

Allgemeiner Überblick

1.1

Natur der Metalle

In der Natur sind Metalle recht selten (Gold, Meteoriteisen). Ein Blick auf das Periodische System (Anhang A1) lehrt 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,
- plastische Verformbarkeit unter Zug, Druck und auch bei tiefer Temperatur,
- in einigen Fällen Ferromagnetismus oder Supraleitung.

Einzelne dieser Eigenschaften können auch in Nichtmetallen auftreten; deshalb ist auf diese Weise noch nicht befriedigend definiert, was ein Metall ist. Eine eindeutige Beschreibung des metallischen Zustandes wäre: Ein Metall ist ein Stoff, 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 oben erwähnten bekannten Eigenschaften beruhen. Sie sind zwischen den Ionen eines Metallkristalls frei beweglich. Diese Beweglichkeit wird durch thermische Schwingungen der Atome verringert. Folglich ist der Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes negativ: ein weiteres Kennzeichen der Metalle.

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

- a) Die Streckgrenze R_p ist die mechanische Spannung, bei der die plastische Verformung eines Metalls beginnt (Kap. 7). Für reines Eisen findet man

$R_p \approx 10 \text{ MNm}^{-2}$. Fügt man dem Eisen nur ein Atomprozent Kohlenstoff zu, 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 Legierungen, die immer hauptsächlich aus Eisen, Kobalt oder Nickel bestehen, zwischen 10^{-1} und 10^5 Am^{-1} ändern.

Ähnliche Beispiele könnten für die elektrische Leitfähigkeit (Kap. 6), die plastische Verformbarkeit (Kap. 7, 12, 14) oder die chemische Beständigkeit gegeben werden.

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 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 sollen besondere physikalische Eigenschaften haben. Beispiele dafür sind Kupfer oder Aluminium als elektrische oder thermische Leiter, ferromagnetische Schichten für die Speicherung von Information, Bimetalle oder Legierungen mit Formgedächtnis für die Regelungstechnik (Kap. 18).

Es ist Aufgabe der Metallkunde, die makroskopische Eigenschaften der Metalle aus dem mikroskopischen Aufbau zu erklären. Bei der Analyse des mikroskopischen Aufbaus sind drei Stufen zu unterscheiden, die hier aufgezählt 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,

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

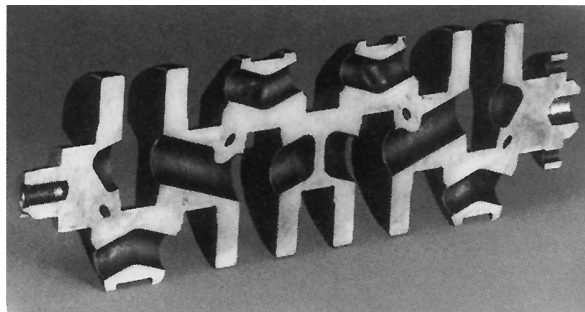
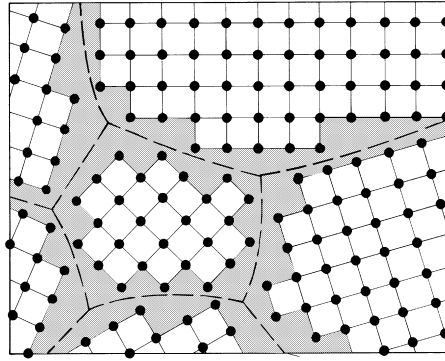


Abb. 1.2. Schematische ebene Darstellung von Kristalliten und deren Grenzen, die das Gefüge bilden



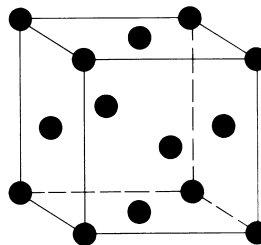
die durch Korngrenzen voneinander getrennt sind (Abb. 1.2). Ihre Anordnung bezeichnet man als das Gefüge des Metalls. Wir können den Begriff des Gefüges hier gleich erweitern:

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 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). Sie ist eine wichtige Eigenschaft eines Metalls. Viele weitere Eigenschaften folgen aus dem Vorhandensein einer Kristallstruktur. Zum Beispiel die Kristallplastizität, Spaltbarkeit 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 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 (Tabelle 1.1).

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 Darstellung 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

Tabelle 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 *)	Al	Mg
Oxidationspotential ϵ_0 , Volt	– 0,44	– 0,76	– 1,67	– 2,34
Beginn der Verwendung, Jahr	1000 v. Chr.	1500	1850	1850

*) römische Messingmünzen sind bekannt.

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 Rohstoff (verbunden mit Abfallbeseitigung) 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,
- Aluminium und Magnesium werden weiter zunehmend gebraucht werden, wo geringes Gewicht gewünscht wird. Für letzteres müßten noch gute Knetlegierungen gefunden werden.
- Alle drei Metalle haben auch 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.

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. In diesem Zusammenhang muß auch die Verträglichkeit mit dem menschlichen Körper (Toxizität) erwähnt werden, Abb. 1.7.

Verschiedene metallische Werkstoffe stehen untereinander und außerdem mit nichtmetallischen Werkstoffen im Wettbewerb. Abbildung 1.4 zeigt die Produktion einiger Metalle und Nichtmetalle in den USA während dieses Jahr-

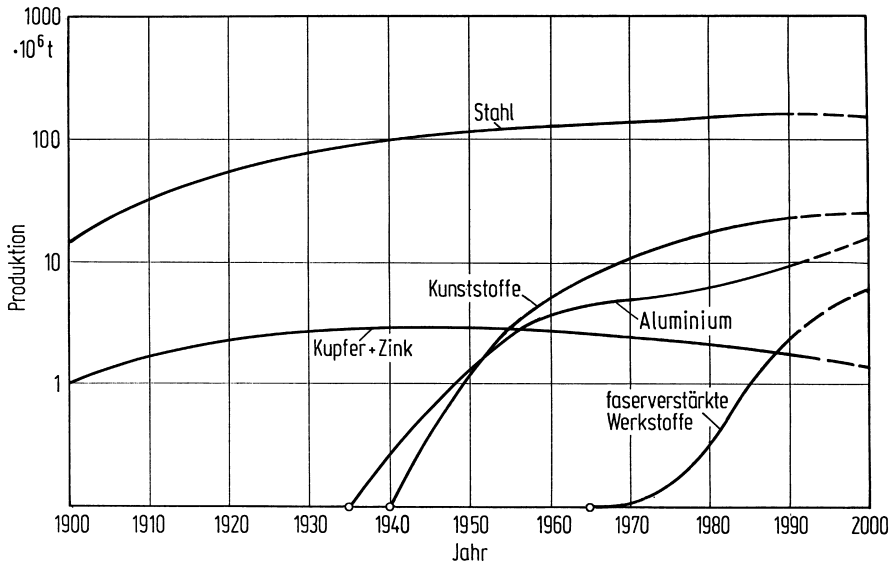


Abb. 1.4. Produktion von Werkstoffen in den USA. Kurzzeitige Schwankungen wurden ausgeglichen, die Entwicklung bis zum Jahre 2000 geschätzt

hunderts. Am Anfang des Jahrhunderts hat der Stahl das Bauholz als Konstruktionsmaterial wegen wirtschaftlicher Produktion und besserer mechanischer Eigenschaften überflügelt. Die physikalischen Eigenschaften des Eisens haben die Ersetzbarkeit von Stahl durch Aluminium in späterer Zeit begrenzt, wenn höchste Zugfestigkeit oder hohe Kriechfestigkeit bei erhöhter Temperatur verlangt wurden. Aluminium setzt sich dann durch, wenn als typische technische Eigenschaft ein günstiges Verhältnis von Festigkeit zu Gewicht verlangt wird. Der Wettstreit zwischen Metall und Kunststoff ist durch die Wärmeempfindlichkeit ($> 200^\circ\text{C}$) der meisten Hochpolymere begrenzt. Die Erhöhung der Temperaturbeständigkeit der Kunststoffe ist aber Gegenstand vieler Forschungen. Der annähernd konstante Verbrauch von Cu und Zn ist darauf zurückzuführen, daß frühere Anwendungen durch neue Verwendungszwecke auf Grund besonderer Eigenschaften (hohe Leitfähigkeit von Kupfer, niedriger Schmelzpunkt von Zink: Spritzguß) ersetzt wurden.

Die produzierte Menge von Werkstoffen ist allerdings kein Maßstab mehr für die technische Leistungsfähigkeit eines Landes (Abb. 1.5 u. 1.6). Verbesserte Eigenschaften und Konstruktionsbedingungen führen zu einer abnehmenden Werkstoffmenge pro technischem Nutzen. Gefragt ist der an die Beanspruchung genau angepaßte, „maßgeschneiderte“ Werkstoff. Dies führt zu einer zunehmenden Komplexität technischer Systeme. In unserem Zusammenhang bedeutet es, daß eine Maschine nicht nur aus einer zunehmenden Zahl von Teilen, sondern auch aus einer immer größeren Vielfalt von Werkstoffen besteht. Dies wiederum kann zu Problemen beim Recycling führen (Abb. 1.7), wenn komplexe Systeme wieder getrennt werden müssen.

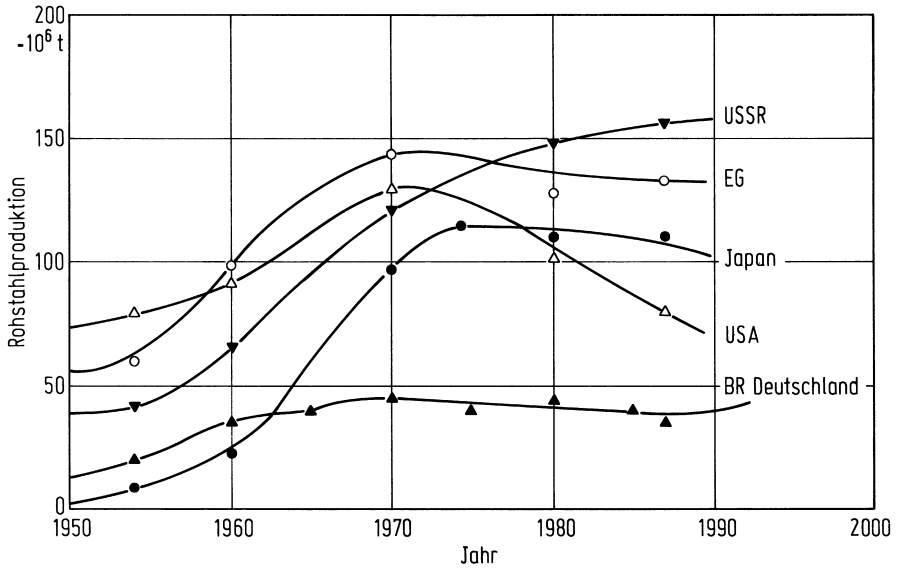


Abb. 1.5. Rohstahlproduktion: In technisch fortgeschrittenen Ländern nimmt die Stahlproduktion nicht mehr zu

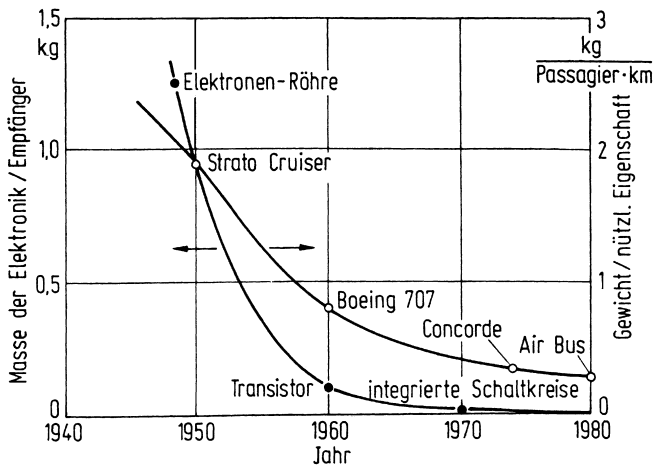


Abb. 1.6. Abnehmende Werkstoffmenge pro technischem Nutzen in der modernen Technik; Beispiele: Werkstoffe im Flugzeugbau, elektronische Werkstoffe eines Radios

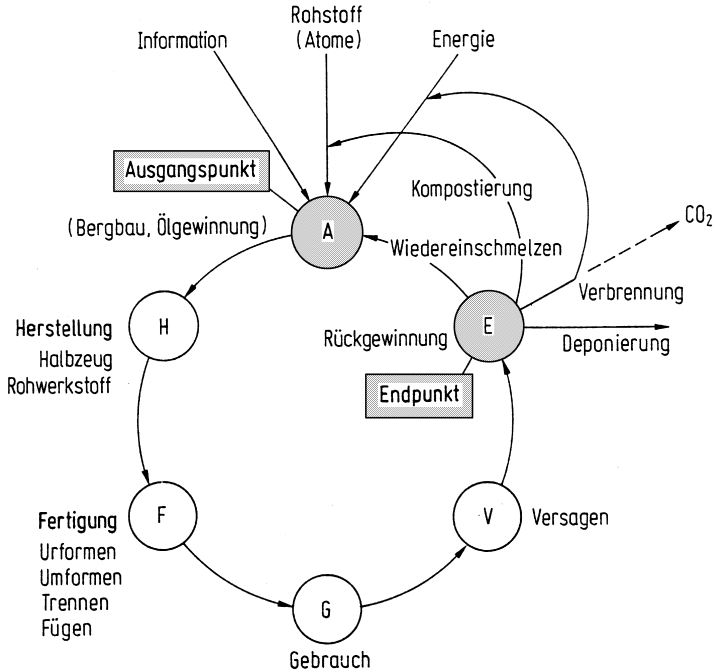


Abb. 1.7. Kreislauf der Werkstoffe

1.4

Aufgaben der Metallkunde

Das Teilwort „Kunde“ liefert ein Beispiel dafür, daß auch der Gebrauch der deutschen Sprache vorteilhaft sein kann. Im Englischen müssen Metallkunde und Werkstoffkunde umständlich mit „metals“ oder „materials science and engineering“ übersetzt werden (Abb. 1.8). Die Metallkunde ist in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts entstanden. Sie liefert ein frühes Beispiel für ein fachübergreifendes Wissensgebiet, wie es gegenwärtig für die Gesamtheit der Werkstoffe unverzichtbar wird (Kap. 18). Die Metallkunde liegt zwischen Festkörperphysik und Werkstofftechnik. Die Festkörperphysik bemüht sich, grundsätzliche Erkenntnisse über Aufbau und Eigenschaften der Metalle aus Messungen unter einfachen Verhältnissen – an reinsten Metallen und Einkristallen – zu erhalten. In der Werkstofftechnik beschäftigt man sich mit Metallgemischen wie den Stählen, die oft aus vielen Atomarten und mehreren Kristallstrukturen bestehen und ein kompliziert aufgebautes Gefüge besitzen, im Hinblick auf ihre technische und wirtschaftliche Anwendung. Die Metallkunde liegt verbindend zwischen beiden Gebieten und außerdem im Rahmen aller Werkstoffgruppen (Kap. 18).

Sie steht in Wechselwirkung mit der Metallphysik, indem sie, von deren Ergebnissen ausgehend, auch komplexere Fälle – Legierungen, Vielkristalle,

Literatur

- Smith CS (ed) (1965) The Sorby Centennial Symposium on History of Metallurgy. New York, Gordon & Breach
- Cottrell AH (1967) An Introduction to Metallurgy. London, Arnold
- Haasen P (1984) Physikalische Metallkunde. Berlin, Springer
- Cottrell AH (1962) Theoretical Structural Metallurgy. London, Arnold
- Cahn RW, Haasen P (ed) (1996) Physical Metallurgy. Amsterdam, North Holland
- Kittel Ch (1968) Einführung in die Festkörperphysik. München, Oldenbourg
- Amato J (1998) Stuff, The Material the World is made of. New York, Avon
- Hornbogen E (1994) Werkstoffe. Berlin, Springer
- Hornbogen E (1995) Kreislauf der Werkstoffe. Mat-Wiss. u. Werkstofftechnik 26: 573–593
- Hornbogen E, Donner P, Bode R (Hrsg) (1993) Materialwissenschaftliche Aspekte des Recycling. Berlin, Springer
- Warlimont H (ed) (1994) Environmental Aspects in Materials Research. Oberursel, DGM
- Gottstein G (1998) Physikalische Grundlagen der Materialkunde. Berlin, Springer
- N.N. (1986–2005) 1–21 ASM Handbook, Materials Park OH, ASM International
- Martienssen W, Warlimont H (eds) (2005) Springer Handbook of Condensed Matter and Materials Data, Berlin, Heidelberg, Springer

Metalle

Struktur und Eigenschaften der Metalle und Legierungen

Hornbogen, E.; Warlimont, H.

2006, XI, 383 S. 290 Abb., Hardcover

ISBN: 978-3-540-34010-2