

DIE METALLISCHEN WERKSTOFFE DES MASCHINENBAUES

VON

DR.-ING. E. BICKEL

PROFESSOR AN DER EIDGENÖSSISCHEN
TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

MIT 456 ABBILDUNGEN



SPRINGER-VERLAG

BERLIN / GÖTTINGEN / HEIDELBERG

1953

ISBN 978-3-642-52657-2 ISBN 978-3-642-52656-5 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-642-52656-5

ALLE RECHTE, INSBESONDERE DAS DER ÜBERSETZUNG
IN FREMDE SPRACHEN, VORBEHALTEN.

OHNE AUSDRÜCKLICHE GENEHMIGUNG DES VERLAGES

IST ES AUCH NICHT GESTATTET, DIESES BUCH ODER TEILE DARAUS
AUF PHOTOMECHANISCHEM WEGE (PHOTOKOPIE, MIKROKOPIE) ZU VERVIELFÄLTIGEN.

COPYRIGHT 1953 BY SPRINGER-VERLAG OHG., BERLIN/GÖTTINGEN/HEIDELBERG.

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1953

Vorwort.

Bei der Fülle der umfangreichen und vorzüglichen metallkundlichen Literatur scheint es ein überflüssiges Unternehmen, ein Lehrbuch zu verfassen, welches das Gebiet der Metallkunde in voller Breite und Tiefe zu umreißen versucht. Die Rechtfertigung liegt darin, daß dieses Lehrbuch für einen bestimmten Leserkreis gedacht ist, den der Verfasser aus seiner Industrie- und Lehramtspraxis kennt, nämlich für angehende und in der Praxis stehende Maschinen- und Elektroingenieure.

Für den Maschineningenieur ist die Metallkunde eine Hilfswissenschaft, analog der Mathematik und den exakten Naturwissenschaften, und hierzu vermißte der Verfasser eine *einheitliche Einführung in das Gebiet der allgemeinen und der speziellen Metallkunde sowie der Werkstoffprüfung* im Unterricht und in der Praxis.

Diese Zielsetzung ergab die Abgrenzung des Stoffes in der Breite und Vertiefung. Die letztere Frage ist stets besonders schwierig zu entscheiden. Welche Vorkenntnisse können beim Leser vorausgesetzt werden? Der Verfasser entschied sich im allgemeinen für diejenigen eines Studenten der unteren Semester, ohne diese Grenze überall genau einzuhalten. Eine sehr weitgehende Gliederung des Stoffes sollte dann dem Leser, wenn diese Grenze bisweilen seinen Vorkenntnissen nicht angepaßt ist, ermöglichen, den betreffenden Abschnitt zu überspringen, ohne den Zusammenhang der Lektüre zu sehr zu stören.

Gänzlich verzichtet wurde darauf, dem Buch den Charakter eines Nachschlagwerkes mit Tabellen usw. zu geben, sowie auf Hunderte von Literaturangaben im einzelnen, deren Auswahl ja doch bei jedem Autor subjektiv und entweder unvollständig oder wegen der Überfülle für denjenigen praktisch unbrauchbar ist, der das betreffende Wissensgebiet als eine *Hilfswissenschaft* betrachtet.

Wenn der Leser durch dieses Buch lernt, die Nachschlagwerke und Handbücher sinnvoll zu benutzen oder die vertiefte Spezialliteratur zu verstehen, so hat es seinen Zweck als Lehrbuch erfüllt.

Es sei an dieser Stelle verschiedenen Instituten und Firmen gedankt, die Schlibbilder, Forschungsergebnisse oder sonstige Abbildungen zur Verfügung gestellt haben. Ihre Namen wurden den betreffenden Abbildungen nur durch eine Kurzbezeichnung beigefügt, weshalb sie hier voll angegeben sind.

EMPA	Eidgenössische Materialprüf-Anstalt, Zürich.
AIAG	Aluminium Industrie Aktiengesellschaft, Neuhausen (Schweiz).
Amsler	Alfred J. Amsler & Co., Maschinenfabrik, Schaffhausen (Schweiz).
ASTM	American Society for Testing Materials.
BBC	Brown, Boveri & Cie., Aktiengesellschaft, Baden (Schweiz).
Bühler	Gebr. Bühler, Maschinenfabrik und Gießereien, Uzwil (Schweiz).

Carnegie Corp.	Carnegie-Illinois-Steel Corporation (USA).
Durferrit	Deutsche Gold- und Silberscheideanstalt, Abt. Durferrit, Frankfurt a. Main.
Dornach	Metallwerke Aktiengesellschaft Dornach, Dornach (Schweiz).
Escher Wyss	Escher Wyss Aktiengesellschaft, Zürich.
+ GF+	Georg Fischer Aktiengesellschaft, Schaffhausen (Schweiz).
Hilger & Watts	Hilger & Watts Ltd., London.
Kanz	Hans Kanz, Metallgießerei, Zürich.
Leitz	Ernst Leitz GmbH., Optische Werke, Wetzlar.
Molybdenum	Climax Molybdenum Company New York (USA).
PeeWee	PeeWee Maschinen- und Apparatebau GmbH., Berlin.
Philips	N. V. Philips' Gloeilampenfabrieken Eindhoven (Holland).
Plansee	Metallwerke Plansee GmbH., Reutte (Tirol).
von Roll	Gesellschaft der Ludw. von Roll'schen Eisenwerke Gerlafingen (Schweiz).
SAV	Schweiz. Azetylenverein, Basel.
Selve	Schweiz. Metallwerke Selve & Co., Thun (Schweiz).
Stellram	Wolfram & Molybdän Aktiengesellschaft, Nyon (Schweiz).
Taber	Taber Instrument Corporation, North Tonawande (USA).
Trüb, Täuber	Trüb, Täuber & Co., Aktiengesellschaft, Fabrik elektr. Meßinstrumente und wissenschaftlicher Apparate, Zürich.
Usogas	Genossenschaft für die Förderung der Gasverwendung, Zürich.
USS	United States Steel Export Company, New York (USA).
Vibro-Meter	Vibro-Meter GmbH., Fribourg (Schweiz).

Wo andere Daten, Diagramme usw. aus der Fachliteratur zur Illustration herangezogen sind, wurde als Quelle der Name des Autors angegeben, jedoch ohne Gewähr, daß es sich dort um eine Erstveröffentlichung handelte, was festzustellen bisweilen sehr mühsam ist. Für etwaige Mängel in der Quellenangabe wird deshalb um Nachsicht gebeten.

Zürich, Herbst 1953.

E. Bickel.

Inhaltsverzeichnis.

1. Der Gefügebau.

1.1. Die kristalline Struktur	2
1.11. Die Sichtbarmachung der kristallinen Struktur— Metallographie	2
1.12. Das Wesen der Kristalle— Kristallographie— Anisotropie und Isotropie	7
1.13. Kristallographische Systeme	8
1.14. Die Quasi-Isotropie der Metalle	11
1.15. Der Feinbau der Kristalle	11
1.15.1. Die röntgenographische Erforschung und die stereochemische Betrachtungswiese der festen Materie	11
1.15.2. Das Prinzip der röntgenographischen Strukturforschung	13
1.16. Das Kristallgitter	16
1.16.1. Gittertypen	16
1.16.2. Gitter dichtester Kugelpackung	18
1.16.3. Modifikationen	20
1.16.4. Koordinationszahlen, interatomare Abstände und Zwischenräume ..	22
1.16.5. Atomdurchmesser	23
1.16.6. Kristallographische Ebenen und Richtungen	24
1.17. Grundlagen der röntgenographischen Strukturbestimmungen.....	26
1.17.1. Die LAUE- und BRAGG-Gleichungen	26
1.17.2. Röntgenographische Untersuchungsmethoden	28
Polychromatische und monochromatische Strahlung S. 28 — Die wichtigsten Verfahren S. 30.	
1.18. Mischkristalle.....	34
1.18.1. Allgemeine Charakteristik und Definition	34
1.18.2. Substitutions- und Einlagerungsmischkristalle	35
1.18.3. Bedingungen für die Bildung von Mischkristallen	37
1.18.4. Geordnete und ungeordnete Mischkristalle	38
1.19. Molekular- und Kristallverbände	39
1.2. Die Bindungskräfte in Kristallen	43
1.21. Schema einer Einteilung	43
1.22. Die Elektronenhülle der Atome	44
1.23. Die diskreten Energiestufen der Hüllelektronen	47
1.24. Die Theorien der Bindungskräfte	53
1.24.1. Ionische, polare oder heteropolare Bindung	53
1.24.2. Covalente, homöopolare oder unpolare Bindung.....	54
1.24.3. Metallische Bindung	54
1.24.4. Sonstige Bindungskräfte	55
1.25. Elektronenkonzentration und Zonentheorie	56
1.25.1. Der Temperatureinfluß auf die elektrische Leitfähigkeit.....	58

1.3. Die Gefügeformen	58
1.31. Primärgefüge	59
1.31.1. Keimbildung und Kristallwachstum	59
1.31.2. Formen des Gußgefüges	61
1.31.3. Modifizierte Gußgefüge	65
1.32. Sekundärgefüge	66
1.32.1. Knetgefüge	66
Elastische und plastische Verformung des Gitters S. 67 – Der Mechanismus der plastischen Verformung des Einkristalls S. 68 – Der Mechanismus der plastischen Verformung des polykristallinen Haufwerks S. 73 – Die Fiktionen der Elastizitätstheorie S. 75 – Knetgefügeformen S. 75 – Kristallerholung S. 77.	
1.32.2. Die Rekristallisation	79
1.32.3. Ausscheidungsgefüge	81
1.32.4. Modifikationseinwirkungen	83
1.32.5. Zusammenfassung	83
1.33. Sintergefüge	84
1.4. Die Gefügequalität	85
1.41. Einfluß der Form und Größe der Körner	85
1.42. Gefügefehler	87
1.42.1. Lunken	87
1.42.2. Gasblasen	88
1.42.3. Seigerungen	89
Schwerkraftseigerungen S. 89 – Blockseigerung S. 89 – Kristallseigerung S. 90.	

2. Legierungslehre.

2.1. Definitionen	91
2.2. Allgemeine Eigenschaften	92
2.3. Die Gefügebestandteile von Legierungen	94
2.4. Die äußeren Erscheinungen bei der Legierungsbildung und die daraus entwickelten Zustandsdiagramme	96
2.41. Die Löslichkeit im flüssigen und festen Zustand	96
2.42. Haltepunkte	98
2.43. Das Zustandsdiagramm bei Unlöslichkeit im festen Zustand (Typus Va) ...	100
2.43.1. Der Phasenerfall beim Erstarren	104
2.43.2. Das Hebelgesetz	106
2.44. Das Zustandsdiagramm bei vollständiger Löslichkeit im festen Zustand (Typus I)	109
2.45. Das Zustandsdiagramm mit Mischungslücke im festen Zustand (Typus V) ..	112
2.46. Peritektische Reaktionen	116
2.5. Dreistoffdiagramme	118
2.51. Das Konzentrationsdreieck	118
2.52. Das räumliche Zustandsschaubild	119
2.53. Das doppelte Hebelgesetz	121
2.54. Der Erstarrungsvorgang in ternären Legierungen	123

2.6. Die energetische Betrachtungsweise der Legierungsbildung (Phasenlehre)	126
2.61. Definitionen	127
2.61.1. System	127
2.61.2. Phasen	128
2.61.3. Stoffe	128
2.61.4. Zustand	128
2.61.5. Energie	129
2.61.6. Stabiles und metastabiles Gleichgewicht	131
2.62. Die Zustandsgleichungen	132
2.63. Bestimmungsgrößen für Zustandsgleichungen	133
2.64. Die Umwandlungswärme	134
2.65. Die Umwandlungstemperaturen	135
2.66. Die vollständigen Umwandlungsschaubilder	136
2.67. Das vollständige isobare Zustandsschaubild	139
2.68. Die Phasenregel	140
2.69. Anwendungen der Phasenregel auf Systeme	142
2.7. Die atomistische Betrachtungsweise der Legierungsbildung	143
2.71. Entstehungsbedingungen und Löslichkeitsgrenzen für Substitutionsmischkristalle	144
2.71.1. Der Größenfaktor	144
2.71.2. Der Valenzfaktor	145
2.71.3. Die Elektronenkonzentration	146
2.71.4. Der elektrochemische Faktor	146
2.72. Typologie der festen Phasen	147
2.72.1. Metallide und Übergangsverbindungen	147
2.72.2. Intermediäre Phasen	148
2.72.3. Ungeordnete und geordnete Substituierung	150
2.72.4. Molekularverbände	151
2.72.5. Bildung einer Überstruktur	151
2.73. Auswirkungen einer geordneten und ungeordneten Verteilung	152
2.74. Die Hume-Rothery-Regel	154
2.74.1. Die Elektronenkonzentration bei elektronischen Verbindungen	154
2.74.2. Die Strukturen von elektronischen Verbindungen	155
2.75. Die Bildung von Einlagerungsmischkristallen	157
2.8. Die künstliche Erzeugung metastabiler Phasen zur Beeinflussung der Gebrauchseigenschaften der Metalle	157
2.9. Allgemeine Bemerkungen zur Metallphysik	158

3. Die Gebrauchseigenschaften der Werkstoffe und deren Prüfung.

3.1. Die physikalisch-chemischen und die technologischen Eigenschaften — Begriffe	159
3.2. Technologische Eigenschaften und ihre Prüfung	159
3.21. Eigenschaften und Kennzahlen für die Festigkeitsrechnung	159
3.21.1. Der statische Kurzzeit-Zugversuch	160
Das Meßprinzip S. 160 — Die Meßeinrichtung S. 160 — Die Probenformen S. 162 — Typologie der Kraft-Weg-Diagramme S. 162 — Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm S. 164 — Die Kennzahlen des Zugversuches S. 165 — Die Feindehnungsmessung S. 169 — Kritik des einfachen Spannungs-Dehnungs-Diagramms S. 172.	

3.21.2. Der Druckversuch.....	174
3.21.3. Biegeversuche	175
3.21.4. Der Scherversuch	176
3.21.5. Der Verdrehungsversuch	177
3.21.6. Beeinflussende Faktoren	178
Temperatur S. 178 – Der Zeiteinfluß S. 180.	
3.21.7. Die Dauerstandfestigkeit	183
Phänomene und Begriffe S. 183 – Die Kriechkurven S. 184 – Definition der Dauerstandfestigkeit und der Kriechgrenze S. 186.	
3.21.8. Die Wechselfestigkeit	189
Die Phänomene S. 189 – Das Meßprinzip und die Versuchseinrichtungen S. 190 – Kennzahlen für die Wechselfestigkeit S. 192 – Beeinflussende Faktoren S. 194.	
3.22. Sonstige Eigenschaften für die konstruktive Verwendung	200
3.22.1. Die Härte	200
Definition und Meßverfahren S. 200 – Die Eindringverfahren S. 201 – Ritzverfahren S. 208 – Rückprallverfahren S. 208 – Zeit- und Temperatureinfluß S. 209.	
3.22.2. Die Kerbschlagzähigkeit	210
Prüfmethoden und Maßzahl S. 210 – Interpretation der Kerbschlagzähigkeit S. 211 – Beeinflussende Faktoren S. 213 – Die praktische Bedeutung der Probe S. 214.	
3.22.3. Die Dämpfungsfähigkeit	215
3.22.4. Die Verschleißfestigkeit	217
3.22.5. Die Korrosionsfestigkeit	219
Erscheinungsformen S. 219 – Angriffsformen S. 221 – Standardproben S. 224 – Korrosionsschutz von Metallen durch Metalle S. 225.	
3.22.6. Die Hitzebeständigkeit	228
3.22.7. Die Härtpbarkeit	228
3.23. Eigenschaften und Kennzahlen für die Formgebungsverfahren	229
3.23.1. Die Gießbarkeit	229
3.23.2. Die Schmiedbarkeit	230
3.23.3. Die Tiefziehfähigkeit	231
3.23.4. Die Zerspanbarkeit	233
3.23.5. Die Schweißbarkeit	234
3.3. Physikalische Eigenschaften für die konstruktive Verwendung	235
3.31. Die Magnetisierbarkeit	236
3.31.1. Physikalische Ursachen	236
3.31.2. Die Magnetisierungskurve und die magnetischen Eigenschaften	237
3.31.3. Charakteristik magnetischer Werkstoffe und Beeinflussung ihrer Eigenschaften	238
3.32. Die elektrische Leitfähigkeit	241

4. Spezielle Metallkunde.

4.1. Die Eisenmetalle (Stahl und Eisen)	243
4.11. Das Eisen–Kohlenstoff-Diagramm	243
4.12. Der unlegierte Stahl	245
4.12.1. Die Gefügebestandteile	245
4.12.2. Die Haltepunkte	248
4.12.3. Die Abhängigkeit der Festigkeitseigenschaften vom C-Gehalt	249

4.12.4. Die Einteilung des unlegierten Stahles	250
4.12.5. Die Wärmebehandlungen des unlegierten Stahles	251
Das Spannungsfreiglühen S. 251 – Das Weichglühen S. 253 – Das Normalisieren S. 254 – Das Härten S. 255 – Das Anlassen S. 270 – Das Vergüten S. 272.	
4.12.6. Durchhärbarkeit des Stahles	272
Erscheinungen und Begriffe S. 272 – Prüfmethode und Maßzahlen für die Durchhärbarkeit S. 273 – Die Höchsthärbarkeit des Stahles S. 274.	
4.12.7. Die kombinierte Temperatur-Zeit-Einwirkung auf die Anlaßhärte . .	274
4.12.8. Die Härtespannungen	276
4.12.9. Die Oberflächenhärtung	278
Die Zementierung S. 279 – Die Nitrierhärtung S. 283 – Kombinierte Zementierung und Nitrierung S. 284 – Flammhärtung S. 285 – Hoch- frequenzhärtung S. 286.	
4.13. Die legierten Stähle	287
4.13.1. Die allgemeinen Einflüsse der Legierungskomponenten auf die äußeren Eigenschaften	288
Der Begriff „legierter Stahl“ S. 288 – Wirkung der Legierungskom- ponenten auf die Gebrauchseigenschaften S. 288.	
4.13.2. Die allgemeine Wirkung der Legierungselemente auf das Stahlgefüge	289
Mischkristallbildung S. 290 – Karbidbildung S. 292 – Zusammenfas- sung und Schlußfolgerung S. 293.	
4.13.3. Die Auswirkung auf die Gefügewandlung	295
Die Verschiebung der Phasengrenzen S. 295 – Beeinflussung der kriti- schen Abkühlgeschwindigkeit und der Martensittemperatur S. 297.	
4.13.4. Die Wärmebehandlungen der legierten Stähle	300
Das Vergüten S. 301 – Das Härten S. 301.	
4.14. Die Stahlsorten.	303
4.14.1. Klassifikation	303
4.14.2. Unlegierte Stähle	305
Baustähle S. 305 – Sonderstähle S. 306 – Werkzeugstähle S. 307.	
4.14.3. Legierte Stähle	307
Baustähle S. 308 – Sonderstähle für mechanische und chemische Be- anspruchungen S. 315 – Magnetstähle S. 327 – Legierte Werkzeug- stähle S. 340 – Stähle mit sonstigen besonderen physikalischen Eigen- schaften S. 353.	
4.15. Der Stahlguß	355
4.15.1. Definition	355
4.15.2. Wärmebehandlungen	355
4.15.3. Sorten	356
4.16. Das Gußeisen	359
4.16.1. Das Zustandsfeld der Guß- und Roheisensorten	359
4.16.2. Die Beeinflussung des Graphitanteils	360
4.16.3. Vor- und Nachteile des Gußeisens und die Problematik seiner Festig- keit	361
4.16.4. Struktur und Festigkeit des Gußeisens	363
4.16.5. Festigkeitsschwankungen genormter Sorten	365
4.16.6. Legiertes Gußeisen	371
4.16.7. Wärmebehandlungen des Gußeisens	372
4.16.8. Duktiles Gußeisen (mit Kugelgraphit)	373
4.16.9. Gewalztes Gußeisen	374

4.17. Der Temperguß	375
4.17.1. Herstellungsverfahren und Gefüge	375
4.17.2. Die Gefügebildung beim Glühfrischen	376
4.17.3. Sorten und Eigenschaften	378
4.2. Die Nichteisen-Schwermetalle	379
4.21. Die wichtigsten Sorten	380
4.21.1. Das Zink	380
Zinklegierungen S. 381.	
4.21.2. Das Blei	381
Bleilegierungen S. 382.	
4.21.3. Das Zinn	383
Zinnlegierungen S. 383.	
4.21.4. Das Nickel	384
Nickellegierungen S. 385.	
4.21.5. Das Chrom	386
4.21.6. Das Kupfer	386
Kupferlegierungen — Buntmetalle S. 389.	
4.22. Sonstige Schwermetalle	404
4.3. Die Leichtmetalle	405
4.31. Das Aluminium	405
4.32. Aluminiumlegierungen	406
4.32.1. Die Ausscheidungshärtung	406
4.32.2. Legierungsgruppen und Sorten	409
4.33. Magnesiumlegierungen	415
4.4. Lagermetalle	416
4.41. Die Anforderungen an Lagermetalle	416
4.42. Gruppen und Sorten	421
4.42.1. Weißmetalle	421
4.42.2. Bronzen	422
4.42.3. Leichtmetalle	423
4.42.4. Homogene Metalle	423
4.42.5. Metalle mit Graphiteinlagerung	424
4.5. Widerstandsmetalle	424
4.51. Widerstandsmetalle für den Apparatebau	424
4.52. Heizleiter	425
4.6. Sintermetalle	426
4.61. Definition und Eigenart	426
4.62. Selbstschmierende Lagerbronze	428
4.63. Hartmetalle	429
Sachverzeichnis	434

Berichtigung.

- S. 21 Z. 6 v. o. **streiche:** Fe_γ .
- S. 21 Z. 6 v. o. **statt:** Ni **lies:** Ni_α .
- S. 21 Z. 8 v. o. **statt:** Ni_α **lies:** Ni_β .
- S. 37 Z. 12 v. u. **statt:** $0,77 \text{ \AA}$ **lies:** $0,86 \text{ \AA}$.
- S. 37 Z. 3 v. u. **statt:** $1,54 \text{ \AA}$ **lies:** $1,72 \text{ \AA}$.
- S. 102 Z. 11 v. u. **statt:** Soliduslinie **lies:** Liquiduslinie.
- S. 106 Z. 16 v. u. **statt:** M_2 **lies:** M_1 .
- S. 117 Abb. 115, Abszissenangabe rechts, **statt:** Gew. % A **lies:** Gew. % B .
- S. 153 Abb. 142: In der Legende sind die gestrichelten und die ausgezogenen Linien zu vertauschen.
- S. 202 Z. 10 v. u. **statt:** Zerreißfestigkeit **lies:** Zugfestigkeit.
- S. 215 Z. 3 v. u. **statt:** α_e **lies:** α_n .
- S. 245 Z. 18 v. u. **statt:** Pe **lies:** Fe .
- S. 246 Tabelle, Feld P-Q-V-S, **statt:** (Sekundär-) Zementit **lies:** Perlit.
- S. 280 Abb. 298 Ordinatenwerte, **statt:** 0,10 0,12 0,14 **lies:** 1,0 1,2 1,4 .
- S. 293 Abb. 308 **statt:** $\alpha + (\text{Cr} \cdot \text{Fe})_7 + (\text{Cr} \cdot \text{Fe})_4\text{C}$ **lies:** $\alpha + (\text{Cr} \cdot \text{Fe})_7 \cdot \text{C}_3 + (\text{Cr} \cdot \text{Fe})_4\text{C}$.
- S. 296 Z. 13 v. o. **streiche:** Mn.
- S. 296 Z. 14 v. o. **streiche:** Co.
- S. 349 Abb. 371: Die unbezeichnete Kurve ist Kurve 1 .
- S. 392 Abb. 415 Legende Z. 3, **statt:** $0,8 + 2\% \text{ Pb}$ **lies:** $0,8 \div 2\% \text{ Pb}$.
- S. 410 Abb. 430 Legende: Die gestrichelten und die ausgezogenen Linien sind zu vertauschen.