

Erhard Hornbogen
Hans Warlimont

Metalle

Struktur und Eigenschaften der
Metalle und Legierungen

6. Auflage

 Springer Vieweg



Metalle

Erhard Hornbogen • Hans Warlimont

Metalle

Struktur und Eigenschaften der Metalle
und Legierungen

6., aktualisierte Auflage

Erhard Hornbogen
Universität Bochum, Bochum
Deutschland

Hans Warlimont
Technische Universität Dresden, Dresden
Deutschland

ISBN 978-3-662-47951-3
DOI 10.1007/978-3-662-47952-0

ISBN 978-3-662-47952-0 (eBook)

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

Springer Vieweg

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1967, 1991, 1995, 2001, 2006, 2016

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

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. Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer-Verlag Berlin Heidelberg ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.com)

Vorwort zur 6. Auflage

Die Metallkunde verbindet die physikalischen und die physiko-chemischen Grundlagen der Metalle mit ihren Werkstoffeigenschaften. Im vorliegenden, inzwischen bewährten Buch geben wir eine kompakte Einführung in dieses interdisziplinäre Fachgebiet.

Die metallische Bindung und die Eigenschaften der Metalle beruhen auf den Zuständen der freien Elektronen und ihrer hohen Beweglichkeit als Elektronengas zwischen den Atomrümpfen. Aus dem elektronischen Zustand lassen sich dementsprechend die kennzeichnenden Eigenschaften der Metalle ableiten wie eine dichte Packung der Atome, die elektrische und thermische Leitfähigkeit, der Glanz, die plastische Verformbarkeit und auch die oft geringe chemische Beständigkeit und ihre Folgen wie die Rostbildung, die Korrosion und die Verzunderung.

Ihre vielfältigen nützlichen Eigenschaften machen die Metalle zur wichtigsten Werkstoffgruppe. Dies gilt auch bei der gemeinsamen Behandlung aller Werkstoffe in der Werkstoffwissenschaft und bei der Werkstoffauswahl für die Anwendung. Der konstruierende Ingenieur wählt denjenigen Werkstoff aus, der für ein Bauteil oder als Funktionswerkstoff die günstigste Eigenschaft oder die optimale Kombination von Eigenschaften bietet. Auch für das grundlegende Verständnis ist eine vergleichende Betrachtung der verschiedenen Werkstoffgruppen oft nützlich. So tritt eine typische Metalleigenschaft z. B. die elektrische Leitfähigkeit auch in Polymeren und keramischen Werkstoffen auf, allerdings auf der Basis anderer Leitungsmechanismen. Analog wird Supraleitung nicht nur in Metallen, sondern auch in keramischen Stoffen wie Oxiden, Carbiden, Nitriden und Boriden angetroffen.

Die Metallkunde hat sich während des letzten Jahrhunderts zu einem eigenständigen Fachgebiet entwickelt. In Deutschland war Gustav Tamman, der 1903 bis 1937 in Göttingen lehrte, eine prägende Persönlichkeit. Sein Schüler Werner Köster, der 1935 bis 1969 Direktor des Max-Planck-Instituts für Metallforschung in Stuttgart war, hat uns 1964 zum Schreiben dieses Buches ermutigt.

Die Metallkunde ist nach wie vor ein wachsendes, lebendiges Fach im Rahmen der Werkstoffwissenschaft. Wir hoffen, dass diese grundlegende Darstellung des Aufbaus und der Eigenschaften der Metalle auch in ihrer 6. Auflage weiterhin vielen Lesern als Einführung in das Fach oder zur Auffrischung ihrer Kenntnisse nützlich sein wird.

Nach einer Einführung wird im zweiten Kapitel die Entstehung des festen Zustandes aus der Schmelze behandelt. Die folgenden drei Kapitel beschreiben die verschiedenen Aspekte des atomaren und des mikroskopischen Aufbaus. Darauf aufbauend werden in zwei Kapiteln die makroskopischen physikalischen und die mechanischen Eigenschaften abgeleitet. Zwei Kapitel beschäftigen sich mit Diffusion und Phasenumwandlungen, den Grundlagen der Wärmebehandlung. Das folgende Kapitel gibt eine Übersicht über experimentelle Untersuchungsmethoden mit einem Schwerpunkt bei den mikroskopischen und Beugungsverfahren. Der anschließende Teil des Buches besteht aus acht auf die Werkstoffgruppen und ihre Eigenschaften bezogenen Kapiteln. Nach den Herstellungsmethoden werden Gußlegierungen, Knetlegierungen und pulvermetallurgische Werkstoffe, nach Härtungsmechanismen aushärtbare Legierungen und Stähle dargestellt. Schließlich ist je ein Kapitel den metallischen Magnetwerkstoffen und den technisch bedeutsamen Oberflächeneigenschaften in Zusammenhang mit Korrosion, Reibung und Verschleiß gewidmet. Im letzten Kapitel werden kurz die nichtmetallischen Werkstoffgruppen charakterisiert und im Vergleich und Verbund mit Metallen behandelt.

Wir sind gern der Anregung aus dem Springer-Verlag gefolgt, aufgrund der nach wie vor regen Nachfrage nach diesem Buch eine weitere Auflage zu bearbeiten.

im Sommer 2015

Erhard Hornbogen
Hans Warlimont

Inhaltsverzeichnis

1 Allgemeiner Überblick	1
2 Übergang in den festen Zustand	13
3 Strukturen fester Phasen	27
4 Phasengleichgewichte	51
5 Gitterbaufehler und Gefüge	69
6 Physikalische Eigenschaften	95
7 Mechanische Eigenschaften	119
8 Diffusion und Ausheilreaktionen	153
9 Strukturelle Phasenumwandlungen	169
10 Untersuchungsmethoden der Mikrostruktur	199
11 Erstarrung, Gußwerkstoffe	223
12 Umformung, Knetlegierungen	245
13 Pulvermetallurgie	259
14 Teilchengehärtete Legierungen	273
15 Stähle	291

16 Magnetische Werkstoffe	309
17 Korrosion, Verschleiß, Oberflächenbehandlung	339
18 Werkstoffe im Vergleich und Verbund	357
Sachverzeichnis, deutsch – englisch	391

1.1 Natur der Metalle

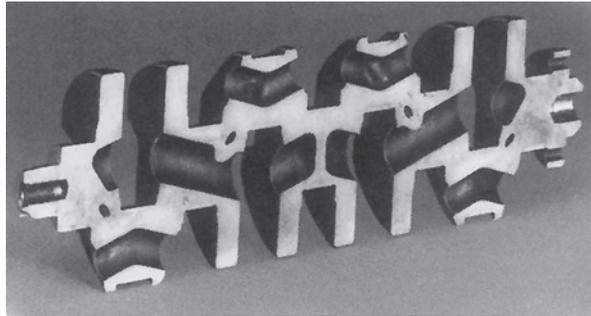
In der Natur treten reine Metalle selten auf (Gold, Meteoriteisen). Ein Blick auf das periodische System (Anhang A1) zeigt jedoch, daß der größte Teil der Elemente zu den Metallen gehört. Sie sind in der oxidierenden Atmosphäre der Erde nicht stabil, liegen deshalb meist als Oxide vor und müssen zur Gewinnung reduziert und im Gebrauch meist vor Reoxidation geschützt werden.

Als Metall wird im täglichen Leben ein Stoff bezeichnet, der folgende Eigenschaften hat:

- Reflexionsfähigkeit für Licht,
- hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit,
- gute plastische Verformbarkeit unter mechanischer Beanspruchung, auch bei tiefer Temperatur,
- in einigen Fällen Ferromagnetismus oder Supraleitung.

Einzelne dieser Eigenschaften treten auch in Nichtmetallen auf; deshalb ist hiermit noch nicht befriedigend definiert, was ein Metall ist. Eine physikalische Beschreibung des metallischen Zustandes ist: ein Metall ist ein Feststoff, in dem mindestens ein Energieband nur teilweise mit Elektronen besetzt ist und dem folglich eine Fermi-Fläche innerhalb des äußersten besetzten Bandes zugeordnet werden kann. Es handelt sich hier allerdings um einen unanschaulichen Begriff aus der Elektronentheorie (Kap. 6). Damit wird gesagt, daß die äußeren Elektronen der Metallionen im Zustand metallischer Bindung besondere Eigenschaften haben, auf denen die erwähnten bekannten Eigenschaften beruhen. Die Außenelektronen sind zwischen den Ionen eines Metallkristalls frei beweglich. Ihre

Abb. 1.1 Schnitt einer hohlen, gegossenen Kurbelwelle für Automotoren. Werkstoff: Gußeisen mit Kugelgraphit (s. auch Abb. 11.12)



Beweglichkeit wird durch die thermischen Schwingungen der Atome verringert. Deswegen ist der Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes von Metallen negativ.

Es ist charakteristisch, daß sich manche Eigenschaften von Metallen oft um viele Größenordnungen ändern können, z. B. durch Legieren (Mischen verschiedener Metalle), Glühen (Wärmebehandlung), Verformen (mechanische Behandlung) und Bestrahlen mit Neutronen. Dazu zwei Beispiele:

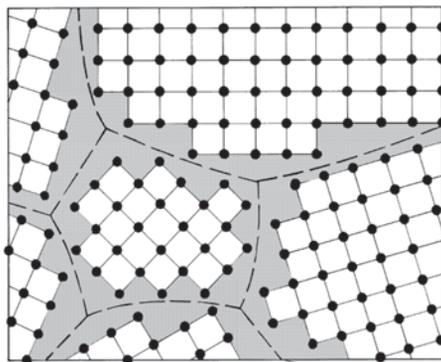
- a. Die Streckgrenze R_p ist die niedrigste mechanische Spannung, bei der die plastische Verformung eines Metalls eintritt (Kap. 7). Für reines Eisen findet man $R_p \approx 10 \text{ MNm}^{-2}$. Fügt man dem Eisen nur ein Atomprozent Kohlenstoff hinzu, so kann bei geeigneter Wärmebehandlung (Kap. 14) eine Streckgrenze von über 3000 MNm^{-2} erreicht werden.
- b. Die Koerzitivkraft ist die magnetische Feldstärke H_c , die aufgebracht werden muß, um ein bis zur Sättigung magnetisiertes ferromagnetisches Metall wieder zu entmagnetisieren (Kap. 16). Der Wert von H_c kann sich in ferromagnetischen Legierungen, deren Hauptkomponenten Eisen, Kobalt und/oder Nickel sind, zwischen 10^{-1} und 10^5 Am^{-1} ändern.

Ähnliche Beispiele für die große Variationsbreite der Eigenschaften finden sich bei der elektrischen Leitfähigkeit (Kap. 6), der plastischen Verformbarkeit (Kap. 7, 12, 14) und der chemischen Beständigkeit.

Es gibt andererseits Eigenschaften der Metalle, die durch die erwähnten Behandlungen nicht über viele Größenordnungen geändert werden können, z. B. die Schmelztemperatur, die Dichte, der Elastizitätsmodul oder die Sättigungsmagnetisierung (Kap. 16). Man bezeichnet die erste Gruppe von Eigenschaften als stark gefügeabhängig, die zweite als intrinsisch oder schwach gefügeabhängig.

Es ist üblich, Struktur- und Funktionswerkstoffe zu unterscheiden, wenn es um die Anwendungsbereiche in der Technik geht. Dies gilt entsprechend für die Metalle. Strukturlegierungen sind solche, bei denen es vorwiegend auf die mechanischen Eigenschaften ankommt: z. B. Stähle oder Gußeisen für Kurbelwellen (Abb. 1.1) oder Al-Legierungen für Flugzeugbauteile. Metallische Funktionswerkstoffe haben besondere physikalische Eigenschaften. Beispiele dafür sind Kupfer oder Aluminium als elektrische oder thermische

Abb. 1.2 Schematische ebene Darstellung von Kristalliten und deren Grenzen, die das Gefüge bilden



Leiter, ferromagnetische Schichten für die Speicherung von Information, Thermobimetalle oder Legierungen mit Formgedächtnis für die Regelungstechnik (Kap. 18).

Es ist Aufgabe der Metallkunde als Wissenschaft, die makroskopischen Eigenschaften der Metalle aus dem mikroskopischen Aufbau zu erklären. Bei der Analyse des mikroskopischen Aufbaus sind drei Stufen zu unterscheiden, die hier kurz charakterisiert und in den folgenden Kapiteln ausführlicher behandelt werden.

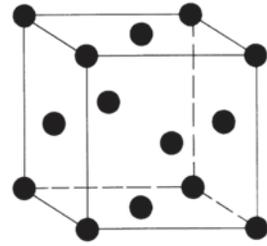
Ein massives Stück Metall erscheint als ein homogener Stoff. Schleift man es an, poliert die Oberfläche und behandelt sie mit einem geeigneten Ätzverfahren, so findet man im Mikroskop eine Anordnung einzelner Kristalle. Die Kristalle im Verband des massiven Metalls werden Kristallite oder Körner genannt, die unterschiedlich orientiert und durch Korngrenzen voneinander getrennt sind (Abb. 1.2). Ihre Anordnung bezeichnet man als das Gefüge des Metalls. Wir können den Begriff des Gefüges hier gleich erweitern:

Das Gefüge eines reinen Metalls ist gegeben durch die Anordnung der Kristallite mit allen Störungen des regelmäßigen Kristallaufbaus. Gefügeabhängige Eigenschaften sind daher Eigenschaften, die von diesen Störungen stark beeinflusst werden. Die Lehre von der Beschreibung der Gefüge ist die Metallographie; ihre wichtigsten Werkzeuge sind Licht- und Elektronenmikroskop (Kap. 10).

Die nächste Stufe betrifft die Anordnung der Atome entweder geordnet als Kristall oder ungeordnet als Glas (oder amorpher Festkörper). Dazwischen liegen die Quasikristalle, das sind nicht periodisch geordnete Strukturen, die selten auftreten und erst 1982 entdeckt wurden. In den meisten Fällen sind Metalle kristallin. Die Abstände und Symmetrieverhältnisse der Atome im Kristallgitter ergeben die Kristallstruktur (Abb. 1.3, Kap. 3). Sie ist eine wichtige Eigenschaft eines Metalls. Viele weitere Eigenschaften folgen aus dem Vorhandensein einer Kristallstruktur. Zum Beispiel die Kristallplastizität und viele weitere Erscheinungen der Anisotropie (Richtungsabhängigkeit) von Eigenschaften.

Die meisten Metalle kommen nur in einer bestimmten Kristallstruktur vor, einige in zwei (Fe, Co, Ti) oder mehreren (Mn, U): Polymorphie. Das geeignetste Mittel zur Bestimmung von Kristallstrukturen sind die Beugungserscheinungen von Röntgenstrahlen und Elektronen (Kap. 10).

Abb. 1.3 Räumliche Anordnung der Atome in der Elementarzelle eines kubisch flächenzentrierten Kristallgitters. Diese Anordnung wiederholt sich regelmäßig bis zu den Kristallitgrenzen



Auf die Beschreibung der Gitterpunkte des Kristalls folgt als nächst feinere Stufe die Analyse des Atomaufbaus selbst. Es handelt sich einerseits um die Atomkerne und andererseits um die Elektronen, die in ihrer Wechselwirkung mit den Atomkernen im Kristallverband betrachtet werden. Das Verhalten der äußeren Elektronen bestimmt wichtige Eigenschaften des metallischen Zustands. Dadurch, daß ein Teil der Außenelektronen nicht an einem bestimmten Atomkern lokalisiert ist, sondern sich im gesamten Kristall als Elektronengas bewegt, können metallische Eigenschaften wie die elektrische Leitfähigkeit, die Undurchsichtigkeit, die dicht gepackten Kristallstrukturen und die oft geringe chemische Beständigkeit verstanden werden (Kap. 6).

Die Untersuchung der Elektronenverteilung im Metallgitter erfordert spezielle physikalische Methoden, z. B. die Anwendung der Spektroskopie von Röntgenstrahlen und des Energieverlustes von Elektronen (Kap. 10). Zur Analyse des Atomkerns können die Neutronenstreuung und die rückstoßfreie Kernresonanzabsorption (Mössbauer-Effekt) dienen.

1.2 Geschichte und Zukunft der Metalle

Die Geschichte der Verwendung der Metalle ist vor allem durch die zunehmende Überwindung der metallurgischen Schwierigkeiten ihrer Gewinnung bestimmt. Da die Metalle in der Natur meist als chemische Verbindungen, vor allem mit Sauerstoff, vorkommen, nehmen die Schwierigkeiten mit der Stärke der Bindung zu. Wie erwartet, findet man eine zeitliche Reihenfolge der Verwendung der Metalle, die parallel zur Spannungsreihe der Elemente läuft (Tab. 1.1).

Tab. 1.1 Zusammenhang von Oxidationspotential (Kap. 17) und Beginn der technischen Verwendung einiger Metalle

	Au	Ag	Cu	Sn
Oxidationspotential ϵ_0 , Volt	+1,5	+0,81	+0,34	-0,14
Beginn der Verwendung, Jahr	< 4000 v. Chr.	< 4000 v. Chr.	< 4000 v. Chr.	< 2000 v. Chr.
	Fe	Zn ^a	Al	Mg
Oxidationspotential ϵ_0 , Volt	-0,44	-0,76	-1,67	-2,34
Beginn der Verwendung, Jahr	1000 v. Chr.	1500	1850	1850

^a römische Messingmünzen sind bekannt

Anfangs wurden nur Metalle verwendet, die gediegen in der Natur vorkommen (Au, Ag, Cu, Meteoriteisen). Später begann eine lange Zeit der Entwicklung empirischer Verfahren zur Gewinnung von Metallen, die in chemischen Verbindungen vorliegen. Erst seit historisch kürzester Zeit wendet man die Kenntnis der anorganischen Chemie auf diese Prozesse an (1700). Noch jüngeren Datums ist die Anwendung physikalischer Denkweise auf das Verständnis der Eigenschaften der Metalle im metallischen Zustand (1900). Fast alle technisch interessanten Eigenschaften von Metallen wurden bisher durch die empirische Methode gefunden, d. h. zufällig oder durch systematisches Probieren. Erst in neuester Zeit spielt dabei wissenschaftliches Verständnis eine entscheidende Rolle:

–	Verfestigung durch Kaltverformung	4000 v. Chr.
–	Legierungshärten von Bronzen: Cu + Sn	2500 v. Chr.
–	Stahlhärtung	1000 v. Chr.
–	Austenitischer rostfreier Stahl	1913
–	Aushärtung von Aluminiumlegierungen	1905
–	Legierungen mit Formgedächtnis	1955
–	Magnetische metallische Gläser	1960

Beim heutigen Stand der Metallkunde sind wir im Wesentlichen in der Lage, diese Eigenschaften zu verstehen. Es ist aber auch jetzt noch schwierig, neue Vorgänge in Metallen und die daraus folgenden Eigenschaften theoretisch vorherzusagen. Die Entdeckung keramischer Supraleiter und leitfähiger Polymere zeigt, daß bisher als typisch metallisch betrachtete Eigenschaften auch in anderen Stoffgruppen auftreten (Kap. 18).

Die Metalle haben in der menschlichen Zivilisation seit jeher als Material für Schmuck, Münzen, Werkzeug, Waffen, Maschinen und Konstruktionen eine große Rolle gespielt. Dazu kommt in neuerer Zeit eine Zahl von Anwendungsmöglichkeiten, bei denen es auf besondere physikalische Eigenschaften – Leitfähigkeit, Magnetismus, Ausdehnungskoeffizient, Thermospannung – ankommt. Die Kenntnis der Herstellung und die Verwendung von Metallen ist aber trotzdem keine Vorbedingung für die Bildung von Zivilisationen. Das zeigt zum Beispiel die Kultur der Maya-Indianer, die ohne die Verwendung von Metallen zu bedeutenden Leistungen in Architektur, Astronomie und Landwirtschaft kamen.

Unter allen Metallen ist seit etwa 3000 Jahren das *Eisen* das wichtigste. Für die bevorzugte Stellung, die dieses Metall nicht nur hinsichtlich der praktischen Anwendung, sondern auch für die metallkundliche Forschung einnimmt, gibt es folgende Gründe:

- die hohe Stabilität der Atomkerne des Eisens,
- die zweimalige Gitterumwandlung bei verschiedener Temperatur,
- den Ferromagnetismus,
- das häufige Vorkommen in der Erdkruste (4,2 Masseprozent),
- die günstige Schmelztemperatur im Hinblick auf technische Wärmebehandlungen (1540 °C),

- den hohen Elastizitätsmodul,
- die leichte Rückgewinnbarkeit von aus Eisenschrott.

Der Grund für die Beliebtheit des Eisens und seiner Legierungen liegt in seiner leichten Verfügbarkeit in großen Mengen und in der Möglichkeit, durch Legieren und Wärmebehandeln eine Fülle von nützlichen Eigenschaften zu erzielen.

Eine Vorhersage der Zukunft der Metalle ist nur teilweise leicht. Vorhersagbar sind nur evolutionäre Entwicklungen:

- Stahl wird wegen der erwähnten Eigenschaften der wichtigste Werkstoff bleiben,
- werden weiter zunehmend gebraucht werden, wo geringes Gewicht gewünscht wird. Für letzteres müßten noch gute Knetlegierungen gefunden werden.
- *Gold* ist ein sehr gutes Beispiel für die komplexe Vielfalt der Eigenschaften und Anwendungen der Metalle. Die Nachfrage nach Gold stammt im Wesentlichen aus folgenden Bereichen: Schmuck, Kunst, Kultgegenstände, Wertanlagen; nur etwa 10% des Goldes wird technisch angewendet. Gold wurde früher wegen seiner hohen spezifischen elektrischen Leitfähigkeit ($\kappa = 48.8 \cdot 10^6 \text{ S/m}$) in Verbindung mit seiner hohen Oxidationsbeständigkeit für die Leiterbahnen von integrierten Schaltkreisen eingesetzt. Inzwischen kommt aber aus Kostengründen nahezu ausschließlich Kupfer ($\kappa = 59.5 \cdot 10^6 \text{ S/m}$) mit einer Oxidationsschutzschicht zum Einsatz. Zur Erhöhung der mechanischen Festigkeit, besonders auch der Verschleißfestigkeit, und der Verbesserung des Gießverhaltens wird Gold häufig mit Silber und/oder Kupfer legiert. Bemerkenswert ist der Zusatz von nanokristallinen Goldteilchen zur prächtig leuchtenden Rotfärbung von Glasfenstern.
- Die Anlage und Lagerung von Gold wegen seiner Wertbeständigkeit übertrifft allerdings die Bedeutung seiner technischen und dekorativen Anwendung bei weitem.
- In der Natur kommt Gold selten und feinverteilt vor. Oft ist es als Begleitelement in Kupfererzen enthalten und tritt deshalb bei der Kupfergewinnung als wertvolles Nebenprodukt auf.
- Metalle insgesamt haben auch deshalb eine gute Zukunft, da sie gut rückgewinnbar sind. Nicht vorhersagbar sind überraschende Entdeckungen. Diese sind bei den Metallen am ehesten auf dem Gebiet der Funktionswerkstoffe zu erwarten.

1.3 Metalle als Werkstoffe

Es gibt vier Gesichtspunkte, unter denen die Eigenschaften von Metallen betrachtet werden können:

Physikalisch Die Eigenschaften und ihre mikrostrukturellen Ursachen werden untersucht, ohne daß ein Anwendungszweck im Vordergrund steht.

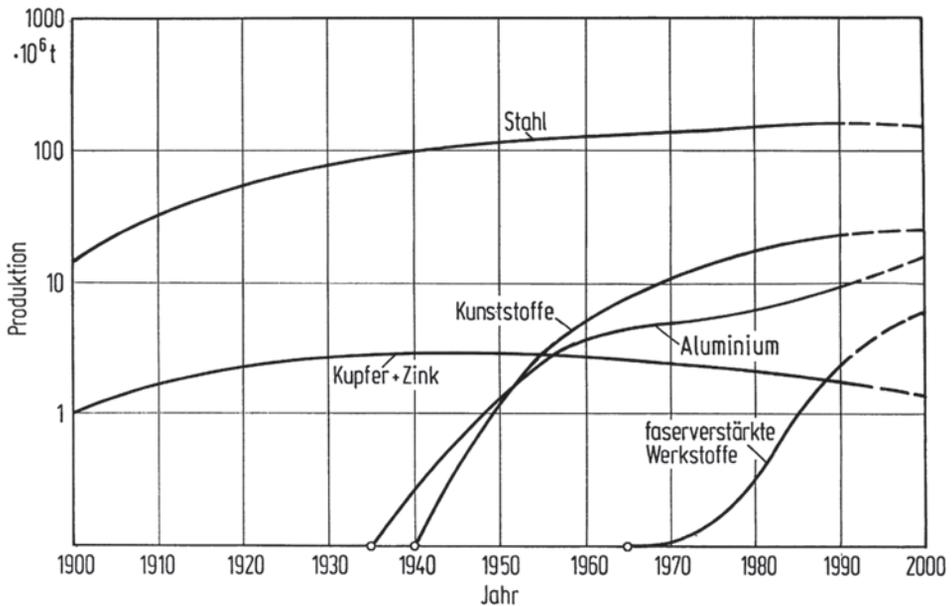


Abb. 1.4 Produktion von Werkstoffen in den USA. Kurzzeitige Schwankungen wurden ausgeglichen, die Entwicklung bis zum Jahre 2000 geschätzt

Technisch Man interessiert sich für die physikalischen Eigenschaften im Hinblick auf ihre nützliche Anwendung. Häufig müssen für technische Zwecke zwei oder mehr physikalische Eigenschaften zu einem Optimum kombiniert werden, z. B. Zugfestigkeit und Gewicht, Leitfähigkeit und Oxydationsbeständigkeit. Man spricht dann von technischen Eigenschaften oder einem Eigenschaftsprofil. Ein Metall mit technisch nutzbaren Eigenschaften ist ein Werkstoff, wenn er außerdem noch in die Form eines Bauteils gebracht werden kann (Gebrauchseigenschaft und fertigungstechnische Eigenschaft).

Wirtschaftlich Gute technische Eigenschaften sind oft nicht interessant, wenn der Werkstoff zu teuer also nicht in genügenden Mengen oder nicht zu anwendungsgerechten Kosten verfügbar ist. Deshalb wird ein Metall nur dann verwendet werden, wenn aus seinen physikalischen Eigenschaften technisch nutzbare Eigenschaften folgen und wenn Herstellung und Behandlung des Werkstoffs wirtschaftlich sinnvoll sind. Das wirtschaftliche Interesse, das manche Metalle finden, kann aus den Produktionszahlen abgelesen werden (Abb. 1.4).

Ökologisch Dies bedeutet, daß für den gesamten Lebenszyklus ihre Verwendung nachhaltig mit den Interessen des Menschen verträglich ist. Die metallischen Werkstoffe sollen gut rückgewinnbar sein. Sie sollen nicht nach Gebrauch oder bei ihrer Herstellung die Oberfläche der Erde stören, z. B. durch Staub und Gase in der Atmosphäre, Verunreinigung von Gewässern oder durch Deponien, aus denen schädliche Stoffe austreten können.