

Das Konzentrationsprofil ist in Bild A3.3 dargestellt.

x in m	0	5·10 ⁻⁴	1·10 ⁻³	2·10 ⁻³	3·10 ⁻³	4·10 ⁻³	5·10 ⁻³	6·10 ⁻³	10 ⁻²
ξ ₁	0	0,35	0,71	1,41	2,12				
ξ ₂	0	0,11	0,22	0,45	0,67	0,90	1,12	1,34	2,24
Δ(τ ₁)	0	0,38	0,68	0,96	1,00				
Δ(τ ₂)	0	0,13	0,25	0,47	0,66	0,80	0,89	0,94	1,00
c _N (x,t ₁)	0,85	0,56	0,34	0,13	0,10				
c _W (x,t ₂)	0,85	0,76	0,66	0,49	0,36	0,25	0,18	0,14	0,10
c _A (x,t ₁)		1,14	1,36	1,57	1,60				
c _A (x,t ₂)		1,94	1,04	1,21	1,34	1,45	1,52	1,56	1,60

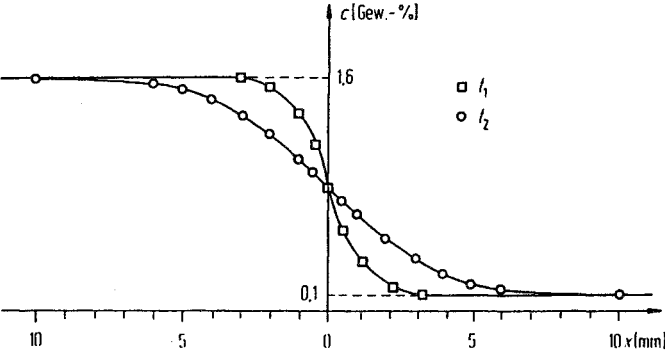


Bild A 3.3

3.3 Rekristallisation

1. Notwendige Voraussetzung für die Rekristallisation ist eine hohe Defektdichte, z.B. Versetzungen durch Kaltverformung oder Punktfehler durch Bestrahlung. Die treibende Kraft für die Rekristallisation resultiert aus der Differenz der Defektdichten vor und nach der Rekristallisationsfront, wobei für die Auslösung der Rekristallisation eine thermische Aktivierung notwendig ist:

$$P_R \sim (\rho_0 - \rho_1)$$

ρ_0 = Defektdichte vor der Rekristallisationsfront

ρ_1 = Defektdichte nach der Rekristallisationsfront

2. Ziele der Rekristallisation sind:
 - Weichglühen,
 - Einstellen einer großen oder kleinen Korngröße und
 - Einstellung einer bestimmten Textur.
3. - Versetzungsgruppen, Scherbänder
 - Inkohärente Phasengrenzen
 - Korngrenzen
4. Feinkörnige Gefüge können erzeugt werden durch:
 - eine große Keimzahl bei der Erstarrung, die durch die starke Unterkühlung erzeugt wird (homogene Keimbildung),
 - Ausnutzung der heterogenen Keimbildung, die durch das Impfen der Schmelze mit kleinen Kristalliten ausgelöst wird und
 - eine Rekristallisationsglühung bei einer sehr hohen Defektdichte ($\rho > \rho_c$)
5. Die Gleichung für die Zeit bis zum Ende der Rekristallisation t_R lautet:

$$t_R = t_0(\rho) \exp\left(\frac{H_R(\rho)}{RT}\right) \quad (1)$$

Es kann angenommen werden, daß die Aktivierungsenergie für Rekristallisation $H_R(\rho)$ gleich der Aktivierungsenergie für Selbstdiffusion Q_{SD} ist.

Aus (1) folgt:

$$T_2 = \frac{Q_{SD}}{R \cdot \ln \frac{t R_2}{t_0}} \quad (2)$$

und

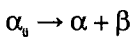
$$t_0 = t_{R1} \exp\left(-\frac{Q_{SD}}{RT_1}\right) \quad (3)$$

Mit (3) in (2) ergibt sich:

$$T_2 = \frac{1}{\frac{R}{Q_{SD}} \cdot \ln \frac{t_{R2}}{t_{R1}} + \frac{1}{T}} = \frac{1}{\frac{8,314}{24 \cdot 10^4} \cdot \ln \frac{0,5}{3} + \frac{1}{873}} [K] = \underline{\underline{923 \text{ K} \approx 650^\circ\text{C}}}$$

3.4 Aushärtung

1. Reaktionstypen:
 - a) Erholung ist die Änderung der Defektanordnung durch Annihilation und Umordnung (Annihilation von Leerstellen zu Versetzungen oder Bildung von Kleinwinkelkorngrenzen aus Versetzungen).
 - b) Entmischung ist die örtliche Änderung der chemischen Zusammensetzung ohne Änderung der Struktur der Grundmasse.
 - c) Umwandlung ist die vollständige Änderung der Struktur.
2. Voraussetzung für die Ausscheidungshärtung ist eine abnehmende Löslichkeit mit abnehmender Temperatur. Im ersten Schritt erfolgt eine Homogenisierungs-(Lösungs-)glühung des α -Mischkristalls bei einer Temperatur von $T = 580^\circ\text{C}$. Nachfolgend wird rasch abgeschreckt, so daß bei Raumtemperatur ein übersättigter Mischkristall α_u vorliegt. Zwischen $20^\circ\text{C} < T < 150^\circ\text{C}$ bildet sich aus dem übersättigten Mischkristall eine zweite stabile Phase β aus (Bild A3.4):



3. Der Beginn der Ausscheidung wird durch die Gleichung

$$t_{AB} = t_0 \exp \left(\frac{\Delta G_K(T) + Q_D}{R \cdot T} \right)$$

beschrieben. Darin ist ΔG_K die temperaturabhängige Aktivierungsenergie für die Keimbildung, die bei T^* unendlich groß ist, aber mit zunehmender Unterkühlung abnimmt ($0 < \Delta G_K < \infty$). Q_D ist die temperaturunabhängige Aktivierungsenergie für Diffusion. Daraus ergibt sich die in Bild A3.5 gezeichnete Form der Kurve:

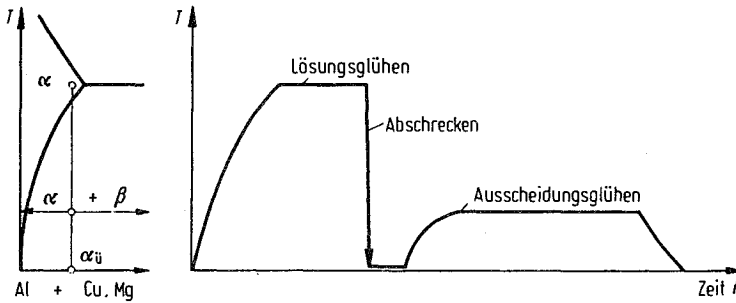


Bild A 3.4

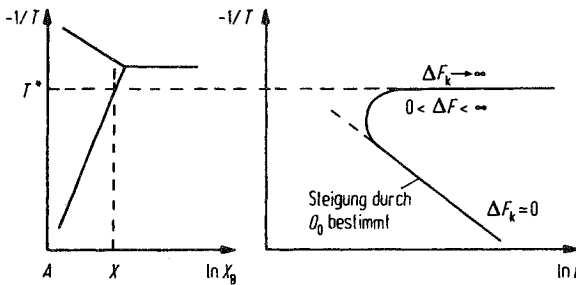


Bild A 3.5

4. Angestrebt wird:
 - Feine Dispersion kohärenter Teilchen in den Körnern.
 - Der Teilchenabstand und die Teilchengröße (Durchmesser) sollten möglichst klein sein.
 Ungünstig ist:
 - Grobe und ungleichmäßige Verteilung der Teilchen.
 - Ausscheidung inkohärenter Teilchen auf den Korngrenzen
5. Die feinste Dispersion entsteht durch homogene Keimbildung, also durch starke Übersättigung und Unterkühlung (Bild A3.6):

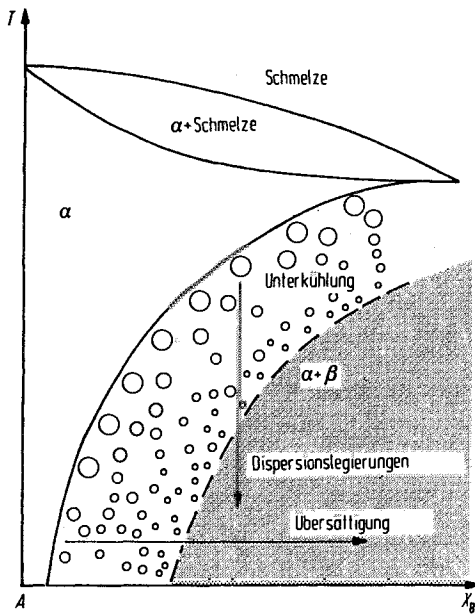


Bild A 3.6

6.

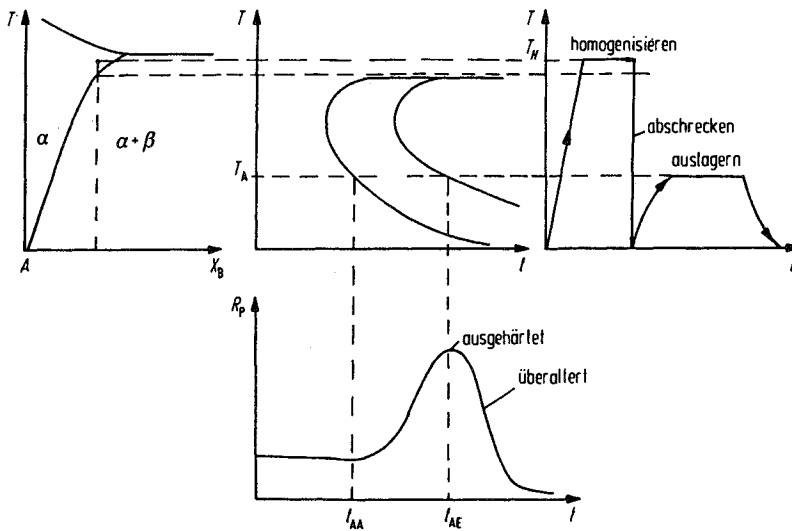


Bild A 3.7

7. Eine thermo-mechanische Behandlung ist eine gezielte Kombination von Kalt- und/oder Warmverformung und anschließenden Umwandlungsvorgängen mit dem Ziel der Festigkeitssteigerung. Durch die Verformung wird dabei im Werkstoff eine hohe Versetzungsdichte induziert. Da an Gitterdefekten (Orte höherer Energie) eine bevorzugte Keimbildung stattfindet, können sich bei der anschließenden Wärmebehandlung Ausscheidungsteilchen oder Martensit sehr fein und homogen verteilt bilden.

Beispiele:

- Beim Austenitformhärten von Stählen wird die Abkühlung im Austenitgebiet unterbrochen, um einen schnellen Umformprozeß (Warmwalzen mit starker Querschnittsabnahme) einzuschieben. Dabei werden viele Versetzungen erzeugt, an denen sich bei der anschließenden weiteren schnellen Abkühlung der Martensit sehr fein verteilt bildet. Dieser Martensit ist allerdings sehr hart und spröde, so daß der Werkstoff noch bei ca. 400 °C angelassen wird. Dabei geht ein Teil der ursprünglichen Härte aufgrund der teilweisen Ausscheidung des übersättigten Kohlenstoffs verloren. Dies wird jedoch durch die gleichzeitige Bildung von fein verteilten Karbiden (Ausscheidungshärtung) ausgeglichen und gleichzeitig eine wesentlich höhere Duktilität erzielt.
 - Bei den martensitaushärtenden Stählen wird zunächst der übersättigte und metastabile Austenit durch Abkühlung umgewandelt. Da diese Stähle fast frei von Kohlenstoff sind, bildet sich nur ein relativ weicher Martensit. Durch die hohe innere plastische Verformung bei der Umwandlung wird jedoch eine hohe Versetzungsdichte erzeugt. In diesem Zustand erfolgt in der Regel die endgültige Formgebung, bei der weitere Versetzungen induziert werden. Anschließend wird der übersättigte Mischkristall zur Ausscheidungshärtung auf Temperaturen um ca. 500 °C gebracht. Dabei bilden sich aus den Legierungselementen Al, Si, Mo, oder/und Ti in Verbindung mit den Elementen der Grundmasse Fe, Ni und Co intermetallische Verbindungen hoher Härte. Keimstellen für diese Teilchen sind wiederum die vorhandenen Versetzungen, die zu einer sehr feinen und homogenen Verteilung der Ausscheidungen führen.
8. - Keimbildung: Die Keimbildung im Innern fester Stoffe wird zum einen durch den Aufbau der neuen Grenzflächen und zum anderen durch die Verzerrung des umgebenden Kristallgitters beeinflusst.
 - Keimwachstum: Bildung von Teilchen aus dem übersättigten Mischkristall bis die Gleichgewichtszusammensetzung der Matrix erreicht ist.
 - Teilchenwachstum (Ostwald-Reifung): Abbau der Konzentrationsgradienten zwischen großen und kleinen Teilchen durch Umlösungsvorgänge. Die Ursache ist eine Verringerung der Summe der Grenzflächenenergie.
 9. Liegen die Gitterabmessungen eng beieinander, so entsteht eine kohärente Grenzfläche (z.B.: Ni-Superlegierungen $\gamma-\gamma'$), andernfalls entsteht eine inkohärente Grenzfläche (z.B.: C in α -Fe). Es gibt Mischfälle, in denen die

Grenzfläche in einer Orientierung kohärent, in der anderen Orientierung inkohärent ist. Solche Ausscheidungen werden als teilkohärent bezeichnet.

3.5 Martensitische Umwandlung

1. - Grundlage der Stahlhärtung (Umwandlung von C-haltigen Fe-Legierungen vom kfz ins trz Gitter).
 - Verschleißfestigkeit von Mn-Hartstahl (Die Oberfläche eines metastabilen Fe-Mn-C Mischkristalls wandelt durch eine Reibschubbeanspruchung in die sehr viel härtere martensitische Phase um).
 - Grundlage des Formgedächtniseffektes in speziellen geordneten bzw. teilweise geordneten Legierungen (reversible martensitische Umwandlung).
2. Die notwendigen und hinreichenden Bedingungen für die Kennzeichnung einer martensitischen Umwandlung sind:
 - eine homogene Gitterverformung, die primär durch eine einfache Scherung erzeugt wird,
 - für die Umwandlung ist Diffusion nicht notwendig, d.h. die Reaktion ist zeitunabhängig,
 - der Volumenanteil des Martensits nimmt mit der Unterkühlung unter M_s zu und ist bei $M_f < M_s$ abgeschlossen (s = start, f = finish).

Konsequenzen der Bestimmung:

Die homogene Gitterverformung resultiert aus einer koordinierten Atombewegung. Dabei wird ein Gittertyp in einen anderen überführt. Makroskopisch ist dies durch die Ausbildung eines Oberflächenreliefs zu beobachten. Bringt man vor der Umwandlung einen Kratzer in die polierte Oberfläche ein, so kann auch noch entschieden werden, ob die homogene Gitterverformung durch eine Volumendilatation oder durch eine Scherung erzeugt ist: bei einer Scherung wird die ursprünglich gerade Linie an der Grenzfläche zum Martensit abgeknickt (siehe Bild A3.8). Da die martensitische Umwandlung diffusionslos verläuft, kann sie erstens auch bei sehr tiefen Temperaturen stattfinden und zweitens verhält sich der Werkstoff thermodynamisch und kinetisch wie ein Einkomponentensystem (keine Änderung der chemischen Zusammensetzung).

3. Bild A3.9 zeigt, wie aus dem γ -Fe der tetragonal verzernte α' -Martensit entsteht: o $\hat{=}$ Fe-Atom, x $\hat{=}$ mögliche Positionen von C-Atomen.
4. Im Freien Energie-Temperatur-Diagramm ist die M_s Temperatur durch die Differenz der freien Energien der beteiligten Phasen α und β bei der Gleichgewichtstemperatur T_0 gegeben. Diese Energiedifferenz ist erforderlich, um

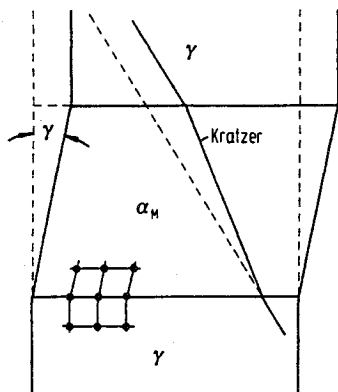


Bild A 3.8

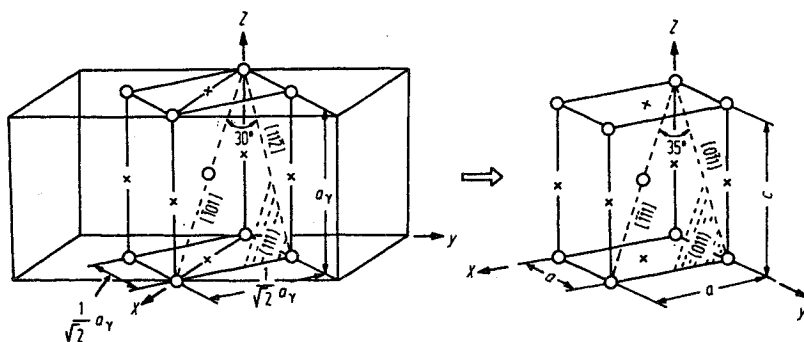


Bild A 3.9

die Umwandlung überhaupt erst in Gang zu bringen, (Keimbildung), (Bild A 3.10).

5. Da die martensitische Umwandlung unabhängig von der Abkühlungsgeschwindigkeit ist (nicht diffusionsgesteuert), erscheinen die Temperaturen des Beginns (M_s) und des Endes (M_f) der Umwandlung im ZTU - Diagramm als horizontale Linien (Bild A 3.11).
6.
 - äußere Schubspannung,
 - hydrostatischer Druck,
 - Legierungsgehalt,
 - innere Spannungsfelder,
 - Korngröße,
 - Ausscheidungsteilchen einer zweiten Phase.

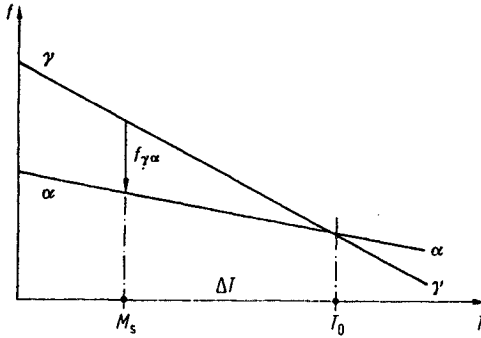


Bild A 3.10

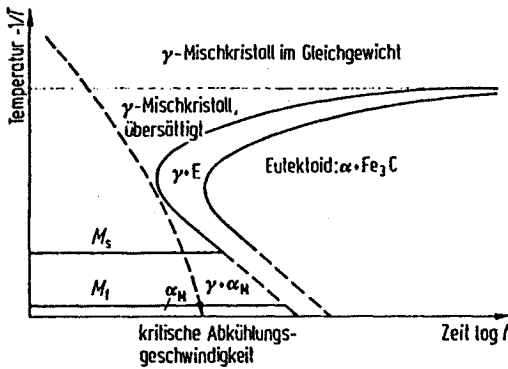


Bild A 3.11

7. Es muß einen Betrag $\Delta T = T_0 - M_s$ unter die Gleichgewichtstemperatur unterkühlt werden um die Energie, die für die Bildung neuer Grenzflächen sowie für die innere plastische Verformung (Gitterscherung) benötigt wird bereitzustellen.
8. - Die M_s Temperatur von austenitischen Stählen muß weit unter Raumtemperatur liegen, damit der im Prinzip metastabile Austenit nicht im Gebrauch umwandelt.
- Die Abkühlung muß schneller als mit der kritischen Abkühlgeschwindigkeit vorgenommen werden, um thermisch aktivierte Reaktionen zu vermeiden (Perlit).
9. M_s = Martensitstart-Temperatur $\rightarrow V_{\text{Mart.}} = 0\%$
 M_f = Martensitende ("finish")-Temperatur $\rightarrow V_{\text{Mart.}} = 100\%$
 A_s = Austenitstart-Temperatur $\rightarrow V_{\text{Mart.}} = 100\%$
 A_f = Austenitende ("finish")-Temperatur $\rightarrow V_{\text{Mart.}} = 0\%$

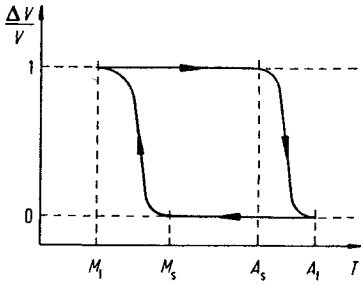


Bild A 3.12

10. Das in Bild F 3.4 gezeigte Gefüge ist ein martensitisches. Wird γ -Fe (Bild A 3.13) ausreichend schnell bis unterhalb der Martensit-Start-Temperatur abgekühlt, so beginnt die martensitische Umwandlung. Es bildet sich die erste Generation von Martensitnadeln, die größten in dem Bild F 3.4. Bei weiterer Abkühlung schreitet die Umwandlung voran und es entstehen weitere Generationen von Nadeln, zu erkennen an ihrer abnehmenden Größe. Das Bild F 3.4 enthält drei Generationen Martensitnadeln.

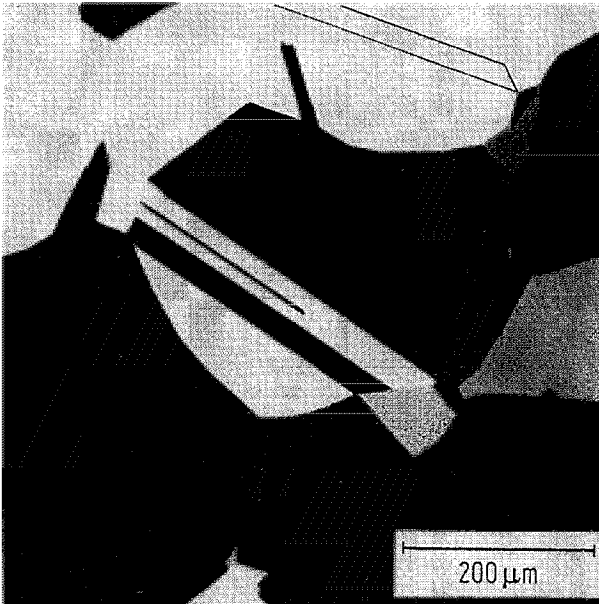


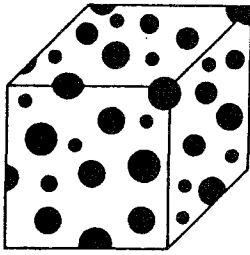
Bild A 3.13

3.6 Wärmebehandlung und Fertigung

	absichtlich	unabsichtlich
1a) Fertigung	Zwischenglühen beim Kaltwalzen	Wärmeeinflußzone beim Schweißen
1b) Gebrauch	Ausscheidungshärtung von Aluminium-Legierungen	Reiberwärmung von Lageroberflächen -

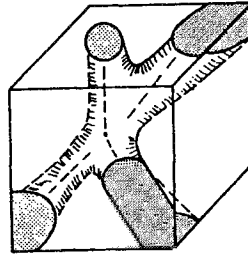
	absichtlich	unabsichtlich
2a) Fertigung	Weichglühung zur Verringerung der Walzkraft und Wiederherstellung der Verformbarkeit	unerwünschtes Anlassen, was zur Härtung (Sprödigkeit) oder Weichglühen führen kann
2b) Gebrauch	Erhöhung der Streckgrenze für Betriebsbeanspruchung	trockener Lauf von Gleitlagern, dadurch Weichglühen bis zum Aufschmelzen der Oberfläche

3.
 - Herstellung eines Sinterkörpers durch die Reaktion der Oberfläche zu Grenzflächen,
 - Warmwalzen oder Zwischenglühen beim Kaltwalzen, wobei dynamische oder normale Rekristallisation auftritt,
 - Verbindung von zwei Bauteilen durch Diffusions- oder Reibschweißen,
 - Einsatz-, Nitrier-, Borierhärtung von Stahl, zur Erzeugung harter Oberflächenschichten.
4.
 - Dispersionsgefüge: die zweite Phase ist in der ersten dispergiert,
 - Zellgefüge: z.B. bei Ausscheidungen auf den Korngrenzen,
 - Netzgefüge: Zwei Phasen nebeneinander bilden je ein Netz, z.B. Duplexstähle.



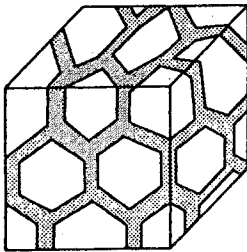
$$0 < f_p < 1$$

Dispersionsgefüge



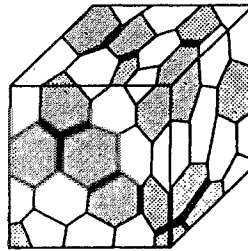
$$0 < f_p < 1$$

Netzgefüge



$$0 < f_p < 1$$

Zellgefüge



$$f_\alpha = f_p = 0,5$$

Duplexgefüge

Bild A 3. 14

4 Mechanische Eigenschaften

4.1 Arten von Beanspruchungen

- 1.a) Stahlseil: statische einachsige Zugbeanspruchung und überlagerte kleine Schwingungsamplituden (Zugschwellbelastung).
 - b) Rotorblatt: Zentrifugalkräfte beim Rotieren erzeugen Zugbeanspruchung (maximale Zugspannung an der Blatteinspannung) und schwingende Zug-/Druckbeanspruchung. Im Stand biegen sich die Rotorblätter unter ihrem Eigengewicht durch und erzeugen Biegespannungen (Oberseite Zugspannungen, Unterseite Druckspannungen) und Reiberermüdung an der Befestigung der Blätter.
 - c) Gleitlagerschalen: Druck aus dem Eigengewicht der Welle und Schubspannungen aus Reibungskräften.
 - d) Generatorwelle: statische Biegebeanspruchungen und umlaufende Zug-/Druckbeanspruchungen infolge der Durchbiegung der Welle und Reibung im Lager.
 - e) Hüllrohr: Strahlungsbeanspruchung durch Neutronen, statische Zugspannung aus dem Eigengewicht bei erhöhter Temperatur (Kriechbeanspruchung); durch Temperaturzyklen entsteht zusätzlich eine thermische Ermüdungsbeanspruchung. Außerdem sind noch (chemische) Beanspruchungen durch Brennstoff und Umgebung vorhanden.
 - f) Gasturbinenschaufel: Der Zugbeanspruchung infolge der Rotation sind Schwingungen (Zug-/Druck-Wechselbeanspruchung) überlagert. Diese Beanspruchungen treten bei sehr hohen Temperaturen auf, so daß noch Kriechen und Heißgaskorrosion hinzukommen.
- 2.a) Werkzeugschneide (Drehmeißel, Fräser): Schubspannungen bei erhöhter Temperatur infolge Reibung.
 - b) Walzen beim Kaltwalzen: ein mit zunehmender Verformung verfestigender Werkstoff übt eine Biegespannung auf die Walze aus;
Walzen beim Warmwalzen: der Werkstoff verhält sich nahezu ideal plastisch (keine Verfestigung), so daß die mechanische Beanspruchung geringer ist. Der Walzenwerkstoff muß härter sein als der gewalzte Werkstoff.

- c) Draht beim Ziehen: der radialen Druckspannung im Werkzeug ist eine Zugspannung beim Austritt überlagert.
- d) Tiefziehen: Kombination aus Biegen, einachsigem Recken und zweiachsigem Zug (im Boden). Reibung zwischen Werkzeug und verarbeitetem Werkstoff.
Streckziehen: wie beim Tiefziehen, jedoch sind die Enden des Werkstücks eingespannt, so daß eine weitere Verformung in Dickenrichtung auftritt.

4.2 Elastizität

- 1.a) Lineare Elastizität ist eine reversible Verformung, die nach dem Hook'schen Gesetz linear von der Spannung abhängt ($\sigma = E \cdot \epsilon$).
- b) Gummielastizität ist eine nichtlineare reversible elastische Verformung in verknäuelten und vernetzten Polymeren. Nichtlinear ist auch die Elastizität von Gusseisen mit lamellarem Graphit.
- c) Viskoelastizität ist eine zeitabhängige reversible Verformung.
- d) Als Elastizitätsgrenze wird im Spannungs-Dehnungs-Diagramm diejenige Spannung bezeichnet, bei der die erste plastische Verformung auftritt. Sie hängt von der Meßgenauigkeit ab: z.B. $R_{p0,01}$ (0,01% bleibende Dehnung wurde gemessen).

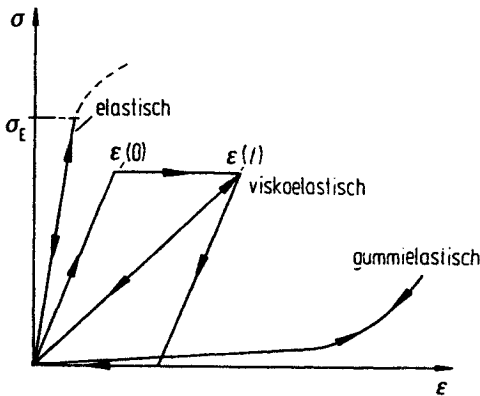


Bild A 4.1

2.

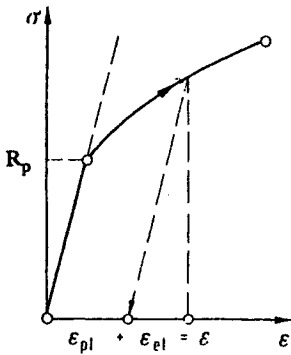


Bild A 4.2

a)

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

$$\epsilon_{xel} = \frac{\sigma}{E} = \frac{300 \text{ MPa}}{72.000 \text{ MPa}} = 0,0042 \quad (1)$$

für isotrope elastische Dehnung gilt:

$$\epsilon_{zel} = \epsilon_{yel} = -\nu_{el} \epsilon_{xel} \quad (2)$$

$$\epsilon_{zel} = \epsilon_{yel} = -0,34 \cdot 0,0042 = -0,0014$$

b)

$$\epsilon_{ges} = \epsilon_{el} + \epsilon_{pl} \quad (3)$$

$$\epsilon_{zges} = \epsilon_{yges} = -\nu_{ges} \epsilon_{xges} \quad (4)$$

$$\epsilon_{yges} = \epsilon_{yel} - \epsilon_{ypl} \quad (4.1)$$

$$\epsilon_{yel} \text{ (siehe Gl. (2))}$$

Für plastische Verformung gilt $\nu_{pl} = 0,5$, da $\Delta V/V = 0$:

$$\epsilon_{ypl} = -0,5 \epsilon_{xpl} \quad (5)$$

$$\epsilon_{xpl} = \epsilon_{xges} - \epsilon_{xel} = \epsilon_{xges} - \frac{\sigma}{E} \quad (6)$$

Aus Gl. (6) folgt:

$$\nu_{ges} = 0,5 - (0,5 - \nu_{el}) \frac{\sigma}{E} \cdot \varepsilon_{xges} \quad (7)$$

$$\varepsilon_{xges} = \varepsilon_{xel} - \varepsilon_{xpl} = 0,0042 + 0,002 = 0,0062$$

$$\nu_{ges} = 0,5 - (0,5 - 0,34) \frac{300}{72.000 \cdot 0,0062} = 0,39$$

$$\varepsilon_{yges} - \nu_{ges} \varepsilon_{xges} = -0,39 \cdot 0,0062 = 0,0024$$

3. In der Technik werden vier Konstanten benutzt, die nicht unabhängig voneinander sind:

E-Modul (Elastizitätsmodul):

$$E = \sigma / \varepsilon \text{ [MPa]}$$

G-Modul (Schubmodul):

$$G = \tau / \gamma \text{ [MPa]}$$

K-Modul (Kompressionsmodul):

$$K = - \rho / \Delta V / V \text{ [MPa]}$$

ν (Querkontraktionszahl, Poissonsche Zahl): $\nu = \varepsilon_{quer} / \varepsilon_{längs}$

Abhängigkeit der Konstanten untereinander:

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}, \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad \frac{E}{G} = \frac{9}{3+(G/K)}$$

Für die Beschreibung eines isotropen Werkstoffes sind nur zwei dieser Konstanten notwendig.

- 4.a) parallel:

$$\sigma_1 > 0, \quad \sigma_2 = 0$$

$$\varepsilon_\alpha = \varepsilon_\beta, \quad \sigma_\alpha \neq \sigma_\beta, \quad (\text{bei guter Haftung})$$

$$E_{II} = \frac{\sigma_\alpha}{\varepsilon_\alpha} \cdot f_\alpha + \frac{\sigma_\beta}{\varepsilon_\beta} \cdot f_\beta$$

$$\underline{\underline{E_{II} = E_\alpha f_\alpha + E_\beta f_\beta = 50 \cdot 10^4 \cdot 0,2 + 50 \cdot 10^2 (1 - 0,2) = 10,4 \cdot 10^4 \text{ MPa}}}$$

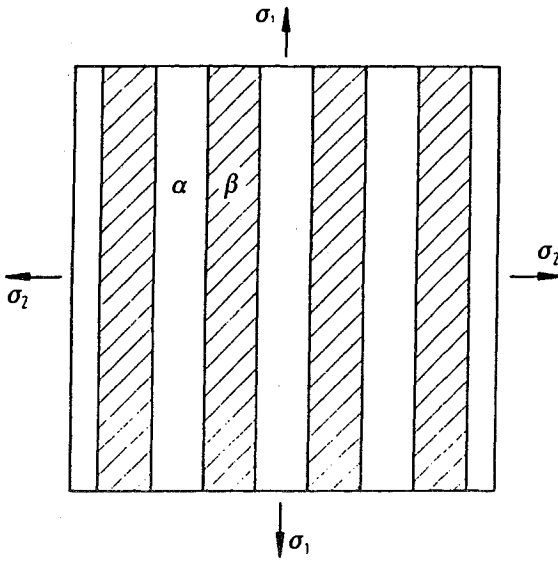


Bild A 4.3

b) quer:

$$\sigma_1 = 0, \quad \sigma_2 > 0$$

$$\varepsilon_\alpha \neq \varepsilon_\beta, \quad \sigma_\alpha = \sigma_\beta$$

$$\frac{1}{E_\perp} = \frac{\varepsilon_\alpha}{\sigma_\alpha} \cdot f_\alpha + \frac{\varepsilon_\beta}{\sigma_\beta} \cdot f_\beta$$

$$E_\perp = \frac{E_\alpha + E_\beta}{E_\alpha f_\alpha + E_\beta f_\beta}$$

$$\underline{\underline{E_\perp = \frac{50 \cdot 10^4 + 50 \cdot 10^2}{50 \cdot 10^4 \cdot 0,8 + 50 \cdot 10^2 \cdot 0,2} = 6,2 \cdot 10^3 \text{ MPa}}}$$

5. Bedingt durch den weichen lamellenförmigen Graphit, der wie kleine Risse wirkt, zeigt das graue Gußeisen kein linearelastisches Verhalten. Der E-Modul nimmt mit zunehmender Spannung ab (Bild A4.4) und wird auch so tabelliert.

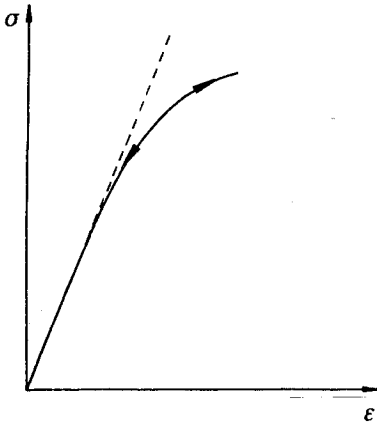


Bild A 4.4

4.3 Formänderungen

1. Verformung geschieht durch Abgleiten der dichtest gepackten Ebenen. Dementsprechend sind die dichtest gepackten Richtungen auch die Kristallrichtungen, in denen das Abgleiten geschieht. Die plastische Verformung findet in der Regel nicht durch das Verschieben ganzer Ebenen aufeinander statt. Vielmehr wird die Abgleitung hier durch die Bewegung von Versetzungen realisiert. Die Atome der gesamten Ebene brauchen sich dabei nicht gleichzeitig zu bewegen, sondern können dies nacheinander (jeweils um den Betrag des Burgersvektors b) tun.
2. Bis zur Gleichmaßdehnung läßt sich die wahre Verformung φ aus der nominalen ϵ berechnen:

$$\varphi = \ln(1+\epsilon)$$

Tabelle:

ε [%]	ϕ [%]	Abweichung $1-\phi/\varepsilon \cdot 100$ [%]
5,0	4,879	2,42
4,0	3,922	1,92
3,0	2,956	1,47
2,5	2,469	1,23
2,4	2,372	1,18
2,3	2,274	1,13
2,2	2,176	1,08
2,1	2,078	1,04
2,0	1,980	0,99
1,0	0,995	0,50

Für $\varepsilon \leq 2 \%$ ist der Fehler $< 1 \%$.

3. Für den einachsigen Spannungszustand ($\sigma_z \neq 0$) und Isotropie gilt:

$$\varepsilon_{vol} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \quad (1)$$

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = -\nu \varepsilon_z \quad (2)$$

aus (1) und (2):

$$\varepsilon_{vol} = \varepsilon_z - \nu \varepsilon_z - \nu \varepsilon_z = (1 - 2\nu) \varepsilon_z$$

$$\varepsilon_z = \sigma_z / E$$

$$\underline{\underline{\varepsilon_{vol} = (1 - 2\nu) \frac{\sigma_z}{E} = (1 - 2 \cdot 0,33) \frac{0,8 \cdot 300}{215 \cdot 10^3} = 3,8 \cdot 10^{-4} \hat{=} 0,038\%}}$$

4. Bei plastischer Verformung tritt keine Volumenänderung auf: die Querkontraktionszahl ist 0,5. Bei elastischer Verformung tritt eine Volumenänderung auf, für die Querkontraktionszahl heißt das: $0 < \nu < 0,5$.

5. Die Volumenänderung bei plastischer Verformung ist nahezu gleich Null, so daß $v = 0,5$ wird.

$$\varepsilon_{vol} = 0 = \varphi_x + \varphi_y + \varphi_z$$

$$\Rightarrow \varphi_x - 0,5 \varphi_y - 0,5 \varphi_z = 0$$

- 6.a) Eine elastische Verformung ist eine reversible Verformung, d.h. daß sich nach der Entlastung die Ausgangslänge (Volumen) wieder einstellt.
 b) Eine plastische Verformung ist eine bleibende Verformung:

$$\varepsilon_{ges} (\sigma > 0) = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl}$$

$$\varepsilon_{ges} (\sigma = 0) = \varepsilon_{pl}$$

- c) Gleichmaßdehnung liegt vor, wenn die plastische Verformung gleichmäßig über die Probenlänge verteilt ist (keine Einschnürung).
 d) Die Bruchdehnung A ist die Gesamtdehnung (Gleichmaß- + Einschnürdehnung) bis zum Bruch.
 e) Die Brucheinschnürung Z berechnet sich aus der Differenz der Querschnittsflächen vor (S_0) und nach dem Bruch (S_B):

$$Z = \frac{S_0 - S_B}{S_0} = \frac{\Delta S_B}{S_0}$$

7. Der ebene Dehnungszustand ist dadurch definiert, daß in eine Richtung keine Verformung auftritt. Entsprechendes gilt für den ebenen Spannungszustand; hier ist in einer Richtung die Belastung gleich null.
8. - Isotrop: nur Volumenänderung.
 - Anisotrop: Volumen- und Formänderung.
9. Kriechen: Das Kriechen ist ein thermisch aktivierter Prozeß, bei dem sich ein Werkstoff bei höheren Temperaturen plastisch verformt. Dieser Vorgang ist nicht nur von der äußeren Spannung und der Temperatur, sondern auch von der Zeit abhängig. Die Grundvorgänge sind das Klettern von Versetzungen und das Abgleiten von Korngrenzen. Ohne thermische Aktivierung können sich die Versetzungen nur in Richtung ihres Burgersvektors bewegen, beim Kriechen jedoch auch senkrecht dazu.
Superplastizität: Beim superplastischen Umformen wird eine zeitabhängige Warmverformung absichtlich herbeigeführt. Man strebt dabei ein mechanisches Verhalten ähnlich den viskos fließenden Flüssigkeiten an. Der Werkstoff soll ohne einzuschnüren sehr hohe Verformungsgrade und Formänderungen erlauben. Mikrostrukturelle Bedingungen für ein superplastisches Verhalten sind eine kleine Korngröße sowie eine möglichst globulare Korn-

form. Darüber hinaus darf das Gefüge keine Dispersion von Teilchen enthalten, die die Versetzungsbewegung behindern könnten.

10. - Stoffe mit hoher Schmelztemperatur verwenden.
- Durch Legieren den Diffusionskoeffizienten erniedrigen.
- Grobes Korn (d.h. wenig Korngrenzen), möglichst Einkristall, eventuell ausgerichtete Korngrenzen.
- Behinderung der Versetzungsbewegung, insbesondere des Quergleitens, durch Einbringen einer zweiten Phase (Ausscheidungshärtung), die sich bei Betriebstemperatur jedoch nicht auflösen sollte.

4.4 Zugversuch

1.

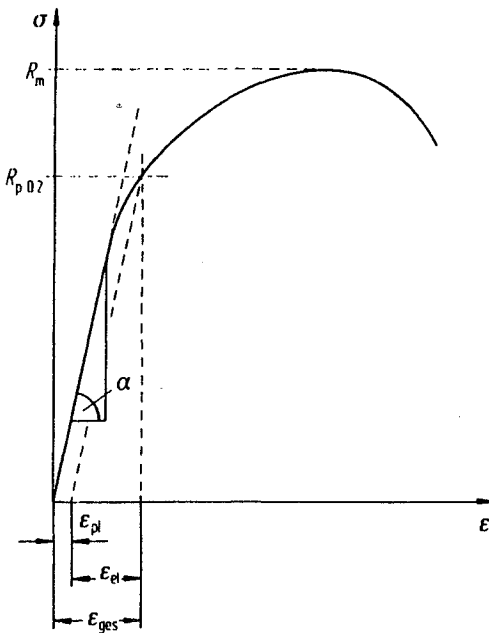


Bild A 4.5

$$a) E = \sigma / \epsilon_{el} = \tan \alpha \quad (1)$$

$$b) \nu = \epsilon_{quer} / \epsilon_{längs} \quad (2)$$

- c) Die Streckgrenze ist diejenige Spannung, ab der die erste plastische Verformung auftritt. In der Praxis wird eine meßbare plastische Verformung, z.B. 0,2 % zur Spannungsmessung, festgelegt: $R_{p0,2}$ -Grenze.
- d) Die Zugfestigkeit R_m ist im (ingenieurmäßigen) Spannungs - Dehnungs - diagramm die maximale Spannung.
2. Für einen verfestigenden Werkstoff nimmt ab der Streckgrenze die notwendige Kraft zur weiteren Verformung zu. Demgegenüber steht eine Querschnittsabnahme, die die aufzubringende Kraft verringert. Die maximale Kraft F_{max} tritt bei der Gleichmaßdehnung A_g auf, wo die Änderung der Zugkraft durch Verfestigung durch diejenige der Querschnittsabnahme kompensiert wird: $dF = 0$

$$F = \sigma \cdot S \text{ [N]} \quad (3)$$

$$dF = \sigma dS + Sd\sigma = 0 \quad (4)$$

$$D\sigma / \sigma = -ds / s \quad (5)$$

Für plastische Formänderungen von inkompressiblen Stoffen gilt:
 $\Delta V/V \dot{=} 0$, so daß

$$V = S \cdot l \quad (6)$$

$$dV = Sdl + ldS = 0 \quad (7)$$

$$-ds / s = dl / l \quad (8)$$

und aus (5) und (8) folgt:

$$d\sigma/\sigma = dl/l = d\varphi \quad (9)$$

$$d\sigma / d\varphi = \sigma \quad (10)$$

$d\sigma/d\varphi$ wird als Verfestigungskoeffizient bezeichnet, der bei F_{max} gleich der wahren Spannung σ_w ist und den Einschnürbeginn kennzeichnet.

3.a) siehe Aufgabe 2

Da für die Nenndehnung ϵ und der wahren Verformung φ der Zusammenhang (bis zur Einschnürung)

$$\varphi = \ln(1 + \epsilon) \quad (11)$$

$$d\varphi = d\epsilon / (1 + \epsilon) \quad (12)$$

gilt, kann der Verfestigungskoeffizient auch aus einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm bestimmt werden, (10) und (12):

$$d\sigma/d\epsilon = \sigma / (1 + \epsilon) \quad (13)$$

- b) Die wahre Spannungs-Dehnungs-Kurve kann nach einem empirischen Ansatz, wie folgt, beschrieben werden:

$$\sigma = K\varphi^n \quad (14)$$

wobei n der Verfestigungsexponent ist.

Gl. (14), nach der Verformung differenziert, liefert

$$d\sigma/d\varphi = nK\varphi^{n-1}, \quad (15)$$

so daß für die Höchstkraftbedingung ($dF = 0$) aus (10) und (15) folgt:

$$nK\varphi^{n-1} = K\varphi^n \quad (16)$$

$$n = \varphi \quad (17)$$

D.h., daß die wahre Verformung φ ($dF = 0$) beim Einschnürbeginn gleich dem Verfestigungsexponenten wird.

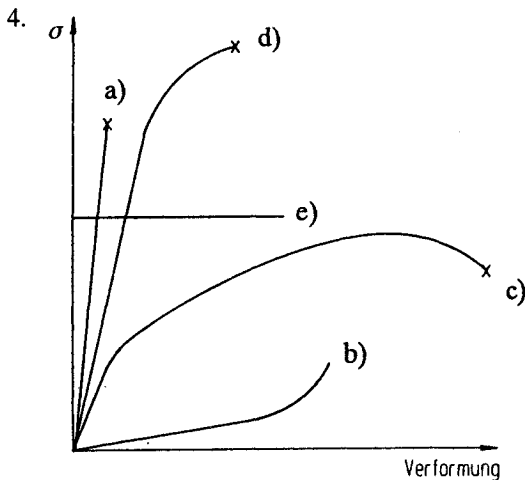


Bild A 4.6

- a) ideal spröde + linear elastisch, z.B. Glas
- b) spröde + nicht linear elastisch, z.B. Gummi
- c) niedrige Streckgrenze + starke Verfestigung, z.B. Tiefziehwerkstoffe
- d) hohe Streckgrenze + wenig Verfestigung, z.B. ausgehärtete Al-Legierung
- e) ideal plastisch, z.B. Werkstoffe beim Warmwalzen.

- 5.a) Aufgrund des E-Moduls und der gegebenen Festigkeiten folgt, dass der geprüfte Werkstoff ein Stahl, z.B. aus der Gruppe der Vergütungsstähle (42 CrMo 4), ist.

$$b) E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{R_e}{\varepsilon_{el}}$$

$$\Rightarrow \underline{\underline{\varepsilon_{el} = \frac{R_e}{E} = \frac{750 \text{ MPa}}{210.000 \text{ MPa} = 0,00357 \hat{=} 0,357 \%}}$$

- c) Der Wert A_5 ist die Bruchdehnung, angegeben in Prozent, gemessen an einem kurzen Proportionalitätsstab ($l_0 = 5 d_0$).
- d) Ab der Gleichmaßdehnung ε_g beginnt die Probe einzuschnüren.
- e) Die Probe hat eine bleibende Längenänderung erfahren, sie geht nicht mehr in ihren Ausgangszustand zurück. Eine Einschnürung hat jedoch noch nicht stattgefunden.
- f) Die Probe hat eine höhere Elastizitätsgrenze, da der Werkstoff durch die bleibende Verformung verfestigt wurde.

4.5 Härtungsmechanismen

1.

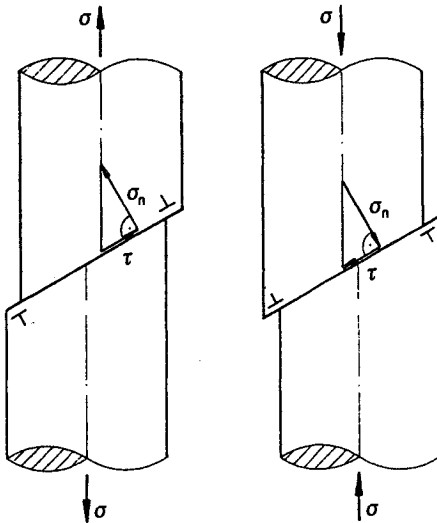


Bild A 4.7

- 2. Die diskontinuierliche Streckgrenze von kohlenstoffarmen Stählen ist auf eine Blockierung der Versetzungen durch C- und N-Atome zurückzuführen. Unter Spannung wandern sie in das Zugspannungsfeld der Versetzung (Cottrell-Wolken), so daß eine erhöhte Spannung zum Losreißen von diesen Fremdatom-Wolken notwendig ist, (Bild A4.8):

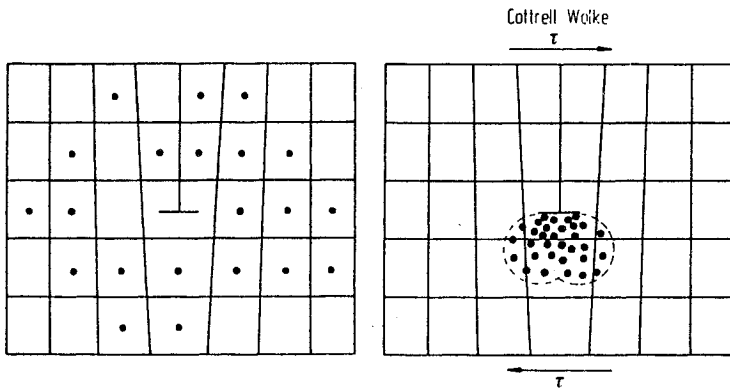


Bild A 4.8

3.

Dimension	Hindernis	Mechanismus
0	gelöste Atome	$\Delta\sigma_M$: Mischkristallhärtung
1	Versetzungen	$\Delta\sigma_V$: Kaltverfestigung
2	Korngrenzen	$\Delta\sigma_{KG}$: Feinkornhärtung
3	Ausscheidungen	$\Delta\sigma_P$: Ausscheidungshärtung, Dispersionshärtung
-	Kristallanisotropie	Texturhärtung
-	Gefügeanisotropie	Faserverstärkung

4. Nach Orowan gilt:

$$\Delta\sigma \approx 3\Delta\tau \quad \text{Erhöhung der Streckgrenze}$$

$$\Delta\tau = (G \cdot b)/D_T \quad \text{Erhöhung der Schubspannung}$$

mit:

 b = Burgersvektor D_T = Teilchenabstand

$$\underline{\underline{\Delta \tau_T \leq \frac{28 \cdot 10^3 \cdot 0,4 \cdot 10^{-9}}{0,2 \cdot 10^{-6}} = 56 \text{ MPa}}}}$$

5. - τ_{th} ist die Spannung, die die Verschiebung der Atome im perfekten Kristall bewirkt.

$$\tau_{th} \approx \frac{G}{30} \approx \frac{G \cdot b}{2\pi \cdot a}$$

mit

$G \hat{=}$ Schubmodul

$B \hat{=}$ Burgersvektor

$a \hat{=}$ Gitterkonstante.

- σ_{th} ist die Spannung, die zum Trennen zweier Ebenen des perfekten Gitters notwendig ist.

$$\sigma_{th} \approx 3 \cdot \tau_{th} \quad \text{oder} \quad \sigma_{th} \approx E/10$$

mit

$E \hat{=}$ Elastizitätsmodul.

6. Perfektes Kristallgitter ohne Gitterbaufehler (Beispiel: perfekter Einkristall oder Fadeneinkristalle (Whisker)).
7. - Zahl der Gleitsysteme,
- Art und Richtung der wirkenden Spannung,
- Anzahl der Hindernisse für die Bewegung von Versetzungen

4.6 Kerbschlagarbeit, Bruchzähigkeit

1.a)

$$A = m \cdot g (H - h) \text{ [J]} \quad (1)$$

m = Masse des Hammers

g = Erdbeschleunigung

H = Höhe des Hammers vor dem Versuch

h = Höhe des Hammers nach dem Versuch

- b) Je größer die plastische Verformung beim Durchschlagen der Kerbschlagbiegeprobe ist, desto größer ist die verbrauchte Kerbschlagarbeit. Eine niedrige Kerbschlagarbeit ist daher Indiz für einen makroskopisch verformungslosen Bruch, d. h. sprödes Bruchverhalten, während eine hohe verbrauchte Schlagarbeit ein duktils Bruchverhalten anzeigt.

2. Zur
- Feststellung, ob Werkstoffe einen Steilabfall der Kerbschlagarbeit mit der Temperatur zeigen, wie z.B. krz-Stähle und Kunststoffe (Tieftemperaturversprödung);
 - Prüfung der Anlaßversprödung von Stählen,
 - Festlegung der unteren Verwendungstemperatur eines Werkstoffs.
3. Der Kerbschlagbiegeversuch wird zur Prüfung des Sprödbbruchverhaltens von metallischen und polymeren Werkstoffen eingesetzt. Der eingebrachte Kerb wirkt sprödbbruchfördernd, stellt also eine Verschärfung der Versuchsbedingungen dar. Im Kerbgrund wird bei Belastung im Versuch zum einen ein mehrachsiger Spannungszustand aufgebaut. Gleichzeitig sorgt der verminderte Kerbquerschnitt für ein sehr kleines Verformungsvolumen. Mit der damit verbundenen Konzentration der Verformung wird eine hohe örtliche Verformungsgeschwindigkeit erzielt. Eine weitere Verschärfung stellt die Absenkung der Versuchstemperatur dar. Mit niedrigerer Temperatur steigt der Gleitwiderstand (also der Widerstand gegen plastische Verformung) an. Mit der Variation der Versuchstemperatur erhält man nach der Auswertung der Versuche deutliche Hinweise auf eine evtl. vorhandene Übergangstemperatur. Hierbei wechselt das Bruchverhalten in einem sehr kleinen Temperaturbereich von einem zähen zu einem spröden Versagensmechanismus.
- 4.a) Die Bruchzähigkeit ist der Widerstand eines Werkstoffs gegen Rißausbreitung. Quantitativ bestimmt ist sie durch die kritische Spannungsintensität K_{IC} .
- b) mit:
- σ = äußere Belastung (Normalspannung),
 - a = Rißlänge (Fehlergröße),
 - Y = Geometriefunktion, abhängig von der Probenform:

$$K = \sigma \sqrt{\pi \cdot a} \cdot Y \left(\frac{a}{b} \right) \quad (2)$$

Die Spannungsintensität K ist ein Maß für den Anstieg der Spannungsüberhöhung, infolge eines Risses der Länge a .

Bild A4.9 zeigt eine unendlich ausgedehnte Scheibe mit äußerer Spannung σ_a und den schematischen Verlauf des Spannungsanstieges gegen die Rißspitze.

- c) K_{IC} -Versuche werden mit servohydraulischen Prüfmaschinen durchgeführt. Gesteuert wird die Belastungsgeschwindigkeit und aufgezeichnet wird die Kraft F über der Rißaufweitung v . Als Probenform standardisiert sind die Kompaktprobe (CT = "compact tension"), die Dreipunktbiegeprobe und die C-Probe.

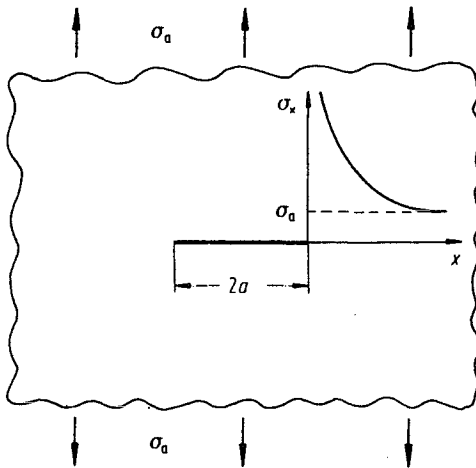


Bild A 4.9

Versuchsdurchführung: In die Proben wird zunächst durch schwingende Beanspruchung ein scharfer Ermüdungsriß eingebracht und dann mit konstanter Kraftanstiegsgeschwindigkeit zu Bruch gefahren.

- d) Das Diagramm (s. Aufgabenstellung) zeigt, daß die Probe ohne merkliche plastische Verformung bricht. Die kritische Kraft F_c ist daher unmittelbar identisch mit der Maximalkraft $F_{\max} = 17,2 \text{ N}$. Damit sind alle erforderlichen Werte bekannt und die Spannungsintensität berechnet sich mit der angegebenen Formel zu:

$$K = 1822 \text{ Nmm}^{-3/2} \hat{=} 57,63 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

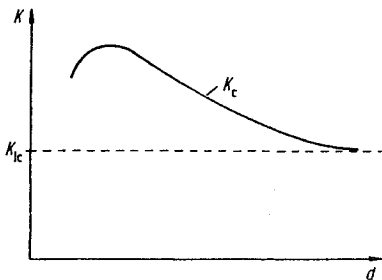


Bild A 4.10

Bezüglich der Dicke d der Probe ist $K_I = K_{lc}$, wenn gilt:

$$d \geq 2,5 \left(K_I / R_{p0,2} \right)^2 \quad (3)$$

$$d \geq 2,5 (1822/1460)^2 = 3,89 \text{ mm}$$

$$\underline{d = 12,57 \text{ mm}} \Rightarrow K = K_{ic} \Rightarrow \text{Werkstoffkennwert}$$

4. Ausgangspunkt ist eine unendlich ausgedehnte Scheibe (Bild A4.11) mit der Einheitsdicke $t = 1 \text{ [m]}$, die in der y -Richtung mit einer äußeren Spannung σ belastet wird.

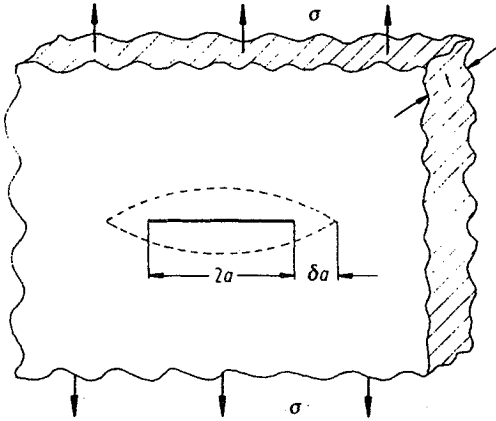


Bild A 4.11

Wird in diese Scheibe ein Riß der Länge $2a$ eingebracht, so ändert sich die potentielle Energie der Scheibe:

$$U = U_{e10} - U_{el} + U_{\gamma} \quad (4)$$

wobei $+U_{\gamma}$ die aufzubringende Oberflächenenergie für die zwei Rißflächen ist und $-U_{el}$ die freiwerdende Verzerrungs- oder Verformungsenergie darstellt. U_{e10} ist die potentielle Energie der Scheibe vor dem Anriß. Die Oberflächenenergie berechnet sich aus der Fläche der beiden Rißufer ($A = 2 \cdot 2a \cdot t$) und der spezifischen Oberflächenenergie γ_o :

$$U_{\gamma} = 2 \cdot 2a \cdot t \cdot \gamma_o = 4a\gamma_o \cdot t \text{ [J/m}^2\text{]} \quad (5)$$

Die freiwerdende Verzerrungsenergie läßt sich experimentell bestimmen und wurde von Griffith für den Fall eines ebenen Spannungszustandes in der Scheibe berechnet.

$$U_{el} = -\frac{\sigma^2 \pi a^2 \cdot t}{E} \text{ [Jm}^2\text{]} \quad (6)$$

(ebener Dehnungszustand: $U_{el} = -\frac{\sigma^2 \pi a^2 t (1-\gamma)}{E}$)

Die potentielle Energie der Scheibe ist daher

$$U_{e10} = E_{e10} - \frac{\pi a^2 t \sigma^2}{E} + 4 a t \gamma_0 \quad (7)$$

(da U_{e10} die potentielle Energie der Scheibe ohne Riß ist, hängt sie auch nicht von der Rißlänge ab)
und für $dU/da = 0$ wird ein Maximum durchlaufen (siehe Bild A4.12), da die 2. Ableitung

$$\frac{d^2U}{da^2} = -\frac{2\pi t \sigma^2}{E} \quad (8)$$

stets kleiner Null ist.

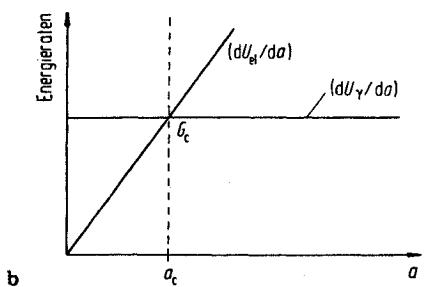
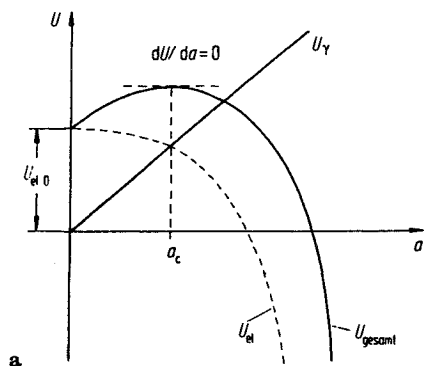


Bild A 4.12

Da für $dU/da = 0$ gilt:

$$\frac{\pi a \sigma^2}{E} = 2\gamma_0 \quad (9)$$

tritt instabiles Rißwachstum ein, wenn

$$\frac{\pi \cdot a \cdot \sigma^2}{E} \geq \gamma_0$$

ist, oder umgeschrieben:

$$\sigma \geq \sqrt{\frac{2E\gamma_0}{\pi \cdot a}} \quad (10)$$

Dies ist eine der wichtigsten Gleichungen der Bruchforschung, denn sie stellt einen Zusammenhang zwischen einer äußeren Belastung und einer Rißgröße über Werkstoffkennwerte (E-Modul, γ_0) her. Für eine gegebene Rißlänge a läßt sich mit Gl. (10) eine kritische Spannung σ_c berechnen, so daß für $\sigma \geq \sigma_c$ instabile Rißausbreitung auftritt.

Anmerkung: Für praktische Berechnungen muß die Gl. (10) durch Geometriefunktionen noch modifiziert werden, die die endlichen Abmessungen von Proben berücksichtigen, sowie durch einen zusätzlichen Energieterm für die an der Rißspitze immer auftretende plastische Verformung γ_{pl} .

Als Energiefreisetzungsrate oder Rißausbreitungskraft G (engl.: "elastic energy release rate" oder "crack driving force") wird die durch eine infinitesimale Rißverlängerung dort freiwerdende elastische Verformungsenergie definiert:

$$-\left(\frac{dU_{el}}{da}\right) = \frac{2\pi\sigma^2 a}{E} = G \quad \left[\frac{MN}{m}\right] \quad (11)$$

Von besonderem Interesse ist die kritische Energiefreisetzungsrate G_c , da für $G \geq G_c$ instabiles Rißwachstum einsetzt. $G = G_c$, wenn

$$dU_{el}/da = dU_{pl}/da$$

ist und dies ist nach Gl. (9) für $dU/da = 0$ der Fall (Bild A4.12b). Anmerkung: In der Literatur findet man auch $G_c = 2(\gamma_0 + \gamma_{pl})$. Dies ist eine Erweiterung des Griffith-Bruchkriteriums, die auf Irwin und Orowan zurückgeht und die immer auftretende plastische Verformung an der Rißspitze mit berücksichtigt.

4.7 Kriechen, Schwingfestigkeit, Ermüdung

1.

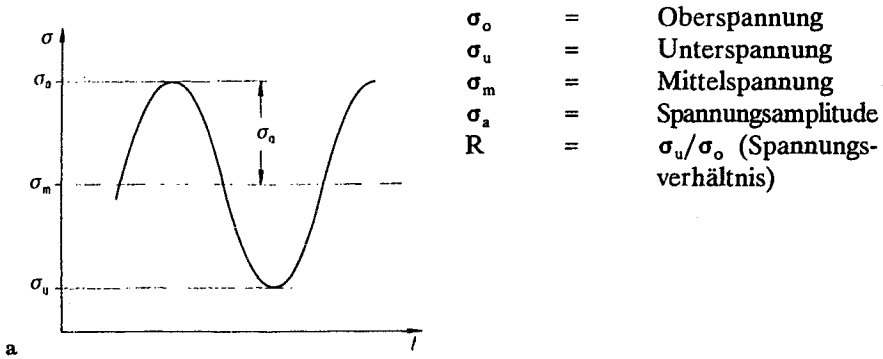


Bild A 4.13a

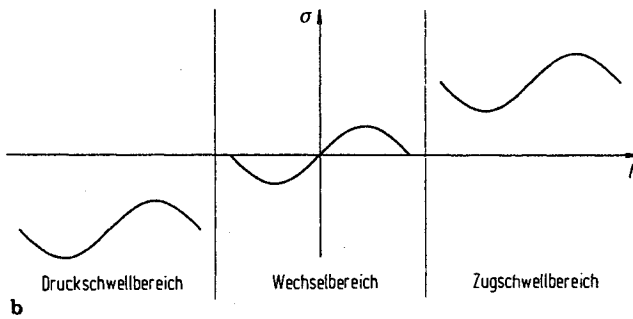


Bild A 4.13 b

2. Parameter sind Dehnung, Zeit und Spannung. Das Diagramm gilt für eine bestimmte Temperatur.

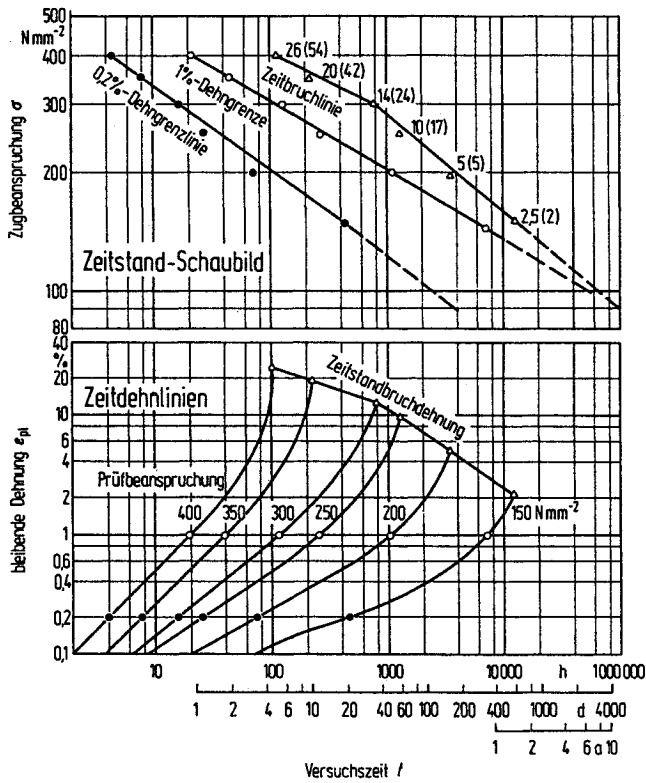


Bild A 4.14

3.

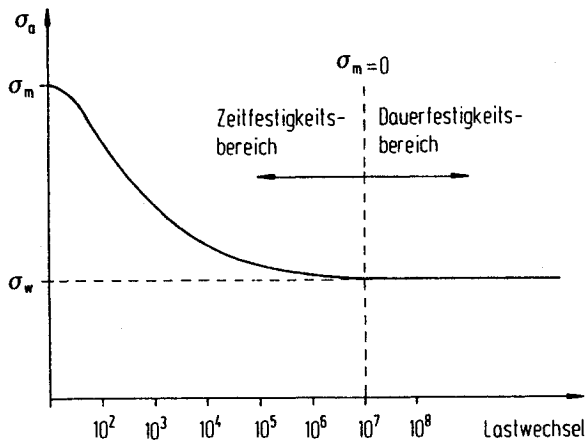
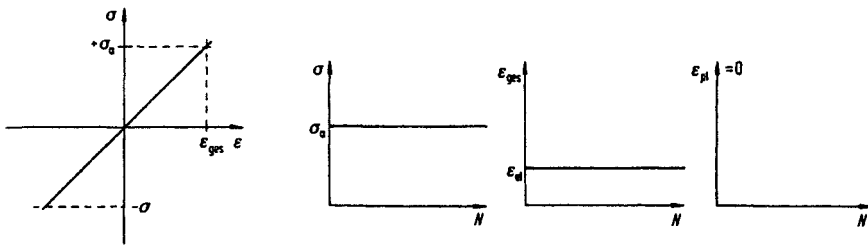


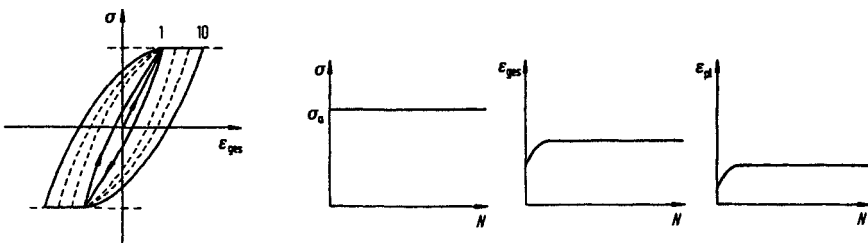
Bild A 4.15

- 4.a) Als spannungskontrolliert bezeichnet man einen Ermüdungsversuch, wenn die Spannung konstant gehalten wird und die bei einem entfestigenden Werkstoff zunehmende oder bei einem verfestigenden Werkstoff abnehmende Dehnung gemessen wird. In der praktischen Versuchsdurchführung wird immer die Kraft geregelt, so daß genaugenommen die Spannung nicht konstant ist, da durch plastische Verformung und Rißbildung die Querschnittsfläche nicht konstant bleibt.
- b) Bei dehnungskontrollierten Versuchen unterscheidet man zwischen gesamtdehnungsgesteuerten Versuchen und den plastisch-dehnungsgesteuerten Versuchen. Die Proben werden mit einer zyklischen Dehnungsamplitude beaufschlagt und je nach Ver- oder Entfestigung des Werkstoffs eine zu- oder abnehmende Spannung gemessen.

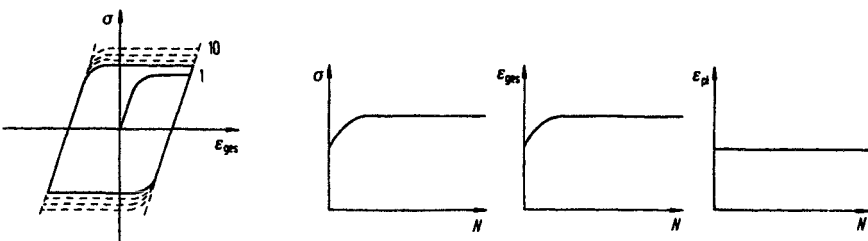
5. a) $\sigma_a = \text{const.}, \epsilon_{pl} = 0$



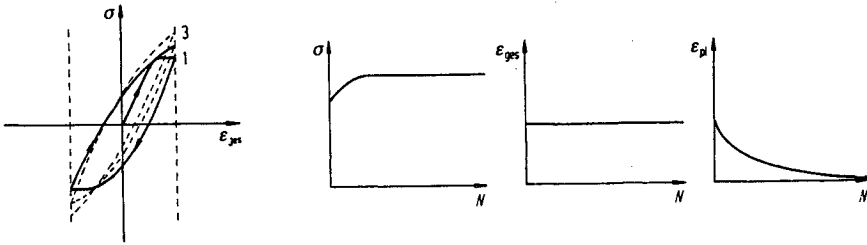
b) $\sigma_a = \text{const.}, \text{Werkstoff entfestigt}$



c) $\epsilon_{pl} = \text{const.}, \text{Werkstoff verfestigt}$



d) $\varepsilon_{ges} = \text{const.}$, Werkstoff verfestigt



6.

$$\sum_i \frac{n_i}{N_i} = 1$$

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_n}{N_n} = 1$$

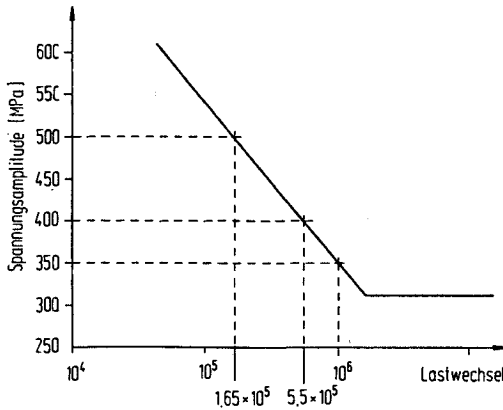


Bild A4.16

Beispiel:

$\sigma_{a1} = 500 \text{ MPa}$ (aus Wöhlerdiagramm) $N_1 = 165.000 \text{ LW}$
 $\sigma_{a2} = 350 \text{ MPa}$ (aus Wöhlerdiagramm) $N_2 = 10^6 \text{ LW}$
 $\sigma_{a3} = 400 \text{ MPa}$ (aus Wöhlerdiagramm) $N_3 = 5,5 \cdot 10^5 \text{ LW}$

Die Restlebensdauer ist 225.000 LW bei einer Spannungsamplitude $\sigma_a = 400 \text{ MPa}$.

Anmerkung: Die lineare Schadensakkumulationshypothese (Palmgren - Miner-Regel) ist für die praktische Auslegung von Bauteilen oft nicht zu gebrauchen, da die Schadensakkumulation von der Reihenfolge der Lastkollektive abhängt und dieser Reihenfolgeeinfluß immer nichtlinear mit n_1 variiert.

4.8 Bruchmechanismen

1. - zyklische Ver- oder Entfestigung
- Rißbildung
- stabiles (unterkritisches) Rißwachstum bis zur kritischen Anrißlänge
- instabiles, kritisches, schnelles Rißwachstum
2. - Spannungen an der Oberfläche am größten (überlagerte Biegespannungen, Kerben, Riefen, Gleitstufen, Einschlüsse)
- Festigkeit von Oberflächenkörnern geringer (Randentkohlungszone)
- viele Beanspruchungen werden über die Oberfläche eingeleitet und erzeugen eine Schädigung: z.B. Verschleiß, Korrosion, Erosion, Kavitation.
3. Schwingstreifen entstehen beim Rißwachstum durch das Öffnen und Schließen der Rißspitze. Da ein Schwingstreifen durch jeweils einen Lastwechsel erzeugt wird, kann nach dem Bruch der Probe aus den Schwingstreifenabständen auf die Rißgeschwindigkeit geschlossen werden (Bild A4.17).

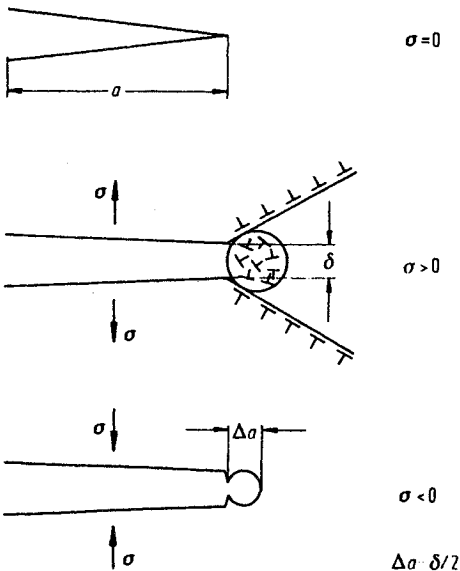


Bild A 4.17

- 4.a) In bruchmechanischen Proben (Kompaktprobe oder mittig angerissene Zugprobe) wird ein Schwingungsanriß eingebracht. Falls die dafür notwendige Anschwinglast höher als die für den Versuch zu verwendende ist, muß die Maximalkraft schrittweise so reduziert werden, daß nach dem Ende des Anschwingvorganges die gewünschte Schwingbreite der Spannungsintensität ΔK erreicht ist.

Gemessen wird die Rißgeschwindigkeit, indem man z.B. mit dem Lichtmikroskop die Rißlänge a_i in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl N_i beobachtet:

- Sekantenmethode: Aus jeweils zwei aufeinanderfolgenden Meßpunkten wird der Differenzenquotient gebildet.

$$\frac{a_{i+1} - a_i}{N_{i+1} - n_i} = \frac{\Delta a}{\Delta N} \rightarrow \frac{da}{dN}$$

- Polynommethode: Gesucht wird ein Polynom zweiter Ordnung, das $2n + 1$ (mit $n = 1, 2, 3$ oder 4) aufeinanderfolgende Versuchspunkte annähert.

- b) $\Delta K \sim f(\Delta \sigma, a)$

Da ΔK eine Funktion der Rißlänge a ist, nimmt ΔK in der Regel mit wachsender Rißlänge zu.

- c) $da/dN = A \Delta K^m$ (Paris-Gleichung).

Die Konstanten A und m sind werkstoffabhängig, wobei der Exponent m meist Werte zwischen 2 und 4 annimmt.

- d) Für abnehmende ΔK -Werte sinkt die Rißausbreitungsgeschwindigkeit, bis bei ΔK_0 keine stabile Rißausbreitung mehr erfolgt. Mit steigender Rißlänge nimmt ΔK zu, bis K_{\max} (obere Grenze von ΔK , $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$) die kritische Bruchzähigkeit K_c erreicht und die Probe durch instabiles Rißwachstum versagt. (Dieser kritische K -Wert liegt für viele Werkstoffe etwas höher als derjenige, der nach Anschwingen des Anrisses bei sehr kleinen ΔK -Amplituden bestimmt wird.), (Bild A 4.18)

- 5.a) Bild F4.4a zeigt einen Ermüdungsbruch; durch den Pfeil ist der Anriß gekennzeichnet. Das weitere Rißwachstum fand durch eine schwingende Belastung statt (Schwingstreifen), der Restgewaltbruch ist in dieser Aufnahme nicht zu sehen.
- b) Bild F4.4b zeigt einen duktilen Bruch, charakteristisch hierfür ist die Wabenstruktur (Wabenbruch) der Bruchfläche, die durch plastische Deformation entstanden ist.
- c) Bild F4.4c zeigt einen spröden Bruch. Die Bruchfläche zeigt keine Spuren plastischer Verformung. Der Bruchverlauf ist interkristallin.

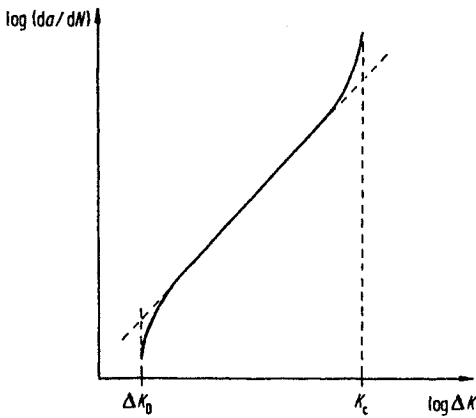


Bild A 4. 18

4.9 Viskosität, Viskoelastizität

1. Sowohl viskoses als auch viskoelastisches Verformungsverhalten sind zeitabhängige Verformungen, wobei erstere irreversibel und letztere reversibel sind (Bild A4.19a,b).

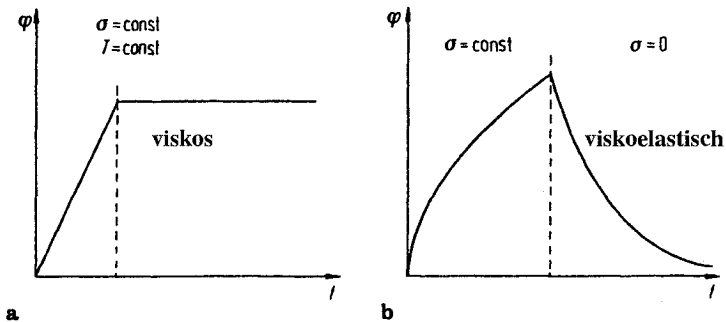


Bild A 4.19

- 2.a) Newton'sche Flüssigkeit $\tau = \eta \cdot \dot{\phi}$ (Gase, Wasser).
- b) Nicht-Newtonsche Flüssigkeit (höhere Fließgeschwindigkeit durch Ausrichten der Molekülfäden), $\eta \neq \text{const}$.
- c) Viskoses Fließen nach dem Überschreiten einer Schwellspannung (Fließgrenze; Bingham'sche Flüssigkeit).

3. Entweder durch die Auswertung der Hysteresis im Spannungs-Dehnungs-Diagramm (Energieverlust pro Zyklus [Jm^{-3}]) oder durch die Bestimmung des logarithmischen Dekrements der Abklingamplitude.
4. Im Prinzip alle Prozesse, die Energie in Form von Wärme oder Defekten dissipieren.
Metalle: Diffusion von Kohlenstoff in Stahl, Erzeugung von Versetzungen durch plastische Verformung; reversible Phasenumwandlungen (z.B. martensitische Umwandlung), Bewegung von Domainengrenzen.
Kunststoffe: Streckung von verkäuelten Molekülketten und durch das Vorbeirutschen von unvernetzten Molekülketten.

4.10 Technologische Prüfverfahren

1. Härte ist der Widerstand, den ein Werkstoff dem Eindringen eines sehr viel härteren Prüfkörpers entgegensetzt.

$$H = \frac{F}{O} \left[\frac{kp}{\text{mm}^2} \right]$$

Hier wird nicht die nominelle Dimension einer Spannung verwendet, sondern es wird ein "Härtepunkt" angegeben.

- a) für Metalle wird die bleibende, plastische Verformung als Härteeindruck gemessen: nach Entlasten
- b) für Gummi wird unter Last gemessen. Ohne Last ergäbe sich eine Härte von $H \rightarrow \infty$
2. Wenn die Härte durch plastische Verformung des zu prüfenden Werkstoffs ermittelt wird, ist sie ein integraler Wert aus der Streckgrenze und dem Festigungsverhalten. Daraus folgt, daß die in der Praxis häufig verwendete Umrechnungsformel für die Streckgrenze nur für vergütete Stähle im begrenzten Umfang gilt. (Die Härte von Gummi ist durch eine elastische Verformung bestimmt. Sie muss unter Spannung gemessen werden.)
3. - Adhäsion, μ_{ad}
 - elastische und plastische Verformung (Deformation), μ_{def}
 - Energiedissipation durch Ausbreitung von Rissen, μ_{r}
 $\mu = \mu_{\text{ad}} + \mu_{\text{def}} + \mu_{\text{r}}$
4. Unter einem Verschleißsystemtem versteht man z.B. einen Werkstoff A, der auf einem Werkstoff B gleitet. Dies geschieht in einer bestimmten Umgebung C und mit einem Schmiermittel D (also: Verschleißkörper, Gegenkörper, Umgebungsmedium, Zwischenmedium).
 Die Verschleißrate w ist im allgemeinsten Fall definiert als Abtragung pro Gleitweg und wird oft gemessen als Gewichtsabnahme pro Gleitweg. Der Kehrwert der Verschleißrate ist der Verschleißwiderstand (w^{-1}).
 Den Verschleißkoeffizient k erhält man durch die Normierung der Verschleißrate mit der Druckspannung und der Härte des Werkstoffes. Der Ver-

schleißkoeffizient k ist zu verstehen als die Abtragungswahrscheinlichkeit pro effektiver Berührungsfläche A_{eff} der beiden Stoffe (d.h., welcher Verschleißmechanismus vorliegt).

$$w = k \frac{|\sigma|}{H} = k \frac{A_{\text{eff}}}{A_0} \quad (1)$$

$$-\sigma = \frac{-F}{A_0} = \frac{\text{Druckkraft}}{\text{Gesamtfläche}} \quad (2)$$

$$H = \frac{-F}{A_{\text{eff}}} = \frac{\text{Druckkraft}}{\text{Berührungsfläche}} \quad (3)$$

5. Aus der Gl. (1) und der Definition der Härte (siehe 4.10.1) folgt, daß die effektive Berührungsfläche A_{eff} der Oberflächen, die aufeinander gleiten, proportional der spezifischen Druckbelastung a und umgekehrt proportional der Härte ist. D.h. also, je härter ein Werkstoff ist, desto größer ist sein Verschleißwiderstand (sofern sich der Verschleißmechanismus nicht ändert!).

5 Physikalische Eigenschaften

5.1 Werkstoffe im Kernreaktorbau

1.

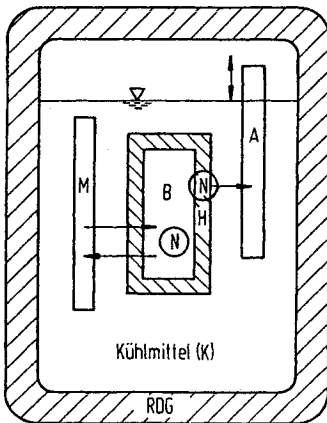


Bild A 5.1

B: = Brennstoff: Als Brennstoff (Spalt- oder Brutstoff) finden Uran, Plutonium und Thorium entweder als metallische Legierung oder als Keramik Verwendung. Die wichtigsten Forderungen im Beanspruchungsprofil sind

- hohe Konzentration des spaltbaren Anteils,
- hohe Schmelztemperatur und
- gute Wärmeleitfähigkeit und Temperaturwechselbeständigkeit.

H: = Hüllwerkstoff: Das Beanspruchungsprofil umfaßt folgende Punkte:

- sehr gute Korrosionsbeständigkeit gegenüber dem Kühlmittel und Verträglichkeit mit dem Brennstoff,
- niedriger Absorptionsquerschnitt für thermische Neutronen,
- Undurchlässigkeit für Spaltprodukte,
- gute Wärmeleitfähigkeit und
- hinreichende Warmfestigkeit.

Als Hüllwerkstoff in wassergekühlten Reaktoren kommen vor allem rostbeständige austenitische Stähle und Zirkonlegierungen in Betracht.

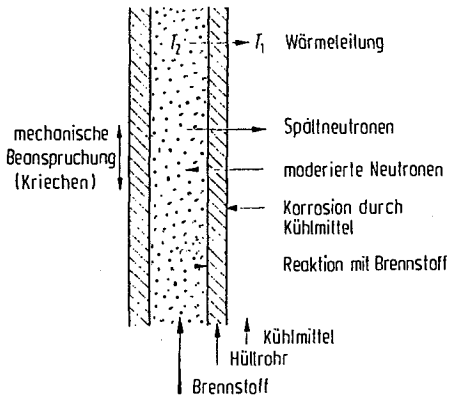
K: = Kühlmittel; M: = Moderator: Wenn das Kühlmittel gleichzeitig als Moderator dient, so ist folgende Anforderung zu stellen: geringe Atommasse bei möglichst kleinem makroskopischen Absorptionsquerschnitt Σ_a und gleichzeitig großem Streuquerschnitt Σ_s .

A: = Absorber: Um eine stationäre Kettenreaktion im Reaktor aufrechtzuerhalten, ist ein Steuerelement notwendig, das die überschüssigen Neutronen absorbiert. Dies ist die Aufgabe des Absorbers, der je nach Betriebszustand tiefer oder weniger tief in die aktive Zone eingefahren wird und durch die Vernichtung von freien Neutronen den Reaktor "kritisch" hält. Die Hauptforderung an Absorberwerkstoffe ist deshalb ein möglichst großer makroskopischer Absorptionsquerschnitt Σ_a . Geeignete Werkstoffe sind z.B. Bor- und Hafnium-Legierungen.

RDG: = Reaktor-Druckgefäß: Hauptsächliche Forderungen an das Reaktor-Druckgefäß sind hohe Festigkeit bei Betriebstemperatur (Zeitstandfestigkeit) bei guter Bruchzähigkeit und guter Korrosionsbeständigkeit.

- 2.a) Der mikroskopische Wirkungsquerschnitt σ eines Elementes ist durch diejenige Fläche definiert, innerhalb der ein Neutron in Wechselwirkung mit dem Atom tritt. Als Einheit wird Barn verwendet:
 $1 \text{ Barn} = 10^{-28} \text{ m}^2$.
- b) Der makroskopische Wirkungsquerschnitt $\Sigma = \sigma \cdot N_v \text{ [m}^{-1}\text{]}$ ist der mikroskopische Wirkungsquerschnitt auf das Volumen bezogen (N_v = Anzahl der Atome pro Volumen). Der reziproke Wert des makroskopischen Wirkungsquerschnitts entspricht der Absorptionslänge λ für Neutronen und stellt eine wichtige Größe zur Dimensionierung von Abschirmungen dar.
3. Spaltquerschnitt σ_f (für Brennstoff a_f möglichst groß);
 Absorptionsquerschnitt σ_a (für Absorber, Abschirmung, σ_a möglichst groß);
 Streuquerschnitt σ_s (für Moderator σ_s möglichst groß).
4. - Niedriger Absorptionsquerschnitt für thermische Neutronen
 - Korrosionsbeständigkeit gegenüber Kühlmittel
 - Kompatibilität mit Brennstoff
 - Undurchlässigkeit für Spaltprodukte
 - Gute Wärmeleitfähigkeit
 - Hinreichende Warmfestigkeit
 - geringe Empfindlichkeit für Strahlenschäden.

Den geringsten makroskopischen Absorptionsquerschnitt Σ_a hätte Beryllium mit $1,2 \cdot 10^{-4} \text{ [m}^{-1}\text{]}$. Berücksichtigt man jedoch alle Forderungen des Beanspruchungsprofils, so kommt das Eigenschaftsprofil von Zirkonlegierungen und das von rostfreien austenitischen Stählen am ehesten mit dem Beanspruchungsprofil (für Wasserkühlung) zur Deckung.

**Bild A 5.2**

- 5.a) Primär werden Strahlenschäden durch schnelle Neutronen verursacht (γ -Strahlung führt zur Erwärmung, Spaltprodukte x sind nur kurzreichweitig), die mit Atomen zusammenstoßen und diese auf Zwischengitterplätze stoßen. Es entsteht ein Frenkel-Defekt, bestehend aus einer Leerstelle und einem Zwischengitteratom.
- b) Durch die Erzeugung von Punktfehlern steigen die Zugfestigkeit und die Streckgrenze, während die Duktilität und der K_{IC} -Wert (Bruchzähigkeit) abnimmt (Strahlenversprödung).

5.2 Elektrische Leiter

1.

	Leiter	Isolatoren
a) Bandstruktur	Überlappendes Leitungs- und Valenzband	Große „verbotene Zone“ zwischen Leitungs- und Valenzband
b) elektrischer Widerstand ρ_L [Ωm]	$10^{-8} - 10^{-6}$	$10^7 - 10^{16}$
c) Temperaturkoeffizient	negativ	positiv

2.

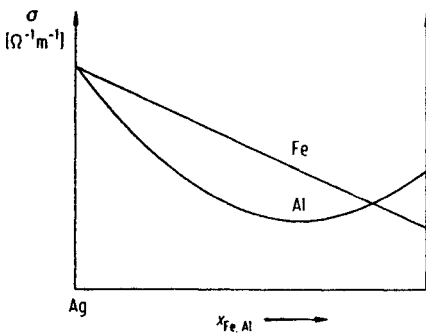


Bild A 5.3

3. Da gelöste Atome den spezifischen Widerstand stark erhöhen (siehe 5.2.2), kann eine Festigkeitssteigerung niemals durch Mischkristallhärtung erfolgen. Der geeignetste Aufbau besteht aus einer gut leitenden Matrix (z.B. Kupfer), die durch kleine harte Teilchen einer zweiten Phase (Wolfram) gehärtet wird (Dispersionshärtung).
- 4.a) Zugfestigkeit
b) Kombination von maximaler Zugfestigkeit mit maximaler elektrischer Leitfähigkeit.

5.3 Ferromagnetische Werkstoffe

1. Hart- und weichmagnetisch bezieht sich auf die notwendige magnetische Feldstärke zur Ummagnetisierung. Bei magnetisch harten Werkstoffen ist diese um mehrere Zehnerpotenzen größer als bei magnetisch weichen Werkstoffen (Bild A5.4).
 - a) - weichmagnetisch
 - b) - hartmagnetisch

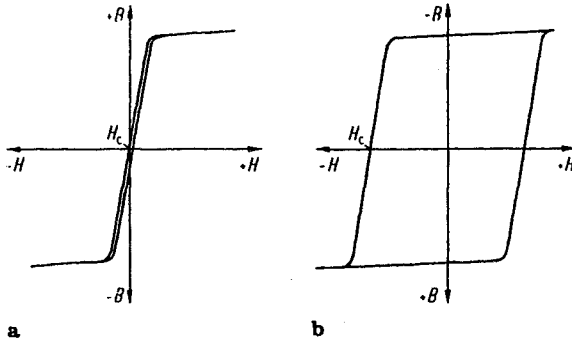


Bild A 5.4: a) weichmagnetisch, b) hartmagnetisch

2. Anwendungen für

weichmagnetische Werkstoffe	hartmagnetische Werkstoffe
Transformatorbleche	Halterungen
Spulenkerne	Lautsprecher
Abschirmung	Läufer im Elektromotor
Tonköpfe	Magnetspeicher, Informationsspeicher

3. - Durch das Zulegieren von Si zu α -Fe steigt der spezifische elektrische Widerstand, wodurch die Wirbelstromverluste verringert werden.
- Werden mindestens 2,2 Gew.% Si zulegiert, so werden umwandlungsfreie Wärmebehandlungen bis zu 1.400 °C möglich, da das γ -Gebiet eingeschnürt wird. Dadurch kann ein grobkörniges, mit geringer Defektdichte behaftetes Gefüge eingestellt werden, das leicht ummagnetisierbar ist.
- große, defektfreie Körner, damit Domänenwände sich leicht bewegen können
- Einstellen einer Textur, die der magnetischen Vorzugsrichtung des Kristallgitters entspricht (Goss- oder Würfeltextur).
- Lamellierung von möglichst dünnen Blechen mit dazwischenliegenden Isolationsschichten, um die Wirbelstromverluste zu verringern.
- Anmerkung: Als recht aktuelle Entwicklung werden metallische Gläser, die die besten weichmagnetischen Eigenschaften zeigen, eingesetzt.

4. Hartmagnetische Phasen (wie z. B. Eisenoxidteilchen) werden in eine meist aus Duromeren bestehende Matrix feindispers eingebettet.
5. Ferromagnetismus tritt sowohl in Metallen als auch in Keramik auf. Bezüglich der Atomarten tritt Ferromagnetismus nur in den Übergangsmetallen auf und hier in der zweiten Hälfte der jeweiligen Perioden. Außerdem ist der Ferromagnetismus auf bestimmte Phasen beschränkt (α -Fe ferromagnetisch, γ -Fe nicht). Dabei kann in bestimmten metallischen Verbindungen auch Ferromagnetismus auftreten, wenn die einzelnen Komponenten nicht ferromagnetisch sind (Heuslersche Legierung Cu_2MnAl).
6. Die magnetische Härtung stellt ein Maß für die notwendige magnetische Feldstärke zur Entpolarisierung dar.
Voraussetzungen:
 - möglichst große Zahl von Gitterstörungen,
 - eine bezüglich der Magnetisierung starke Kristallanisotropie,
 - hohe Formanisotropie der dispergierten ferromagnetischen Teilchen.

5.4 Halbleiter

1. Das einfachste Modell zur Darstellung der Leitfähigkeit von Leiter, Halbleiter und Isolator ist das Energiebandmodell. Ausgehend von den diskreten Energieniveaus der Elektronen in Atomen, "verschmieren" diese Niveaus in Festkörpern, durch die gegenseitige Beeinflussung der Atome, zu Bändern. Man unterscheidet Valenz-, Verbotenes - (nach der Quantenmechanik nicht mögliche Energiezustände von Elektronen) und Leitungsband. Während sich nun in Leitern (Bild A5.5a) das Valenzband mit dem Leitungsband überschneidet, so daß im letzteren stets leitfähige Elektronen vorhanden sind, ist der energetische Abstand zwischen beiden Bändern in Nichtleitern (Bild A5.5b) so groß, daß nur bei sehr starker Anregung ein Elektron ins Leitungsband gehoben werden kann (Durchschlag von Isolatoren). Halbleiter (Bild A5.5c) können durch Fremdatome so dotiert werden, daß das gegenüber dem Nichtleiter kleinere verbotene Band durch Aktivierung von Elektronen übersprungen werden kann.
2. Grundbauelemente der Halbleiter sind Silizium- oder Germanium-Einkristalle der IV-Gruppe. Sie sind wie Kohlenstoff kovalent gebunden und haben auch Diamantstruktur. Wird ein vierwertiges Si-Atom durch ein fünfwertiges Atom, wie z.B. P, As oder Sb (Donatoren), ersetzt, so wird das überzählige fünfte Elektron vom Valenz- in das Leitungsband angehoben und erzeugt damit eine Leitfähigkeit. Da die Leitfähigkeit durch einen negativen Ladungsträger erzeugt wird, wird sie n-Leitung genannt.

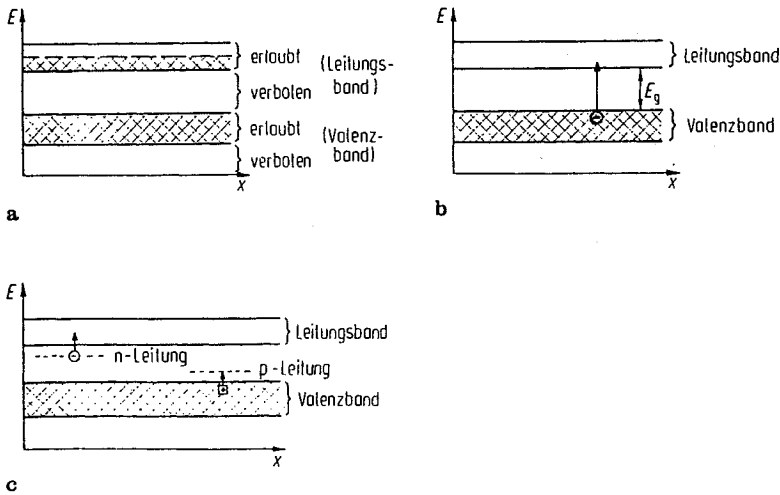


Bild A 5.5

Dotiert man ein Element der III-Gruppe, wie z.B. In, B oder Al (Akzeptoren), so wird die sonst erfüllte Oktettregel im Si-Gitter durch das Fehlen eines Elektrones gestört. Das Valenzband zeigt eine hinsichtlich der elektrischen Ladung positive Defektstelle (e^+ -Loch), die bei Anlegen eines elektrischen Feldes wandern kann und damit eine Leitfähigkeit erzeugt (= p-Leitung), (s. Bild A5.5c).

- Beim Zonenschmelzverfahren wird mittels einer Heizspule ein schmaler Bereich eines Stabes aufgeschmolzen und, entweder durch die Bewegung der Spule oder des Stabes, durch die gesamte Länge des Stabes geführt (Bild A5.6a). Da Verunreinigungen die Schmelztemperatur reiner Stoffe senken, reichern sich gemäß dem Zustandsdiagramm die Verunreinigungen in der Schmelze an, während die ersten erstarrten Kristallite an ihnen "verarmen" (Bild A5.6b). Wird die schmelzflüssige Zone mehrmals (bis zu 50 mal) in einer Richtung durch den Stab geführt, so werden alle Verunreinigungen in einem Ende des Stabes konzentriert und man erhält einen hochreinen Werkstoff.
- Die Diode als einfachstes Halbleiterbauelement besteht aus einem p- und einem n-Leiter (pn-Übergang). Wird ein elektrisches Feld gemäß Bild A5.7 angelegt, so werden die Ladungsträger über den pn-Übergang hinweg angezogen und es fließt ein Strom. Bei umgekehrter Polung werden sowohl die Elektronen als auch die positiven Leerstellen vom Übergang weggezogen, so daß die Dichte der Ladungsträger klein wird; der Strom wird gesperrt.

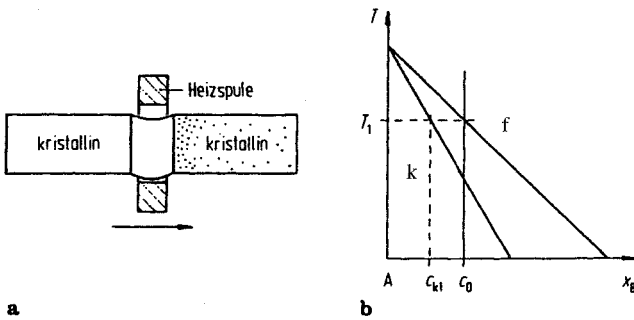


Bild A 5.6

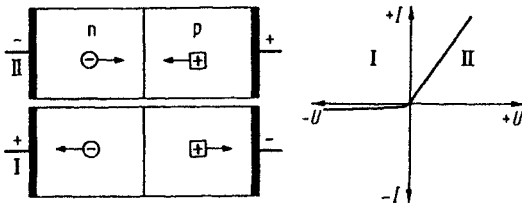


Bild A 5.7

- Integrierte Schaltungen werden aus Blöcken von sehr reinem einkristallinem Si hergestellt. Die p- und n-leitenden Bereiche werden dann in einer zweistufigen Behandlung hergestellt:

- örtliches Aufdampfen von Atomen,
- Diffusionsbehandlung.

Sehr gut isolierende Schichten können durch eine Oxidation des Si zu SiO_2 hergestellt werden. Die notwendigen metallisch leitenden Zuleitungen entstehen durch das Aufdampfen reiner Metalle (z.B. Al).

5.5 Thermische Ausdehnung

- Da die Wärmeleitfähigkeit der elektrischen Leitfähigkeit bei den Metallen proportional ist, nimmt sie in der Reihenfolge reines Eisen, Baustahl S 235 und austenitischer Stahl ab (zunehmender Anteil gelöster Atome).
- Es treten zwei Anomalien auf:
Eine ist durch die Phasenumwandlungen beim Abkühlen des Eisens bedingt, die dazu führt, daß bei der Hochtemperaturphase eine Kontraktion auftritt und dadurch der thermische Ausdehnungskoeffizient negativ wird.

Die zweite tritt im Zusammenhang mit der magnetischen Umwandlung in der Nähe der Curie-Temperatur auf (Magnetostriktion). Der Werkstoff dehnt sich bei der Abkühlung etwas aus. Dies führt zusammen mit der thermisch bedingten Kontraktion zum sogenannten Invar-Effekt: Der effektive Ausdehnungskoeffizient ist in einem bestimmten Temperaturbereich bei einigen Legierungen nahezu null.

3. Alle aufgezählten Effekte sind Anomalien im Dehnungsverhalten bestimmter Werkstoffe und stehen im Zusammenhang mit Umwandlungen im festen Zustand.
 - a) Der Einwegeffekt erfordert zunächst die Einwirkung einer Kraft, die den Werkstoff scheinbar (pseudo-plastisch) verformt. Die Verformung geht beim anschließenden Erwärmen vollständig zurück.
 - b) Der Zweiwegeffekt ist eine Formänderung die bei Erwärmen und Abkühlen auftritt, ohne das eine Kraft einwirken muß.
 - c) Die Super- oder auch Pseudoelastizität ist ein gummiartiges Verhalten mit hoher reversibler Dehnung bei geringer Spannungszunahme.
4. - Temperaturabhängige Durchflusssteuerung in Sicherheitsventilen (Ein- oder Zweiwegeffekt, je nach Konstruktion)
 - stark verformbare Brillenrahmen, die nach Entlastung wieder ihre ursprüngliche Form annehmen (Pseudo- oder Superelastizität)
 - Gefäßstützen (Stents) zum Einsatz in der Medizin (Einwegeffekt und Superelastizität)

5.6 Werkstoffe der Energietechnik

1.a) Der thermische Wirkungsgrad

$$\mu = \frac{T_1 - T_0}{T_0}$$

hängt von der oberen Betriebstemperatur T_1 ab, die wiederum durch die Grenzen der Belastbarkeit von Hochtemperaturwerkstoffen bestimmt wird (Ni-Superlegierungen).

- b) Hier sind die Werkstoffe für Batterien bestimmend. Bemerkenswert ist der geringe technische Fortschritt des Bleiakkus trotz extremer Nachteile (hohes Gewicht, Schwefelsäure).
 - c) Leiterwerkstoffe (Cu, Al), die Werkstoffe für Schiffe (Öltanker: Sicherheit!), Trafobleche (Fe+Si: Minimierung der Wattverluste).
- 2.a) Solarzellen bestehen aus Halbleitern, in der Regel Si, das n- und p-leitend dotiert wird. Bei Bestrahlung entstehen Elektronen (n) und Elektronenlöcher (p-, positive Ladungsträger). Ein p-, n-Übergang verhindert, dass ein Strom innerhalb der Zelle fließen kann. Der Strom kann dann durch Parallelschalten von Zellen verstärkt werden, (Bild A 5.8).

- b) Die Platten der Solarzellen können als Einkristall, Polykristall oder Si-Glas hergestellt werden, (aber: in dieser Richtung abnehmender Wirkungsgrad).
- c) Es kommen alle Halbleiter in Frage, deren Energieniveaus durch Sonnenstrahlung angeregt werden können, z.B. CdTe.

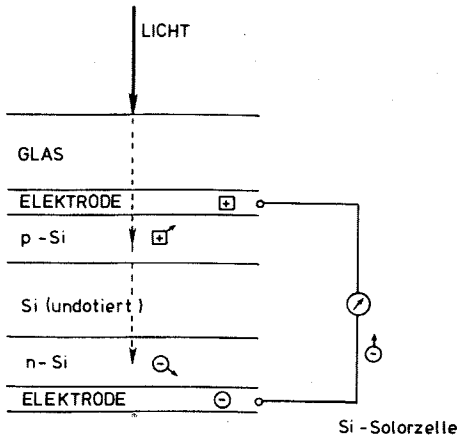


Bild A 5.8

- 3.a) Eine Brennstoffzelle soll chemische Energie (Oxidation) direkt in elektrischen Strom umwandeln. Dazu muss ein Brennstoff (z.B. CH_3OH) mit dem Oxidationsmittel (O_2 , Luft) über einen Katalysator geleitet werden. Es entstehen CO_2 und H_2O , die abgeführt werden müssen.

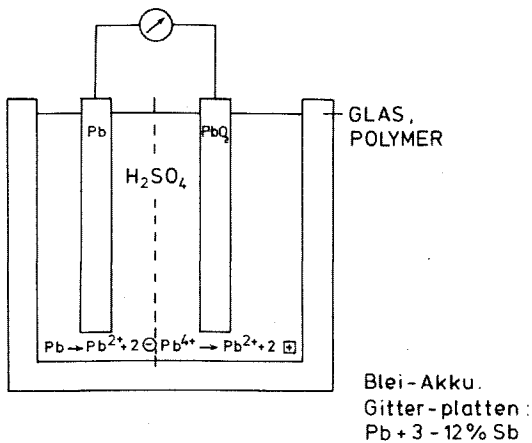


Bild A 5.9

- b) Das Werkstoffproblem ist die Langzeitstabilität der plattenförmigen Reaktionszone. Entscheidend ist Korrosions- und Temperaturbeständigkeit, die durch keramische Ionenleiter erreicht wird: SOFC- (solid oxide fuel cell), Perowskit-Struktur ABO_3 , LaMnO_3 , technisch $\text{La}(\text{Sr})\text{FeO}_{3-x}$ (bis zu 1000°C). Eine erhöhte Temperatur ist notwendig, um ausreichende Leitfähigkeit für O^{2-} - oder H^+ -Ionen zu erzielen.
- c) Perowskite sind eine keramische Phase der Zusammensetzung ABO_3 , Prototyp BaTiO_3 , die eine kubisch-flächenzentriert + raumzentrierte Struktur besitzen, (Bild A 5.10).
 Ausser in Ionenleitern ist diese Struktur auch in Hochtemperatur-Supraleitern und in ferro-elektrischen Werkstoffen zu finden.

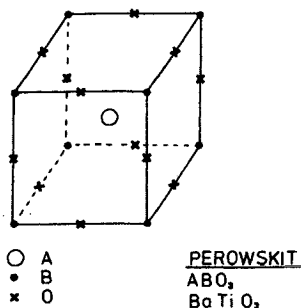


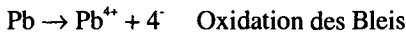
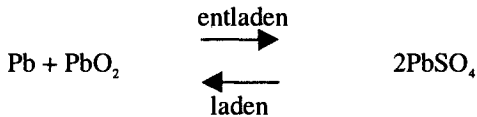
Bild A 5.10

$$4.a) \quad \eta = \frac{T_o - T_u}{T_o}; \quad 0 < \eta < 1$$

mit: T_o obere Betriebstemperatur
 T_u untere Betriebstemperatur

- b) Die obere Betriebstemperatur wird bestimmt durch die Hitzebeständigkeit (Zeitstandfestigkeit plus Zunderbeständigkeit). Bei gegebenem Werkstoff (Ni-Basis-Superlegierung) kann T_o durch ein Kühlsystem (Flüssigkeit) erhöht werden.
- c) Die Beständigkeit des Schaufelwerkstoffs gegen das bei hohen Temperaturen einströmende Gas. Dazu kommt Temperaturwechselbeständigkeit, insbesondere beim Abschalten (Abkühlen) der Turbine.

- 5.a) Eine Batterie besteht aus einem oder mehreren galvanischen Elementen. In diesen oxidiert eine Elektrode und liefert dabei Elektronen (Metall, Minus-Pol), während die andere Elektrode reduziert wird (Plus-Pol). Die gespeicherte Oxidations-Energie kann in andere Energiearten umgewandelt werden. Beim Laden eines Akkumulators tritt der umgekehrte Vorgang auf. Der Werkstoff der Elektroden hat Plattenform: Eine große Oberfläche (Porosität) ist notwendig zum schnellen Ablauf der Oxidation im Elektrolyt.
- b) Das wichtigste Speicherlement ist der Bleiakku, (Pb- und PbO₄-Elektroden in H₂SO₄):



Die Elektroden des Bleiakkus sind gitterförmig gestaltet. Sie bestehen aus einer Pb-Sb- oder Pb-Ca-Legierung. Das Legierungselement Antimon dient zur Erhöhung der Festigkeit. In den Maschen des Gitters befindet sich die poröse "Aktivmasse" Pb + PbO₄.

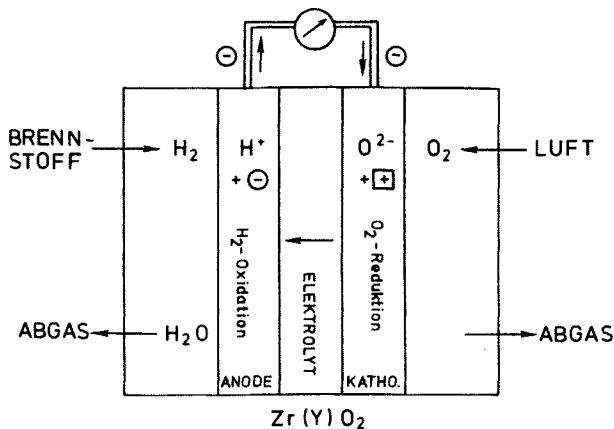


Bild A 5.11

- c) Die Pb/PbO₄-Batterie liefert etwa zwei Volt pro Zelle. Der Ni-Fe-Akku [Ni(OH)₂ und Fe] liefert etwa 1,3 Volt pro Zelle, gasdichte Ni-Cd-Akkus 1,25 V.

Der Pb-Akku besitzt höchste Zellspannung und Wirkungsgrad. Bei Ni-Cd ist die Giftigkeit von Cd zu berücksichtigen. Nachteil von Pb ist die hohe Dichte.

- d) Energie ist gespeichert in:
- Brenn- und Sprengstoffen,
 - hochgelegenen Seen (Pumpspeicherwerke),
 - Wasserdampf,
 - gespannten Federn,
 - geladenen Kondensatoren,
 - Stoffen, die für Kernspaltung oder -fusion geeignet sind.

5.7 Werkstoffe für Sensoren

1. Ein Sensorwerkstoff ist in der Lage, eine physikalische Eigenschaft in eine andere, messtechnisch gut nutzbare, umzuwandeln.
2. Dehnungsmessstreifen (DMS) dienen zur Ermittlung von elastischen Dehnungen, ϵ_e . Dazu wird ein mäanderförmig gebogener Metalldraht auf die Oberfläche des zu untersuchenden Materials (Probe, Bauteil) aufgeklebt. Eine Dehnung führt zu dessen Querschnittsabnahme, diese wiederum zu einer Erhöhung des elektrischen Widerstandes, $\Omega + \Delta\Omega(\epsilon_e)$. Diese kann durch eine Brückenschaltung (Wheatston'sche Brückenschaltung) gemessen werden.
3. Ein piezoelektrischer SiO_2 -Kristall wandelt eine mechanische Spannung (Pa) in elektrische Spannung (V) um. Magnetostriktive Werkstoffe (z.B. Tb_2Fe) sind in der Lage, mechanische Spannungen in Änderung der Magnetisierung zu umzuwandeln.
4. Passive Dämpfung kommt zustande durch innere Reibung im Werkstoff, z.B. durch Bewegung von C-Atomen in Stahl, Bloch-Wänden in Ferromagnetika, Entknäueln/Verknäueln von Elastomeren.
Aktive Dämpfung ist eine Systemeigenschaft. Sie benötigt eine Messung der zu dämpfenden Schwingung mit einem Sensor (DMS) und deren Kompensation durch Gegenschaltung z.B. eines aktiven piezo-elektrischen Elements.

6 Chemische und tribologische Eigenschaften

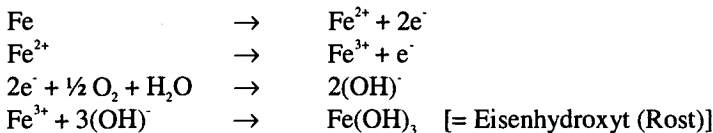
6.1 Korrosion

1. Korrosion ist die unerwünschte, meist lokalisierte chemische Reaktion der Oberfläche mit dem umgebenden Medium, die zu einer Verschlechterung der mechanischen und optischen Eigenschaften führt.
Spannungsrißkorrosion liegt vor, wenn die Entstehung und Ausbreitung von Rissen nicht alleine durch den Werkstoffzustand sondern von inneren oder äusseren Spannungen und das umgebende Medium und durch das Elektrodenpotential bestimmt ist.
Rosten ist die Oxidation von Eisen an feuchter Luft, unter der Bildung von Eisenhydroxiden.
Korrosionsermüdung ist Spannungsrißkorrosion unter dynamischer mechanischer Beanspruchung. Charakteristisch ist eine größere Rißausbreitungsgeschwindigkeit und ein kleinerer Schwellwert der Spannungsintensität für Rißausbreitung (K_{Isc}) als unter Vakuumbedingungen.
Wasserstoffversprödung führt zu einem makroskopisch verformungslosen Bruch (Spröbruch), indem adsorbierter atomarer Wasserstoff in den Werkstoff eindiffundiert und sich an Spannungsspitzen anlagert. Durch Rekombination des Wasserstoffes zu H_2 entstehen hohe Drücke, die zur Dekohäsion des Gitters führen.
2.
 - Alle Arten von mechanisch induzierten Brüchen,
 - Verschleiß, verursacht durch Reibungskräfte,
 - Korrosion.
3. Alle Werkstoffe, die mit ihrer Umgebung im thermodynamischen Gleichgewicht sind, zeigen keine Korrosion und umgekehrt. Beispiele dazu sind
 - a) nicht passivierbare unedle Metalle,
 - b) vollständig oxidierte Keramiken (SiO_2 , Al_2O_3) in sauerstoffhaltiger Umgebung.
4. Bauteile aus unterschiedlichen Werkstoffen mit großen Potentialdifferenzen im Elektrodenpotential dürfen nicht leitend miteinander verbunden sein, da sonst das unedlere Bauteil angegriffen wird.

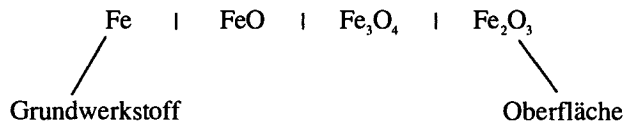
6.2 Elektrochemische Korrosion

- Größere Korrosionsbeständigkeit ist bei AlZnMg-Legierungen zu erwarten, da die Potentialdifferenz zwischen Al und Zn ($\sim 0,94$ V) wesentlich geringer als zwischen Al und Cu ($\sim 2,10$ V) ist. Dies wird in der Praxis auch beobachtet.
- Ein Lokalelement liegt vor, wenn sich zwei Gefügebestandteile (Phasen, Ausscheidung) in ihrem Elektrodenpotential unterscheiden und ein Elektrolyt (z.B. Wasser) vorhanden ist, so daß ein Strom fließen kann. Es kommt zu einer lokalen Oxidation. Im Falle eines Fe-Cu Sinterwerkstoffes tritt eine Oxidation des Fe ein, da Fe mit Cu keine Verbindungen bildet, so daß im Werkstoff Fe als unedlere Phase neben Cu vorliegt.

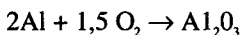
3.a) An feuchter Luft rostet Eisen nach folgenden chemischen Reaktionen:



b) An trockener Luft verzundert Eisen unter Ausbildung einer relativ kompliziert aufgebauten Zunderschicht:



- Unter Passivität versteht man die Erscheinung, daß ein Metall in einem Elektrolyten (z.B. Eisen in Salpetersäure), trotz großer treibender thermodynamischer Kraft für Korrosion, nicht angegriffen wird. Das Metall verhält sich wie ein Edelmetall durch Bildung einer Schutzschicht.
- Aluminium reagiert an der Oberfläche mit Sauerstoff zu einer festhaftenden Oxidschicht, die Aluminium vor einer weiteren Oxidation schützt.



Für technische Zwecke wird diese Oxidation durch die Schaltung von Al als Anode künstlich herbeigeführt und damit die Oxidschicht verstärkt. Außerdem können Farbpartikel in die Oxidschicht mit eingelagert werden → Eloxieren.

- Korrosionsschutz durch Beschichtung mit einem edleren Element, das nicht angegriffen wird: Verzinnen, Vergolden.

- Beschichtung mit einem unedleren Element, das bevorzugt angegriffen wird: Verzinken.
 - Zulegieren von mindestens 13 Gew.% Cr, wodurch sich eine Passivierung einstellt (rostfreie Stähle).
 - Beschichtung mit einem chemisch nicht reagierenden Werkstoff, meist mit Kunststoffen oder auch Email.
7. Für festhaftende Zunderschichten ist das Dickenwachstum bestimmt durch die Diffusion der Atome durch die Schicht hindurch:

$$\frac{d\Delta x}{dt} = k \cdot \frac{1}{\Delta x}$$

Δx = Schichtdicke
 t = Zeit
 k = Proportionalitätskonstante

Die Integration mit $\Delta x = 0$ für $t = 0$ als unterer Grenze ergibt sich

$$(\Delta x)^2 = 2kt$$

oder

$$\Delta x = \sqrt{2kt}$$

6.3 Spannungsrißkorrosion (SRK)

1. (Siehe 6.1.1) ergänzend: Der primär durch SRK erzeugte Bruch ist ein makroskopisch verformungsloser Bruch.
2. Vorwiegend unedlere Werkstoffe, die durch Passivierung korrosionsbeständig sind.
 - Werkstoffe, die sich, sehr stark lokalisiert, in Gleitbändern plastisch verformen (transkristalline Korrosion).
 - Werkstoffe, bei denen die Korngrenzen besonders geeignete Angriffsorte bieten (interkristalline Korrosion).
3. - Statische Beanspruchung: Der Werkstoff wird im korrosiven Medium einer Zugspannung ausgesetzt und die Lebensdauer bis zum Bruch bestimmt.

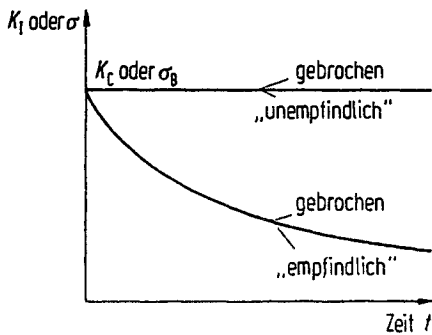


Bild A 6.1

- **Dynamische Beanspruchung:** Es wird die Rißausbreitungsgeschwindigkeit da/dN im Vakuum und im korrosiven Medium (meist 3,5%NaCl-Lösung) in Abhängigkeit von der Schwingbreite der Spannungsintensität ΔK bestimmt.

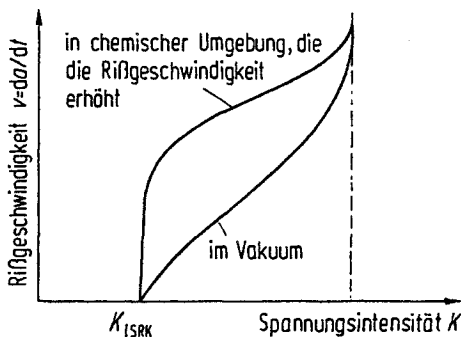


Bild A 6.2

- Für die Durchführung von Bruchmechanikversuchen in korrosiven Medien gelten alle Regeln, wie sie bereits in Kap. 4.6.3 dargestellt worden sind. Versuchstechnisch sind lediglich leicht abgewandelte Formen der Proben oder z.B. ein horizontaler Aufbau der Versuchsmaschine für die Anbringung des korrosiven Mediums notwendig, (siehe Bild A 6.3).
Für die K_{Isc} (scc = stress corrosion cracking) Bestimmung wird die Probe unter einem korrosiven Medium mit einer bestimmten Spannungsintensität K (bzw. Spannung) beaufschlagt, so daß unter der Wirkung von Spannungsriß-

korrosion Rißausbreitung einsetzt. Je nach Wachstumsgeschwindigkeit des Risses erreicht nach kürzerer oder längerer Zeit t der Riß seine kritische Länge und es tritt Bruch ein. Trägt man über die Zeit bis zum Bruch die Spannungsintensität auf, so stellt sich die Wirkung der Spannungsrißkorrosion als eine Erniedrigung der Bruchzähigkeit dar, für die ein Schwellwert $\Delta K_{I_{\text{occ}}}$, unterhalb dessen keine Rißausbreitung unter korrosiven Einfluß stattfindet (siehe Bilder A6.1 und A6.2), existiert.

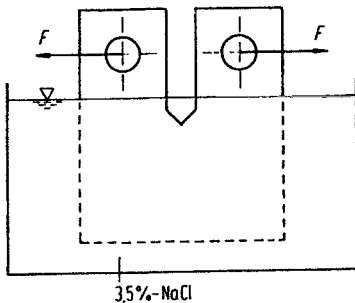


Bild A 6.3

5. Prinzipiell kann ein Riß unter SRK-Bedingungen sich ebenfalls trans- oder interkristallin ausbreiten. Häufig liegt jedoch eine Änderung des Rißausbreitungsmechanismus bei SRK-Bedingung vor, so daß umgekehrt durch die Kenntnis des Rißausbreitungsmechanismus unter inerten Bedingungen auf einen SRK-Schaden geschlossen werden kann.
Beispiel: Aluminium ist kfz und zeigt unter normalen Bedingungen ein transkristallines Rißausbreitungsverhalten. Wird die Wasserstoffkonzentration erhöht, diffundiert dieser in die Korngrenzen und versprödet sie, so daß die Rißausbreitung interkristallin erfolgt.

6.4 Reibung und Verschleiß

1. siehe Bild A6.4
- 2.a) Es muß eine möglichst hohe Wechselwirkungsenergie zwischen den Oberflächen angestrebt werden, d.h. eine hohe Oberflächenenergie ist günstig für gute Klebbarkeit.

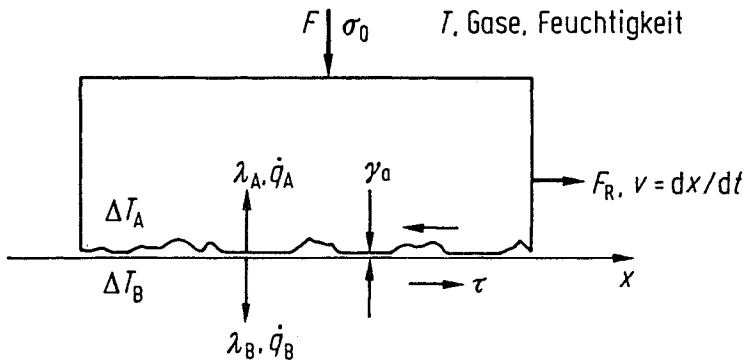


Bild A 6.4

- b) Es muß eine möglichst geringe Wechselwirkungsenergie zwischen den Oberflächen angestrebt werden, d.h. eine geringe Oberflächenenergie ist günstig für gute Gleiteigenschaften und führt zu einem minimalen trockenen Reibungskoeffizienten.
3. Die Oberflächenenergie wird durch das Benetzen mit einer Flüssigkeit, deren Eigenschaften bekannt sind, ermittelt. Die Oberfläche des Flüssigkeitstropfens bildet mit der ebenen Oberfläche der Probe einen Winkel, aus dem die Oberflächenenergie bestimmt werden kann.
4. In beiden Fällen handelt es sich um die Wechselwirkung von sich gegeneinander bewegenden Oberflächen.
 - Reibung ist die Dissipation von Energie und die Ursache des Verschleißes.
 - Verschleiß ist die Dissipation von Materie.
5. Verschleiß wird entweder als Änderung der geometrischen Form als Abtragungsrate auf den Laufweg bezogen, gemessen oder gravimetrisch als Gewichtsverlust auf den Laufweg bezogen, bestimmt.
- 6.a) Geringe Reibung und geringer Verschleiß ist die übliche Forderung bei Gleitlagern.
 - b) Hohe Reibung mit geringem Verschleiß ist bei einer Bremse gefordert.
 - c) Hoher Verschleiß trotz geringer Reibung ist in der Trenntechnik und in der Zerspanungstechnik gewünscht.

7 Keramische Werkstoffe

7.1 Allgemeine Kennzeichnung

1. Die moderne Definition der keramischen Werkstoffe weist dieser Werkstoffgruppe alle nicht-metallischen und nicht-hochpolymeren Werkstoffe zu und umfaßt daher auch die nicht-oxidische Keramik. In der Technik wird als Keramik meist nur die Oxidkeramik bezeichnet und eingeteilt in Keramik/Glas/Bindemittel.
2. - Keramik: Hochtemperaturwerkstoffe für Ausmauerungen von Öfen,
- Glas: Werkstoffe für chemischen Apparatebau und Optik,
- Bindemittel: Zement in der Bauindustrie.
3. Durch ihren spezifischen elektrischen Widerstand, der im Falle der Metalle bei steigender Temperatur zunimmt und bei den Keramiken fällt (siehe auch Kap. A5.2.1).
4. Bei Raumtemperatur sind Keramiken
 - thermodynamisch stabil (kein korrosiver, chemischer Angriff),
 - hart und spröde,
 - elektrische Isolatoren.
5. Asbest besitzt eine Faserkristallstruktur mit einer starken Bindung in der Faserachse und einer schwachen Bindung zwischen den Fasern. Dies führt bei Spaltung zu spitzen Kriställchen, die, eingeatmet, in der Lunge mechanische Schäden erzeugen und so potentielle Orte für Krebsbildung schaffen.
6. - Gasturbinen, Schaufeln, Ventile
- Schneidkeramik,
- Verschleißschuttschichten

7.2 Nichtoxidische Keramik

1. - Diamant als Hartstoff,
- Graphit als Schmierstoff und Gefügebestandteil des Gußeisens,
- Kohleglas im chemischen Apparatebau (chemisch beständig),
- Kohlefaser im Verbundwerkstoff.
2. Keramische Werkstoffe besitzen eine geringe Wärmeleitfähigkeit bei niedriger Bruchzähigkeit, so daß Wärmespannungen sofort zum Bruch führen. Die technische Eigenschaft "Temperaturwechselbeständigkeit" ist eine Kombination folgender Eigenschaften, aus denen sich ein Kennwert für die Werkstoffauswahl berechnen läßt (anzustreben ist ein möglichst hoher Wert).

$$R = \frac{K_{Ic} \cdot \lambda \cdot T_{kf}}{E \cdot \alpha} \rightarrow \text{MAX.}$$

Damit eine Keramik eine gute Temperaturwechselbeständigkeit besitzt, muß sie zu allererst warmfest sein, d.h. eine hohe Schmelztemperatur T_k besitzen. Zur Vermeidung von Temperaturgradienten und den daraus bedingten Wärmespannungen, die insbesondere beim Aufheizen und Abkühlen entstehen, muß der Wärmeleitfähigkeitskoeffizient λ groß, der Ausdehnungskoeffizient α und der E-Modul jedoch klein sein. Außerdem erträgt die Keramik die Wärmespannungen ohne Rißbildung umso besser, je größer die Bruchzähigkeit K_{Ic} ist. Je nachdem, ob der Werkstoffkennwert maximiert oder minimiert werden soll, schreibt man ihn in den Zähler oder Nenner und erhält so den obigen Quotienten. Derjenige Werkstoff, aus dessen Werkstoffkennwerten sich der größte R-Faktor errechnet, zeigt die beste Temperaturwechselbeständigkeit.

3. Phasen mit hohen Werten von E/ρ müssen eine geringe relative Atommasse besitzen, also weit vorne im Periodensystem stehen und fest gebunden sein, was bei der kovalenten Bindung der Fall ist.
Beispiele: B, C, Be.
4. - Als Absorberwerkstoff in Kernreaktoren,
- In der Oberflächentechnik zur Borierung von Stählen,
- In der Verbundwerkstofftechnik als hochfeste Borfaser.

7.3 Oxidkeramik

1. Die obere Verwendungstemperatur wird durch das Auftreten von

schmelzflüssigen Phasen begrenzt, d.h. sie liegt immer unterhalb der im Zustandsdiagramm eingezeichneten Zweiphasengebiete, in denen eine Phase flüssig (f) ist.

2.

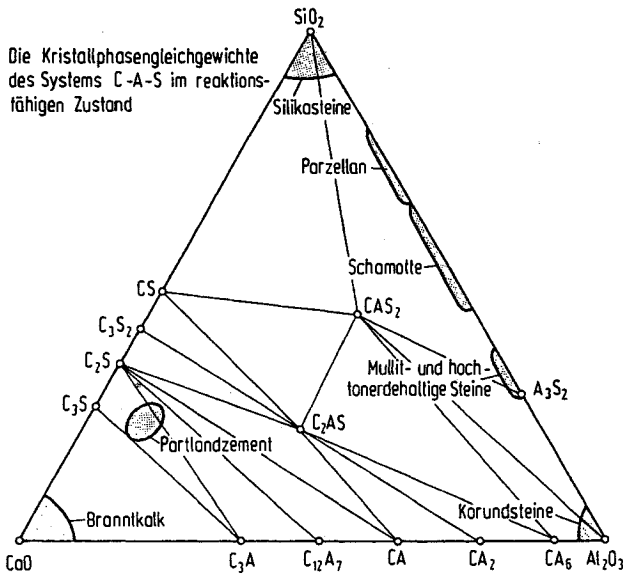


Bild A 7.1

3. Die plastische Verformbarkeit beruht bei:
 - a) Metallen auf der Gleitung in Kristallebenen mit Hilfe von Versetzungen,
 - b) feuchtem Ton auf dem Gleiten auf durch Adhäsion gebundenen Flüssigkeitsschichten, die zwischen Feinkristallen liegen,
 - c) Oxidglas auf dem viskosen Fließen, das nur bei erhöhter Temperatur möglich ist.
4. Vorteile: hohe Schmelztemperatur, hohe Oxidationsbeständigkeit,
Nachteil: geringe Temperaturwechselbeständigkeit. (siehe auch Kap. A7.2.2).
5.
 - Korund ist vollständig im thermodynamischen Gleichgewicht (vollständig oxidiert),
 - Polyäthylen ist reaktionsträge, d.h. die Oxidation ist sehr schwer aktivierbar,
 - Chromstahl ist durch eine dünne Oxidschicht passiviert.

7.4 Zement-Beton

1. Hydraulische Zemente binden durch die Einlagerung von Wasser ab (sind im Wasser nicht löslich),
nichthydraulische Zemente wie Kalk binden nicht durch Wasser, sondern durch Karbonat ab (ist in Wasser löslich).
2. Entscheidend ist, daß die Verbindung Ca_3SiO_5 die besten Eigenschaften als hydraulischer Zement hat. Diese Verbindung bildet sich jedoch erst oberhalb von 1.200°C . Daraus folgt für die Zementherstellung, daß man ein Gemisch aus SiO_2 und CaO herstellt und es auf diese Temperatur erhitzt. Anschließend muß zur Erzielung einer großen Oberfläche der Zement noch gemahlen werden.
3. Beton besteht aus den Gefügebestandteilen Schotter (Kiesel), Sand und Zement, die aufgrund ihrer unterschiedlichen Größe eine dichte Packung bilden. Durch die Hydratation des Zements verkleben diese Gefügebestandteile zu einer wasserunlöslichen Verbindung.
- 4.

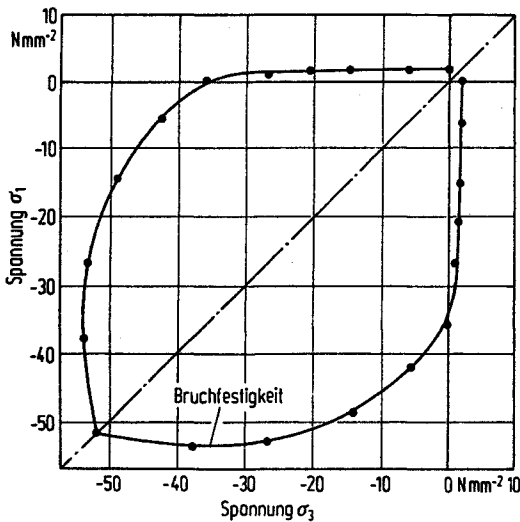


Bild A 7.2

5. Beton ist durch seine Druckfestigkeit in kp/cm^2 ($\hat{=}$ $0,1 \text{ N/mm}^2$) gekennzeichnet.
 $\text{BN } 200 \hat{=}$ $200 \text{ kp/cm}^2 \hat{=}$ 20 MPa .

7.5 Oxidgläser

1. In allen Werkstoffgruppen können Gläser hergestellt werden. Die dazu notwendigen Abkühlungsgeschwindigkeiten unterscheiden sich aber erheblich. Leicht herzustellen sind Oxide mit eutektischer Zusammensetzung sowie Polymere mit flexiblen Ketten. Schwer herzustellen sind Ionenkristalle und Metalle. Kennzeichnend für die Glasstruktur ist eine ungeordnete Anordnung von Baugruppen (z.B. SiO_2 , diese selbst sind wohlgeordnete Tetraeder). Im Gegensatz zum vollständig geordneten Kristall besteht die Glasstruktur aus ungeordneteren Atomgruppen oder Molekülen.

In

Keramiken: regelloses Netz von Atomgruppen,

Metallen: regellose dichte Packung

Polymeren: regellos verknäuelte Molekülketten.

2. Die Schmelztemperatur T_{kf} ist durch das thermodynamische Gleichgewicht zwischen flüssiger und fester Phase gegeben. Die Glastemperatur (T_g) ist diejenige Temperatur, bei der eine unterkühlte Flüssigkeit einfriert, d.h. Diffusionsvorgänge relaxieren die Struktur nicht mehr in meßbaren Zeiten (aber kein thermodynamisches Gleichgewicht!). Die Neuformung von Oxidgläsern erfolgt oberhalb von T_g , während die Verwendungstemperatur darunter liegt.
3. Der Bereich des Fensterglases liegt zwischen 60 und 78 Mol-% SiO_2 , Rest Na_2O (siehe auch Bild F7.4).

$$4. \quad \varepsilon_{\text{ges}} = \sigma \cdot \left[\underbrace{1/E}_{\text{elastische Verformung}} + \underbrace{t/\eta}_{\text{viskoses Fließen}} \right]$$

Welches Verformungsverhalten dominiert, hängt von der Temperatur ab, da η stark temperaturabhängig ist.

5. Die Lichtleitung im Glasfaserstrang basiert auf Totalreflexion. Dazu muß im Strang ein Dichtegradient aufgebaut werden, der durch Eindiffundieren von z.B. Germaniumdioxid in Siliziumdioxid erreicht wird. Bild A 7.3 zeigt den Aufbau eines Glasfaserstranges.

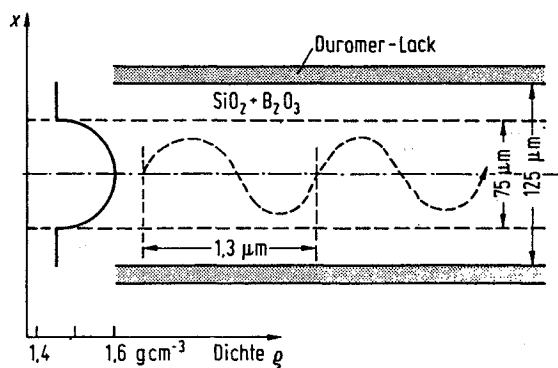


Bild A 7.3

8 Metallische Werkstoffe

8.1 Metalle allgemein und reine Metalle

1. Ein Metall ist ein Stoff mit folgenden Eigenschaften:
 - Reflexionsfähigkeit für Licht,
 - hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit,
 - plastische Verformbarkeit und Bruchzähigkeit (auch bei tiefer Temperatur),
 - in einigen Fällen Ferromagnetismus,
 - chemisch meist nicht beständig.
2. - Gußeisen (GG), Stahl (St):
 - GG: Schmelztemperatur ~ 1.250 °C, etwa eutektisch, nicht plastisch verformbar;
 - St: Schmelztemperatur ~ 1.540 °C, gut plastisch verformbar, bruchzäh- G-AlSi12, AlMg 5:
 - G-AlSi12: Schmelztemperatur 580 °C, etwa eutektisch,
 - AlMg 5: Schmelztemperatur 650 °C, gut verformbar, meerwasserbeständig.
3. - niedriger Schmelzpunkt,
 - eutektische Zusammensetzung,
 - feines Gefüge,
 - geringe Volumenkontraktion (Schwindung),
 - geringe Seigerungsneigung,
 - gutes Formfüllvermögen.
4. Hoher Schmelzpunkt: kleiner Atomradius (Be), kovalenter Bindungsanteil (V, W, Übergangsmetalle).
Niedriger Schmelzpunkt: umgekehrt (Sn, Pb, Bi).
5. Leitkupfer; Wolfram für Glühfäden (mit Dispersion keramischer Teilchen); Ag, Al für Spiegel (sehr selten).

6. Nicht das stabile Zustandsdiagramm Eisen-Kohlenstoff (Fe-C), sondern das metastabile Gleichgewicht (Fe-Fe₃C) ist maßgeblich für die Beurteilung der Stähle.
7. Stähle mit 0,1 bis 0,5 Gew.% C-Gehalt werden als Baustähle bezeichnet, Vergütungsstähle enthalten 0,25 bis 0,8 Gew.% Kohlenstoff, Werkzeugstähle 0,7 bis 2,0 Gew.%.
Eisen-Kohlenstoff Legierungen mit mehr als 2 Gew.% C-Gehalt werden als Gußeisen bezeichnet. Diese Grenze ist durch die maximale Löslichkeit von C in γ -Fe bestimmt.
8. Grundsätzlich werden weißes (ledeburitisches) Gußeisen, basierend auf dem metastabilen System Fe-Fe₃C, und graues Gußeisen, basierend auf dem stabilen System Fe-C, unterschieden. Letzteres kann wiederum hinsichtlich der Form des Graphits in lamellares und globulitisches Gußeisen unterschieden werden.
9. Das Legierungssystem Aluminium-Silizium (Al-Si) bildet die Grundlage für Aluminium-Gußlegierungen. Auf Aluminium-Kupfer (Al-Cu) und Aluminium-Magnesium (Al-Mg) basieren die meisten Knetlegierungen. Dabei sind Al-Cu Legierungen härtbar (durch Ausscheidungshärtung), Al-Mg Legierungen naturhart (durch Mischkristallhärtung).
10. Es gibt zwei Gruppen von Superleichtmetallen:
 - Al-Li-und
 - Mg-Li-Legierungen
 - + jeweils evtl. weiterer Legierungsbestandteile.

8.2. Mischkristallegierungen

1. Siehe dazu in den betreffenden Zustandsdiagrammen (Bild F8.1a-c) die mit " α " und " $\alpha + \beta$ " gekennzeichneten Phasenfelder (Temperaturbereiche beachten!).
2. In Cu-gelöste Atome (Zn, Al, Si) erhöhen Streckgrenze und Verfestigungskoeffizienten. Dadurch erhöht sich auch Gleichmaßdehnung und Tief- und Streckziehfähigkeit.
3. Entscheidend für Mischkristallhärtung ist die Differenz der relativen Atomradien

$$\left| \frac{\sqrt{r_x} - \sqrt{r_{Fe}}}{\sqrt{r_{Fe}}} \right| = \varepsilon \quad \Delta\sigma \approx G \cdot c^{\frac{1}{2}} \cdot \varepsilon$$

Dazu muß der nächste Atomabstand berechnet werden.

Atom	Struktur	a	r_x	ϵ	$\Delta\sigma$ [MPa]	A	Gew.-%
α -Fe	krz	0,287	0,124	/	/	56	-
Ce	krz	0,288	0,125	0,008	67,2	52	8,58
Mo	krz	0,315	0,136	0,097	814,8	96	1,70
Al	kfz	0,405	0,143	0,153	1285	27	0,48
P	(krz)*	0,217	0,094	0,242	2033	31	0,57

*berechnet aus Gitterparameter der krz Fe(P)-Mischkristalle

gegeben:

- Umrechnungsformel At.% \rightarrow Gew.%:

$$w = \frac{x_x A_x}{x_{Fe} A_{Fe} + x_x A_x} = \frac{1}{1 + \frac{x_{Fe} A_{Fe}}{x_x A_x}}$$

mit:

$$x_x = 0,01 \quad , \quad x_{Fe} = 0,99$$

- Schubmodul für α -Fe:

$$G_{\alpha-Fe} = 84 \text{ GPa}$$

4. Mischkristallbildung führt immer zu einer Mischkristallhärtung (siehe Kap. 8.2.3). Die Streckgrenze wird wie der spezifische elektrische Widerstand ρ erhöht. Die Schmelztemperatur (Schmelzbereich) kann bei vollständiger Mischkristallbildung entweder erhöht oder erniedrigt werden, je nach Schmelzpunkt der zugemischten Atomart (siehe entsprechende Zustandsdiagramme mit Mischkristallgebieten in den vorigen Kapiteln).

8.3 Ausscheidungshärtbare Legierungen

1. Bei Zusammensetzungen, bei denen die Löslichkeit mit abnehmender Temperatur sinkt.

2.

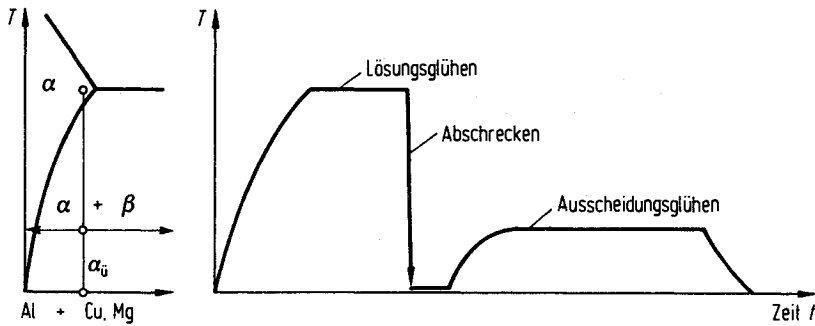


Bild A 8.1

- Homogenisieren \equiv Glühen im Mischkristallgebiet, so daß ein übersättigter Mischkristall α_u entsteht.
- Auslagern \equiv Glühen im Zweiphasengebiet, so daß die β -Phase fein dispers ausgeschieden wird, $\alpha_u \rightarrow \alpha + \beta$

3.

$$\Delta\tau_T = G \cdot \frac{b}{D_T} = \frac{84 \cdot 10^3 \cdot 0,25 \cdot 10^{-6}}{100 \cdot 10^{-6}} = 210 \text{ MPa} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} G_{\alpha_{\text{Fe}}} &= 84.000 \text{ MPa} \\ B_{\alpha_{\text{Fe}}} &= 0,25 \text{ nm} \\ D_T &= 100 \text{ nm} \end{aligned}$$

4. Die Erhöhung der Streckgrenze einer ausscheidungsgehärteten Legierung ist gegeben durch

$$\Delta\sigma_T = \frac{G \cdot b}{D_T}$$

Nach Ende der Ausscheidung tritt bei isothermer Glühung (bei T_A) Teilchenwachstum (d_T = Teilchen-Durchmesser) bei konstantem Volumenanteil f_T auf. Der Teilchenabstand D_T nimmt proportional dem Teilchendurchmesser d_T zu:

$$d_T / D_T = cf^{1/2} = \text{const.} \quad (2)$$

Folglich nimmt die Streckgrenze ab. Die Legierung befindet sich im überalterten Zustand.

5. Aus Gleichung (1) und (2):

$$\Delta\tau_T = \frac{G \cdot b \cdot cf^{\frac{1}{2}}_{NbC}}{d_T}$$

$$f_{NbC} = \left(\frac{\Delta\tau_T d_T}{Gbc} \right)^2 = \left(\frac{500 \cdot 5}{84.000 \cdot 0,2482 \cdot 0,5} \right)^2 = 0,058 \equiv 5,8 \text{ Vol.} - \%$$

Umrechnung des Volumenanteils von NbC in Gewichtsprozente:

$$W_{NbC} = \frac{1}{1 + \frac{f_{\alpha-Fe} \cdot \rho_{\alpha-Fe}}{f_{NbC} \cdot \rho_{NbC}}} = \frac{1}{1 + \frac{0,942 \cdot 7,88}{0,058 \cdot 7,78}} = 0,057 \equiv 5,7 \text{ Gew.} - \%$$

⇒ 100 kg Schmelze müssen 5,7 kg Nb enthalten.

Aus den relativen Atommassen von C ($A_C = 12,0111$) und Nb ($A_{Nb} = 92,906$) sowie der Zusammensetzung von NbC (50 At.-% Nb, 50 At.-% C) läßt sich der Nb-Anteil berechnen:

$$W_{Nb} = \frac{1}{1 + \frac{x_{Nb} \cdot A_{Nb}}{x_C \cdot A_C}} = \frac{1}{1 + \frac{0,5 \cdot 92,906}{0,5 \cdot 12,011}} = 0,8855 \equiv 88,55 \text{ Gew.} - \%$$

⇒ in 5,7 kg NbC sind 5,05 kg Nb enthalten.

D.h., um eine Erhöhung der kritischen Schubspannung $\Delta\tau = 500 \text{ MPa}$ durch NbC-Teilchen zu erreichen, muß einer 100 kg Schmelze 5,05 kg Nb zugefügt werden.

6. - Ursache: Die Keimbildung von Ausscheidungen erfolgt mit Hilfe von Leerstellen. Da Korngrenzen aber sogenannte Leerstellensenken darstellen, sind dies Zonen geringer Teilchendichte und geringer Festigkeit.
 - Konsequenzen: Die teilchenfreie Zone stellt einen Bereich geringer Härte und Festigkeit entlang der Korngrenzen dar. Bei Belastung kann dies zu einem vorzeitigen Versagen der weichen Korngrenzen führen (pseudo-interkristalliner Bruch).

8.4 Umwandlungshärtung

1. - Fe: $\alpha - \rightarrow \gamma - \rightarrow \delta\text{-Fe}$
 - Sn: $\alpha - \rightarrow \beta\text{-Sn}$
 - Ti: $\alpha - \rightarrow \beta\text{-Ti}$
 - Co: $\alpha - \rightarrow \beta\text{-Co}$
 - U: $\alpha - \rightarrow \beta - \rightarrow \gamma\text{-U}$

2.

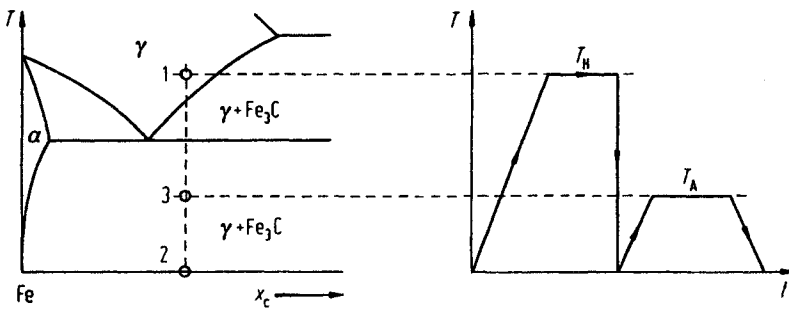


Bild A 8.2

- Austenitisieren im $\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$ -Gebiet (wegen unverhältnismäßig langen Zeiten wird nicht das gesamte Fe_3C aufgelöst),
 - Abschrecken (Martensitbildung, jedoch Perlitbildung vermeiden),
 - Anlassen (feine Karbide im Martensit, gute Bruchzähigkeit).
- 3.a) Umkristallisieren eines untereutektoiden Stahls durch Erhitzen ins γ -Gebiet und Abkühlen.
 - b) Kombinierte Behandlung von Härten (siehe 8.4.2) und Anlassen bei erhöhten Temperaturen zur Verbesserung der Bruchzähigkeit / Kerbschlagzähigkeit.
 - c) (siehe 8.4.2), Erwärmen auf eine Temperatur, bei der die Diffusion so schnell abläuft, daß Ausscheidung innerhalb von $t < 1$ Stunde eine gewünschte Eigenschaftsänderung (Erhöhung der Bruchdehnung oder Erhöhung der Streckgrenze) bewirkt.
 - d) Meist durch Segregation an Korngrenzen bedingter interkristalliner Bruch, führt zur Abnahme der Bruchdehnung.
 - e) Abnahme der Streckgrenze beim Anlassen wird durch Zusetzen bestimmter Legierungselemente (Cr, Mo, V im Stahl) zu höheren Temperaturen verschoben. Grund: langsame Diffusion dieser Elemente bei Karbidbildung.
 - f) Wärmeleitfähigkeit bestimmt denjenigen Durchmesser, bis zu welchem ein Stahl beim Abschrecken (H_2O) martensitisch umwandelt und dadurch härtet. Durch bestimmte Legierungselemente wird das Umwandeln der Perlitstufe

verzögert (z.B. B, Cr, Mo) und damit in größerer Dicke martensitische Umwandlung und damit Härtung (oder Vergütung) ermöglicht.

- 4.a) Warmfestigkeit kommt zustande aufgrund von Gleitbehinderung durch Karbide, deren Vergrößerung bei Betriebstemperatur begrenzt ist. Verwendungstemperatur: Cr-legiert 350 °C, Mo-legiert 550 °C.
 - b) Warmfestigkeit durch langsame Diffusion im kfz-Gitter plus Ausscheidung von Teilchen (aushärtbare austenitische Stähle), Verwendungstemperatur: 750 °C.
 - c) Warmfestigkeit wie b), zusätzlich zweierlei Teilchen (Oxide und intermetallische Verbindung $\text{Ni}_3\text{Al} \equiv \gamma'$), Einkristalle, gerichtet erstarrte Eutektika, Superlegierungen, Verwendungstemperatur: 1.050 °C.
5. Bei der eutektoiden Umwandlung findet eine Neubildung von zwei unterschiedlichen Phasen in der Reaktionsfront statt, ($\gamma \rightarrow \alpha + \beta$). Während einer diskontinuierlichen Ausscheidung wird eine Kristallart β aus einem übersättigten Mischkristall α_0 gebildet. Dabei ändert die α -Phase nicht ihre Kristallstruktur, sondern nur die chemische Zusammensetzung in Richtung des Gleichgewichtes, ($\alpha_0 \rightarrow \alpha + \beta$).

9 Polymerwerkstoffe

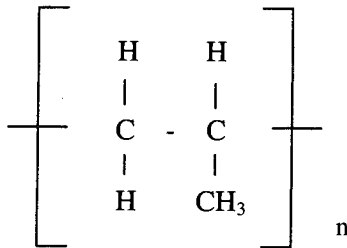
9.1 Molekülketten

1. Aus allen kohlenstoffhaltigen Mineralien: Kohle, Erdöl, (Erdgas).

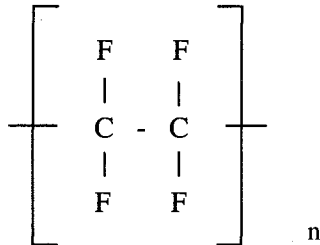
$$2. \quad A_H = 1 \quad A_C = 12,0 \quad A_{Cl} = 35,5 \quad M_{C_2H_3CL} = 62,5$$

$$\rightarrow \bar{u}_{PVC} = 62,5 \cdot 10^4$$

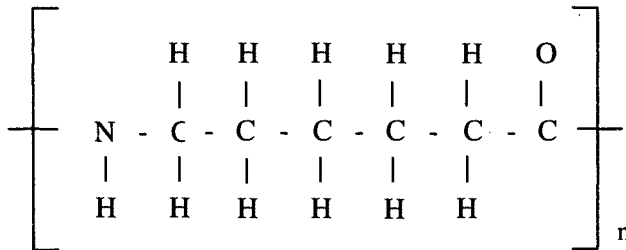
3.a) PP-Polypropylen



b) PTFE: Poly-tetra-fluor-ethylen



c) PA: Polyamid, z.B. PA 6 - Polyamid 6 (Perlon)



- 4.a) Struktur der Kette: z.B. Folge von Seitengruppen, Verzweigungen;
 - b) Form der Moleküle: z.B. Knäuel, gestrecktes Molekül;
 - c) Anordnung der Seitengruppen am Monomer: z.B. PP asymmetrisch, PTFE symmetrisch;
 - d) Reihenfolge auch besonderer Seitengruppen in der Kette: ataktisch = regellos, isotaktisch = regelmäßig.
5. Der Polymerisationsgrad ist gegeben durch die Anzahl der Monomere, aus denen die großen Molekülketten der Polymermoleküle entstehen. Der Polymerisationsgrad ist definiert als das Verhältnis aus Molekulargewicht des Polymers und Molekulargewicht des Monomers.
 6. Ein Kopolymer ist aus mindestens zwei verschiedenen Monomeren zusammengesetzt. Damit sind besondere Eigenschaftskombinationen der Polymermoleküle und somit auch der polymeren Werkstoffe möglich. (z.B.: ABS)
 7. Polymere können als Glas, im Extremfall als verknäultes Molekül oder als Kristall vorliegen. Im letzten Fall liegen gestreckte Moleküle parallel nebeneinander. Eine Besonderheit ist, daß ein Polymermolekül in sich kristallisieren kann. Es bildet dann eine sogenannte Faltlamelle.

9.2 Kunststoffgruppen

1. und 2.

- a) Thermoplaste (T) (oder Plastomere): unvernetzte Ketten, plastisch verformbar nach Erwärmen;
- b) Duromere (D): stark vernetzt, nach Vernetzung nicht mehr plastisch verformbar;
- c) Elastomere (E): verknäulte Ketten, schwach vernetzt, stark elastisch verformbar.

- 3.a) E-Modul: $E \rightarrow T \rightarrow D$
b) R_m : $E, T \rightarrow D$
c) $\epsilon_{pl,RT}$: $E, D \rightarrow T$
d) $\epsilon_{pl,>RT}$: $E, D \rightarrow T$

4.

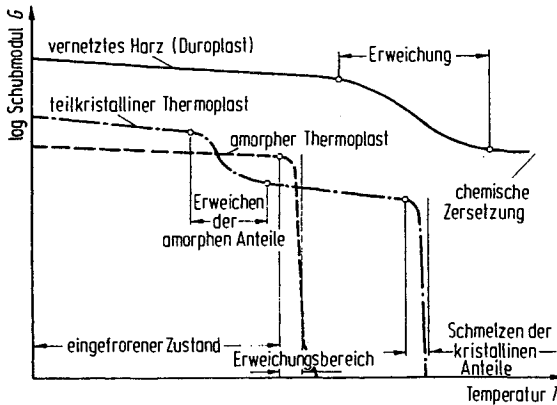


Bild A 9.1

9.3 Mechanische Eigenschaften I

1.

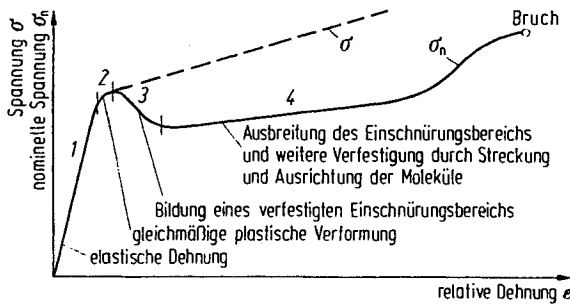


Bild A 9.2

2. siehe Erläuterungen in Bild A 9.2

3.

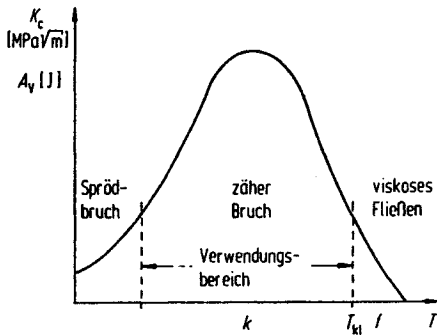


Bild A 9.3

4. - Einmischen von Elastomeren in PS. Diese bilden eine Dispersion und wirken als Reißstopper, indem sie an ihren Grenzflächen plastische Verformung zulassen.
- Einmischen von Weichmachern. In PVC werden Moleküle mit mittlerem Molekulargewicht $100 < \bar{M} < 1.000$ eingemischt, die die Molekülketten "auseinanderrücken". Die Übergangstemperatur zum Sprödbruch wird erniedrigt.
- Durch Werkstoffverbund z.B. Einbringen von Metall- oder Aramidfasern.

9.4 Mechanische Eigenschaften II

1. Schäume entstehen durch Polymerisationsreaktion, bei der gasförmige Komponenten gebildet werden: PUR (Polyurethan) oder durch Einblasen eines Gases in zähflüssige Thermoplaste: Dampf in PS (Polystyrol) bei 70 °C. Die Mikrostruktur setzt sich aus geschlossenen Zellen und den von ihnen eingeschlossenen Poren zusammen. Zur Kennzeichnung der Dichte von Schäumen dient die sogenannte Rohdichte:

$$f_{\text{Polymer}} + f_{\text{Pore}} = 1$$

$$\rho_R = \rho_{\text{Polymer}} \cdot f_{\text{Polymer}} + \rho_{\text{Poreinhalt}} \cdot f_{\text{Pore}} \quad (\text{Rohdichte})$$

2. Parallelschaltungsmodell:

$$E = E_{\text{Polymer}} \cdot f_{\text{Polymer}} \quad (\text{geschlossener Schaum})$$

- 3.a) μ = niedrig: PTFE, PE

b) μ = hoch: PA, PMMA (trockene Umgebung!)

Unsymmetrische Moleküle führen zu hoher Oberflächenenergie und folglich zu starker Adhäsion (Klebrigkeit) und umgekehrt.

Bemerkung: durch Adhäsion von Wassermolekülen (in feuchter Luft) wird μ erniedrigt.

4. Ein eindeutiger Zusammenhang ist noch nicht gefunden worden:
- PTFE: zeigt hohen Verschleiß bei geringer Reibung
 - PE: mit hohem Molekulargewicht, beste Kombination von niedrigem Reibungskoeffizienten und Verschleißrate
 - PA: zeigt diese günstige Kombination nur in feuchter Luft.

Die Erforschung dieses Gebietes ist insgesamt noch nicht abgeschlossen.

- 5.a) Dichtungsringe;
- b) Konstruktionsteile im Flug- und Fahrzeugbau, Ersatz von Stahl;
 - c) Reifen, Bremsen, Schuhsohlen;
 - d) Lager und andere Gleitflächen, Schnappverschlüsse, Datenspeicher;
 - e) Konstruktionsteile für chemischen Apparatebau, Behälter für Chemikalien, Kunststoffbeschichtung als Korrosionsschutz;
 - f) Dämpfungsglieder in Getrieben, Schallschutz Ummantelungen.

6. Adhäsion kommt dadurch zustande, daß zwischen polaren Klebstoffmolekülen und den Atomen der Werkstoffoberfläche Bindungskräfte auftreten. Daneben wird die Bindung der Atome im Klebstoff selbst durch die Kohäsion beschrieben. Beide übertragen bei einer Klebung die angreifenden äußeren Kräfte.

Adhäsion kann am besten durch die Verwendung von Stoffen mit niedriger Oberflächenenergie, wie z.B. PE oder PTFE, verhindert werden.

10 Verbundwerkstoffe

10.1 Herstellung von Phasengemischen

1. Ein Verbundwerkstoff entsteht durch die künstliche Kombination zweier oder mehrerer Werkstoffe mit dem Ziel der Herstellung eines neuen Werkstoffes, bei dem eine Eigenschaft, oder eine Eigenschaftskombination, diejenige der einzelnen Bestandteile übertrifft.

Anmerkung: Es gibt auch natürlich entstandene Werkstoffe mit der eines Verbundes vergleichbaren Struktur: Holz enthält ein Fasergefüge, das durch organisches Wachstum entsteht. Durch gerichtete eutektische Erstarrung entstehen Faser- oder Lamellengefüge, die auch als in-situ Verbunde bezeichnet werden.

- 2.a) Tränken von Fasern (Strängen, Geweben).
b) Verbundverformung (Ziehen) von Dispersionen.
c) Gerichtete Erstarrung.
d) Organisches Wachstum.
- 3.a) α -Eisen (Ferrit) und Graphit im grauen Gußeisen.
b) α -Eisen und Fe_3C im Stahl.
c) Al und C im kohlefaserverstärkten Aluminium.
4. Einlegen der gewünschten Anordnung der Glasfasern in eine Form \rightarrow Tränken mit dünnflüssigem (unvernetztem) Polymer \rightarrow vernetzen.

10.2 Faserverstärkte Werkstoffe

1. a) Es gilt für
 $\epsilon_{\text{Cu}} = \epsilon_{\text{c}}$ (Parallelschaltung)

$$E = E_{\text{Cu}} f_{\text{Cu}} + E_{\text{c}} f_{\text{c}} \quad (1)$$

$$R_{\text{mv}} = R_{\text{mCu}} f_{\text{Cu}} + R_{\text{mc}} f_{\text{c}} \quad (2)$$

Gl. 2 gilt nur, wenn Matrix und Faser beim Bruch des Verbundes gleichzeitig reißen.

$$f_C = \frac{R_{mV} - R_{mCu}}{R_{mC} - R_{mCu}}$$

$$\underline{\underline{f_C = \frac{1000 - 300}{2000 - 300} = 0,41}}$$

b) $\underline{\underline{E = (127 \cdot 0,59 + 350 \cdot 0,41) \cdot 10^3 \text{ MPa} = 218.430 \text{ MPa}}}$

c) Es gilt annähernd das Reihenschaltungsmodell für E:

$$\frac{1}{E} = \frac{f_{Cu}}{E_{Cu}} + \frac{f_C}{E_C} \quad (3)$$

Die Zugfestigkeit ist durch das schwächste Glied in der Reihe bestimmt: $R_{mCu} < R_{mC}$, falls nicht die Grenzflächen Cu/C aufreißen und zu einer zusätzlichen Schwächung führen.

- 2.a) - Keramik-Fasern (SiC),
 - Korund-Fasern (Al_2O_3)
 mit jeweils maximal 60% Faseranteil.
 b) Erhöhung des E-Moduls bei gleichzeitiger Erniedrigung von Dichte und thermischer Ausdehnung.

3.

$$l_c = \frac{\sigma_F \cdot d}{2 \cdot \tau_{FM}}$$

mit:

$\sigma_F \hat{=}$ Faserfestigkeit

$\tau_{FM} \hat{=}$ Grenzschichtscherfestigkeit, Faser / Matrix

4. $F_{Zug} = F_{Schub}$

$$r^2 2\pi R_{m\beta} = l_C \tau_{\alpha\beta} 2r\pi$$

a) $\underline{\underline{l_c = \frac{r \cdot R_{m\beta}}{2 \cdot \tau_{\alpha\beta}} = \frac{10 \cdot 2000}{2 \cdot 250} = 40 \mu m}}$

b) $\underline{\underline{l_c = 4 \mu m}}$

5.a) Die obere Grenze der Schubfestigkeit τ_{th} von Metallen beträgt:

$$\tau_{th} \approx G/10$$

Für den Zusammenhang zwischen Schub- und Zugspannung gilt für regellose Verteilung der Orientierungen:

$$\sigma \approx 3 \tau$$

folglich ist:

$$\sigma_{th} \approx G/10 \approx E/30$$

	E [GPa]	σ_{th} [MPa]	R_m [MPa]	ρ [g/cm ³]
W	360	12.000	-	19,3
B	309	10.300	-	1,9
Fe	215	7.200	3.500	7,8
Cu	125	4.200	-	8,0
Ti	110	3.700	1.700	4,5
Al	72	2.400	670	2,7

bisher in der Praxis erreicht

b) E/ρ bestimmt die Reihenfolge:

	Be	Fe	Al	Ti	W	Cu
E/ρ	1,163	28	27	24	19	16

[GPa/Mgm⁻³]

c) Bei Werkstoffen für Luft- und Raumfahrt: Erdanziehung ist proportional der Masse;

Für Zentrifugen, Ultrazentrifugen, Turbinenschaufeln: Zentrifugalkraft ist proportional der Masse;

Für alle beschleunigten und verzögerten Massen zum Beispiel bei Kolben von Kolbenmaschinen: Beschleunigungskräfte, Trägheit ist proportional zur Masse.

	E [GPa]	ρ [gcm ⁻³]	E/ ρ [GPa/Mgm ⁻³]	
Diamant	1.200.000	2,26	531.000	keramisch
Oxidglas	70.000	2,50	7.000	keramisch
PE	1.000	0,95	1.053	polymer
PVC	3.000	1,38	2.170	polymer

Keramische Werkstoffe können insbesondere dann höhere E/ ρ -Werte aufweisen, wenn sie aus Atomen geringerer Ordnungszahl (B, C) aufgebaut sind.

Polymere weisen geringere Werte im isotropen Zustand auf. Beim einachsigen Verstrecken kann der E-Modul auf das 30-80 fache erhöht werden. Parallel der Richtung der Molekülachse erreichen und übertreffen sie dann die Werte der Metalle.

6. Die Reißlänge ist die größtmögliche Länge eines Fadens (Drahtes, Stabes), die freihängend erreicht werden kann, ohne daß er unter seinem Eigengewicht reißt.

Die Zugkraft ist festgelegt durch die Masse des Werkstoffes und der Erdbeschleunigung: $K_1 = m \cdot g$.

Die größtmögliche Zugkraft K_2 ist durch die Zugfestigkeit R_m des Werkstoffes bestimmt: $K_2 = R_m \cdot S$

S ist der Querschnitt des Drahtes, V sein Volumen, L seine Länge.

$$V = SL$$

Für $K_1 = K_2$ wird $L = L_R$, der Reißlänge des Werkstoffes bei definierter Erdbeschleunigung g und Dichte $\rho = m \cdot V^{-1}$.

$$R_m S = \rho \cdot SL_R \text{ g}$$

$$\frac{R_m}{\rho \cdot g} = L_R = \left[\frac{KN \cdot m^3 \cdot s^2}{m^2 \cdot Mg \cdot m} = \frac{Mg \cdot ms^2}{s^2 \cdot Mg} = m \right]$$

Da in der irdischen Praxis von g als Konstante ausgegangen werden kann, findet man die Reißlänge oft auch mit der Dimension

$$\left[\frac{N}{m^2} \cdot \frac{cm^3}{g} \right]$$

angegeben.

Werkstoff	Maraging Stahl	Aramid	C-Faser	Al -Leg.
$\frac{R_m}{\rho}$ [MPa/Mgm ⁻³]	450	2.500	1.700	250

7. Ein Faserverbund kann unter einachsigen Zug entweder durch Bruch der Fasern oder durch Herausziehen der Fasern versagen. Ist die Kraft die die Faser in Zugrichtung aufnehmen kann kleiner als die, die über die Fasermantelfläche durch Schubspannung übertragen wird, so bricht die Faser. Andernfalls wird die Faser herausgezogen. In die Mantelfläche geht die Länge der Faser direkt ein, so daß es eine Länge gibt, an der der Übergang zwischen den beiden Mechanismen stattfindet. Dies ist die kritische Faserlänge.

8. Es gilt:

$$E_v = E_f \cdot v_f + E_m \cdot (1 - v_f) \quad (1)$$

mit:

$$(1 - v_f) = v_m$$

$$\rightarrow E_v = E_f + v_m \cdot (E_m - E_f)$$

$$\rightarrow v_m = \frac{E_v - E_f}{E_m - E_f} \quad (2)$$

aus Aufgabe: $E_f = 7 \cdot E_m = 350.000 \text{ MPa}$

alles in Gl. (2) einsetzen:

$$\rightarrow \underline{v_m} = \frac{170.000 - 350.000}{50.000 - 350.000} = 0,6 \hat{=} 60 \%$$

10.3 Stahl- und Spannbeton

- 1.a) Die Aufnahme von Zugspannungen im Bauteil und die Behinderung des Rißwachstums im Beton. Der Beton schützt umgekehrt den Stahl vor Korrosion.
- b) Die Erzeugung einer Druckvorspannung im Beton, um diesen wiederum mit Zug belasten zu können.
- 2.a) Aus dem Gleichgewicht der Kräfte folgt:

$$|\sigma_{st}| \cdot f_{st} = |\sigma_b| \cdot f_b = \sigma_b (1 - f_{st})$$

$$\sigma_b = \frac{\sigma_{st} \cdot f_{st}}{1 - f_{st}} = \frac{600 \cdot 0,05}{0,95} = 32 \text{ MPa}$$

- b) Die hohe Streckgrenze kommt neben der Mischkristall- und Ausscheidungshärtung (Fe_3C -Dispersion) . insbesondere durch Kaltverfestigung beim Ziehen (erhöhte Versetzungsdichte + Reckaltern) zustande.

10.4 Schneidwerkstoffe

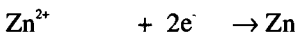
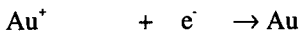
- 1.a) Kaltarbeitsstahl: $x_c > 0,6$ Gew. %
Warmarbeitsstahl zusätzlich Cr, Mo zur Bildung von anlaßbeständigen Karbiden.
 - b) 1% C, 18% W, 4% Cr, 2% V.
 - c) 60 bis 90% WC, TiC in Co, (Ni, Fe).
 - d) Al_2O_3 , $\text{Al}_2\text{O}_3 + 5\% \text{ZrO}_2$
 - e) Allgemein: metallische Grundmasse und keramische (Oxid-) Dispersion.
 (Alle Angaben in Gew.%)
2. Mischen der Pulver \rightarrow Pressen \rightarrow Reaktionssintern bei etwa 1.500 °C \rightarrow Schleifen.
3. Nach oben begrenzt durch die Notwendigkeit einer metallischen Grundmasse (erhöhte Bruchzähigkeit).
4. Die Härte- und Schmelztemperatur von Al_2O_3 -Schneidkeramik ist höher, die Bruchzähigkeit ist geringer als bei Hartmetallen. Schneidkeramik ist günstiger unter Bedingungen, die die Bildung und Ausbreitung von Rissen nicht begünstigen, sie sind also nicht gut geeignet für schlagartige Beanspruchung und unterbrochene Schnitte.

10.5 Oberflächenbehandlung

1. - Veränderung der Mikrostruktur ohne Änderung der Zusammensetzung, z. B. Flammhärten, Kugelstrahlen, Laserhärten.
 - Modifizierung der chemischen Zusammensetzung, Aufkohlen (Einsatzhärten), Inchromieren.
 - Aufbringen einer Schicht eines anderen Werkstoffes, Walzplattieren, Emaillieren.

2. Oxidierend: Anodische Oxidation von Al: $\text{Al} - 3\text{e}^- \rightarrow \text{Al}^{3+}$ führt zur Bildung einer verstärkten Oxidschicht.

Reduzierend: Elektrolytische Beschichtung mit Metallen: vergolden, verzinnen, verzinken:



3. Es gibt

- keramische,
- metallische und
- organische

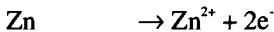
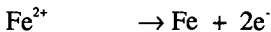
Beschichtungen sowie Behandlungen mit Modifizierung der chemischen Zusammensetzung (siehe Kap. 10.5.1).

- Emaillieren, oxidische CVD-, PVD-Schichten
- sowohl durch unedlere (Zn), als auch durch edlere (Sn) Metalle.
- Kunststoffbeschichtung, Farben, Lacke.

Hierbei sind die chemische Schutzwirkung und weitere Eigenschaften (Härte, Schlagfestigkeit, Haftung, Umformbarkeit mit dem Grundwerkstoff) zu unterscheiden.

Für die chemische Schutzwirkung gibt es folgende drei Möglichkeiten:

- die Korrosionsschutzwirkung kommt zustande durch bevorzugte Auflösung des unedleren Metalles: Zn



- oder Schutz durch ein edleres Metall: Sn
- oder Schutz durch eine zu Passivierung führende gelöste Atomart: Cr.

4. K auf M: Emaille - Stahl
 M auf M: reines Al - AlCuMg
 P auf M: Polymer - Stahl

10.6 Holz

1. und 2.

Orthorhombische Symmetrie (8,4,2) der Struktur: in Wachstumsrichtung orientierte Zellen mit Wänden aus Zellulosefasern (Z), die durch Lignin (L) verklebt sind; Hohlräume (H) im Zellinneren; radiale Wachstumsringe (Jahresringe).

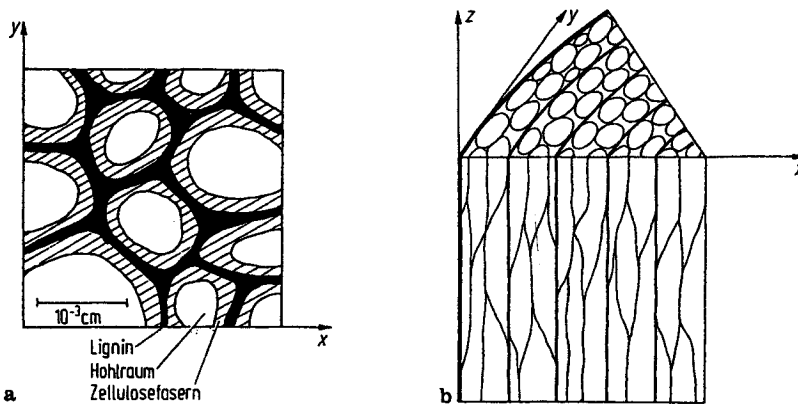


Bild A 10.1

3. Zugfestigkeit $R_{mz} > R_{my} > R_{mx}$
 Druckfestigkeit $R_x > R_y > R_z$

4. $R_{mz} = R_{mz} f_z + R_{mL} f_L$

$$f_z + f_L + f_H = 1$$

f_i Flächenanteile in xy-Ebene von Zellulosefasern, Lignin und Hohlräumen.

5. Wasser erhöht die Dichte; die plastische Verformbarkeit wird besser; das Volumen vergrößert sich (Verzuggefahr).
6. Imprägnieren von Holz mit Duromeren verhindert die Eindiffusion und Adhäsion von H_2O .
7. Dieses Holz zeigt eine wabenartige Struktur, die einzelnen Zellen. In der Mitte der Zellen sind Hohlräume, darum befinden sich die Zellulosefasern. Die Wabenwände bestehen aus Zellulose und sind durch Lignin verklebt.

Die mittlere Zellgröße wird mit dem Linienschnittverfahren (vgl. Aufg. 1.5.6.) ermittelt. Aus der Länge der Linien "L" und der Anzahl der Schnittpunkte dieser Linien mit den Zellwänden "S" ergibt sich unter Beachtung der Vergrößerung "V" die Zellgröße "Z" nach der Formel:

$$Z = L / (S \cdot V)$$

Die Auswertung erfolgte hier mit drei Geraden von je 8 cm Länge.

$$L = 3 \cdot 8 \text{ cm} = 24 \text{ cm}$$

Jede lieferte 8 Schnittpunkte:

$$S = 24 \text{ Schnittpunkte}$$

$$\Rightarrow \underline{Z} = 24 \text{ cm} / (24 \cdot 320) = 0,0031 \text{ cm} = \underline{\underline{31 \mu\text{m}}}$$

11 Werkstoff und Fertigung

11.1 Halbzeug und Bauteile

1. Als Rohwerkstoff liegt der Werkstoff entweder in seiner endgültigen chemischen Zusammensetzung vor, oder es wird daraus die endgültige Zusammensetzung (Legierung, Polymer und Additive) erst hergestellt. In jedem Falle besitzt der Rohwerkstoff keine bestimmte, für den Gebrauch geeignete Form. Beispiele für Rohwerkstoffe sind Masseln und Brammen.
Im Formteil sind sowohl die chemische Zusammensetzung als auch die Form endgültig für den Gebrauch.
Dazwischen liegt das Halbzeug; der Werkstoff besitzt darin schon seine endgültige chemische Zusammensetzung aber eine Form, die noch eine Weiterverarbeitung erfordert. Beispiele für Halbzeuge sind: Bleche, Bänder, Rohre, Träger usw..
2. In der Norm sind nicht nur die Zusammensetzung des Werkstoffs und seine mechanischen Eigenschaften festgelegt, sondern auch die Abmessungen, in denen Halbzeuge z. B. für I-Träger aus Baustahl, hergestellt werden.
3. Die Fertigungsverfahren werden in 5 große Gruppen eingeteilt:
 - Urformen,
 - Umformen,
 - Trennen,
 - Fügen,
 - Nachbehandlung.

11.2 Urformen

1. Als Ausgangsmaterialien für Urformverfahren dienen immer Rohwerkstoffe, aus denen dann das Bauteil, entweder als Halbzeug oder als endgültiges Formteil, hergestellt werden kann. Dies geschieht aus dem gasförmigen (Aufdampfen), flüssigen (Gießen und Erstarren) oder aus dem festen Zustand (Sintern).

Zur Herstellung z.B. einer gegossenen Automobilkurbelwelle wird das Material zunächst erschmolzen und anschließend der flüssige Rohwerkstoff in die Form gegossen. Das fertige Bauteil besitzt nahezu seine endgültigen Abmessungen.

2. An erster Stelle die Viskosität der Schmelze, die z.B. in der Polymertechnik (als Melt-Flow-Index) praxisnah ermittelt werden kann. Daneben Prozesse durch Wechselwirkung mit der Umgebung, die Gaslöslichkeit im Inneren der Flüssigkeit sowie die Oxidation an der Oberfläche.

In ihrer Viskosität unterscheiden sich Metalle und Polymere oberhalb der Schmelztemperatur um mehrere Größenordnungen, da die Metallschmelze aus einzelnen Atomen, die Polymerschmelze aus riesigen Kettenmolekülen besteht. Druckguß (Metallschmelze) und Spritzguß (Polymerschmelze) sind aber vergleichbare Gießmethoden, bei denen in der Regel eine Metallform unter Druck gefüllt wird. Die Techniken unterscheiden sich insbesondere wegen der verschiedenen Viskositäten des geschmolzenen Werkstoffs.

3. In Stahlschmelzen ist sowohl Kohlenstoff als auch Sauerstoff gelöst. Die Sauerstofflöslichkeit im festen, kristallinen Zustand ist sehr gering, folglich reagiert in einer Eisen-Kohlenstoff-Sauerstoff-Legierung der Kohlenstoff mit dem Sauerstoff unter Bildung von Kohlenoxid. Dieses führt zum sogenannten Kochen der noch nicht erstarrten Restschmelze in der sich dadurch weitere Verunreinigungen (S, N) oder Legierungselemente anreichern. Der daraus entstehende Block erhält eine chemisch nicht gleichmäßige Zusammensetzung: außen reines Eisen, im Inneren die Verunreinigungen. Durch das Beruhigen des Stahls wird dies vermieden. Dies geschieht dadurch, daß kurz vor dem Erstarren der Stahlschmelze ein Legierungselement mit größerer Affinität zum Sauerstoff als der Kohlenstoff zugegeben wird.

Beispiel Aluminium: es entsteht eine feine Dispersion Al_2O_3 - das Kochen unterbleibt, und die Zusammensetzung des Werkstoffs ist gleichmäßig. Dieses Verfahren muß für alle hochlegierten Stähle z.B. Werkzeugstähle angewendet werden.

- 4.a) Veredeln von naheutektischen Aluminium-Silizium-Legierungen:

Es wird das Alkalimetall Natrium zugegeben, das oberflächenaktiv die Kristallisation des eutektischen Siliziums beeinflusst, so daß eine feine Verteilung von annähernd kugelförmigen Teilchen anstelle von spießförmigen Siliziumkristallen entsteht. Die mechanischen Eigenschaften des Gußmaterials werden dadurch verbessert.

- b) die Herstellung von Gußeisen mit Kugelgraphit:

Aus ähnlichem Grunde wird die Bildung von lamellarem Graphit zugunsten von Graphitkugeln durch Zusätze von geringen Mengen Magnesium erreicht, und es entsteht damit ein Gußeisen mit sehr viel höherer Bruchzähigkeit als das normale eutektische Gußeisen mit lamellarem Graphit.

5. Ausgangsmaterial sind Pulverteilchen gleicher oder verschiedener Werkstoffe. Triebkraft für das Sintern ist die Oberflächenenergie dieser Teilchen, aus denen sich Korngrenzen oder Phasengrenzen bilden können. Thermische

Aktivierung (Diffusion) aber auch hydrostatischer Druck unterstützen diesen Prozeß.

Grundsätzlich können durch Sintern Halbzeuge und Bauteile in endgültiger Form hergestellt werden. Notwendig ist das Sintern immer, wenn es sich um einen Werkstoff mit sehr hoher Schmelztemperatur handelt, für den kein geeignetes Gefäßmaterial gefunden werden kann, z.B.: die Herstellung von Wolfram und Wolframdrähten am Anfang des Prozesses durch Sintern. Eine zweite Möglichkeit ist die Kombination von Phasen, die im thermodynamischen Gleichgewicht nicht nebeneinander vorkommen. Anwendungsbeispiele sind Metall-Polymer-Verbundwerkstoffe, z.B. mit Kombinationen aus Polytetrafluorethylen und Metallen. Die dritte Möglichkeit, die das Sintern bietet, ist die Herstellung von porösen Werkstoffen, z.B. selbstschmierende Lager- oder Filtermaterialien. Große praktische Bedeutung haben die Hartmetalle (Sinterhartmetalle aus Co + WC).

6. Bei dem Erstarrungsvorgang von Legierungen im zweiphasigen Zustandsbereich (kristallin + schmelzflüssig) wachsen die gebildeten Kristallkeime zu Kornverbänden zusammen. Kurz vor der endgültigen Erstarrung besteht das Gefüge aus bereits kristallisierten Körnern und Restschmelze, die sich als „Saum“ um diese Körner herumlegt. Da Kristalle i.d.R. mit abnehmender Temperatur stärker kontrahieren als Flüssigkeiten, reißt der gerade erstarrende Restschmelzensaum bei der Abkühlung auf.

Ein solches Verhalten mit grosser Heißrissgefahr ist umso ausgeprägter, je größer die Temperaturdifferenz zwischen der Liquidus- und der Soliduslinie des Zweiphasengebietes ist. Am geringsten ist die Heißrissgefahr daher bei eutektischen oder dicht an der eutektischen Zusammensetzung liegenden Legierungen.

11.3 Umformen

1.

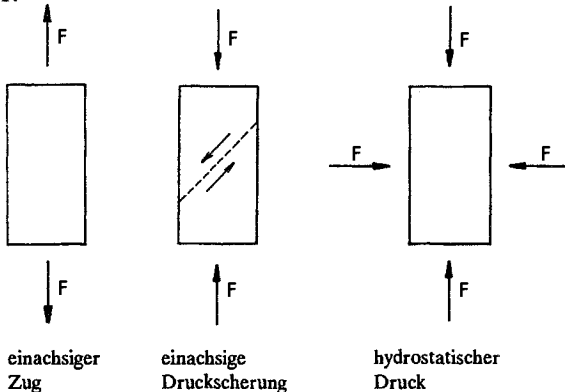


Bild A 11.1

2. Beim Biegen entsteht je nach geometrischer Abmessung über den Querschnitt eine inhomogene Spannung mit einer spannungsfreien neutralen Achse mit Spannung 0. In der äußeren Randfaser herrscht Zug, in der inneren Druck.

Die Streckgrenze wird ausgehend von den äußeren und inneren Oberflächen überschritten, und man erhält im Inneren nur elastisch, im Äußeren aber auch plastisch verformte Zonen.

Die Rißbildung findet in der Regel von der Oberfläche ausgehend statt, da dort maximale Zugspannung und Kerbwirkung erzeugende Oberflächenrauigkeiten zusammenkommen.

Es gibt allerdings auch Werkstoffe, die unter Druck (eher als unter Zug) versagen, z.B.: Holz- und entsprechende Faserverbundwerkstoffe in Richtung der Faserachse, wo dann ein Grenzflächenfalz bzw. Grenzflächenbruch auftritt.

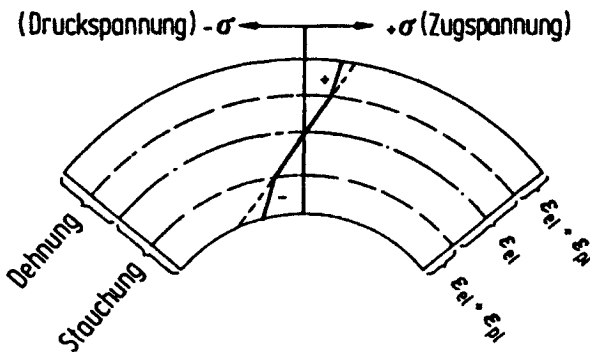


Bild A 11.2

3. Beim Strangpressen ist der Werkstoff in der Regel in einem zylindrischen Aufnehmer hydrostatischem Druck ausgesetzt und deswegen wenig rißgefährdet. Das Fließen geschieht unter Schubspannung, das Werkzeug befindet sich an der Öffnung dieses Zylinders.

Die Beanspruchung beim Tiefziehen ist sehr kompliziert. Im Boden tritt zweiachsiger Zug auf, an den Werkzeugkanten und beim Übergang zum Boden tritt entweder Biegung oder einachsiger Zug auf, wenn z.B. ein zylindrischer Körper hergestellt wird, wo diese Streckung vorherrscht.

4. Beim Vorwärtspressen tritt der Materialfluß in der Preßrichtung und beim Rückwärtspressen entgegen der Preßrichtung auf. Daraus folgt der Vorteil des Rückwärtspressens: die Reibung des Blockes mit der Aufnehmerwand fällt weg, (geringere Druckkraft notwendig). (Bild A 11.3)

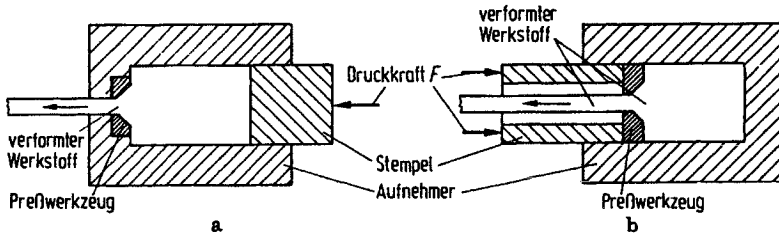


Bild A 11.3 Prinzip des Strangpressens.

a: Vorwärtspressen,
b: Rückwärtspressen

5. Beim Walzen wird der Werkstoff unter dem Druck zweier zylindrischer (oder profilierter) Walzen gestreckt. Der Werkstoff ist einem "kontinuierlichem Druckversuch" unterworfen. Dabei tritt am Eintritt in den Walzspalt die in Bild A 11.4 skizzierte Kraftsituation auf. Um den Werkstoff in den Walzspalt einzuziehen, muß die Kraft, die versucht den Werkstoff in die Walzen zu ziehen größer sein, als die horizontale Komponente der aufgetragenen Druckkraft. Daraus leitet sich die Forderung ab, daß der Öffnungswinkel der Walze kleiner als der Reibungswinkel sein muß.

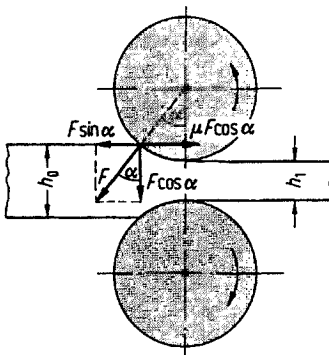


Bild A 11.4

- 6.a) Kaltwalzen verfestigt den Werkstoff, was dazu führt, daß hohe Walzkräfte zum weiteren Aufrechterhalten der plastischen Verformung notwendig sind, d.h. das Walzgerüst wird stark belastet. Deswegen wird oft warmgewalzt, wobei Erholungs- und Rekristallisationsprozesse die Verfestigung abbauen und damit die Belastung der Walzen reduziert wird.
 - b) Die Gefüge des gewalzten Werkstoffs unterscheiden sich dadurch, daß nach dem Warmwalzen eine durch Erholung oder Rekristallisation gekennzeichnete Struktur auftritt, während beim Kaltwalzen zweierlei Gefügeänderungen auftreten: Die ursprünglich vorhandenen, als rund angenommenen Körner werden zu einer Art „Pfannkuchen“ ausgewalzt, zum anderen erhöht sich als Ursache der Verfestigung die Versetzungsdichte in den Körnern sehr stark.
7. Die Viskosität einer Schmelze liefert die Voraussetzung für die Herstellung von Hohlkörpern durch Blasen. Angewandt wird dieses Verfahren insbesondere für Oxidgläser (Glasblasen) und Thermoplaste (Folienblasen). Unter besonderen Bedingungen auch für Metalle in einem als superplastisch bezeichneten Zustand.

11.4 Trennen: Spanen und Schleifen

1.
 - Spanen
 - abrasives Trennen mit Abrasivteilchen (Schleifen, Trennscheibe)
 - Brennschneiden, Kombination aus örtlicher Erwärmung, Schmelzen und Oxidation.
 - Funkenerosion
 - Säuresäge

Zum Brennschneiden bestehen zwei Möglichkeiten: Es wird Brenngas verwendet, das zur Erwärmung führt und Sauerstoff, der zur Oxidation des Werkstoffs dient, oder die Erwärmung wird mit einem Laserstrahl erreicht, wobei auch dann noch ein oxidierender Gasstrahl mit eingeblasen werden kann.

2. Erwünschtes Trennen tritt beim Spanen und Schleifen, aber auch in der Zerkleinerungstechnik (Mühlen) auf. Falls diese Vorgänge unerwünscht sind, werden sie als Verschleiß, in diesem speziellen Fall als Abrasivverschleiß bezeichnet.
3. Phänomenologisch wird die Spanbarkeit aus einem Experiment definiert, in dem die Standzeit einer Schneide (Werkzeugwerkstoff) abhängig von der Schnittgeschwindigkeit gemessen wird. Diese Standzeit wird festgelegt, z.B. 60 min., und aus dem Gesamtdiagramm die zugehörige Schnittgeschwindigkeit ermittelt. Die Zerspanbarkeit ist umso höher, je größer die zugehörige Schnittgeschwindigkeit ist. Umgekehrt kann natürlich auch für konstante Schnittgeschwindigkeit eine höhere Standzeit als Maß der Zerspanbarkeit ermittelt werden.
4. Gute Zerspanbarkeit bedingt hohe Härte und Warmfestigkeit des Werkzeugwerkstoffs und geringe Härte des zerspanenden Werkstoffs. Weiterhin wird

gute Zerspanbarkeit durch eine geringe Bruchzähigkeit des zu zerspanenden Werkstoffs begünstigt.

5. - Graues Gußeisen mit Lamellengraphit: geringe Härte, gute Trennfähigkeit
 - Automatenlegierungen, die absichtlich Gefügebestandteile enthalten, die die Trennung und die diskontinuierliche Spanbildung begünstigen. Automatenstahl enthält Schwefel in Form von Sulfideinschlüssen. Automatenmessing enthält Einschlüsse von metallischem Blei, die ebenfalls spanbrechend wirken.
6. Das System besteht aus Werkzeugwerkstoff und zu zerspanendem Werkstoff, eventuell Kühl- oder Schmiermittel.

11.5 Fügen

1. - Schweißen: gleiche oder gleichartige Werkstoffe und meistens ein geeigneter Schweißzusatzwerkstoff werden über die Schmelztemperatur erhitzt. Durch die Mischung der Werkstoffe im flüssigen Zustand entsteht nach dem Erstarren eine feste Verbindung. Der Schweißzusatzwerkstoff sollte möglichst gleiche oder bessere Eigenschaften haben, als der zu verschweißende Werkstoff.
 - Beim Löten wird nur ein Zusatzwerkstoff erschmolzen, der Grundwerkstoff nicht. Der Zusatzwerkstoff erstarrt anschließend an beiden zu verbindenden Teilen und führt so zu einem festen Zusammenhang. Es tritt aber eine Erwärmung innerhalb des festen Zustands im zu verbindenden Werkstoff auf und damit eventuell eine Eigenschaftsveränderung.
 - Beim Kleben tritt keine Erwärmung und damit Beeinflussung des zu verbindenden Werkstoffes auf. Der Zusammenhalt wird über die Adhäsion mit dem Klebstoff und die Kohäsion im Klebstoff hergestellt.
2. Eine Schweißnaht ist grundsätzlich aus drei Zonen aufgebaut (Bild A 11.5): Im Zentrum befindet sich der Bereich des erstarrten Werkstoffes. Rechts und links davon liegt die Wärmeeinflußzone. In diesem Bereich wurde der Werkstoff einer Wärmebehandlung unterzogen, die negative Folgen haben kann (Überalterung, Rekristallisation). In der äußeren Zone ist das Gefüge unbeeinflusst, hier können jedoch innere Spannungen auftreten.



Bild A 11.5

3. - Schwer schweißbar sind immer Werkstoffe mit sehr hoher Wärmeleitfähigkeit, wie z.B. reines Kupfer.
- Schwer schweißbar können auch Werkstoffe sein, die an der Luft oxidieren, wie z.B. Aluminium und eine temperaturbeständige, festhaftende Oxidschicht bilden, die eine Bindung verhindert. Hier müssen dann Sonder-schweißverfahren angewandt werden.
4. Die thermoplastischen Kunststoffe und Oxidgläser sind die einzigen nicht-metallischen Werkstoffe, die geschweißt werden können.
5. Wird beim Löten eine Temperatur von 450 °C überschritten, so wird das Verfahren als Hartlöten bezeichnet, andernfalls als Weichlöten. Für die Lötbarkeit ist die Benetzungsfähigkeit des Werkstoffes durch das Lot ausschlaggebend. Die Oberflächenenergien müssen erlauben, daß das Lot den Werkstoff gut benetzt und nicht abperlt.
- 6.a) - Einkomponentenkleber: Das Lösungsmittel verdampft, und folglich erhält man eine Erhöhung der Viskosität zwischen der ursprünglichen Flüssigkeit und dem Festkörper nach Verdampfen des Lösungsmittels.
- Zweikomponentenkleber: Es tritt eine Vernetzung des Polymers auf. Diese chemische Reaktion führt zu verstärkter Adhäsion mit den zu verbindenden Oberflächen und zu verstärkter Kohäsion im Inneren der Klebverbindung.
- b) Für die Gestaltung einer Klebverbindung ist es vorteilhaft, wenn nicht Zugspannungen, sondern Schub- oder Druckspannungen in der Klebfläche wirken. Am günstigsten ist eine geschärfte Überlappung mit kleinem Keilwinkel oder eine einfache oder doppelte Überlappung.
- c) Ein sehr häufig verwendeter, nichtorganischer Klebstoff ist der Zement, der bei der Bildung von Beton zum Verkleben von Sand und Kieselsteinen führt. Er ist ein sogenanntes hydraulisches Bindemittel, ein hydraulischer Klebstoff, d.h. es entsteht eine Verbindung des Oxids mit Wasser. Darüber hinaus gibt es auch andere keramische Klebstoffe (z.B. kalt gebranntes CaO , das zu CaCo_3 reagiert).

11.6 Nachbehandlung

1. Unter Nachbehandlung versteht man eine am Ende des Fertigungsprozesses, d.h. nach Herstellung des Bauteils, nachfolgende Behandlung, die in der Regel das Ziel hat, die endgültigen Gebrauchseigenschaften einzustellen. Beispiele dafür sind Oberflächenhärten für entsprechende tribologische Eigenschaften oder Oberflächenbeschichten zur Erhöhung der chemischen Beständigkeit.
Eine weitere wichtige Nachbehandlung ist das Spannungsfreiglühen von Bauteilen, Schweißkonstruktionen etc., die dazu führen sollen, daß innere Spannungen vor dem Gebrauch abgebaut werden, damit sie sich nicht mit

den bei der Beanspruchung auftretenden äußeren Spannungen überlappen und so eventuell zu unerwartetem Versagen führen.

2. - Spannungsfrei- oder Normalisierungsglügen eines Stahlgußteils
- Wärmebehandlung von grauem Gußeisen, z.B. von Gußeisen mit Kugelgraphit zur Veränderung des metallischen Grundgefüges, z.B. Zwischenstufenglügen

11.7 Werkstoffprobleme bei Fertigung und Gebrauch von Kraftfahrzeugen

1. - Schmierung der Lager und Kolben
- Abfuhr der entstehenden Reibungswärme
- Feinstabdichtung der Kolben in den Zylindern
- Ausspülen der Schmutzteilechen und Transport zum Filter
- Korrosionsschutz
2. In der Regel aus Aluminium-Silizium Legierungen (z.B. AlSi 12 CuMgNi). Diese Legierungen zeichnen sich durch gute fertigungstechnische Eigenschaften (gute Gießbarkeit) und gute Gebrauchseigenschaften (hoher Verschleißwiderstand, geringe Wärmeausdehnung) aus.
3. - hohe Warmfestigkeit
- hohe Verschleißfestigkeit
- geringe Wärmeausdehnung
- geringes spezifisches Gewicht
4. Die Höchsttemperatur beträgt etwa 400 °C in der Kolbenbodenmitte an luftgeköhlten 2-Takt Dieselmotoren. Für eine ausscheidungshärtbare Al-Legierung ist dort eine Überalterung zu erwarten und damit eine Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften. Die Niedrigsttemperatur beträgt etwa 110 °C und wird am Schaftende eines Kolbens in einem wassergeköhlten 4-Takt Ottomotor gemessen.
5. Der zusätzliche Lauflächenschutz soll negative Folgen von kurzfristigem Trockenlauf (z.B. bei häufigen Kaltstarts), vorübergehender Überlastung und von einer mangelhaften Schmierung verhindern. Ein Lauflächenschutz besteht aus sogenannten Weichmetallaufschichten (Zinn oder Blei mit Graphit).
6. Kolbenringe bestehen meistens aus Grauguß mit globularem Graphit, ganz selten aus Stahl.
7. In Graugußzylindern sorgt der hohe Graphitgehalt für gute Gleiteigenschaften, die auch bei vorübergehender mangelhafter Ölschmierung bestehen bleiben, (Notlaufeigenschaften).

- 8.a) Leichtmetallzylinder werden in luftgekühlte Motoren eingebaut, da die Wärmeleitung etwa dreimal besser ist als bei Graugußzylindern.
- b) - dünnwandige Graugußlaufbuchsen
- aufgespritzte Eisenschicht
- hartverchromte Laufschrift
- Nickelschicht
9. - hohe mechanische Festigkeit
- hohe Warmfestigkeit
- Korrosionsfestigkeit, auch bei erhöhter Temperatur
- gute Gleit- bzw. Notlaufeigenschaften
10. An den Einlaßventilen treten Temperaturen bis zu etwa 550 °C und an den Auslaßventilen von über 800 °C auf.
11. Auslaßventile mit einer besonders hohen thermischen und mechanischen Belastung werden mit Hartmetallschichten gepanzert, da gerade der Ventil-sitz durch diese Belastungen besonders gefährdet ist.
- 12.a) Einmetallventile bestehen aus nur einem Werkstoff.
- b) Bimetallventile sind aus zwei Werkstoffen hergestellt. Der Schaftwerkstoff muß gute Gleiteigenschaften besitzen und der Tellerwerkstoff muß hochwarmfest sein. Beide sind in der Regel durch eine Reibstumpfschweißung miteinander verbunden.
- c) Hohlventile sind im Schaft und zum Teil auch im Teller hohl ausgeführt, wobei der Hohlraum zu etwa 60% mit metallischem Natrium gefüllt ist. Durch das dadurch extrem gute Wärmeableitvermögen werden solche Ventile vorwiegend als Auslaßventile in Hochleistungsmotoren eingesetzt, (Rennsport).
13. - Grauguß in Zylinderköpfen, die ebenfalls aus Grauguß sind.
- Cr-Mn-Stahl, für höhere Belastung sowohl in Leichtmetall als auch in Graugußzylinderköpfen.
14. - hohe Temperaturen und Temperaturwechsel
- mechanische Beanspruchungen, insbesondere durch Schwingungen
- Korrosion, sowohl innen durch aggressive Kondensate als auch außen durch Witterungseinflüsse.

11.8 Lasermaterialbearbeitung

1. Die grundsätzlichen Einsatzgebiete des Laserstrahls als Werkzeug sind: Schweißen, Schneiden, Bohren, Oberflächenbearbeiten und Beschriften. Darüberhinaus kann in geeigneten Anordnungen auch das Laserfräsen und das Laserdrehen realisiert werden, wobei auch hier der Strahl jeweils das Werkzeug ersetzt und somit kein Werkzeugverschleiß auftritt. Durch die

Möglichkeit, einzelne Bauteilpartien gezielt zu erhitzen, können auch Bleche mit dem Laserstrahl gebogen werden.

Aber nicht jeder Laser ist gleichermaßen für alle Einsatzgebiete tauglich. Für jeden Bearbeitungsfall ist ein geeigneter Lasertyp auszuwählen und mit einer geeigneten Peripherie auszustatten.

2. In der Lasermaterialbearbeitung werden drei Lasertypen bevorzugt eingesetzt. Die größte Bedeutung hat bisher der CO₂-Laser errungen. Er arbeitet im Infrarotbereich mit einer Wellenlänge von 10,6 µm und kann mehr als 50 KW Ausgangsleistung bereitstellen.
Gleichermaßen in der Materialbearbeitung etabliert ist der Nd-YAG-Laser der ebenfalls im Infrarotbereich mit einer Wellenlänge von 1,06 µm arbeitet. Für diese Wellenlänge ist Glas noch durchlässig, so daß der Laserstrahl in einem Glasfaserkabel zur Bearbeitungsstation geführt werden kann. Im Gegensatz zum CO₂ Laser ist hier das angeregte Medium kein Gas, sondern ein Festkörper, ein mit Neodym dotierter Yttrium-Aluminium-Granat (Nd-YAG) Kristall. Moderne Nd-YAG-Laser bieten bis 3 KW Ausgangsleistung an.
Im ultravioletten Bereich und mit eher geringen Leistungen arbeiten die Excimer-Laser. Für diesen Lasertyp werden verschiedene Lasergase verwendet, sogenannte Excimere (z.B.: XeCl, KrF)
3. Eine Laserschweißnaht ist, da weniger Wärme konzentrierter eingebracht wird, schlanker als eine herkömmliche Schmelzschweißnaht. Auch ist die Wärmeeinflußzone erheblich schmaler. Letztlich erlaubt eine Laserschweißnaht ein besseres Oberflächenfinish, wenn diese nicht mehr nachbearbeitet wird.
4. Die Oberflächenzone wurde austenitisiert und anschließend durch Wärmeleitung ins Innere schnell abgeschreckt. Es entsteht ein Härtegefüge, das oft angelassen werden muß.
5. Es können abhängig von Legierung und Laserparametern alle Gefügetypen auftreten:

<ul style="list-style-type: none"> - heterogen stabil, - heterogen metastabil, - homogen kristallin, - homogen quasikristallin, - Glas. 	}	von oben nach unten: abnehmende thermodynamische Stabilität (S. Kap. 2 und 3).
--	---	--

12 Der Kreislauf der Werkstoffe

12.1 Rohstoff und Energie

- 1.a) Holz,
b) Polymere aus Öl,
c) Stein,
d) Metalle.
- 2.a) Nicht rückgewinnbar ist die Energie, die für Transport, Fertigung und Aufbereitung von Schrott verbraucht wird.
b) Rückgewinnbar ist die chemische Energie, die z.B. für die Reduktion von Metalloxiden zu reinen Metallen verwandt wird. Auch fossile und zeitgenössische Sonnenenergie die für Werkstoffe auf Kohlenstoff-Basis gebraucht wird, kann am Ende des Kreislaufs zurückgewonnen werden.
3. - Hochtemperaturwerkstoffe erlauben den Betrieb von Gasturbinen bei höheren Temperaturen. Dadurch wird der Wirkungsgrad gesteigert.
- Neuartige Transformatorenbleche verringern die Ummagnetisierungsverluste und steigern so den Wirkungsgrad der Transformatoren.
- Leichtbauwerkstoffe für Flugzeuge, Straßenfahrzeuge und Schienenfahrzeuge tragen dazu bei, den Energieverbrauch dieser Verkehrsmittel zu reduzieren.
- 4.a) - Kohle und Erdöl (also fossile Stoffe),
- Holz,
- Uran (das allerdings als Legierungselement nur eine geringe Rolle spielt).
b) die Bindungsenthalpie zwischen Sauerstoff und den verschiedenen Metallatomen. Sie ist sehr gering für Au, groß für Mg, Al, Ti.
c) Bei der Herstellung von Zement wird CaO und SiO_2 gemischt zur Bildung von $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$. Diese Phase bildet sich erst oberhalb 1450°C . (siehe auch Zustandsdiagramm, Bild F 7.2).
Energie wird ausser zum Erwärmen auch für das feine Mahlen benötigt, da eine Größe der Pulverteilchen von $< 1\mu\text{m}$ angestrebt wird.

12.2 Auswahl und Dimensionierung

- 1.a) Das Beanspruchungsprofil beschreibt die Summe der an einen Werkstoff in einem vorgegebenen Anwendungsfall gestellten Anforderungen.
- b) Das Eigenschaftsprofil stellt die Summe der einzelnen Eigenschaften dar, die ein bestimmter Werkstoff besitzt.
- 2.a) Ein Werkstoff für ein Flugzeuggehäuse sollte hohe Festigkeit mit geringer Dichte verbinden.
- b) Ein Werkstoff für einen Dauermagnet sollte eine hohe magnetische Energiedichte besitzen, d.h.: das Produkt aus magnetischer Induktion (B) im Werkstoff und äußerem Feld (H) sollte möglichst groß sein.
- c) Ein Werkstoff für ein Küchenmesser sollte hart und damit verschleißfest sein, aber auch über einen weiten pH-Bereich korrosionsbeständig.

12.3 Gebrauch und Versagen

- 1.a) Die Formzahl α_k gibt die Spannungserhöhung in Abhängigkeit von der Kerbform an und ist für einfache Geometrien wie folgt zu berechnen:

$$\alpha_k = \alpha \left(1 + \frac{2a}{b} \right)$$

mit der Kerbtiefe a und der Kerbweite b .

Diese einfachen Geometrien können beispielsweise Gewindegänge sein.

- b) Bei einer schwingenden Beanspruchung muß mit der Kerbwirkungszahl β_k gerechnet werden. Da ein Kerb im allgemeinen die Lebensdauer eines Bauteils bei schwingender Beanspruchung herabsetzt, ist β_k in der Regel > 1 . Die Wöhlerkurve für ein gekerbtes Bauteil gibt für das endgültige Versagen eine geringere Lastwechselzahl oder eine geringere Spannungsamplitude als für das ungekerbte Bauteil an.
- 2.a) Die Betriebsfestigkeit ist die Lebensdauer eines Werkstoffs unter schwingender Belastung mit wechselnder Spannungsamplitude.
- b) Die Hypothese der linearen Schadensakkumulation geht davon aus, daß aus jeder auftretenden Spannungsamplitude ein Schädigungsanteil n_i/N_i resultiert. Hierbei gibt n_i die Anzahl der aufgetretenden Lastwechsel bei der Spannungsamplitude i an, N_i die Anzahl der Lastwechsel, die bei der Spannungsamplitude i zum Bruch führen. Erreicht die $\sum n_i/N_i$ den Wert 1, so tritt nach dieser Hypothese der Bruch ein. Dieser Ansatz ist als grobe Näherung in manchen Fällen nützlich, in anderen Fällen nicht einmal qualitativ richtig.

- 3.a) Für eine Bemessung der zulässigen Spannung nach dem "Leck vor Gewaltbruch-Prinzip" muß kritisches Rißwachstum ausgeschlossen werden, die Belastung muß für den beobachteten Anriß zwischen der Kurve K_{ISRK} und der Kurve K_{IC} liegen (Bild A 12.1).
- b) Die Bemessung nach dem Prinzip der kritischen Rißausbreitung läßt auch höhere Belastungen noch zu.

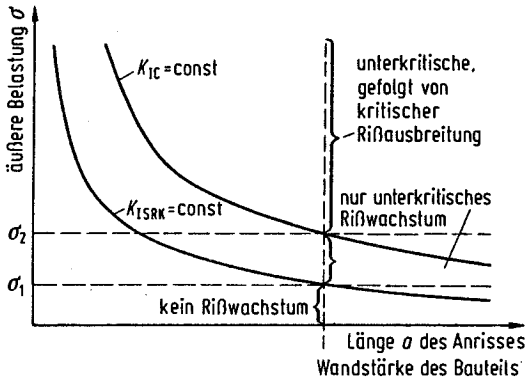


Bild A 12.1

- 4.a) Der Mittelwert errechnet sich zu 397 MPa, der von der Norm vorgegebene Wert wird erreicht.
- b) Der Stahl darf nur mit 365 MPa belastet werden, wenn 97% der Proben der Beanspruchung gewachsen sein sollen. Bis zu diesem Wert ist lediglich eine von 50 Proben gerissen.

12.4 Rückgewinnung und Abfallbeseitigung

1. Das häufigste in der Erdkruste vorkommende Element ist Silizium, so daß der Grundstoff für die Halbleitertechnologie praktisch unbegrenzt verfügbar ist. Ebenfalls recht häufig treten die Elemente Al, Fe, Mg und Ti in der Erdkruste auf.
- 2.a) Metalle (nicht Wolfram), Thermoplaste, keramische Gläser
- b) Polymere, die nur aus C und H-Atomen aufgebaut sind (Polyolefine)
- c) PVC (Polyvinylchlorid) enthält neben Kohlenstoff und Wasser auch Cl-Atome. Werden diese freigesetzt so bilden sich HCl (Salzsäure) und Dioxine.
- d) Für den biologischen Abbau von Polymeren sollte deren Struktur möglichst der, der Biopolymere ähnlich sein. In einer feuchten Umgebung können solche Strukturen von geeigneten Bakterien und Pilzen zersetzt werden.

- e) Nach ersten Demontagen von größeren Komponenten (Motor, Getriebe usw.) wird das Altfahrzeug im Schredder zerkleinert. Aus den erhaltenen Bruchstücken wird zunächst durch Magnetabscheidung der Eisenanteil herausgefiltert. In weiteren Trennschritten, basierend auf der unterschiedlichen Dichte oder elektrischen Leitfähigkeit der Bestandteile, wird das Altmaterial weiter sortiert. Nicht verwertbare Reste werden deponiert.
3. - Weiterverwendung: Einsatz von gebrauchten Bauteilen in einem veränderten, meistens verminderten Sinn (Beispiel: Altreifen als Stoßfänger im Hafen).
- Wiederverwertung: Das eigentliche Recycling im Sinne von stofflichem (Rückgewinnung von Rohstoffen) oder werkstofflichem (Rückgewinnung von Werkstoffen) Recycling.
4. Beim stofflichen Recycling wird der Werkstoff, zumindest aber die Atomart, aus der der Werkstoff bestand, zurückgewonnen (Pyrolyse, Wiedereinschmelzen). Energetisches Recycling ist in der Regel Verbrennung von Polymerwerkstoffen. Dabei geht der Kohlenstoff in Form von CO_2 an die Atmosphäre verloren.
5. Als Recyclinggift kann eine Atomart bezeichnet werden, die das stoffliche Recycling stört. Beispiele liefern Cu für Stahl oder Fe für Al-Legierungen. Cl-Atome des PVC stören auch die thermische Verwertung durch Bildung toxischer Verbindungen (Dioxin).
6. Es gibt sehr viele Ursachen für Toxizität. Die höchsten Anforderungen werden an Werkstoffe für medizinische Implantate gestellt. Eine Regel besagt, dass die geringste Gefahr droht von Stoffen, mit denen Tier und Mensch während der Evolution regelmässig in Kontakt kamen: Werkstoffe auf der Grundlage von SiO_2 , CaO, Al_2O_3 , sowie Holz und Leder. Toxisch sind z.B. die Metalle Be, Cd, Ni.
7. Die biologische Abbaubarkeit von Polymeren ist am geringsten bei stabilen Molekülen ohne Doppelbindungen: PE, PTFE. Sie nimmt zu für ungesättigte Verbindungen (Polyazetylen) und ist am größten, wenn aromatische Ringsysteme in die Ketten eingebaut wurden (Stärke, Cellulose). Sie ist größer bei natürlichen Polymeren als bei synthetisch hergestellten, da für Erstere während der Evolution geeignete Mikroorganismen gebildet werden konnten.
8. Pflanzenstärken, z.B. Mais- oder Kartoffelstärke.

12.5 Recyclingfragen beim Kraftfahrzeug (KFZ)

1. Den größten Teil an Ressourcen verbraucht ein KFZ bei seinem Betrieb in Form des aus Öl gewonnenen Kraftstoffes. Entsprechend ist der Anteil des Rohöls für die Polymerherstellung weit geringer als 10% der verarbeiteten Menge.

- 2.a) Originäre Wiederverwertung ist der Wiedereinsatz recycelter Werkstoffe auf dem gleichen, hohen Qualitätsniveau wie in den ursprünglichen Bauteilen.
- b) - Motoren und Getriebe (Aufarbeitung zu qualitativ hochwertigen Austauschteilen).
 - Batterien (Alle Bestandteile wie Blei, Polymer und Säure können aufgearbeitet und wiederverwendet werden).
 - Katalysatoren (teure und knappe Rohstoffe wie Platin und Rhodium werden zurückgewonnen). Ohne die Wiederverwertung dieser Stoffe würde aufgrund der Knappheit dieser seltenen Metalle innerhalb sehr kurzer Zeit eine Produktion von Katalysatoren nicht mehr möglich sein.
3. - Hochwert-Recycling in Form der originären Wiederverwertung wobei der Qualitätsstandard des so gewonnenen Werkstoffs dem des Primärwerkstoffs entsprechen muß.
 - Sollte eine Wiederverwertung auf dem ursprünglichen Niveau nicht mehr möglich sein, geht man eine Qualitätsstufe tiefer. Aus einem gebrauchten, hochwertigen Kunststoffteil, das früher z.B. eine hohe Festigkeit aufweisen mußte, werden beispielsweise Innenkotflügel oder Kofferraumabdeckungen usw. produziert.
 - Die niedrigste Stufe des Recyclings ist eine chemische oder energetische Verwertung der Materialien. So können brennbare Stoffe wie Polymere bei ihrer Verbrennung zumindest einen Teil der bei ihrer Produktion aufgewendeten Energie nutzbringend abgeben.
4. - Sammeln der kompletten Altfahrzeuge
 - Ablassen und Aufbereiten der Betriebsflüssigkeiten
 - Demontage von Aggregaten und leicht wieder aufzuarbeitenden Bauteilgruppen
 - Sortenreines Sammeln der Werkstoffe durch systematische weitere Zerlegung des Restfahrzeugs
 - Aufarbeiten der Werkstoffe und Wiederverwendung auf möglichst hohem Niveau
5. Zunächst einmal werden in einem KFZ eine Vielzahl unterschiedlicher Glasarten eingesetzt. So gibt es beispielsweise Verbundglas (mit Polymerfolie), Einscheibensicherheitsglas jeweils getönt oder nicht getönt oder verklebt oder nicht verklebt. Da aber auch das Glas zu einer effektiven Wiederverwertung möglichst rein vorliegen sollte, muß die Kunststoffolie aus den Verbundglas-scheiben vollständig entfernt, das Glas von Kleber, Dichtmasse, Lack - oder Keramikbeschichtungen befreit und eventuell eingelagerte Heizdrähte entfernt werden. Weißes Glas ist aufgrund seiner Reinheit das wertvollste Glas (siehe auch Kap. 7). Recyceltes Glas darf jedoch aus Sicherheitsgründen nicht für neue Autoverglasungen eingesetzt werden.
6. Für ihren Einsatz sprechen ihre guten Gebrauchs- und Fertigungseigenschaften.

Gebrauchseigenschaften:

- Gewichtersparnis
- gute Wärme- und Geräuschkämmung
- sehr gute mechanische Eigenschaften wie z.B. hohe Elastizität

Fertigungseigenschaften:

- leichte Integration mehrerer Funktionen in einem Bauteil
- relativ geringer Energieeinsatz bei der Verarbeitung
- wirtschaftliche Fertigung (z.B. durch Spritzgießen).

7. Für den Kunststofftank sprechen zwei Aspekte:

- geringeres Gewicht
- bessere Formbarkeit zur Nutzung kleinster Nischen, (damit wird bei geringerem Gewicht des Tanks ein größeres Volumen erreicht).

8. Metalle:

- Karosseriebleche (Stahlblech)
- Motorblöcke (Gußeisen)
- Zylinderköpfe, Radfelgen (Aluminium)
- Verkabelungen (Kupfer)
- Autobatterien (Blei)
- Katalysatoren (Platin, Rhodium)

Hierbei ist darauf zu achten, daß die Materialien sorgfältig getrennt werden, um Verunreinigungen wie z.B. Kupfer in Eisen oder Eisen in Aluminium zu vermeiden.

Polymere:

- Kabelummantelungen, Trittschutzleisten etc. (Thermoplaste)
- Schutzleisten, Stoßfänger (Elastomere)

Bei den Thermoplasten müssen chlorhaltige und nicht chlorhaltige getrennt werden.

Keramik:

- Scheinwerfer
- Fahrzeugscheiben

Verbundwerkstoffe:

- Windleiteinrichtungen (GFK)
- versteifende Innenbauteile (Pappenguß)

Diese Werkstoffgruppe bereitet die größten Probleme beim Recycling, da die einzelnen Bestandteile sich bei der Wiederaufarbeitung gegenseitig stören.

9. - Möglichst alle im Fahrzeug eingesetzten Materialien sollten nach Werkstoffgruppen gekennzeichnet und wiederverwertbar sein.
- Alle Bauteile sollten möglichst leicht demontierbar sein.
 - Die verwendeten Werkstoffe sollten keine Schadstoffe enthalten.
 - Es sollten möglichst wenige verschiedene Materialien eingesetzt werden.
 - Die Bauteile sollten nicht aus untrennbaren Werkstoffkombinationen gefertigt sein.

Anhang

Anhang

A 1 Begriffe aus Werkstoffwissenschaft und -technik

- 1) **Aktivierungsenergie (activation energy)**
Energie, die notwendig ist, einen Prozess auszulösen. Die Aktivierungsenergie für Diffusion wird gebraucht für Platzwechsel der Atome. Sie wird durch thermische Energie (Temperatur) aufgebracht. Die Aktivierungsenergie für Diffusion ist größer für substituierte (z.B. Fe+Ni) als für interstitielle (eingelagerte) Atome (z.B. Fe+C). Die Aktivierungsenergie für Keimbildung nimmt ab mit zunehmender Unterkühlung und folglich mit abnehmendem kritischen Keimdurchmesser. Vorgänge wie Kristallerholung und Kriechen sind durch die A. für Selbstdiffusion bestimmt. Diese ist etwa proportional zur Schmelztemperatur (in K).
- 2) **Alterung (ageing)**
Diffusionsabhängige Prozesse. Zeitabhängige Änderung der Eigenschaften (Härte, Sprödigkeit, magn. Hysterese). Reckalterung: nach plastischer Verformung von Baustählen: Erhöhung der Streckgrenze, durch Diffusionen von C-Atomen in Versetzungen.
- 3) **Anisotropie (anisotropy)**
Anisotropie ist die Richtungsabhängigkeit von makroskopischen Eigenschaften, die von der Kristallstruktur (in Vielkristallen bei Textur) oder vom Gefüge (z. B. orientierte stabförmige Teilchen, Faserverstärkung) stammen kann. Gefügeanisotropie: Kristallanisotropie verschwindet bei regelloser Verteilung der Kristallite. Makroskopische Gefügeanisotropie setzt Vorzugsorientierungen der Kristallite (Textur) oder zweiter Phasen (Schlackenzeilen, orientierte Fasern) voraus.
- 4) **Anlassen (tempering)**
Wiedererwärmen eines abgeschreckten Stahls mit martensitischem Gefüge. Es bilden sich Ausscheidungen von Karbiden. Streckgrenze und Härte nehmen ab, Bruchdehnung und Bruchzähigkeit nehmen zu.

- 5) **Aushärtung (age hardening, precipitation hardening)**
Erhöhung von Härte und Streckgrenze durch Ausscheidung feinstdispersierter Phasen. Maßnahmen: Lösungsglühen, Abschrecken, Anlassen. Voraussetzung: abnehmende Löslichkeit.
- 6) **Bainit (bainite)**
Auch Zwischenstufengefüge (nach E. C. Bain, U. S. Steel Corp.) Festkörperreaktion im Temperaturbereich zwischen Perlit (Eutektoid) und Martensit im Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubild von Stählen und Gusseisen.
- 7) **Beton (concrete)**
Ein durch Verkleben mit Hilfe von Zement ($3 \text{ CaO} - \text{SiO}_2$) entstehender Werkstoff. Verklebt werden natürliche keramische Stoffe (Sand, Schotter) mit hydraulischem (d. h. mit H_2O reagierendem) oder polymerem Zement.
- 8) **Bimetall (bimetal)**
Bandförmiger Verbund aus zwei Metallen mit möglichst verschiedenen thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Temperaturänderung führt zu Krümmung. Anwendung für Temperaturregler.
- 9) **Biopolymere (bio-polymers)**
Kettenmoleküle, die pflanzlichen (Cellulose, Stärke) oder tierischen Ursprungs (Wolle, Seide) sind. In der Biosynthese werden CO_2 und H_2O mittels Sonnenenergie zu Glukose verbunden, aus der Stärkekettens polymerisiert werden. Diese Polymere sind biologisch (Bakterien, Pilze) abbaubar: Der Werkstoffkreislauf ist geschlossen. Auch einige künstliche Polymere sind biologisch abbaubar.
- 10) **Bronze (bronze)**
→ 63) Kupferlegierungen
- 11) **Bruchdehnung (elongation at rupture)**
Bleibende Dehnung nach Beendigung des Zugversuches. Sie setzt sich zusammen aus Gleichmaßdehnung und Einschnürungsdehnung. Letztere tritt bei plastischer Instabilität durch mangelnde Verfestigungsfähigkeit auf.
- 12) **Bruchmechanismen (fracture mechanisms)**
Die Trennung kann ohne plastische Verformung (spröde) oder durch plastisches Abgleiten (Scherbruch, Einschnürungsbruch) erfolgen. Häufig geht dem Bruch plastische Verformung und Verfestigung voran (Bruchzähigkeit). Anisotropie: bevorzugte Spaltbarkeit bestimmter Kristallebenen. Interkristalline Sprödigkeit: Bruch längs Korngrenzen.

- 13) **Bruchmechanik (fracture mechanics)**
Analyse der Ausbreitung von Rissen in Proben mit vorgegebenem scharfen Anriß der Länge a , Beanspruchung $K = \sigma \sqrt{\pi a}$: Spannungsintensität.
- 14) **Burgersvektor (Burgers vector)**
Vektor, der geeignet ist, die Verzerrung einer Versetzungslinie im Kristallgitter zu kennzeichnen, z. B. $\vec{b} = \frac{a}{2} \langle 111 \rangle$ für das krz-Gitter: Vektoren, die nicht Gittervektoren sind, führen zu unvollständigen Versetzungen und Stapelfehlern eines Kristalls: z. B.: $\frac{a}{6} \langle 112 \rangle$ für das kfz-Gitter.
- 15) **Curietemperatur (Curie temperature)**
Temperatur des Übergangs von paramagnetisch zu ferromagnetisch. Bei $T < T_c$: magnetische Ordnung und Bildung einer Domänenstruktur (Weiss'sche Bezirke). Entsprechend verhalten sich die keramischen Ferroelektrika. Unterhalb T_c entsteht ein spontanes elektrisches Feld und eine Domänenstruktur.
- 16) **Cermet (cermet)**
Ein Verbundwerkstoff bestehend aus metallischer Grundmasse und einer dispergierten keramischen Phase: z. B. $\text{Cu} + \text{Al}_2\text{O}_3$, oder $\text{Ag} + \text{SnO}_2$ für elektrische Kontakte.
- 17) **Dämpfungsfähigkeit (damping capacity)**
Durch innere Reibung (äußere Reibung siehe Tribologie) verursachte Energiedissipation bei Viskoelastizität, Plastizität durch Versetzungsbewegung, Diffusion, Entknäueln von Molekülen. Hochdämpfend sind graues Gußeisen, Polymere, Legierungen mit Formgedächtnis (martensitische Umwandlung).
- 18) **Diamant (diamond)**
Kristalline Phase des Kohlenstoffs mit kovalenter Bindung, tetraedrischer Koordination in kubischer Kristallstruktur. Diamant ist bei Umgebungsdruck metastabil. Diamant ist der Stoff mit höchster Härte und E-Modul. Verwendung in Schneidwerkzeugen.
- 19) **Dichte (density)**
Auf das Volumen bezogene Eigenschaften ρ ,

Massendichte	ρ [gm^{-3}]
Leerstellendichte	ρ_i [m^{-3}]
Versetzungsichte	ρ_v [m^{-2}]

Korngrenzendichte	$\rho_{KG} [m^{-1}]$
$\rho_{KG}^{-1} = \bar{s}_{KG}$ mittlerer Korndurchmesser	
Elektronendichte	$\rho_e [m^{-3}]$
Energiedichte	$\rho [Jm^{-3}]$ Triebkraft für Reaktionen
Grenzflächendichte	$\rho_{\alpha\beta} [m^{-1}]$
	$\rho_{\alpha\beta} = f_{\beta}/d_{\beta}$ Dispersionsgrad mit f_{β} : Volumenanteil und d: Teilchendurchmesser

- 20) **Diffusion (diffusion)**
 Reaktion im festen Zustand, bei der individuelle Atome ihre Plätze wechseln. Im Gegensatz zu fluiden Phasen (in denen Konvektion möglich ist), ist hier Diffusion die einzige Möglichkeit zur Bildung von Mischphasen. Diffusion kann aber auch Entmischung, Kristallerholung und Rekristallisation ermöglichen. Die Werkstoffeigenschaft ist der Diffusionskoeffizient $D [m^2s^{-1}]$, z. B. für C im α -Fe.
- 21) **Dreistoffsystem (ternary system)**
 Werkstoff bestehend aus drei Atomarten (Fe, Cr, Ni) oder Verbindungen (SiO_2 , Al_2O_3 , CaO). Die chemische Zusammensetzung kann in gleichseitigem Dreieck dargestellt werden. Es können bis zu vier Phasen im Gleichgewicht auftreten (ternäres Eutektikum, niedrige Schmelztemperatur, Lote).
- 22) **Duromer (thermosetting material, resin)**
 Polymerwerkstoff, dessen Kettenmoleküle eng vernetzt sind (= Kunstharz, z. B. Epoxidharz).
- 23) **Einkristall (single crystal)**
 Bauteil oder Probe, die aus einem einzigen Kristall besteht, Beispiel: Gasturbinenschaufel aus Ni-Superlegierung, Si-Kristall für integrierten Schaltkreis
- 24) **Einsatzhärten (carburizing)**
 Wie Stahlhärtung, aber ein nicht härtharbarer Stahl wird in seiner Oberfläche durch Diffusion von C aufgekocht: harte Schale, weicher Kern.
- 25) **Elastizität (elasticity)**
 Formänderung, die bei Entlastung rückläufig (reversibel) ist. Energieelastizität durch Entfernen der Atome aus Gleichgewichtspositionen

(Minimum der Energie), Entropieelastizität durch Entknäueln (niedrige Entropie) und Zurückknäueln (hohe Entropie) der Molekülketten des Gummis. Superelastizität durch reversible martensitische Phasenumwandlung. Viskoelastizität ist zeitabhängige (Diffusion) reversible Formänderung.

26) **elektrische Leiter (electric conductor)**

Gute Leiter sind Metalle mit nichtgeradzahligem Wertigkeit: Ag, Cu, Al, neuerdings auch einige Polymere (Polyazetylen). Isolatoren enthalten keine freien Elektronen (Polymere, Keramik). Halbleiter sind bei tiefen Temperaturen Isolatoren, sie werden bei höheren Temperaturen oder durch Zulegierung von Dotierungsatomen leitend. Supraleiter verlieren unterhalb der kritischen Temperatur T_c den elektrischen Widerstand (Metalle, Legierungen, Oxide). Ionenkristalle zeigen mit zunehmender Temperatur zunehmende Leitfähigkeit durch diffusive Bewegung der Ionen.

27) **Elementarzelle (unit cell, elementary cell)**

Bestimmte Anzahl und Anordnung von Atomen, die in einem Koordinatensystem periodisch wiederholt einen Einkristall (Oberfläche) oder Kristallit (Korngrenze) ergeben. Eine Kristallstruktur wird konstruiert aus einem geeigneten Koordinatensystem mit den Einheitsvektoren $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ (Gitterkonstante). In dieser Elementarzelle befinden sich auf den Positionen u, v, w eine bestimmte Anzahl n von Atomen. Beispiel krz-Gitter: $n = 2$: 0, 0, 0 und $1/2, 1/2, 1/2$; $a = b = c$ für das kubische Gitter: $r_{II} = 1/2 a + 1/2 a + 1/2 a$. Manche keramischen und metallischen Verbindungen, insbesondere Polymerkristalle, enthalten sehr viele und verschiedene Atome in der Elementarzelle ihrer Kristallstrukturen.

28) **Entropieelastizität (entropy elasticity)**

Reversible Formänderung, die durch Strecken und Zurückknäueln (hohe Entropie) von Kettenmolekülen zustande kommt (= Gummielastizität, Elastomer)

29) **Erholung (recovery)**

Durch teilweises oder vollständiges Ausheilen von Gitterdefekten ändern sich die Eigenschaften des Werkstoffs: Ausheilen von Strahlenschädigung durch Anihilation von Punktfehlern; Abnahme von Kaltverfestigung und innerer Spannungen durch Umordnung von Versetzungen.

30) **Erosion (erosion)**

Abtragung einer Oberfläche durch Molekül- oder Teilchenstrahl, abhängig von Einfallswinkel, Geschwindigkeit, Masse und Form der Teilchen.

31) **Ermüdung (fatigue)**

→ s. 110) Wöhlerkurve

Schädigung eines Werkstoffs durch periodische Beanspruchung (mechanisch, thermisch). Bei mechanischer Beanspruchung ist Bildung von Rissen und deren langsames und kritisches Wachstum zu unterscheiden.

32) **Erstarren (solidification)**

Der Übergang aus dem flüssigen in den festen Zustand. Kann erfolgen durch Kristallisation oder durch das Einfrieren der Flüssigkeit, d. h. Glasbildung. Im letzten Fall nimmt die Viskosität mit abnehmender Temperatur so stark ab, daß sich die Flüssigkeit wie ein Festkörper verhält.

33) **Eutektikum (eutectic)**

Drei-Phasen-Gleichgewicht, bei abnehmender Temperatur entstehen aus homogener Flüssigkeit f zwei neue Kristallarten α und β : $f \rightarrow \alpha + \beta$. Die eutektische Temperatur ist die niedrigstmögliche Schmelztemperatur eines flüssigen Atom- oder Molekülgemisches, dessen Komponenten im kristallinen Zustand nicht mischbar sind.

Beim Peritektikum bildet sich aus zwei Phasen $f + \alpha$ eine neue β : $f + \alpha \rightarrow \beta$. Die Zusammensetzung der ursprünglichen Phasen liegt um die neue herum.

Eutektoide Reaktion: Reaktion im kristallinen Zustand. Es entstehen aus einer homogenen Kristallphase beim Abkühlen zwei neue Kristallarten. Wichtigstes Beispiel: Perlitbildung im Stahl mit $\sim 0,8$ Masse-% C: $\gamma\text{-Fe(C)} \rightarrow \alpha\text{-Fe(C)} + \text{Fe}_3\text{C}$; aus kubisch flächenzentriertem γ -Mischkristall entsteht α -Mischkristall mit sehr wenig C in Lösung und Fe_3C .

34) **Faserverbundwerkstoff (fibre composite)**

Kombination aus Grundmasse (Polymer, Leichtmetall) und regellos verteilten oder orientierten Fasern zur Erhöhung von Elastizitätsmodul und Zugfestigkeit.

35) **Festigkeit (strength)**

Widerstand eines Werkstoffs gegen plastische Verformung sowie gegen Bildung und Ausbreitung von Rissen unter mechanischer Beanspruchung, i. e. Kombination von Streckgrenze und Bruchzähigkeit.

Biegefestigkeit: Die Beanspruchung ist nicht homogen und wechselt von Zug zu Druck, der Bruch beginnt in der Oberfläche mit höchster Zugspannung.

Druckfestigkeit: Kritische Spannung, bei der ein Bruch durch einachsige Druckspannung ausgelöst wird. Entscheidend ist meist eine kritische Schubspannung (Beton, graues Gußeisen). In diesen Werkstoffen ist die Druckfestigkeit höher als die Zugfestigkeit. In Faser-Verbundwerkstoffen und Holz ist die Druckfestigkeit oft durch Trennung von Faser und Matrix (Spleißen) bestimmt und geringer als die Zugfestigkeit.

Reißfestigkeit: Auf den wahren Querschnitt beim Reißen bezogene Spannung. Sie ist im Falle einer plastischen Instabilität (Einschnürung) sehr viel höher als die Zugfestigkeit.

Schwingfestigkeit: Spannungsamplitude, bei welcher der Werkstoff eine bestimmte Anzahl von periodischen Lastwechseln (z. B. $N = 10^6$) ohne endgültigen Bruch erträgt. Teilvorgänge: Rißbildung, unterkritisches Wachstum, (kritischer) Gewaltbruch).

Zeitstandfestigkeit: Die vom Werkstoff ertragene konstante Spannung (Kraft), bei der nach bestimmter Zeit (z.B. $t = 100$ h) noch kein Bruch aufgetreten ist.

Zugfestigkeit: Maximale Belastbarkeit eines Zugstabs F_{\max} bezogen auf Ausgangsquerschnitt A_0 .

36) **Formgedächtnis (shape memory)**

Die Eigenschaft eines Werkstoffs, sich an den unverformten Zustand zu erinnern. In Polymeren durch Rückknäueln oder Rückfalten gestreckter Moleküle. In Metallen als Folge kristallographischer Scherung bei diffusionsloser martensitischer Umwandlung. Verwandte Erscheinungen:

Pseudoelastizität oder Superelastizität: gummiähnliche reversible Formänderung.

Pseudoplastizität oder Einwegeffekt: scheinbare plastische Verformung geht bei Erwärmen zurück.

Zweiwegeffekt: Reversible Formänderung durch Erwärmen und Abkühlen.

37) **Fügetechniken (joining technology)**

Verfahren der Fertigungstechnik, bei dem zwei Teile unlösbar zusammengefügt werden: Schweißen, Löten, Kleben.

38) **Funktionswerkstoff (functional material)**

Werkstoff, der vorwiegend nicht-mechanische Funktionen erfüllt: elektrische, thermische Leiter, harte und weiche Magnete, Sensorwerkstoffe, Lichtleiter, thermische, elektrische Isolatoren, etc.

39) **Gitterbaufehler (lattice defects)**

Störungen im Raumgitter der Kristalle werden eingeteilt nach ihrer geometrischen Dimension d.

d = 0, Punkt:	Leerstelle, Fremdatom
d = 1, Linie:	Versetzung
d = 2, Fläche:	Korngrenze, Stapelfehler, Zwillingsgrenze, Antiphasengrenzen
d = 3, Raum:	dispergierte Teilchen, Poren

Diese Fehler bewirken in Wechselwirkung mit Gleitversetzungen mechanische Härtung, in Wechselwirkung mit Blochwänden magnetische Härtung (siehe Härtungsmechanismen).

- 40) **Glas (glass)**
 Ungeordnete feste Phase, entsteht durch Einfrieren unterkühlter Flüssigkeiten. Gläser sind in Metallen (regellose dichteste Packung), Keramiken (regelloses Netzwerk) und Polymeren (verknäuelte Moleküle) bekannt. Sie gehören zu den amorphen Festkörpern, die auch anderweitig (Aufdampfen) entstehen können.

- 41) **Gummi (rubber)**
 Polymerwerkstoff bestehend aus verknäuelten, lose vernetzten Molekülketten, die im mittleren Temperaturbereich Entropieelastizität (→ s. 28) zeigen.

- 42) **Gusseisen (cast iron)**
 Legierungen von Eisen mit höherem C-Gehalt als Stähle, in der Nähe des Eutektikums (4,3 Gew.-%): γ -Fe + Graphit: graues Gusseisen, γ -Fe + Fe_3C : weißes Gußeisen. Graphit kann globular (hohe Bruchzähigkeit) oder lamellar (hohe Schwingungsdämpfungsfähigkeit) sein. Weißes Gusseisen ist verschleißbeständig.

- 43) **Halbleiter (semi-conductor)**
 Werkstoffgruppe zwischen Metall und Keramik (Isolator): Si, Ge, GaAs. Ladungsträger können durch thermische Aktivierung oder Lichtstrahlen freigesetzt werden. Durch Dotieren (Einbringen von geringen Mengen höher- (n-Leitung, z.B. P) oder niedrig-wertiger (p-Leitung, z.B. Al) Legierungselemente kann die Leitfähigkeit weiterhin beeinflusst werden.

- 44) **Halbzeug (semi-finished-products)**
 Zwischen Rohstoff und Bauteil (siehe "Kreislauf") kann der Werkstoff als Halbzeug vorliegen, das meist von der werkstofferzeugenden Industrie an Werkstoffanwender geliefert wird: Blech, Band, Rohr, Draht, Profilträger. Die Abmessungen des Halbzeugs sind oft genormt.

- 45) **Härte (hardness)**
 Widerstand eines Werkstoffs gegen das Eindringen eines anderen, sehr viel härteren, von genormten Abmessungen: Kugel: Brinell-Härte [HB], Pyramide: Vickers-Härte [HV], Kraft durch Oberfläche des Eindrucks, Kegel: Rockwell-Härte, [HRC]-Eindrucktiefe. Ritzhärte nach Mohs: Reihung der Stoffe nach gegenseitiger Ritzbarkeit.

- 46) **Hartmetall (sintered hard metal)**
 Auch: Sinterhartmetall, Pulvermetallurgisch hergestellter Werkstoff, bei dem in metallischer Grundmasse (Co) grosse Anteile (60-90%) einer Hartphase (WC, TiC) eingebettet sind: gebraucht für Zerspanungs- und Bohrtechnik.

47) Härtungsmechanismen (hardening mechanisms)

Meist im übertragenen Sinne gebraucht für mikroskopische Ursachen und dazugehörige Verfahren zur Erhöhung von Streckgrenze, Verfestigungsfähigkeit, Zugfestigkeit: In Metallen beruhen die Härtungsmechanismen auf Hinderniswirkung gegen Bewegung von Versetzungen. In Polymeren spielt Orientierung der Molekülketten eine wichtige Rolle. Ausscheidungshärtung = Aushärtung. In Legierungen mit abnehmender Löslichkeit ($T \downarrow$). Homogenisieren = Glühen im homogenen Phasengebiet α und schnell abkühlen, so daß übersättigter Mischkristall α_0 entsteht.

Anlassen oder Altern = Erwärmen auf mittlere Temperatur, so daß nach Minuten bis Stunden feinstverteilte Ausscheidung β entsteht: $\alpha_0 \rightarrow \alpha + \beta$. Diese führt zu Härtung durch Behinderung der Bewegung von Versetzungen. Der Begriff Aushärtung wird auch gebraucht für das Festwerden von Duromeren durch Vernetzung der Moleküle. Feinkornhärtung: Eine geringe Korngröße wird für alle Strukturwerkstoffe (außer warmfesten) angestrebt, da sowohl Streckgrenze als auch Bruchzähigkeit mit \sqrt{s} ansteigt (\bar{s} mittlerer Korndurchmesser). Kaltverfestigung: durch plastische Verformung bei niedrigen Temperaturen wird die Dichte festliegender Versetzungen erhöht (z. B. Spannstähle)

Mischkristallhärtung durch gelöste Atome, die das Kristallgitter verspannen und so die Versetzungsbewegungen erschweren (z. B. Al-Mg-, Cu-Zn-Legierungen).

48) Holz (wood)

Natürlicher Verbundwerkstoff bestehend aus Zellulosefaserbündeln verklebt durch Lignin. Dichte und Festigkeit hängt stark vom Porenvolumen ab. Orthorhombische Gefügeanisotropie, Spaltbarkeit, Abhängigkeit der Eigenschaften von Luftfeuchtigkeit.

49) Innere Spannung (internal stress)

Spannungen (und Deformationen), die im unbelasteten Werkstoff vorhanden sind. Sie addieren sich örtlich zur äußeren mechanischen Beanspruchung, was zu unerwartetem Versagen führen kann. Innere Spannungen gibt es a) im atomaren Bereich (Umgebung eines Versetzungskerns), b) im Gefüge (an Korngrenzen, zwischen Faser und Matrix im Verbundwerkstoff) und c) makroskopisch im Bauteil (in der Umgebung von Schweißverbindungen).

50) Integrierter Schaltkreis (integrated circuit)

Si-Einkristall mit Leiterbahnen (Au, Al) elektronischen Funktionen (p-n-Übergänge) und Isolatorschicht SiO_2 .

51) Invar (invar alloy)

Fe-Ni-Legierung mit minimalen thermischen Ausdehnungskoeffizienten bei Raumtemperatur. Ursache: Kompensation der thermischen Ausdeh-

nung durch Magnetostriktion. Verwendung: Präzisionsmessinstrumente, (→ s. auch 99)

52) **Isotropie (isotropy)**

Isotrop, d. h. ohne Vorzugsrichtung, sind Gläser, Vielkristalle mit regelloser Verteilung der Körner oder Verbundwerkstoffe mit regelloser Verteilung der Fasern.

53) **Keimbildung (nucleation)**

Entstehung einer neuen Phase: Kristall aus Flüssigkeit, Kristall β aus übersättigtem Mischkristall α . Keimbildungswahrscheinlichkeit wächst bei zunehmender Unterkühlung, i.e. mit abnehmender kritischen Keimgröße. Es entsteht feinkörniges Gefüge.

54) **Keramik (ceramics)**

Im traditionellen Sprachgebrauch die aus Tonmineralien, nach Formen durch Brennen hergestellten zumindest teilkristallinen Oxidwerkstoffe. Heute gilt die große Gruppe der vorwiegend kovalent (und mit gewissen Anteilen von Ionenbindung) gebundenen Werkstoffe als keramisch (C = Diamant, SiC, Si₃N₄, Al₂O₃ = Korund). Im weiteren Sinne gehören auch Beton (Hydrate) und die Halbleiter (Si, GaAs) zu dieser Werkstoffgruppe. Dabei spielt es keine Rolle, ob sie kristallin, teilkristallin oder amorph (gläsern) sind.

55) **Kleben (glue, paste, cement)**

Fügetechnik, bei der gleiche oder verschiedene Werkstoffe mit Hilfe eines flüssigen Polymers (Klebstoff) verbunden werden. Kohäsion im Klebstoff entsteht durch Verdampfen eines Lösungsmittels (Plastomer) oder Vernetzung (Zwei-Komponenten-Kleber, Duromer). Die Bindung über die Oberflächen erfolgt durch starke Adhäsion.

56) **Konstitution (constitution, configuration)**

Lehre vom Aufbau der Legierungen im thermo-dynamischen Gleichgewicht, i. e. Minimum der freien Enthalpie. Homogenes Gleichgewicht - eine Phase, heterogenes Gleichgewicht - zwei oder mehr Phasen koexistieren.

57) **Korn, Korngröße (grain, grain size)**

Der einzelne Kristall eines Kristallhaufwerks wird als Kristallit oder Korn bezeichnet. Als Korngröße wird oft der mittlere Korndurchmesser bezeichnet. Ein anderes Maß ist die Anzahl der Körner pro Flächeneinheit (ASTM-Korngröße, American Society for Testing of Materials). Genauere Beschreibung durch Verteilungsfunktion.

58) **Korngrenze (grain boundary)**

Grenze zwischen Kristalliten: Kleinwinkelkorngrenze $\alpha < 5^\circ$ aus Verset-

zungen aufgebaut, Großwinkelkorgrenze $\alpha > 5^\circ$, Zwillingskorgrenze = Spiegelebene zwischen Kristalliten definierter Orientierung.

59) **Korrosion (corrosion)**

Unbeabsichtigte Abtragung (Zerstörung) des Werkstoffs im Zusammenwirken mit den chemischen Bestandteilen der Umgebung. Der Mechanismus ist besonders wirksam, wenn die Abtragung stark lokalisiert, trans- oder interkristallin erfolgt (durch Kristalle hindurch oder entlang den Korgrenzen).

Lokalelement: Zwei Gefügebestandteile mit verschiedenem elektrochemischen Potential (Neigung zur Oxidation) bilden in feuchter Umgebung ein mikroskopisches elektrochemisches Element. Lokalelemente fördern lokalisiertes Abtragen der unedleren Komponente (z.B. Al-CuLegierungen).

Rost: Oxidationsprodukt auf der Oberfläche von Stahl und Eisen. Durch Oxidation von Eisen: $Fe \rightarrow Fe^{2+}$, $Fe \rightarrow Fe^{3+}$ und Reduktion von H_2O bildet sich poröses Eisenhydroxid: $Fe(OH)_{2-3}$.

Zunder: entsteht bei Oxidation von Eisen ohne die Mitwirkung von H_2O , also bei erhöhter Temperatur. Es entstehen die Phasen, die das Zustandsdiagramm Fe-O zeigt: FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 .

Passivierung: Bildung einer fest haftenden, dichten Oxidschicht, die weiteren chemischen Angriff verhindert (z. B. Al_2O_3 auf Al oder Cr_2O_3 auf chemisch beständigen Stählen). Zunderbeständigkeit hat gleiche Ursache.

Spannungsrißkorrosion: Korrosionsangriff der durch gleichzeitig einwirkende (innere oder äußere) Zuspannung stark begünstigt wird.

60) **Kreislauf (cycle)**

Im Rahmen der Technik durchlaufen die Werkstoffe eine zeitliche Folge aus sechs Teilprozessen: 1. Rohstoffgewinnung \rightarrow 2. Werkstoffherstellung (evtl. bis zum Halbzeug) \rightarrow 3. Fertigung von Teilen und deren Montage \rightarrow 4. Gebrauch \rightarrow 5. Versagen \rightarrow 6. Wiederaufbereitung: Falls der Werkstoff wieder zum Rohstoff wird (z. B. durch Wiedereinschmelzen von Legierungen oder thermoplastischen Polymeren), schließt sich ein Kreislauf. Er bleibt geöffnet im Falle der Deponierung oder Dispergierung. Nach Verbrennen C-haltiger Stoffe kann der Kreislauf durch Biosynthese mit Hilfe von Sonnenenergie geschlossen werden.

61) **Kriechen (creep)**

Zeitabhängige plastische Verformung bestimmt durch Selbstdiffusion, Klettern von Versetzungen. Kriechbeständigkeit durch hohe Schmelztemperatur, hohe Aktivierungsenergie für Diffusion, feine Dispersion von Teilchen (Stähle), hoher Volumenanteil kohärenter geordneter Phasen (Superlegierung).

62) **Kristall (crystal)**

Wichtigste der Phasenarten, aus denen Werkstoffe aufgebaut sein können. Langreichweitig geordnete Struktur, Anordnung einer bestimmten Anzahl von Atomen, die die Elementarzelle (Motiv) bilden, die sich in einem bestimmten Koordinatensystem bis an die Kristallgrenzen (Oberfläche, Korngrenze) fortsetzt. Die Koordinationszahl k gibt die Anzahl der nächsten Nachbarn und die Dichte der Packung an, kubische Kristallstruktur: orthogonal und gleiche Achsabstände. Beispiele:

kfz,	kubisch-flächenzentriert,	$k = 12$,	Al, γ -Fe
krz,	kubisch-raumzentriert,	$k = 8$,	α -Fe, W
kd,	kubisch-diamant,	$k = 4$,	Si, Ge

63) **Kupferlegierungen (copper alloys)**

Wir unterscheiden je nach Kristallstruktur α - (kfz) und β -Legierungen (krz). Je nach Legierungselement werden diese wiederum als Messing oder Bronzen bezeichnet.

Bronze: Legierung aus Cu und Sn, aber auch Be, Al, Si. α -Bronzen (kfz), β -Bronzen (krz) Gleitlagerlegierungen.

Messing: Legierung aus Cu mit Zn, α -Messing (kfz) $< 30\%$ Zn: gut verformbar, β -Messing (krz) $< 50\%$ Zn: hart und recht spröde.

Für elektronische und thermische Leiter muß reinstes Cu verwendet werden ($> 99,99\%$ Cu).

64) **Metastabiles Gleichgewicht (metastable equilibrium)**

Thermodynamischer Gleichgewichtszustand neben dem ein weiterer Zustand mit noch niedrigerer freier Energie existiert. Beispiel: $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ - metastabil (Stahl); $\alpha + \text{Graphit}$ - stabil (graues Gusseisen).

65) **Laser (laser)**

Es handelt sich um kohärente Lichtstrahlen mit sehr hoher Energiedichte, die zum örtlichen Erwärmen des Werkstoffs in den festen, flüssigen oder gasförmigen Zustand geeignet sind. Im Unterschied zum Elektronenstrahl benötigt der Laser kein Vakuum. Anwendungen in der Oberflächentechnik (Härten von Stahl, Oberflächenverglasen, Einschmelzen von Hartphasen), Trenntechnik (Schneiden, Bohren), Fügen (Schweißen mit minimaler Wärmeeinflußzone).

66) **Leichtmetalle (light metals)**

Legierungen mit einer Dichte von $\rho < 6,0 \text{ gm}^{-3}$ auf der Grundlage von Mg, Al oder Ti. Eine geringe Dichte ist immer dann von Vorteil, wenn beschleunigte Massen auftreten (Flugzeug-, Fahrzeugbau). Die größte Bedeutung haben Al-Legierungen, deren Festigkeit durch Mischkristallhärtung (Al + Mg, Mn) oder Ausscheidungshärtung (Al + Cu, Mg; Al + Si, Mg; Al + Zn, Mg) erhöht wird.

Magnesiumlegierungen werden meist als Gußlegierungen verwendet. Sie sind wegen ihrer hexagonalen Kristallstruktur weniger gut plastisch verformbar als Al-Legierungen. Durch Legieren mit Li kann die Dichte von Mg- und Al-Legierungen noch weiter verringert werden.

- 67) **Löten (soldering, brazing)**
Fügetechnik für Metalle und manche Keramiken, mit Hilfe von niedrigschmelzendem Lot, von häufig eutektischer Zusammensetzung: Sn-Pb, Al-Si. Hartlöten (z. B. von Stahl) mit nicht-eutektischen Cu- oder Ag-Legierungen.
- 68) **Lokalelement (local element)**
→ s. 59) Korrosion
- 69) **Magnete (magnets)**
Von diesen Stoffen wird eine hohe magnetische Sättigungsinduktion B_s und eine hohe Curie-Temperatur T_c (Temperaturbeständigkeit des Ferromagnetismus) verlangt. Darüber hinaus unterscheiden wir harte (hohe Koerzitivfeldstärke H_c , Remanenz B_r) und weiche (geringe Ummagnetisierungsverluste in W/kg) Magnete. Erstere sind alle Dauermagnete und magnetische Datenspeicher, letztere dienen als Spulenkern in Transformatoren und elektrischen Maschinen. Hartmagnete sind Fe-, Ni-, Co-haltige kristalline Legierungen - oft mit Seltenen Erdmetallen (Fe, Nd, B) - und Oxide (Ferrite), Weichmagnete sind reines Fe, FeSi-Mischkristalle und metallische Gläser.
- 70) **Martensitische Umwandlung (martensitic transformation)**
Diffusionslose strukturelle Phasenumwandlung durch Scherung des Kristallgitters, liefert Voraussetzung für Stahlhärtung ($\gamma \rightarrow \alpha\text{-Fe(C)}$), Formgedächtnis und hohe Dämpfung ($\beta \rightarrow \alpha\text{-CuZnAl}$).
- 71) **Messing (brass)**
→ s. 63) Kupferlegierungen
- 72) **Metall (metal)**
Wichtigste Werkstoffgruppe, die gekennzeichnet ist durch freie Elektronen, die positiv geladene Atomrümpfe zusammenbinden (metallische Bindung). Folge ist hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit, Kristallisation in dichten Kugelpackungen und deshalb gute plastische Verformbarkeit, aber auch Neigung zu elektrochemischer Korrosion. Übergangsmetalle besitzen nicht vollständig gefüllte Elektronenschalen und zeigen Anomalien, die technisch von Bedeutung sind: hohe Schmelztemperatur (W, Mo, Nb, V), Ferromagnetismus (Fe, Ni, Co, Sm, Nd).

73) Mikrostruktur (microstructure)

In diesem Begriff sind folgende Ebenen der Struktur enthalten, ausgehend vom makroskopischen Werkstoff (Probe, Halbzeug, Bauteil): Gefüge, Phase, Molekül (nur für Polymere), Atom, Elementarteilchen.

74) Oberfläche (surface)

Phasengrenze des Werkstoffs mit seiner Umgebung (Vakuum, Gas, Flüssigkeit). Die spezifische Oberflächenenergie bestimmt die Reaktionsfähigkeit der Oberfläche (Klebstoff, Gleitstoff). Das Versagen des Werkstoffs hat häufig seinen Ursprung in der Oberfläche: Korrosion, Verschleiß, Ermüdungsbruch. Eigenschaften der Oberfläche sind Glanz, Farbe, katalytische Wirksamkeit, Rauigkeit, Benetzbarkeit, Adhäsionsfähigkeit, Adsorptionsfähigkeit.

75) Passivierung (passivation)

Fähigkeit zur selbsttätigen Bildung einer Deckschicht in der Oberfläche, die weiteren Korrosionsangriff behindert oder verhindert: $\text{Al} + \text{Al}_2\text{O}_3$.
→ s. auch 59) Korrosion

76) Phase (phase)

Bereich konstanter Struktur, durch Phasengrenzen oder Oberflächen getrennt. Werkstoffe bestehen aus festen Phasen: Kristall, Quasikristall, Glas. Fluide Phasen: Flüssigkeit, Gas, Plasma sind keine Werkstoffe, manchmal jedoch Hilfsstoffe (Schmiermittel, Kühlmittel) oder Werkstofffehler (Poren).

77) Phasengrenze (phase boundary)

Grenze zwischen verschiedenen Phasen: Werkstoff/Umgebung = Oberfläche, im festen Zustand: kohärente, teilkohärente, inkohärente Phasengrenzen.

78) Phasenumwandlung (phase transformation)

Änderung der Phasenstruktur: Kristallisation der Flüssigkeit beim Abkühlen, martensitische Umwandlung bei der Stahlhärtung, Übergang Paramagnetisch → Ferromagnetisch bei T_C .

79) Plastizität (plasticity, ductility)

Bleibende (nicht reversible) Verformung des Werkstoffs durch viskoses Fließen, Kristallplastizität, Orientierung von Polymermolekülen. Als Superplastizität wird in (feinkristallinen) Metallen ein Verhalten ähnlich dem Fließen viskoser Flüssigkeiten bezeichnet (Umformbarkeit durch Blasen). In Kristall-Flüssigkeitsgemischen findet Verformung in flüssiger Phase (Tonkeramik) oder nach Abscheren einer Gerüststruktur (Thixotropie) statt.

- 80) **Polymer - auch Hochpolymer oder Kunststoff (polymer)**
 Werkstoffgruppen, deren Grundbausteine lange, kettenförmige Moleküle sind, die durch Poly-mer-isation aus kleineren Molekülen (Mer) entstanden sind. Die drei Untergruppen sind:
Plastomer \equiv Thermoplast: unvernetzte Moleküle, schmelz- und plastisch verformbar, teilkristallin oder Glas.
Duomer \equiv Kunstharz: vernetzte Moleküle, folglich nur in unvernetzten Zustand verformbar. Höherer E-Modul und höhere Zugfestigkeit als Thermoplaste.
Elastomer \equiv Gummi: verknäulte, leicht vernetzte Moleküle. Starke elastische Dehnfähigkeit. Zurückknäueln zur Maximierung der Entropie Gummielastizität.
- 81) **Reibung (friction)**
 → s. 103) Tribologie
- 82) **Rekristallisation (recrystallization)**
 Thermisch aktivierte (Selstdiffusion) Neubildung von Kristalliten in stark defekten Gefügen (meist hohe Versetzungsdichte durch Kaltverformung). Es entsteht ein neues Korngefüge (je geringer die Korngröße, desto höher die Verformung), oft verbunden mit einer Textur und Entfestigung (Weichglühen).
- 83) **Rohstoff (raw material)**
 Natürliche Stoffe (Mineralien), die Atomarten enthalten, die zur Herstellung von Werkstoffen gebraucht werden. Für Metalle als Erze bezeichnet, für Polymere: Kohle, Erdöl, Erdgas, die auch Rohstoffe für die Energieerzeugung sind. Sekundärrohstoffe werden durch Aufbereitung gebrauchter Werkstoffe anstelle von Primärwerkstoffen dem Kreislauf zugeführt.
- 84) **Schmelztemperatur (melting temperature)**
 Temperatur der Phasenumwandlung kristallin \rightarrow flüssig T_{kf} . Bei gleicher Bindungsart ist die Schmelzwärme etwa proportional T_{kf} und folglich die Schmelzentropie eine Konstante.
- 85) **Schubspannung (shear stress)**
 Parallel einer Fläche wirkende Kraft (z. B. Torsion).
- 86) **Schweißen (welding)**
 Fügetechnik mit Hilfe von gleichartigem oder ähnlichem, flüssigem Schweißzusatzwerkstoff. Neben erstarrter Struktur entsteht im festen Zustand eine Wärmeeinflußzone. Sie ist kritisch, falls innere Spannungen mit Versprödung zusammenkommt. Schweißen erfolgt ohne Zusatzwerkstoff beim Reib- oder Ultraschallschweißen. Schweißbar sind Metalle, thermoplastische Polymere, keramische Gläser.

87) **Seigerung (segregation)**

Meist unerwünschte Inhomogenität der chemischen Zusammensetzung im Werkstoff. Makroskopisch im Gußblock: Schwereseigerung - Atomart mit höherem Atomgewicht im unteren Teil des Blockes, normal Blockseigerung - zuerst erstarrte Schale ist reiner, flüssig gebliebenes Blockinneres enthält Legierungselemente, Verunreinigungen. Mikroskopische Seigerung: Anreicherung höherschmelzender Legierung im Inneren von Körnern oder tannenbaumförmige Kristallisationszonen (Dendriten).

88) **Sensorwerkstoffe (sensor materials)**

Werkstoffe, die in der Lage sind, ein Signal in ein andersartiges, d. h. eine Werkstoffeigenschaft in eine andere umzuwandeln. Beispiele:
mechanisch → elektrisch: Dehnungsmeßstreifen, Piezokeramik
thermisch → mechanisch: Bimetall, Zweiweg-Formgedächtnis
optisch → elektrisch: opto-elektronische Halbleiter (an Schnittstellen von Lichtleitern)

89) **Spannung, mechanische (stress)**

Auf den Querschnitt bezogene Kraft, $\text{Nm}^{-2} = \text{Pa}$, Angaben der Festigkeit meist in MPa, des E-Moduls in GPa, Zug + , Druck -.

90) **Spannbeton (prestressed concrete)**

Verbundwerkstoff, bei dem der Beton durch Stahlstäbe unter innere Druckspannung gesetzt wird, die sich der äußeren Zugbelastung überlagert und deren Wirkung verringert.

91) **Spannungskorrosion (stress corrosion cracking)**

Gleichzeitige Beanspruchung durch Zugspannung und chemische Reaktion in der Oberfläche, die zu Rissbildung führt (z. B. gezogene Messinglegierungen und Amoniak).

92) **Stahl (steel)**

Legierung von Eisen meist mit C. Andere Legierungselemente sind Cr (Korrosionsbeständigkeit), Mo (Warmfestigkeit), Si (Spulenkerne), V (Schnellarbeitsstähle). Baustähle - Vergütungsstähle - Werkzeugstähle zeichnen sich durch steigenden C-Gehalt aus. 2 Gew.-% ist die Grenze zwischen den Stählen und Gußeisen.

Stahlhärtung: Auch Umwandlungshärtung. Austenitisieren \equiv Erwärmen in den Temperaturbereich der homogenen kfz γ -Phase (Austenit). Schnellabkühlen, so daß diffusionslose martensitische Umwandlung $\gamma \rightarrow \alpha_M$ eintritt. Dieser Zustand ist in Werkzeugstählen hart und spröde. Durch Wiedererwärmen auf mittlere Temperaturen (250-600 °C) scheiden sich Karbide aus und die Bruchzähigkeit steigt an (Anlassen, Vergüten).

93) **Streckgrenze R_p (yield strength)**

Spannung, bei der ein bestimmter Betrag (z. B. $0,2 \% = \epsilon_p$) von plastischer Verformung auftritt. Baustähle zeigen ausgeprägte (diskontinuierliche) Streckgrenzen: plastische Verformung beginnt bei überhöhter (oberer) Streckgrenze und setzt sich auf niedrigerem Niveau fort, bis nach $\epsilon_p \approx 2-5 \%$ Verfestigung einsetzt. Für einen spröden Werkstoff gilt: Streckgrenze = Zugfestigkeit, $R_p = R_m$ und Bruchdehnung $\epsilon_B=0$. Das Streckgrenzenverhältnis R_p/R_m ist klein bei großer Verfestigungsfähigkeit des Werkstoffs.

94) **Strukturwerkstoff (structural material)**

Werkstoff, der vorwiegend mechanisch beansprucht werden soll: hohe Zug-, Schwing-, Zustandfestigkeit, Bruchzähigkeit. Sekundärtugenden: geringe Dichte, Korrosionsbeständigkeit.

95) **Superlegierung (superalloy)**

Hochwarmfeste Legierung auf der Grundlage von Ni (oder Co), die im Mischkristall einen hohen Volumenanteil (bis 90%) einer intermetallischen Verbindung vom Typ Ni_3Al im kohärenten Dispersionsgefüge enthält. Obere Verwendungstemperatur (Gasturbine) $1050^\circ C$.

96) **Supraleiter (superconductor)**

Stoffe, die unterhalb einer kritischen Temperatur T_c elektrischen Strom ohne Widerstand leiten können. Die zweite wichtige Eigenschaft ist die Stromtragfähigkeit (harte SL), da das durch Leitung erzeugte Magnetfeld im Inneren des Werkstoffs die Supraleitung zerstört. Supraleiter sind nichtferromagnetische Metalle und Legierungen (z. B. $Nb + Ti$, $T_c = 20 K$). In den letzten Jahren sind keramische Supraleiter mit sehr hohen Sprungtemperaturen entdeckt worden.

97) **Systemeigenschaft (systems property)**

Zum Beispiel der Reibungskoeffizient η eines tribologischen Systems. Er setzt sich zusammen aus den Eigenschaften der Oberflächen der Gleitpartner und der Umgebung (z. B. des Schmiermittels). η kann nicht für einen Werkstoffe, z. B. für Stahl angegeben werden, ohne alle weiteren Systembedingungen zu nennen. Weitere Beispiele: Spannungsrissskorrosion, Bimetall.

98) **Textur (texture)**

In Vielkristallen bevorzugte Orientierung bestimmter Kristallflächen und -richtungen in einem Bezugssystem (Blechtextur in Walzrichtung, Fasertextur in Drahtachse), Ursache von Anisotropie. Texturlose Vielkristalle und Gläser sind isotrop.

99) **Thermische Ausdehnung (thermal expansion)**

Ausdehnungskoeffizient $\alpha = d\epsilon/dT$ ist bei vielen Werkstoffen umgekehrt proportional der Schmelztemperatur (T_{kf} [K]). Anomalien durch Phasenumwandlungen, Auflösen, Auscheiden von Atomen, Wasseraufnahme, -abgabe (Polymere). Durch Magnetostriktion entsteht der INVAR-Effekt: $\alpha \approx 0$ in einem Temperaturbereich bei T_c (Curietemperatur).

thermische Leiter: In Metallen sind thermische und elektrische Leitfähigkeit proportional. Sie nimmt folglich mit zunehmender Temperatur ab (freie Elektronen). In Isolatoren erfolgt die Wärmeleitung durch Gitterschwingungen (Phononen) oder Bewegung von Ionen. Sie nimmt mit der Temperatur zu.

100) **Thermoplast (thermoplast)**

Polymerwerkstoff, der aus unvernetzten Kettenmolekülen besteht. Bei erhöhter Temperatur Plastizität durch viskoses Fließen, bei Raumtemperatur fester Zustand, Härtung oft durch teilweise Kristallisation.

101) **Thermische Stabilität (thermal stability)**

Unterhalb eines Temperaturbereiches $T < 1/3 T_{kf}$, laufen thermisch aktivierte Prozesse, wie Alterung, Kriechen, Kristallerholung, Teilchenvergrößerung sehr langsam ab. Der Werkstoff verändert sich praktisch nicht mehr durch Diffusionsprozesse.

102) **Tiefziehfähigkeit (deep drawing ability)**

Komplexe fertigungstechnische Eigenschaft. Der Tiefziehprozeß wird nachgeahmt durch Kugeleindruck in Blech (Erichsen) oder Näpfchenziehversuch. Gemessen wird Tiefung (Tiefe des Eindrucks bis zum Bruch). Außerdem wird beurteilt: Zipfelbildung durch Textur und Apfelsinenschalenbildung = Rauigkeit durch hohe Korngröße.

103) **Tribologie (tribology)**

Lehre von der Wechselwirkung aufeinandergleitender Oberflächen. Das tribologische System umfaßt außerdem das umgebende Gas (trockene Reibung) und/oder ein Schmiermittel. Die (äußere) Reibung ist die Folge der Energiedissipation. Der Reibungskoeffizient ist eine typische Systemeigenschaft. Die Reibkraft hängt auch von der Oberflächenmorphologie ab. Ursachen der Reibungskraft sind Adhäsion, elastische, plastische Verformung, tribo-chemische Reaktionen. Die Oberflächenhärte beeinflusst den Anteil der Oberflächen, die in Berührung sind. Die Folge der Reibungskraft kann Verschleiß sein, i.e. es hängt von Systembedingungen ab, welcher Anteil der Reibungsenergie für die Materialabtragung wirksam wird. Verschleißbeanspruchungen können: adhäsiv, abrasiv, erosiv sein. Die Abtragungsmechanismen umfassen spröden Bruch, Ermüdungsbruch, duktilen Abtrag bis zum Abtrag einzelner Atome (Ionenerosion).

In geschmierten Systemen sollte keine Berührung zwischen den Werkstoffen und folglich keine Adhäsion auftreten. Die Energiedissipation erfolgt primär durch innere Reibung des viskos fließenden Schmierstoffes. Feste Schmierstoffe sind Schicht- oder Faserkristalle mit sehr schwacher Bindung in einer (Graphit, Molybdänsulfid) oder zwei Richtungen (PTFE = Teflon).

104) **Verbundwerkstoffe (composites)**

Vierte Werkstoffgruppe, die aus Bestandteilen der drei Grundgruppen aufgebaut werden, um verbesserte Eigenschaften zu erzielen. Beispiele sind Al_2O_3 -faserverstärkte Leichtmetalle, Schichtverbunde aus keramischen und polymeren Gläsern (Sicherheitsglas), beschichtete Werkstoffe.

105) **Verfestigung (work hardening)**

Erhöhung der Streckgrenze durch plastische Verformung von Metallen (i.e. Erhöhung der Versetzungsdichte). In thermoplastischen Polymeren kann Verfestigung durch Gleiten und Orientierung von Molekülen auftreten.

106) **Versagen (failure)**

Das Ende des Gebrauchs eines Werkstoffs (im Bauteil) durch verschiedenartige Beanspruchung: mechanisch → Bruch, thermisch → Schmelzen, chemisch → Korrosion, chemisch + mechanisch → Spannungsrisskorrosion, tribologisch → Verschleiß.

107) **Versetzung (dislocation)**

Linienförmiger Kristallbaufehler, gekennzeichnet durch Burgervektor. Versetzungen ermöglichen Kristallplastizität, führen zu Verfestigung und können die Keimbildung von Ausscheidungen stark beeinflussen.

108) **Verschleiß (wear)**

→ s. 103) Tribologie

109) **Verzundern (scaling)**

Oxidation der Oberfläche des Werkstoffs ohne Mitwirkung von wässrigen Elektrolyten, deshalb bei erhöhter Temperatur. Bei fest anhaftenden Oxidschichten ist die Verzunderung kontrolliert durch Diffusion durch die Zunderschicht. Zunderbeständigkeit durch „dichte“ Schichten wie Passivierung.

110) **Werkstoffgruppen (groups of material)**

Wir unterscheiden drei große Gruppen aufgrund von chemischer Bindung und Aufbau der Grundbausteine:

Metall: → s. 72)

Keramik: → s. 54)

Polymer: → s. 80)

Als vierte große Gruppe kommen die Verbundwerkstoffe (→ s. 104) hinzu.

111) **Wöhlerkurve (σ -N-curve)**

Auch σ_a -N-Diagramme zur Bestimmung der Schwingfestigkeit. Die Amplitude einer zyklischen Belastung σ_a wird aufgetragen gegen die Anzahl der Lastwechsel N, bei der die Probe bricht. Als Schwingfestigkeit wird der Wert von σ_a angegeben bei der nach einer bestimmten Zahl von Lastwechseln ($N = 10^7$) der Bruch auftritt: $\sigma_{a,10^7} = 50$ MPa. Die Wöhlerkurve integriert das gesamte Ermüdungsverhalten: zyklische Verfestigung, Rissbildung, stabiles, instabiles Wachstum.

112) **Zähigkeit (toughness, viscosity)**

Hat sehr verschiedene Bedeutungen:

Zähflüssigkeit η [Pa · S]: hoher Wert bedeutet geringe Fließfähigkeit einer Flüssigkeit

Bruchzähigkeit K_{IC} [Pa · m^{1/2}]: Widerstand gegen Ausbreitung eines vorgegebenen scharfen Anrisses unter Bedingungen ebener Dehnung. Kerbschlagzähigkeit A_v [J]: Energie, die zur Trennung einer Probe mit definierten Abmessungen und Kerb in einem Pendelschlagwerk benötigt wird.

113) **Zeitstandversuch (creep test)**

Experimentelle Bestimmung des Kriechverhaltens bei konstanter Last (technisch) oder Spannung (physikalisch). Bestimmt werden Zeitdehnungsgrenze, Zeitstandfestigkeit und deren Temperaturabhängigkeit.

114) **Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubild (time temperature transformation diagram)**

Zur Darstellung des Umwandlungsverhaltens von Werkstoffen (insbesondere der Stähle) bei verschiedenen Abkühlungsgeschwindigkeiten (kontinuierlich) oder nach schnellem abkühlen von der Ausgangstemperatur (Austenitisierung, Homogenisierung) auf eine niedrige konstant gehaltene Temperatur (isotherm).

115) **Zement (cement)**

Allgemein: Klebstoff, speziell: hydraulischer Zement, der bei der Herstellung von Beton Sand und Wackersteine miteinander verklebt. Bei diesem Vorgang verbindet sich der Zement (z.B. Portlandzement, oder Vulkanasche) mit Wasser zu einem Hydrat. Organische Klebstoffe binden durch Vernetzen von Polymermolekülen und Reaktionen mit den Oberflächen.

116) **Zustandsdiagramm (equilibrium phase diagram)**

Graphische Darstellung der Temperaturabhängigkeit von meist heteroge-

nen Gleichgewichten, abhängig von der chemischen Zusammensetzung, manchmal vom Druck. Es handelt sich um stabile thermodynamische Gleichgewichte, z. B. γ -Fe + Graphit (graues Gußeisen), oder bei Reaktionen im festen Zustand oft um metastabile Gleichgewichte, z. B. α -Fe + Fe_3C (Stahl).

117) **Zwillingsbildung (twinning)**

Zweite Möglichkeiten zur plastischen Verformung von Kristallen neben dem Gleiten von Gitterebenen mit Hilfe von Versetzungen. Es bildet sich ein zu Zwillingsebene spiegelbildlich orientierter neuer Kristall. Zwillingsbildung wird begünstigt durch tiefe Temperaturen, hohe Verformungsgeschwindigkeiten und niedrige Stapelfehlerenergie. Beim Stahl besteht ein Zusammenhang zwischen Z. und der Versprödung (Abfall der Kerbschlagzähigkeit) bei tiefer Temperatur.

A 2: Regelmäßig erscheinende Fachzeitschriften

Hier sind die wichtigsten regelmäßig erscheinenden Fachzeitschriften zusammengestellt, die werkstoffwissenschaftliche Themen und deren Randgebiete behandeln.

Hinter den einzelnen Titeln ist jeweils in Klammern vermerkt, wo die inhaltlichen Schwerpunkte der Zeitschriften liegen. Dabei bedeuten:

- WW → Werkstoffwissenschaft (Grundlagen)
- WT → Werkstofftechnik (Anwendung)
- WP → Werkstoffprüfung
- RG → Randgebiete.

- 1) Acta Materialia (WW)
- 2) Advanced Materials and Processes (WW, WT)
- 3) Aluminium (WT)
- 4) Applied Physics (WW)
- 5) Applied Physics Letters (WW)
- 6) Applied Surface Science (WW)
- 7) Composites Science and Technology (WT)
- 8) Corrosion (WT, WP)
- 9) Der Bauingenieur (RG)
- 10) Engineering Failure Analysis (WW, WP)
- 11) Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures (WW, WP)
- 12) Fortschritte der Physik (WW)
- 13) Glass and Ceramics (WW, WT)
- 14) Heat Treatment of Metals (WW, WT)
- 15) Holz als Roh- und Werkstoff (WT, RG)
- 16) Holzforschung und Holzverwertung (WW, WT, RG)
- 17) HTM - Härtereitechnische Mitteilungen (WT)

- 18) International Journal of Fracture (WT)
- 19) International Journal of Polymeric Materials (WW)
- 20) International Journal of Powder Metallurgy (WW, WT)
- 21) Journal of Applied Physics (WW)
- 22) Journal of Biomedical Materials Research (WW, RG)
- 23) Journal of Composite Materials (WW, WT)
- 24) Journal of Elastomers and Plastics (WW, WT)
- 25) Journal of Light Metals (WW, WT)
- 26) Journal of Magnetism and Magnetic Materials (WW, RG)
- 27) Journal of Materials Research (WW)
- 28) Journal of Materials Science (WW)
- 29) Journal of Materials Science Letters (WW)
- 30) Journal of Polymer Engineering (WW, WT)
- 31) Journal of the American Ceramic Society (WW, WT)
- 32) Journal of the European Ceramic Society (WW, WT)
- 33) Keramische Zeitschrift (WW, WT)
- 34) Kunststoffe im Automobilbau (WT)
- 35) Kunststoffe, Deutsche Ausgabe (WW, WT)
- 36) Materialprüfung (WP)
- 37) Materials and corrosion (WW)
- 38) Materials Letters (WW)
- 39) Materials Research Bulletin (WW)
- 40) Materials Science and Engineering A, B (WW, WT)
- 41) Materialwissenschaft und Werkstofftechnik (WW, WT)
- 42) Metal Science and Heat Treatment (WW, WT)
- 43) Metall (WW, WT)
- 44) Metallurgia (WW)
- 45) Metallurgical Transactions A, B (WW)
- 46) Physica Status Solidi A, B (WW)
- 47) Physikalische Blätter (RG)
- 48) Plastics Engineering (WT)
- 49) Powder Metallurgy quarterly (WT)
- 50) Praktische Metallographie (WW, WP)
- 51) Progress in Materials Science (WW)
- 52) Progress in Polymer Science (WW)
- 53) Science of Materials (WW)
- 54) Scripta Materialia (WW)
- 55) Stahl und Eisen (WW, WT)
- 56) Steel research (WW, WT)
- 57) Technische Kunststoffe (WT)
- 58) Tribology International (WW)
- 59) Wear (WT)
- 60) Werkstatttechnik (WT, RG)
- 61) Wood and Fiber (WW, RG)
- 62) Wood Science and Technology (WW, WT)
- 63) Zeitschrift für Metallkunde (WW, WT)