dandelon.com
© 2008 AGI-Information Management Consultants
May be used for personal purposes only or by
libraries associated to dandelon.com network.

Werkstoffkunde

Prof. Dipl.-Ing. Hans-Jürgen Bargel
Prof. Dr.-Ing. Peter Cardinal
Dr.-Ing. Hermann Hilbrans
Prof. Dr. phil. nat. Karl-Heinz Hübner
Dr.-Ing. Oswald Krüger
Prof. Dr.-Ing. Günter Schulze

Herausgegeben von
Prof. Dipl.-Ing. Hans-Jürgen Bargel
Prof. Dr.-Ing. Günter Schulze

Achte, überarbeitete Auflage

Mit 435 Abbildungen und 204 Tabellen

Springer

Inhalt

1	**Grundlagen der Metall- und Legierungskunde** *(H.-J. Bargel, G. Schulze)*		1
1.1	Aufbau kristalliner Stoffe		1
	1.1.1	Bindungsformen anorganischer Stoffe	1
	1.1.2	Gitteraufbau des Idealkristalls	2
	1.1.3	Realkristalle, Gitterbaufehler, Energie von Fehlstellen	4
	1.1.3.1	Punktförmige Gitterbaufehler	5
	1.1.3.2	Versetzungen	6
	1.1.3.3	Zweidimensionale Gitterbaufehler	7
	1.1.4	Einkristall, Vielkristall	8
	1.1.4.1	Korngröße	9
	1.1.4.2	Kornformen	9
1.2	Eigenschaften der Metalle		10
	1.2.1	Elektrische und thermische Eigenschaften	10
	1.2.1.1	Elektrische Leitfähigkeit	10
	1.2.1.2	Wärmeleitfähigkeit	11
	1.2.1.3	Magnetismus	12
	1.2.2	Mechanische Eigenschaften	13
	1.2.2.1	Elastische und plastische Verformung	13
	1.2.2.2	Mechanismen der plastischen Verformung	14
	1.2.2.3	Verformbarkeit, Gleitsysteme	15
	1.2.2.4	Verfestigung	16
	1.2.2.5	Fließkurve	18
1.3	Phasenumwandlungen		18
	1.3.1	Primärkristallisation bei reinen Metallen	19
	1.3.1.1	Keimbildung	19
	1.3.1.2	Kristallwachstum	20
	1.3.2	Primärkristallisation bei Legierungen	21
	1.3.3	Einfluß der Korngrenzen	21
	1.3.4	Umwandlungen im festen Zustand	23
	1.3.4.1	Martensitbildung	24
	1.3.4.1.1	Martensit in Fe-C-Legierungen	24
	1.3.4.1.2	Formgedächtnislegierungen	25
1.4	Thermisch aktivierte Vorgänge		26
	1.4.1	Diffusion	27
	1.4.1.1	1. Fickssches Gesetz, Diffusionskoeffizient	27
	1.4.1.2	Platzwechselmechanismen	28
	1.4.1.3	Technische Anwendungen	28
	1.4.2	Erholung und Rekristallisation	29
	1.4.3	Kriechvorgänge und Spannungsrelaxation	32
1.5	Grundlagen der Legierungsbildung		34
	1.5.1	Mischkristalle	34
	1.5.1.1	Substitutionsmischkristalle (SMK)	35
	1.5.1.2	Einlagerungsmischkristalle (EMK)	35
	1.5.2	Intermediäre Kristalle	36

1.6 Zustandsschaubilder
- 1.6.1 Grundlagen, Begriffe, Definitionen
- 1.6.2 Phasengesetz
- 1.6.3 Aufstellen der Zustandsschaubilder
- 1.6.4 Zustandsschaubilder von Zweistofflegierungen
- 1.6.4.1 Vollkommene Unlöslichkeit im flüssigen und festen Zustand
- 1.6.4.2 Vollkommene Löslichkeit im flüssigen und festen Zustand
- 1.6.4.3 Vollkommene Löslichkeit im flüssigen Zustand, vollkommene Unlöslichkeit im festen Zustand
- 1.6.4.4 Vollkommene Löslichkeit im flüssigen Zustand, begrenzte Löslichkeit im festen Zustand
- 1.6.4.4.1 Eutektische Systeme
- 1.6.4.4.2 Peritektische Systeme
- 1.6.5 Zustandsschaubilder mit intermediären Phasen
- 1.6.6 Zustandsschaubilder mit Umwandlungen im festen Zustand
- 1.6.7 Nichtgleichgewichtszustände
- 1.6.7.1 Kristallseigerung
- 1.6.7.2 Unterkühlungserscheinungen in eutektischen Systemen
- 1.6.7.3 Entartetes Eutektikum

1.7 Eigenschaften technischer Legierungen – Anwendungen der Zustandsschaubilder
- 1.7.1 Eigenschaften von Legierungen aus Kristallgemengen
- 1.7.2 Eigenschaften von Legierungen aus Mischkristallen
- 1.7.3 Eigenschaften von Legierungen mit Umwandlungen im festen Zustand
- 1.7.3.1 Legierungen mit Überstrukturen und intermediären Phasen
- 1.7.3.2 Legierungen, die Segregate bilden – Aushärten

1.8 Korrosion
- 1.8.1 Elektrochemische Grundlagen
- 1.8.1.1 Elektrolyt
- 1.8.1.2 Lösungstension, elektrochemische Spannungsreihe
- 1.8.1.3 Korrosionselement
- 1.8.1.4 Wasserstoffkorrosion
- 1.8.1.5 Sauerstoffkorrosion
- 1.8.2 Korrosionsformen
- 1.8.3 Korrosionsarten
- 1.8.3.1 Korrosion ohne mechanische Beanspruchung
- 1.8.3.2 Korrosion mit zusätzlicher mechanischer Beanspruchung
- 1.8.4 Korrosionsverhalten der Werkstoffe
- 1.8.5 Korrosionsschutz
- 1.8.6 Korrosionsprüfungen

2 Einwirkung von Herstellung und Weiterverarbeitung auf die Eigenschaften von Metalle
(H.-J. Bargel, G. Schulze)

- 2.1 Metallgewinnung, Verhüttung
- 2.1.1 Erze, Anreicherungsverfahren
- 2.1.2 Verhüttung, Reduktion
- 2.1.3 Raffination
- 2.1.4 Nichtmetallische Verunreinigungen
- 2.1.5 Gase im Metall

2.2 Schmelzen und Erstarren 71
2.2.1 Ausgewählte Erstarrungsvorgänge 71
2.2.2 Seigerungen 72
2.2.3 Lunker 73
2.2.4 Einfluß des Gießverfahrens 74

2.3 Umformen 75
2.3.1 Warmformgebung 76
2.3.1.1 Umformtemperatur 76
2.3.1.2 Einfluß des Gefüges 76
2.3.1.3 Warmformgebungsverfahren 77
2.3.2 Kaltformgebung 78
2.3.2.1 Einfluß des Gefüges 78
2.3.2.2 Kaltformgebungsverfahren 79

2.4 Sintern (Pulvermetallurgie) 79
2.4.1 Pulverherstellung, Sintervorgang 79
2.4.2 Möglichkeiten und Eigenschaften von Sinterwerkstoffen 80

2.5 Schweißen und Löten 81
2.5.1 Thermische Wirkung 81
2.5.2 Schweißeigenspannungen 82
2.5.3 Aufbau und Eigenschaften der thermisch beeinflußten Bereiche 83
2.5.4 Werkstoffbedingte Besonderheiten und Schwierigkeiten beim Schweißen 85
2.5.4.1 Probleme während des Erwärmens 85
2.5.4.2 Probleme während des Erstarrens 86
2.5.4.3 Verbindungsschweißen unterschiedlicher Werkstoffe 87
2.5.5 Werkstoffbedingte Probleme beim Löten 88

2.6 Eigenspannungen 93
2.6.1 Eigenspannungen infolge Kaltverformung 93
2.6.2 Eigenspannungen infolge schneller Abkühlung 94
2.6.3 Nachweis und Abbau von Eigenspannungen 94

3 Werkstoffprüfung *(H.-J. Bargel)* 95

3.1 Statische Festigkeits- und Verformungskennwerte 95
3.1.1 Spannung – Verformung – Verlauf 95
3.1.2 Elastische Kennwerte 97
3.1.3 Kennwerte des Zugversuchs 98
3.1.4 Kennwerte des Druckversuchs 100
3.1.5 Biegeversuch und Verdrehversuch 101
3.1.6 Zeitstandversuch 102
3.1.7 Einflußfaktoren 103
3.1.7.1 Versuchsbedingte Einflüsse 103
3.1.7.2 Werkstoffbedingte Einflüsse 104
3.1.7.3 Vergleich verschiedener Werkstoffe 105
3.1.7.4 Besonderheiten einzelner Werkstoffgruppen 105

3.2 Festigkeits- und Verformungskennwerte bei schwingender Beanspruchung 106
3.2.1 Definitionen 106

3.2.1.1 Kennzeichnung schwingender Beanspruchung
3.2.1.2 Einstufige Beanspruchung
3.2.1.3 Mehrstufige Beanspruchung
3.2.2 Prüfverfahren
3.2.3 Einflüsse auf die Schwingfestigkeit
3.2.3.1 Spannungsverhältnis, Dauerfestigkeitsschaubild
3.2.3.2 Spannungsgradient
3.2.3.3 Oberfläche
3.2.3.4 Prüfbedingungen
3.2.3.5 Statische Festigkeit
3.2.4 Werkstoffverhalten bei schwingender Beanspruchung
3.2.4.1 Verfestigung, Entfestigung
3.2.4.2 Gefügeveränderungen
3.2.4.3 Rißbildung, Rißfortschritt
3.2.4.4 Schwingungsbruch (Dauerbruch)

3.3 Härtekennwerte
3.3.1 Begriffe
3.3.2 Statische Härteprüfverfahren
3.3.2.1 Messung der Eindruckfläche
3.3.2.2 Messung der Eindringtiefe
3.3.2.3 Vergleich von Härteangaben
3.3.3 Dynamische Härteprüfverfahren
3.3.4 Einflüsse auf die Härtewerte

3.4 Kennwerte des Bruchverhaltens
3.4.1 Bruchformen
3.4.2 Bruchkriterien, Grundlagen der Bruchmechanik
3.4.3 Verfahren zur Prüfung des Zähigkeitsverhalten
3.4.3.1 Kerbschlagbiegeversuch nach CHARPY
3.4.3.2 Kompakt-Zugversuch
3.4.3.3 Weitere Prüfverfahren
3.4.4 Einflüsse auf das Bruchverhalten
3.4.5 Anwendungsgrenzen von Bruchversuchen

3.5 Technologische Prüfverfahren
3.5.1 Prüfung der Umformeigenschaften
3.5.2 Prüfung der Gießeigenschaften
3.5.3 Weitere technologische Prüfungen

3.6 Zerstörungsfreie Prüfung
3.6.1 Kapillarverfahren
3.6.2 Magnetische und induktive Verfahren
3.6.3 Schallverfahren
3.6.4 Strahlenverfahren

3.7 Metallografische Untersuchungsverfahren
3.7.1 Makroskopische Verfahren
3.7.2 Mikroskopische Verfahren
3.7.2.1 Lichtmikroskopie
3.7.2.2 Raster-Elektronenmikroskopie
3.7.2.3 Durchstrahlungs-Elektronenmikroskopie

3.8 Physikalische Analyseverfahren
3.8.1 Spektralanalyse
3.8.1.1 Lichtemissionsspektroskopie
3.8.1.2 Röntgenspektroskopie
3.8.2 Röntgenfeinstrukturuntersuchung

4 Eisenwerkstoffe *(G. Schulze, P. Cardinal)*

4.1 Eisen-Kohlenstoff-Schaubild (EKS)
4.1.1 Metallkundliche Grundlagen
4.1.2 Phasenänderungen im Eisen-Kohlenstoff-Schaubild

4.2 Einteilung der Eisenwerkstoffe

4.3 Stahlherstellung
4.3.1 Hochofenerzeugnisse
4.3.2 Erschmelzungsverfahren
4.3.2.1 Allgemeine Grundlagen
4.3.2.2 THOMAS-Verfahren (T)
4.3.2.3 SIEMENS-MARTIN-Verfahren (M)
4.3.2.4 Sauerstoff-Blas-Verfahren (Y)
4.3.2.5 Elektrostahl-Verfahren (E)
4.3.3 Sekundärmetallurgie (Pfannenmetallurgie)
4.3.4 Desoxidieren von Stahl
4.3.4.1 Vergießen von Stahl
4.3.4.2 Erstarren von Stahl
4.3.5 Weitere Verarbeitung von Stahl

4.4 Wirkung der Eisenbegleiter
4.4.1 Mangan
4.4.2 Silicium
4.4.3 Phosphor
4.4.4 Schwefel
4.4.5 Stickstoff
4.4.6 Wasserstoff
4.4.7 Sauerstoff
4.4.8 Nichtmetallische Einschlüsse

4.5 Wärmebehandlung der Stähle
4.5.1 Ziel der Wärmebehandlung
4.5.2 Temperaturführung
4.5.3 Glühbehandlungen (gleichgewichtsnahe Zustände)
4.5.3.1 Diffusionsglühen (Homogenisieren)
4.5.3.2 Grobkornglühen
4.5.3.3 Spannungsarmglühen
4.5.3.4 Rekristallisationsglühen
4.5.3.5 Weichglühen
4.5.3.6 Normalglühen (Normalisieren)
4.5.4 Härten (Nichtgleichgewichtszustände)
4.5.4.1 Einfluß der beschleunigten Abkühlung
4.5.4.2 Umwandlung in der Perlitstufe

4.5.4.3 Umwandlung in der Bainitstufe
4.5.4.4 Umwandlung in der Martensitstufe
4.5.5 Austenit-Umwandlung
4.5.5.1 ZTU-Schaubilder für kontinuierliche Abkühlung
4.5.5.2 Isotherme ZTU-Schaubilder
4.5.5.3 ZTA-Schaubilder
4.5.6 Härteverfahren
4.5.6.1 Grundlagen, Begriffe
4.5.6.2 Abschrecken, Abschreckmittel
4.5.6.3 Einfaches Härten, kontinuierliches Härten
4.5.6.4 Gebrochenes Härten
4.5.6.5 Warmbadhärten, isothermes Härten
4.5.6.6 Härtespannungen
4.5.6.7 Härtbarkeitsprüfung
4.5.7 Vergüten
4.5.7.1 Normales Vergüten (Anlaßvergüten)
4.5.7.2 Bainitisieren
4.5.7.3 Patentieren – Perlitisieren
4.5.8 Verfahren zum Härten oberflächennaher Schichten
4.5.8.1 Verfahren mit begrenztem Wärmeeinbringen
4.5.8.2 Verfahren mit Änderung der chemischen Zusammensetzung

4.6 Legierungselemente im Stahl
4.6.1 Einteilung und allgemeine Wirkung
4.6.1.1 Mischkristall- und Carbidbildner
4.6.1.2 Verschiebung der Phasengrenzen im EKS
4.6.2 Austenitumwandlung, Darstellung im ZTU-Schaubild
4.6.3 Härtbarkeit und Härteverhalten legierter Stähle

4.7 Normgerechte Bezeichnung der Eisenwerkstoffe
4.7.1 Benennung nach DIN EN 10027-1
4.7.1.1 Kennzeichnung nach Verwendung und Eigenschaften
4.7.1.2 Kennzeichnung nach der chemischen Zusammensetzung
4.7.2 Kennzeichnung durch Werkstoff-Nummern (DIN EN 10027-2)
4.7.3 Benennung nach DIN 17006

4.8 Stahlgruppen
4.8.1 Einteilung der Stähle
4.8.2 Baustähle
4.8.2.1 Unlegierte Baustähle nach DIN EN 10025-1
4.8.2.2 Kaltgewalzte weiche Stähle zum Kaltumformen nach DIN EN 101
DIN EN 10142
4.8.2.3 Hochfeste Baustähle
4.8.2.3.1 Methoden zum Erhöhen der Festigkeit
4.8.2.3.2 Hochfeste, nicht vergütete Feinkornbaustähle
4.8.2.3.3 Hochfeste vergütete Feinkombaustähle
4.8.3 Härtbare Maschinenbaustähle
4.8.3.1 Vergütungsstähle
4.8.3.2 Stähle für das Randschichthärten
4.8.3.3 Nitrierstähle
4.8.3.4 Einsatzstähle
4.8.4 Warmfeste und hitzebeständige Stähle

4.8.5 Kaltzähe Stähle
4.8.6 Nichtrostende Stähle
4.8.6.1 Perlitisch-martensitische Chromstähle
4.8.6.2 Ferritische und halbferritische Chromstähle
4.8.6.3 Austenitische Chrom-Nickel-Stähle
4.8.6.4 Austenitisch-ferritische Stähle
4.8.7 Druckwasserstoffbeständige Stähle
4.8.8 Werkzeugstähle
4.8.8.1 Anforderungen
4.8.8.2 Unlegierte Werkzeugstähle
4.8.8.3 Legierte Kaltarbeitsstähle
4.8.8.4 Warmarbeitsstähle
4.8.8.5 Schnellarbeitsstähle

4.9 Eisengußwerkstoffe
4.9.1 Begriff, Bedeutung, Einteilung
4.9.2 Stahlguß
4.9.3 Gußeisen
4.9.3.1 Gußeisendiagramme
4.9.3.2 Hartguß
4.9.3.3 Gußeisen mit Lamellengrafit
4.9.3.4 Gußeisen mit Kugelgrafit
4.9.4 Temperguß
4.9.4.1 Weißer Temperguß
4.9.4.2 Schwarzer Temperguß

5 Nichteisenmetalle *(H. Hilbrans)*

5.1 Normgerechte Bezeichnung der Nichteisenmetalle
5.1.1 Kurzzeichen
5.1.2 Werkstoff-Nummern

5.2 Kupfer und Kupferlegierungen
5.2.1 Kupferherstellung
5.2.2 Unlegiertes Kupfer
5.2.3 Legiertes Kupfer
5.2.4 Messing und Neusilber
5.2.5 Bronzen
5.2.6 Kupfer-Nickel-Werkstoffe mit besonderen elektrischen Eigenschaften
5.2.7 Korrosionsbeständige Kupfer-Nickel-Legierungen

5.3 Nickel und Nickellegierungen
5.3.1 Reinnickel
5.3.2 Legiertes Nickel
5.3.3 Nickel-Kupfer-Werkstoffe
5.3.4 Zunderbeständige und warmfeste Nickellegierungen
5.3.5 Korrosionsbeständige Nickellegierungen
5.3.6 Nickelhaltige Magnetwerkstoffe

5.4 Aluminium und Aluminiumlegierungen
5.4.1 Unlegiertes Aluminium

5.4.2 Legierungssysteme des Aluminiums
5.4.3 Wärmebehandlung und Aushärten
5.4.4 Aluminium-Knetlegierungen
5.4.5 Aluminium-Gußlegierungen
5.4.6 Verarbeitung von Aluminiumlegierungen

5.5 Magnesium und Magnesiumlegierungen
5.5.1 Reinmagnesium
5.5.2 Magnesiumlegierungen

5.6 Titan und Titanlegierungen
5.6.1 Unlegiertes Titan
5.6.2 Titanlegierungen

5.7 Zirkonium und Reaktorwerkstoffe

5.8 Zinn und Zinnlegierungen
5.8.1 Reinzinn
5.8.2 Zinnlegierungen

5.9 Zink und Zinklegierungen
5.9.1 Unlegiertes und niedriglegiertes Zink
5.9.2 Zink-Überzüge
5.9.3 Zink-Druckguß

5.10 Blei und Bleilegierungen
5.10.1 Weichblei
5.10.2 Bleilegierungen

5.11 Recycling metallischer Werkstoffe

6 Anorganische nichtmetallische Werkstoffe *(K.-H. Hübner)*

6.1 Einteilung, Definition, Bedeutung

6.2 Glas

6.3 Keramik
6.3.1 Tonkeramische Werkstoffe
6.3.2 Oxidkeramische Werkstoffe
6.3.3 Ferroelektrische keramische Werkstoffe
6.3.4 Magnetische keramische Werkstoffe

6.4 Kohlewerkstoffe

6.5 Nichtoxidische Hartstoffe
6.5.1 Nichtmetallische Hartstoffe
6.5.2 Hartstoffe mit metallischen Eigenschaften

6.6 Halbleiter
6.6.1 Einteilung

6.6.2 Bändermodell
6.6.3 Eigenleitung
6.6.4 Störstellenleitung
6.6.5 p-n-Übergang
6.6.6 Transistor
6.6.7 HALL-Generator
6.6.8 Fotoelektrische Bauelemente

7 Kunststoffe *(O. Krüger)*

7.1 Einführung und Aufbau der Kunststoffe
7.1.1 Bezeichnungen, Begriffe
7.1.2 Eingruppierung der Kunstoffe
7.1.3 Vorprodukte, Formstoffe, Zusatzstoffe
7.1.4 Normung

7.2 Gemeinsame Eigenschaften, charakteristische Merkmale
7.2.1 Äußere Merkmale
7.2.2 Chemische und physikalische Eigenschaften
7.2.2.1 Chemische Beständigkeit
7.2.2.2 Dichte
7.2.2.3 Wärmeleitfähigkeit, Wärmeausdehnung
7.2.2.4 Wärmebeständigkeit
7.2.3 Mechanische Eigenschaften
7.2.3.1 Festigkeit
7.2.3.2 Formänderungseigenschaften
7.2.4 Elektrische Eigenschaften
7.2.4.1 Isolationswiderstand
7.2.4.2 Durchschlagfestigkeit
7.2.4.3 Kriechstromfestigkeit
7.2.4.4 Dielektrische Eigenschaften
7.2.4.5 Statische Aufladung

7.3 Herstellung
7.3.1 Chemische Grundlagen
7.3.1.1 Grundbegriffe
7.3.1.2 Kohlenstoffverbindungen
7.3.1.3 Polymerenbildung
7.3.2 Polymerisation
7.3.2.1 Chemische Verfahren
7.3.2.2 Technische Prozesse
7.3.2.3 Polymerisate
7.3.2.4 Misch- und Copolymerisate
7.3.3 Polykondensation
7.3.3.1 Polykondensate
7.3.4 Polyaddition
7.3.4.1 Polyaddukte

7.4 Aufbau und strukturelle Einflüsse
7.4.1 Aufbauformen
7.4.2 Strukturelle Einflüsse

7.4.3 Strukturveränderungen

7.5 Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen
7.5.1 Wärmeeinflüsse
7.5.2 Formgebungsmöglichkeiten
7.5.3 Verhalten im Gebrauchszustand

7.6 Kunststoffsorten
7.6.1 Duroplaste
7.6.2 Thermoplaste

7.7 Bestimmung von Kunststoffen

7.8 Kunststoffprüfung
7.8.1 Mechanische Eigenschaften
7.8.1.1 Verhalten bei zügig gesteigerter Beanspruchung
7.8.1.1.1 Festigkeits- und Verformungskenngrößen
7.8.1.1.2 Elastizitätsmodul
7.8.1.1.3 Beurteilung der Versuchsergebnisse
7.8.1.2 Zeitstandverhalten
7.8.1.3 Verhalten bei dynamischer Beanspruchung
7.8.1.4 Härte
7.8.2 Mechanisch-thermisches Verhalten
7.8.2.1 Schubmodul und Dämpfung
7.8.2.2 Formbeständigkeit in der Wärme
7.8.3 Elektrische Eigenschaften
7.8.3.1 Isoliereigenschaften

8 Schadensanalyse *(H.-J. Bargel)*

8.1 Schadensuntersuchungen
8.1.1 Untersuchung von Oberflächenschäden
8.1.2 Fraktografie
8.1.3 Werkstoffuntersuchungen

8.2 Beispiele von Schadenfällen
8.2.1 Wasserschaden durch undichten Rohrentlüfter
8.2.2 Bruch eines Auslaßventils
8.2.3 Bruch der Kurbelwelle eines Dieselmotors
8.2.4 Lochkorrosion in einem Wärmeübertrager
8.2.5 Bruch von Federringen infolge Wasserstoffversprödung

9 Sachwortverzeichnis