



Karlheinz G. Schmitt-Thomas

Metallkunde für das Maschinenwesen

Band I
Aufbau und Eigenschaften
metallischer Werkstoffe

Mit 249 Abbildungen

Springer-Verlag
Berlin Heidelberg GmbH 1988

Dr.-Ing. Karlheinz G. Schmitt-Thomas
o. Professor, Lehrstuhl für Metallurgie und Metallkunde
Technische Universität München

ISBN 978-3-540-17615-2

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek
Schmitt-Thomas, Karlheinz G.: Metallkunde für das Maschinenwesen / Karlheinz G. Schmitt-Thomas.

Bd. 1. Aufbau und Eigenschaften metallischer Werkstoffe. – 1988.
ISBN 978-3-540-17615-2 ISBN 978-3-662-08699-5 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-08699-5

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 Fassung vom 24. Juni 1985 zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1988
Ursprünglich erschienen bei Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1988

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 Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Satz: Mit einem System der Springer Produktions-Gesellschaft
Datenkonvertierung: Daten- und Lichtsatz-Service, Würzburg

2362/3020-543210

Vorwort

Der Titel „Metallkunde für das Maschinenwesen“ fordert die Frage heraus, wie sich eine solche Metallkunde von vielen anderen, allgemeinen Darstellungen dieses Gebiets unterscheiden sollte. Auch liegen spezielle werkstoffkundliche Abhandlungen für die Hand des Ingenieurs vor, der daraus die für seine Aufgaben wichtigen Fakten entnehmen kann. Die Lücke, die zu schließen mit diesem Buch versucht werden soll, wird darin gesehen, daß zunächst aus der Sicht von Metallkundlern, Physikern, Metallurgen oder Chemikern sehr umfassende und gründliche Darstellungen vorliegen, die jedoch für einen Ingenieur des Maschinenwesens nicht immer leicht den unmittelbaren Bezug zu einem Verständnis des Werkstoffs als Medium zur Verwirklichung seiner Überlegungen und Ideen erkennen lassen. Dem stehen Darstellungen gegenüber, die eine mehr „technologische“ Behandlung des Werkstoffs, seiner Eigenschaften und seiner Anwendung in den Vordergrund stellen. Fragen des Bezugs der Werkstoffreaktionen zu den Mechanismen in Struktur und Gefüge jedoch werden dort auf knappe Betrachtungen beschränkt. Den Maschinenbauingenieur läßt dies zuweilen die Werkstoffkunde als ein „Faktenwissen“ auffassen, dessen funktionelle Zusammenhänge im Verborgenen bleiben und für das damit nur eine geringe Akzeptanz besteht.

In fünfzehn Jahren der Vorlesung „Werkstoffkunde für das Maschinenwesen“ an der TU München, die von etwa 12.000 Studenten gehört wurde, hat sich mir als Maschinenbauingenieur die Forderung gestellt nach einem ingenieurmäßigen Verständnis des Werkstoffs aus den in diesem ablaufenden elementaren Mechanismen unter den verschiedenartigsten Beanspruchungen im Bauteil. Mit der vorgelegten „Metallkunde für das Maschinenwesen“ wird bewußt versucht, den metallischen Werkstoff als Bestandteil eines Maschinenelements aufzufassen, der seinerseits aus Elementarbausteinen besteht, die von der Natur vorgegeben und nach natürlichen Bauplänen zusammengefügt sind.

Mit dieser Form der Darstellung der Metallkunde hoffe ich, als Maschinenbauer für Maschinenbauer die Brücke zu diesem, für die Verwirklichung technischer Ideen unverzichtbaren Wissensgebiet geschlagen zu haben.

Mein Dank gilt allen, die mir beim Zustandekommen dieses Buches ihre wertvolle Unterstützung haben zukommen lassen.

Besonders danke ich Frau Dr.-Ing. Sonja Wege und Herrn Dr. rer. nat. Wolfgang Loos für die kritische Durchsicht des Manuskriptes, sowie für die gründlichen und sorgfältigen Korrekturen. Herr Dr. Loos hat darüber hinaus in dankenswerter Weise eine Abhandlung über die Feinstrukturuntersuchung zu dem Buch beigetragen.

Bildmaterial wurde freundlicherweise zur Verfügung gestellt von
Bayerische Motorenwerke AG
Lehrstuhl für angewandte Mineralogie und Geochemie der Technischen Uni-
versität München (Prof. Dr. Born)
Motoren- und Turbinen-Union GmbH (Dr. Esslinger)
Opel AG (Dr. Hoffmann)
Porsche AG (Dir. Hensler)
Siemens AG (Dr. Kolbesen)

Für diese Unterstützung danke ich.

Nicht zuletzt danke ich dem Springer-Verlag für die außergewöhnlich ge-
duldige und verständnisvolle Betreuung.

München, im Dezember 1987

Kh. G. Schmitt-Thomas

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	1
2 Werkstoff in Geschichte und technischer Entwicklung	3
3 Beanspruchungsgerechte Werkstoffauslegung	11
4 Eigenschaften und Eigenschaftskennwerte	19
4.1 Statische Festigkeit und Bruchverhalten (einmalige Belastung)	22
4.1.1 Zugfestigkeit	22
4.1.2 Bruchverhalten	25
4.1.2.1 Kerbschlagbiegeversuch	26
4.1.2.2 Bruchsicherheits- und Riauffangversuche	28
4.1.2.3 Bruchmechanikprfung	30
4.1.3 Zeitstandfestigkeit	35
4.2 Dynamische Festigkeit (Wechselbelastung)	37
4.2.1 Einstufenwechselfestigkeit	37
4.2.2 Betriebsfestigkeit (Mehrstufenwechselfestigkeit)	41
4.2.3 Dehnungswechselfestigkeit	41
4.3 Härteprüfung	44
4.3.1 Statische Härteprüfungen	44
4.3.1.1 Härteprüfung nach Brinell (DIN 50 351)	44
4.3.1.2 Härteprüfung nach Vickers (DIN 50 133)	45
4.3.1.3 Härteprüfung nach Rockwell	46
4.3.2 Dynamische Härteprüfungen	47
4.3.2.1 Schlghrte	47
4.3.2.2 Fallhrte	47
4.3.2.3 Rckprallhrte	48
5 Morphologie	49
5.1 Metallografie	49
5.1.1 Präparation	49
5.1.2 Lichtoptische Untersuchung	51
5.1.3 Elektronenmikroskopische Untersuchung (Durchstrahlungselektronenmikroskop)	53
5.1.4 Bildanalyse	55

5.2	Fraktografie und Schadenanalyse	55
5.2.1	Gewaltbrüche	56
5.2.1.1	Makrofraktografie	56
5.2.1.2	Mikrofraktografie	59
5.2.2	Dauerbrüche	63
5.2.2.1	Makrofraktografie	63
5.2.2.2	Mikrofraktografie	65
5.2.3	Rasterelektronenmikroskop	67
6	Atombau und periodisches System	69
6.1	Atomkern	69
6.2	Elektronenstruktur.	71
6.3	Periodisches System	72
6.4	Metallische Eigenschaften.	74
6.5	Charakteristische Spektren	75
6.6	Bindungsarten im Atomverband	77
6.7	Leitfähigkeit	80
6.8	Oberflächen und Grenzflächen	83
7	Struktur	85
7.1	Aufbau kristalliner Festkörper.	85
7.1.1	Kristallsysteme und Translationsgitter	86
7.1.2	Symmetrieeigenschaften	89
7.1.3	Dichteste Kugelpackung und Stapelfolge.	91
7.2	Analyse der kristallinen Struktur.	93
7.2.1	Definition von Richtungen und Ebenen	93
7.2.2	Richtungsabhängigkeit von Eigenschaften in Einkristallen und Vielkristallen	98
7.2.3	Methoden zur Strukturuntersuchung	103
7.2.3.1	Beugung von Röntgenstrahlen	103
7.2.3.2	Reziprokes Gitter des Einkristalls	107
7.2.3.3	Beugung am Vielkristall.	114
7.2.3.4	Analyse charakteristischer Spektren	125
8	Gefüge.	131
8.1	Nulldimensionale Fehlordnung	135
8.1.1	Thermisches Gleichgewicht.	137
8.1.2	Diffusionsmechanismen	139
8.1.2.1	Leerstellenmechanismus.	145
8.1.2.2	Zwischengittermechanismus	147
8.1.2.3	Kinetik der Diffusion.	149
8.1.3	Chemische Fehlordnung	154
8.1.3.1	Substitutionsmischkristalle	154
8.1.3.2	Interstitielle Mischkristalle	155
8.1.3.3	Überstruktur	155

8.1.3.4	Intermetallische Phasen	157
8.1.3.5	Einlagerungsverbindungen.	158
8.2	Eindimensionale Fehlordung	159
8.2.1	Theoretische und tatsächliche Schubfestigkeit.	160
8.2.2	Versetzungen in kubisch-primitiver Struktur (Versetzungstypen)	163
8.2.3	Makroskopische Verformung und Versetzungslaufwege	168
8.2.3.1	Korngrößeneinfluß	170
8.2.3.2	Beanspruchungsgeschwindigkeit, Temperatur und Spannungszustand	172
8.2.3.3	Kräfte und Spannungen an einer Versetzungslinie (Verfestigung, Warmfestigkeit)	179
8.2.3.4	Versetzungsvervielfachung (Quellenmechanismus)	185
8.2.4	Wechselwirkungen von Versetzungen	188
8.2.4.1	Versetzung – Versetzung	188
8.2.4.2	Versetzung – Nulldimensionale Fehlstellen (Klettern, Leerstellenkondensation, Alterung)	198
8.2.5	Versetzung in Realstrukturen	203
8.2.5.1	Kfz-Struktur (Versetzungsaufspaltung, Quergleiten)	203
8.2.5.2	Krz-Struktur	208
8.2.5.3	Hexagonale Struktur	209
8.2.6	Theoretische und tatsächliche Trennfestigkeit	210
8.2.6.1	Rißausbreitung	210
8.2.6.2	Versetzungsaufbau und Rißeinleitung	212
8.2.6.3	Nicht-gleitfähige Versetzungen	214
8.3	Zweidimensionale Fehlordnung	216
8.3.1	Kleinwinkelkorngrenzen	217
8.3.2	Großwinkelkorngrenzen	219
8.3.3	Zwillingsgrenzen	220
8.3.4	Phasengrenzen	222
9	Gefügebildung – Rekristallisation und Erholung	223
9.1	Abgrenzung von Erholung und Rekristallisation	225
9.2	Voraussetzung zur Rekristallisation	228
9.3	Ablauf der Rekristallisation	229
9.3.1	Polygonisation und Keimbildung	229
9.3.2	Keimwachstum/primäre Rekristallisation.	231
9.3.3	Kornvergrößerung	234
9.3.4	Sekundäre Rekristallisation	234
9.4	Rekristallisationsgefüge	234
9.4.1	Korngrößen	234
9.4.2	Textur	236
9.4.3	Rekristallisationszwillinge	236

X	Inhaltsverzeichnis	
	9.5 Abgrenzung zwischen Rekristallisation und Normalisierungsglügen	237
	9.6 Warmumformung	237
	Literaturverzeichnis	239
	Sachverzeichnis	243

Einführung

Wenn ein Lehrbuch über Metallkunde sich speziell an den Ingenieur des Maschinenbaus wenden soll, ist es sinnvoll, einige Überlegungen anzustellen, wie die Lehre von den Werkstoffen, im besonderen von den Metallen, im Maschinenwesen angesiedelt ist. Dazu ist zunächst die Art und Zielsetzung der Ingenieurausbildung zu betrachten, die gegenüber anderen naturwissenschaftlichen Fächern ihr besonderes Profil besitzt. Aufgabe des Ingenieurs ist es, naturwissenschaftliche Erkenntnisse so umzusetzen, daß diese technisch nutzbar werden, also zu wirtschaftlichem, gesellschaftlichem und zivilisatorischem Fortschritt führen. Dazu hat sich der Ingenieur mit naturwissenschaftlichen und mathematischen Grundlagen zu beschäftigen, die ihn in die Lage versetzen, Funktionsweise, Verfahrensabläufe, Reaktionen und Folgen analytisch zu verstehen. Mit Hilfe dieser analytischen Fähigkeiten sind dann die schöpferischen Aufgaben zu bewältigen, die darin bestehen, durch geeignete konstruktive Synthesen technische Einrichtungen, Maschinen und Anlagen zu schaffen, mit deren Hilfe die Grundlagenerkenntnisse zu praktisch nutzbarer Technik werden.

Die Werkstoffkunde hat in einer solchen Struktur der Ausbildung und der Arbeit des Maschineningenieurs eine Sonderstellung, die zunächst schon dadurch offenbar wird, daß sie vielfach nicht in gleicher Form wie andere naturwissenschaftliche Grundlagenfächer in die Ausbildung und in die Vorgehensweise des Ingenieurs integriert ist. Ursprünglich war die „Werkstoffkunde“ eine reine „Stoffkunde“, die insoweit eine Grundlage darstellen sollte, als sie Stoffwerte vermittelt, die ohne eine weitere analytische Betrachtung vom Ingenieur als solche in seine Berechnungen und konstruktiven Gestaltungen Eingang fanden. Die Verfahren zur Werkstoffherzeugung, insbesondere die Metallurgie, die ihre Wurzeln in der physikalischen Chemie besitzt, wurde vom Ingenieur entsprechend dessen Denkweise mehr als Faktenwissen denn als ein in seinen elementaren Zusammenhängen von ihm erarbeitetes Wissensgebiet aufgenommen. Auch die Einführung der neuzeitlichen Metallkunde, wie sie sich in den letzten 30 Jahren vorzugsweise entwickelte, hat an der beschriebenen Weise der Akzeptanz dieses Wissensgebietes durch den Ingenieur nichts Grundlegendes geändert. Oft fehlt für den Maschineningenieur in Darstellungen aus der fachlichen Sicht der Physiker, Chemiker und Metallurgen die aus Analyse und Synthese gewonnene Einsicht in die „Funktionsweise“ des Werkstoffes.

Diese Möglichkeit, einen Werkstoff im Hinblick auf bestimmte Funktionen spezifisch auszurichten, also zu „konstruieren“, ist auf einer breiten Basis für den Anwender der Funktionswerkstoffe in der Elektronik durch die Halbleiter deutlich geworden. Während früher elektrische Schaltkreise aus Einzelkomponenten zusammengelötet wurden, ermöglichen heute die modernen Halbleiterwerkstoffe die Herstellung sogenannter integrierter Schaltungen, bei denen einzelne Bauele-

mente (Transistoren, Dioden, Widerstände, Kondensatoren u. a.) und die verbindenden Leiterbahnen durch gezielte örtliche Modifikationen im atomaren Aufbau eines Halbleiterscheibchens (Chip) gebildet werden. Auf diese Weise entstehen ganze Schaltungen auf einem einzigen Chip, wobei es möglich ist, bis zu 2 000 000 Einzelbauelemente auf einem solchen Chip von etwa 1 cm² Fläche unterzubringen. In ähnlicher Weise – wenn bis heute auch nicht ebenso offenkundig – lassen sich Eigenschaften wie Festigkeit, Hochtemperaturbeständigkeit, Verschleißwiderstand, Korrosionsbeständigkeit u. a. durch gezielte Eingriffe in Struktur und Gefüge der Werkstoffe einstellen. Neue Fertigungsverfahren ermöglichen solche Eingriffe ebenso wie Werkstoffkombinationen und -zusammensetzungen, die sich auf konventionelle Weise nicht erzielen lassen. „Neue Werkstoffe“ sind im eigentlichen Sinne nicht neue „Stoffe“, sondern neue Strukturen und neue Gefüge.

Dem Ingenieur des Maschinenwesens soll ins Bewußtsein gerufen werden, daß seine Möglichkeiten zur konstruktiven Gestaltung nicht an der Oberfläche des Bauteils oder einer Komponente endet, sondern daß er in das „Gerüst“ des Werkstoffes „konstruktiv“ eingreifen kann. Die Reaktionen dieses Gerüsts auf äußere Beanspruchungen und die Möglichkeiten, durch planmäßigen Eingriff in Struktur und Gefüge des Werkstoffes eine Abstimmung mit äußeren Beanspruchungen herbeizuführen, nehmen eine zentrale Stellung in diesem Lehrbuch ein. Kennwerte des Werkstoffes und sein Verhalten sind Folge der im Werkstoff ablaufenden Vorgänge und unter dieser Maßgabe gezielt einstellbar. Um die vorliegende Darstellung gerade für den Werkstoffanwender verständlich zu halten und wegen der Notwendigkeit, die Fülle des Stoffes auf einigermaßen beschränktem Raume unterzubringen, mußte an vielen Stellen die Argumentation vereinfacht und auf mathematisch-physikalische Strenge weitgehend verzichtet werden. Die Gliederung des Buches orientiert sich an der genannten Zielsetzung. Nach der allgemeinen Darstellung der Verknüpfung der Fortschritte in den Werkstoffwissenschaften mit den Entwicklungen im Maschinenwesen wird der Werkstoffaufbau in Struktur und Gefüge behandelt. Breiten Raum nimmt dabei die Behandlung der Baufehler im atomaren Aufbau ein, wobei den Versetzungen eine besondere Aufmerksamkeit geschenkt wird. Dies ist damit begründet, daß die Wechselwirkungen zwischen den Baufehlern und den äußeren Beanspruchungen das Werkstoffverhalten gut verstehen lassen. Dem vorliegenden Band über die Eigenschaften und den Aufbau des Werkstoffes folgt ein weiterer über Gleichgewichts- und Ungleichgewichtszustände.

Schließlich steht noch die Frage im Raum, warum sich dieses Lehrbuch auf den metallischen Werkstoff beschränkt. Dies erschien insofern sinnvoll, als die angestrebte Geschlossenheit der Darstellung und die klare Systematik der Zusammenhänge durch die Beschränkung auf den metallischen Werkstoff am besten gewährleistet ist. Darüberhinaus stellt der metallische Werkstoff den mengenmäßig nach wie vor überwältigenden Anteil der Konstruktionswerkstoffe im Maschinenbau dar, und hier liegen wieder mit 85 bis 90% die Eisenbasiswerkstoffe an der Spitze. Aus der Darstellung am Beispiel des Verhaltens der Metalle und der damit verbundenen Vorgänge in Struktur und Gefüge wird jedoch auch eine Grundlage zum Verständnis anderer Werkstoffe – insbesondere Werkstoffe mit anderen Bindungsarten – gegeben sein, die einer späteren Behandlung vorbehalten sein sollen.

2 Werkstoff in Geschichte und technischer Entwicklung

Die Fähigkeit, mit Hilfe der zur Verfügung stehenden Ressourcen geeignete Werkstoffe bereitstellen zu können, ist Voraussetzung, um naturwissenschaftliche Erkenntnisse in eine anwendbare, nutzbringende und zivilisatorisch umsetzbare Technik zu transferieren. Die Gewinnung und die Beherrschung des Werkstoffs, im Sinne der Fähigkeit seine Eigenschaften zu steuern und den Beanspruchungen optimal anzupassen, wird auf diese Weise zum Schlüssel, mit dem es unter der Verantwortlichkeit des Ingenieurs ermöglicht wird, wissenschaftliche Erkenntnisse in Lebensqualität zu überführen.

Bereits in der Frühzeit und im Altertum waren wichtige naturwissenschaftliche Regeln und Gesetze bekannt, mit denen wesentliche Voraussetzungen zur Schaffung von Kraft- und Arbeitsmaschinen gegeben gewesen wären. Die damaligen Ergebnisse des Forschungs- und Erkenntnistriebs mußten jedoch weitgehend im Naturphilosophischen verhaftet bleiben, da der Werkstoff fehlte, um Ideen Gestalt werden zu lassen. Dazu mußten erst die technischen Erfahrungen, Kenntnisse und Fähigkeiten erarbeitet werden, die es ermöglichten die geeigneten Werkstoffe zur kulturellen und technischen Entwicklung zu schaffen.

So konnte der Mensch zur Schaffung von Werkzeugen, Geräten und Ausrüstung zunächst nur die Stoffe verwenden, die ihm die Natur ohne Anwendung von physikalisch-technischen Verfahrensschritten unmittelbar bot. Es war dies neben dem Holz als Baumaterial der Stein, der die Mindestanforderung an Härte, Festigkeit und Verschleiß erfüllen konnte, die an einen Werkstoff für Werkzeuge und Waffen zu stellen war. Unter den Metallen waren zunächst diejenigen der Verwendung zugänglich, deren Gewinnung wenig Anforderungen an metallurgische Kenntnisse und Techniken stellte, also Metalle, die entweder in reiner Form, d. h. gediegen vorkommen oder durch sehr einfache Verfahren vom oxidischen in den metallischen Zustand zu überführen waren. So ist es durchaus kein Zufall, daß der Mensch zur Realisierung seiner technischen Fähigkeiten zunächst die Metalle zur Verfügung hatte, die durch ihre Stellung in der elektrochemischen Spannungsreihe als edel einzuordnen sind. Die ältesten Metalle in der zeitlichen Abfolge der Werkstoffverwendung sind entsprechend Gold und Silber, als ältestes Gebrauchsmetall erscheint das Kupfer. Durch Zugabe des ebenfalls vergleichsweise edlen und leicht darzustellenden Zinns zum Kupfer war eine frühe Legierungstechnik gegeben, mit der es gelang, den Schmelzpunkt der auf diese Weise entwickelten Bronzen gegenüber dem des reinen Kupfers herabzusetzen und damit die Verarbeitbarkeit dieser Legierung gegenüber dem reinen Kupfer, insbesondere durch Gießen und Schmieden, erheblich zu erleichtern.

Die Stellung der Metalle in der elektrochemischen Spannungsreihe und damit ihre Verfügbarkeit in Abhängigkeit vom technischen Wissen und Können haben wohl mehr Einfluß auf die Menschheitsentwicklung als viele andere Ereignisse, die von der Geschichtsschreibung in den Vordergrund gestellt werden, aber letztlich doch nur Folge der Möglichkeiten des Menschen, sich zu verwirklichen, sind. Diese hohe Bedeutung des Werkstoffs drückt sich darin aus, daß ganze geschichtliche Epochen nach den verfügbaren Materialien Stein, Bronze, Eisen gekennzeichnet werden. Metalle wie Eisen und Zink erforderten dabei bereits höher entwickelte metallurgische Verfahrensweisen und traten erst später auf, bis schließlich die unedlen Metalle wie Aluminium und Magnesium erst im vergangenen Jahrhundert erstmals darstellbar waren (Tabelle/Bild 2.1).

Neben den Möglichkeiten des Legierens wurden in empirischer Weise auch bereits in frühgeschichtlicher Zeit Techniken entwickelt, um die Eigenschaften des Werkstoffs zu steuern, wobei überwiegend das Bestreben zur Festigkeitssteigerung im Vordergrund stand. Meilensteine in der Geschichte der Werkstoffbehandlung sind:

Verfestigung durch Kaltverformung 4000 v. Chr.

Stahlhärtung 1000 v. Chr.

Ausscheidungshärtung (kurz Aushärtung) von Aluminium 1905 n. Chr.

Korrosionsbeständiger Stahl 1930 n. Chr.

Superlegierungen 1950 n. Chr.

Die Werkstoffbehandlung in früher Zeit war ausschließlich das Resultat reiner Empirie und erfolgte oft unter dem Nimbus der Mystik nach streng gehüteten Rezepturen. Die Vorgehensweise ist allerdings aus heutiger Sicht leicht verständlich. So brachte die „Wärmebehandlung“ von Schwertern in organischen Substanzen wie Stallmist oder Jauche einen Effekt zustande, den wir heute in die Gruppe des „Carbonitrierens“ einordnen könnten. Erst die wissenschaftlichen

Spannungen gegen Normalwasserstoffelektrode	Au ¹⁺	Ag ¹⁺	Cu ²⁺	Sn ²⁺
ϵ_0	+ 1,5	+ 0,81	+ 0,34	- 0,14
Beginn der Verwendung (Jahr)	< 4000 v. Chr.	< 4000 v. Chr.	4000 v. Chr.	2000 v. Chr.

Spannungen gegen Normalwasserstoffelektrode	Fe ²⁺	Zn ²⁺	Al ³⁺	Mg ³⁺
ϵ_0	- 0,44	- 0,76	- 1,67	- 2,34
Beginn der Verwendung (Jahr)	1000 v. Chr.	1500 n. Chr.	1850 n. Chr.	1850 n. Chr.

Bild 2.1. Beziehung zwischen der Elektrochemischen Spannungsreihe und der Verfügbarkeit einiger ausgewählter Metalle (nach Hornbogen/Warlimont)

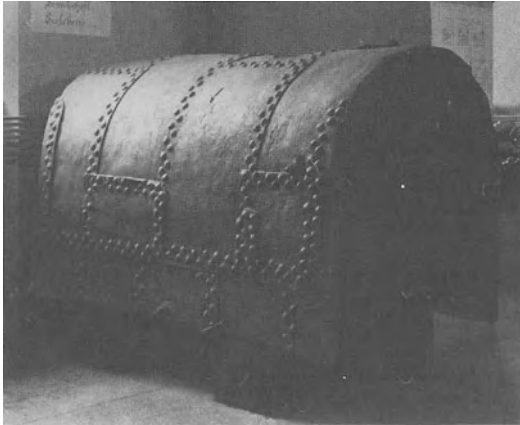


Bild 2.2. Aus Blechbahnen aus Puddeleisen vernieteter Dampferzeuger von James Watt (Archiv Deutsches Museum)

Entwicklungen der Neuzeit und die Bereitstellung entsprechender Untersuchungsverfahren unter Ausnützung neuester Erkenntnisse brachte die Voraussetzung, den Werkstoff in streng wissenschaftlicher Systematik weiter zu entwickeln. Die Werkstoffentwicklung der jüngsten Zeit ist gekennzeichnet durch Verfahrensoptimierung, ganz besonders aber durch eine gezielte Anpassung der Werkstoffe an die sehr hohen und vielfältigen Anforderungsprofile, wie sie heute in Fertigung und Betrieb gegeben sind. Bedeutsame Werkstoffentwicklungen der neueren Zeit reichen von Massenprodukten wie mikrolegierten Stählen über hochwertige Verbundwerkstoffe, gerichtet erstarrte Werkstoffe, Einkristallbauteile, Hybridbauteile bis zu Werkstoffen der Mikroelektronik und der Feinwerktechnik sowie Memory-Metallen.

Die Verzahnung zwischen dem Stand der Werkstofftechnologie und realisierbarer Technik ist heute enger als dies vielfach vordergründig wahrgenommen wird. Der Werkstoff in einer optimierten Komponente oder Anlage ist integraler Bestandteil der Konstruktion geworden. Es muß also die vielfältige Möglichkeit, den Werkstoff anzupassen und zu steuern, in vollem Umfang beherrscht werden, um zu anforderungsgerechten technischen Lösungen zu kommen. Diese enge Verzahnung zwischen der technischen Entwicklung und der Verfügbarkeit geeigneter Werkstoffe hat sich bereits mit Beginn des industriellen Zeitalters eingestellt und läßt sich in der seither stattgefundenen Geschichte der Technik eindrucksvoll vor Augen führen. Im Vordergrund standen dabei besonders die Eisen-Basis-Werkstoffe, die auch heute noch als Konstruktionswerkstoffe eine unbestrittene Führungsrolle einnehmen. Nach neueren Schätzungen sind auch heute noch 90 % von allen gewonnenen und industriell verwerteten Metallen immer noch die Eisenwerkstoffe.

Die ersten Dampferzeuger, die von James Watt konstruiert wurden, bestanden noch aus Blechbahnen aus Puddeleisen (Bild 2.2). Solche Bleche wurden zum Teil noch gehämmert, zum Teil bereits in Walzwerken erstellt, deren Leistungsfähigkeit allerdings gering war. Somit mußten diese frühen Dampferzeuger aus vielen einzelnen Bahnen zusammengenietet werden. Werkstoffqualität und Ausführung ließen noch im späten 19. Jahrhundert viele Unfälle durch Kesselexplo-

sionen entstehen. Erst die Entwicklung des Flußstahls und leistungsfähige Walzwerke machten eine Ausführung von Dampfzeugern möglich, die eine ausreichende Sicherheit für die technische Anwendung boten.

Die Voraussetzung für den Bau der Eisenbahnen war gegeben, nachdem in England 1820 das Profilverwalzen patentiert worden war. Es wurde dadurch möglich, Schienen und Träger in größeren Mengen und mit gleichbleibender Genauigkeit herzustellen, nachdem vorher solche Fertigprodukte ausgeschmiedet werden mußten.

Eine fortschreitende Technik forderte zu ihrer Realisierung höher belastbare Werkstoffe, um leistungsfähigere Anlagen, wie Dampfturbinen, schnelllaufende Verbrennungskraftmaschinen und schließlich Gasturbinen herstellen zu können. Die gestellten Anforderungen wurden durch planmäßige Legierungsmaßnahmen und durch entsprechend abgestimmte Härtungs- und Vergütungsbehandlungen erfüllt. So wurden geeignete Vergütungsstähle durch Zulegieren von Mangan, Silizium, Vanadium, Nickel, Chrom und Molybdän entwickelt. Dynamisch beanspruchte Bauteile und Oberflächen, die Verschleißbeanspruchungen unterworfen wurden, forderten hohe Oberflächenhärten bei zähem Kern. Solche Forderungen wurden durch spezielle Stähle erreicht, die für Einsatzhärten und Nitrieren geeignet sind. Hohe Warmfestigkeiten von Stählen ließen sich insbesondere durch Zugabe von Karbidbildnern wie Chrom, Vanadin, Molybdän, Wolfram, Niob und Titan einstellen.

Beim Einsatz solcher Werkstoffe unter den ihren Auslegungen entsprechenden Temperaturbeanspruchungen blieben jedoch auch Fehlschläge nicht aus. So wurde bei bestimmten Werkstofftypen eine mit der Warmfestigkeit einhergehende Versprödungsneigung beobachtet, die zu spröden Brüchen führte. Bei großen Werkstücken, wie z. B. bei geschmiedeten Turbinenläufern machte sich die Versprödungsneigung besonders dann unangenehm bemerkbar, wenn gleichzeitig Einschlüsse und Verunreinigungen im Schmiedeteil Kerbwirkungen verursachten, die spröde Trennungen auslösen konnten und bei einem Zerplatzen des Läufers unter der Fliehkraftbeanspruchung folgenschwere Schäden hervorriefen (Bild 2.3 und Bild 2.4). Die Gefahr der plötzlichen eintretenden Sprödbüche



Bild 2.3. Durch Überdrehzahl geborstener Turbinenläufer

führte in den letzten Jahrzehnten zur Entwicklung der Bruchmechanik als ein neues Wissensgebiet, das geeignet ist, Vorgaben zu machen, um Sicherheit gegen derartige Versagensfälle zu gewinnen.

Im Zusammenhang mit der Entwicklung der Luftfahrt und der Forderung, zu leistungsfähigen Flugzeugen zu kommen, stellte sich die Aufgabe, geeignete Leichtbauwerkstoffe hoher Festigkeit zu schaffen. Eine wesentliche Voraussetzung dazu war die Entdeckung von Wilm im Jahr 1909, der bei Aluminium durch geringe Zusätze von Magnesium und Kupfer und durch geeignete Wärmebehandlung Festigkeitssteigerungen von mehr als 500% erzielen konnte. Dieses sog. Dur-Aluminium war eine wesentliche Grundlage, um den Metall-Flugzeugbau realisieren zu können (Bild 2.5).



Bild 2.4 Folgeschäden des infolge Überdrehzahlen zerborstenen Turbinenläufers



Bild 2.5. Eines der bekanntesten Ganzmetallflugzeuge stand am Beginn des modernen Linienflugverkehrs. Es wurde in einer Stückzahl von 4835 hergestellt (Archiv mtu München)

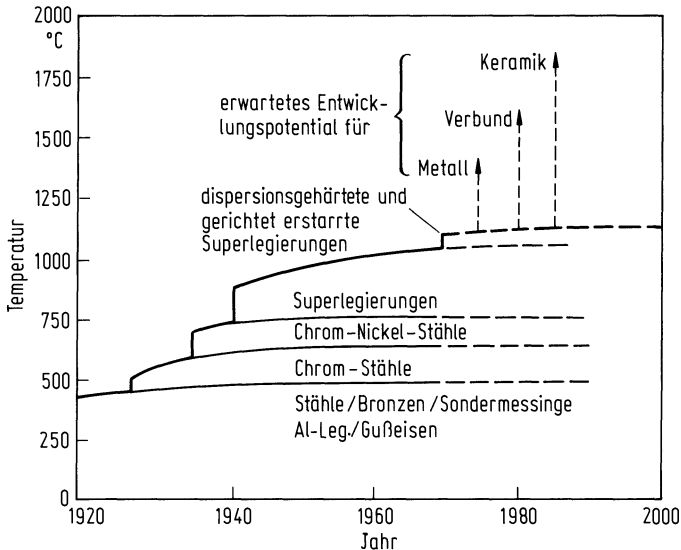


Bild 2.6. Übersicht über die zeitliche Entwicklung von Hochtemperaturwerkstoffen (Petzow)

Leichtbau für höchste Anforderungen ist jedoch nicht zwangsläufig mit der Verwendung von Leichtmetallen verbunden. In zunehmendem Maße werden in modernen Leichtbaukonstruktionen auch hochfeste Stahllegierungen verwendet, die mit ihren höheren spezifischen Gewichten als die Leichtmetalle dennoch leichtere Konstruktionen ermöglichen. Dies ergibt sich daraus, daß naturgemäß nicht das spezifische Gewicht des Werkstoffs im Vordergrund stehen kann, sondern das Gewicht, das erforderlich ist, um eine bestimmte ertragbare statische oder dynamische Spannung zu ermöglichen, d. h. maßgebend für den Leichtbau ist das Verhältnis E-Modul/Gewicht oder Streckgrenzhöhe/Gewicht.

Die Entwicklung der Gasturbine und hier wiederum die leichtbauende schnellaufende Turbine als Triebwerk für Flugzeuge führt ein weiteres Mal die enge Verknüpfung zwischen technischer Realisierbarkeit und Verfügbarkeit von Werkstoffen vor Auge. Strahltriebwerke zum Antrieb von Flugzeugen wurden bereits Ende der dreißiger und Anfang der vierziger Jahre in verschiedensten Ausführungen gebaut, meist hatten diese jedoch keine ausreichende Leistungsfähigkeit oder waren nur für sehr kurzen Einsatz geeignet, da die für einen wirtschaftlichen Dauerbetrieb erforderlichen Hochtemperaturwerkstoffe nicht zur Verfügung standen (Bild 2.6). Gasturbinenschaufeln wurden zunächst mit hochlegierten Chrom-Nickel-Molybdän-Werkstoffen, die außerdem Tantal/Niob/Silizium und Mangan enthielten, ausgeführt. Mit steigenden Nickelgehalten entstanden schließlich die sog. Superlegierungen, d. h. Nickelbasiswerkstoffe, die heute unter Ausnützung der Kenntnisse von Aushärtungsmechanismen Warmfestigkeit im Dauerbetrieb bis knapp unterhalb 1000 °C besitzen. Die geforderten Wirkungsgrade und die notwendigen Leistungssteigerungen lassen jedoch weitere werkstofftechnische Entwicklungen wie gerichtet erstarrte Legierungen (Bild 2.7) und Hybridschaufeln (Bild 2.8) neben fortgeschrittenen Beschichtungstechnologien notwendig erscheinen.



Bild 2.7. Lamellares Gefüge im Querschliff des Blattes einer gerichtet erstarrten Turbinenschaufel aus einer Nickelbasislegierung (Archiv mtu)

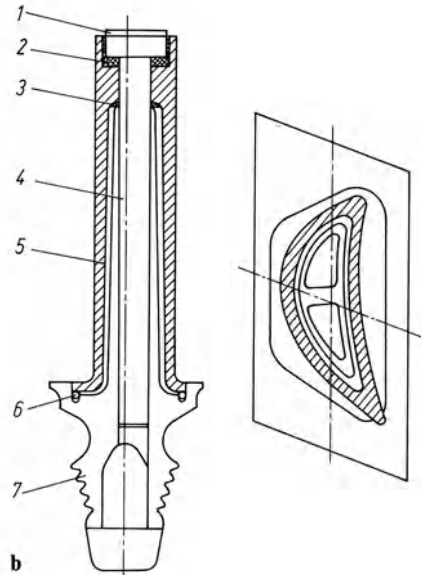
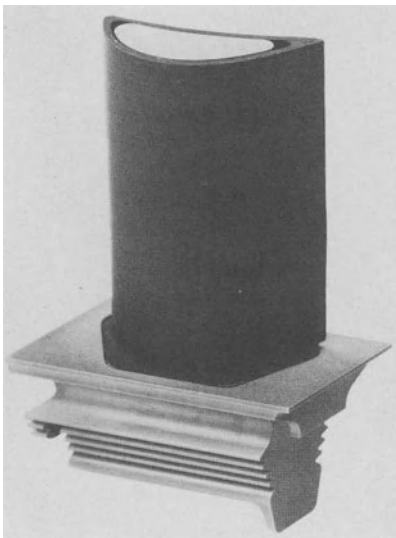


Bild 2.8. Hybridschaufel (Archiv mtu). **a** Makroaufnahme. **b** Schnittzeichnungen (Längs- und Querschnitt) 1 Anstreich Schicht (porös), 2 Isolator, 3 Isolator, 4 Tragstift, 5 Laufschaufel Profil (SSIC), 6 Dichtung, 7 Laufschaufelkern

Der Standort von Werkstoffentwicklung und -forschung kann nicht vollständig bestimmt werden, ohne das Gebiet der Chemieanlagen und der Prozeßtechnik mit in die Betrachtungen einzubeziehen. Hier war die gefahrlose Umsetzung chemischer Reaktionen in großtechnische Prozesse erst möglich durch die Bereitstellung von druckwasserstoffbeständigen Stählen und von Stählen, die gegenüber spezifischen Korrosionsbeanspruchungen höchstmögliche Sicherheit und Widerstandsfähigkeit aufwiesen.

In enger Korrelation zur Fertigungstechnik steht der Zweig der Entwicklung von Werkstoffen für Werkzeuge, wie Schneid-, Zieh- und Stanzwerkzeuge aber auch Warmumformungswerkzeuge.

Werkstoffentwicklung beinhaltet neben der Entwicklung von spezifischen Legierungen auch die Entwicklung und Optimierung der Schmelz- und Gießtechnik sowie die Verfahrenstechnik beim Schmieden und bei der Glühbehandlung. Hohe Reinheitsgrade sind für die Ausnützung der werkstofftechnisch gegebenen Möglichkeiten ein wesentliches Erfordernis. So kann durch nicht ausreichende Reinheitsgrade des Werkstoffs dessen tatsächliches Betriebsverhalten weit unter den werkstofftechnischen Möglichkeiten liegen. Besondere Anforderungen werden auch durch die Zunahme der Abmessungen im Großmaschinenbau gestellt. So ist es notwendig, für Wellen im Turbogeneratorbau Blöcke mit Stückgewichten zwischen 400 und 500 t zur Verfügung zu stellen, die eine größtmögliche Gleichmäßigkeit in der Qualität und Fehlerfreiheit aufweisen.

3 Beanspruchungsgerechte Werkstoffauslegung

In gleicher Weise, wie ein Bauteil durch Berechnung und Gestaltung den Anforderungen einer Maschine oder Anlage angepaßt werden muß, so läßt sich vergleichbar auch der Werkstoff in seinen Eigenschaften vielfältigen Beanspruchungen und zum Teil sich sogar widersprechenden Forderungen anpassen. Ganz besonders bietet der metallische Werkstoff die Möglichkeit, in einer umfassenden Weise über eine außergewöhnlich weite Bandbreite durch gezielte Beeinflussung seines Aufbaus gewissermaßen den Anforderungen entsprechend „konstruiert“ zu werden. Die außergewöhnliche Variabilität metallischer Werkstoffe läßt sich am Beispiel des Eisens eindrucksvoll veranschaulichen. Reinst Eisen weist eine Elastizitätsgrenze, d. h. einen Beginn der plastischen Verformung, bei $R_p = 10 \text{ N/mm}^2$ auf. Durch Zulegierung von nur 0,8% Kohlenstoff und durch geeignete Wärmebehandlung läßt sich der Beginn der plastischen Verformung auf Werte von etwa 2000 N/mm^2 einstellen.

Die rund 80 metallischen Elemente des periodischen Systems bieten durch die Vielfalt ihrer Kombinationsmöglichkeiten untereinander aber auch mit Nichtmetallen wie z. B. Kohlenstoff ein durch Forschung und Entwicklung bis heute nur zum Teil ausgenütztes Potential zur Werkstoffanpassung und Optimierung. Von den theoretisch 10^{23} Kombinationsmöglichkeiten der metallischen Elemente untereinander ist bis heute nur ein kleiner Teil erforscht (Tabelle/Bild 3.1).

Die Fülle der technisch sinnvollen Maßnahmen, den Werkstoff den Erfordernissen einer Konstruktion anzupassen, wird deutlich aus der Kenntnis der Gesetzmäßigkeit des Aufbaus eines Werkstoffvolumens aus den Metallatomen, d. h. aus der Kenntnis des strukturellen Aufbaus. Die Anordnung der Elementarbausteine folgt – von wenigen Ausnahmen abgesehen – den klaren Regeln des Aufbaus kristalliner Körper und bestimmt eine ganze Reihe spezifischer durch die Werkstoffstruktur vorprogrammierter Eigenschaften, wie z. B. das Formände-

Zahl der Komponenten n	Zahl der möglichen Systeme ($\binom{80}{n}$)	Zahl der untersuchten Systeme
1	80	80
2	3 160	2 000
3	82 160	1 000
⋮	⋮	⋮
40	10^{23}	?

Bild 3.1. Zahl der möglichen und der untersuchten Mehrstoffsysteme aus metallischen Elementen