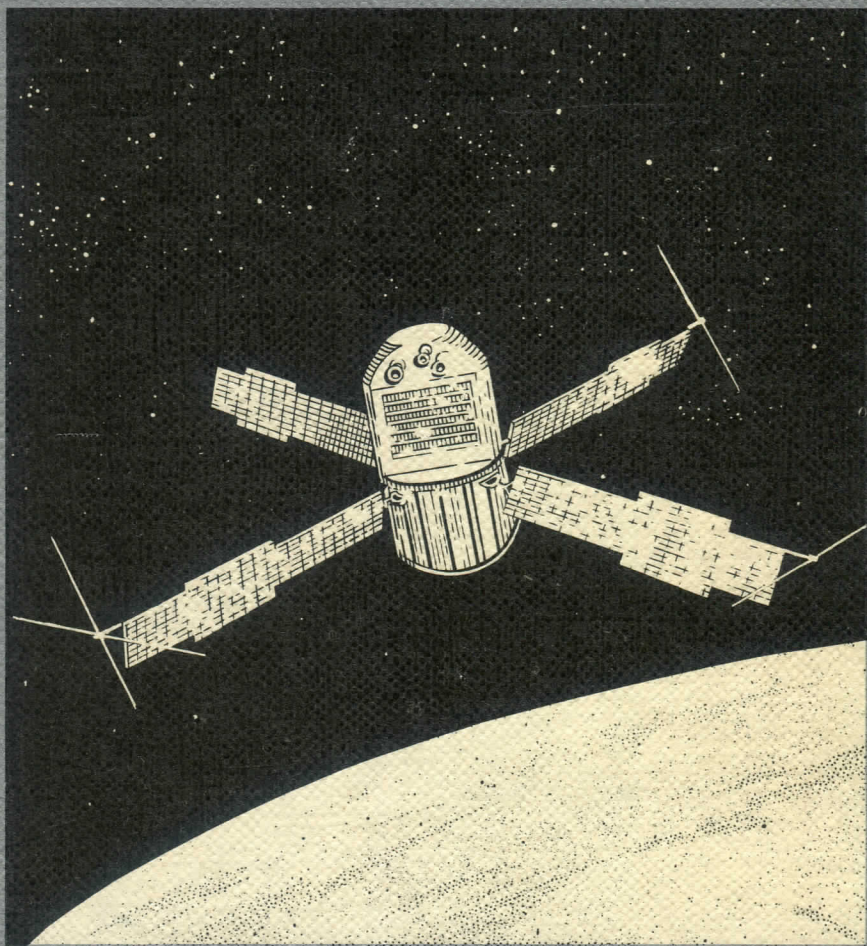


SAWITZKIJ
KLJATSCHKO

METALLE DER KOSMISCHEN ÄRA



Erläuterungen zum Periodensystem

Ordnungszahl

1	H	Elementsymbol
Wasserstoff		
1,0079		relative Atommasse

Periodensystem der Elemente (Kurzperiodendarstellung)						
	I. Gruppe		II. Gruppe		III. Gruppe	
	Hauptgruppe	Nebengruppe	Hauptgruppe	Nebengruppe	Hauptgruppe	Nebengruppe
1. Periode	1 H Wasserstoff 1,0079					
2. Periode	3 Li Lithium 6,941		4 Be Beryllium 9,01218		5 B Bor 10,81	
3. Periode	11 Na Natrium 22,98977		12 Mg Magnesium 24,305		13 Al Aluminium 26,98154	
4. Periode	19 K Kalium 39,0983		20 Ca Kalzium 40,08			21 Sc Skandium 44,9559
		29 Cu Kupfer 63,546		30 Zn Zink 65,38	31 Ga Gallium 69,72	
5. Periode	37 Rb Rubidium 85,4678		38 Sr Strontium 87,62			39 Y Yttrium 88,9059
		47 Ag Silber 107,868		48 Cd Kadmium 112,41	49 In Indium 114,82	
6. Periode	55 Cs Zaesium 132,9054		56 Ba Barium 137,33			57 La ^x Lanthan 138,9055
		79 Au Gold 196,9665		80 Hg Quecksilber 200,59	81 Tl Thallium 204,383	
7. Periode	87 Fr Francium (223)		88 Ra Radium 226,0254			89 Ac ^{xx} Aktinium 227,0278

^xLanthanoide

58 Ce Zerium 140,12	59 Pr Praseodymium 140,9077	60 Nd Neodymium 144,24	61 Pm Promethium (145)	62 Sm Samarium 150,36	63 Eu Europium 151,96
---------------------------	-----------------------------------	------------------------------	------------------------------	-----------------------------	-----------------------------

^{xx}Aktinoide

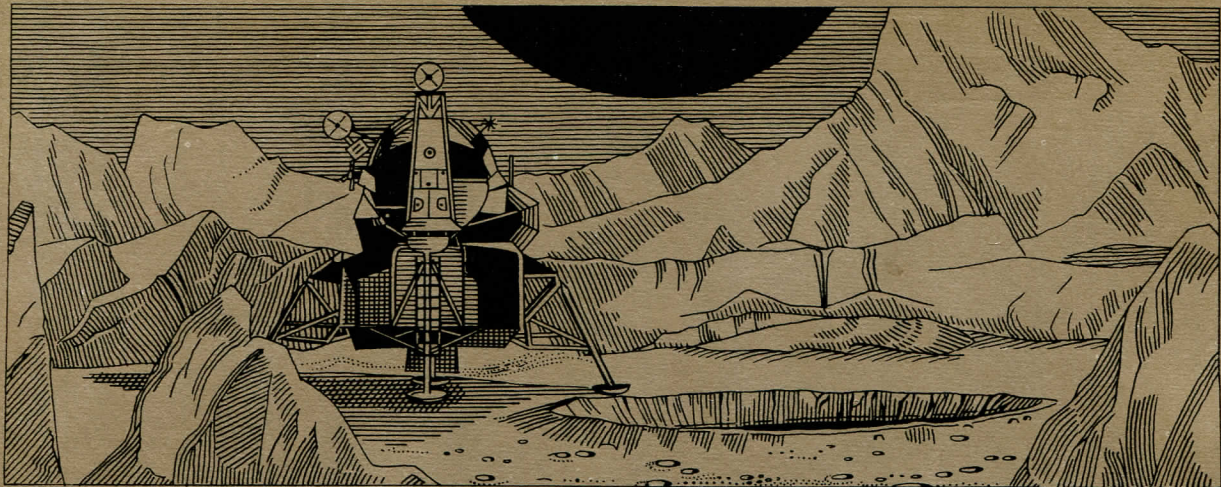
90 Th Thorium 232,0381	91 Pa Protaktinium 231,0359	92 U Uranium 238,0289	93 Np Neptunium 237,0482	94 Pu Plutonium (244)	95 Am Amerizium (243)
------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------	--------------------------------	-----------------------------	-----------------------------

IV. Gruppe		V. Gruppe		VI. Gruppe		VII. Gruppe		VIII. Gruppe			
Haupt- gruppe	Neben- gruppe	Haupt- gruppe	Neben- gruppe	Haupt- gruppe	Neben- gruppe	Haupt- gruppe	Neben- gruppe	Haupt- gruppe	Nebengruppen		
								2 He Helium 4,00260			
6 C Kohlen- stoff 12,011		7 N Stick- stoff 14,0067		8 O Sauer- stoff 15,9994		9 F Fluor 18,998403		10 Ne Neon 20,179			
14 Si Silizium 28,0855		15 P Phosphor 30,97376		16 S Schwefel 32,06		17 Cl Chlor 35,453		18 Ar Argon 39,948			
	22 Ti Titanium 47,88		23 V Vana- dium 50,9415		24 Cr Chro- mium 51,996		25 Mn Mangan 54,9380		26 Fe Eisen 55,847	27 Co Kobalt 58,9332	28 Ni Nickel 58,69
32 Ge Germa- nium 72,59		33 As Arsen 74,9216		34 Se Selen 78,96		35 Br Brom 79,904		36 Kr Krypton 83,80			
	40 Zr Zirko- nium 91,22		41 Nb Niobium 92,9064		42 Mo Molyb- dän 95,94		43 Tc Technet- ium (98)		44 Ru Ruthe- nium 101,07	45 Rh Rhodium 102,9055	46 Pd Palla- dium 106,42
50 Sn Zinn 118,69		51 Sb Antimon 121,75		52 Te Tellur 127,60		53 I Iod 126,9045		54 Xe Xenon 131,29			
	72 Hf Hafnium 178,49		73 Ta Tantal 180,9479		74 W Wolfram 183,85		75 Re Rhenium 186,207		76 Os Osmium 190,2	77 Ir Iridium 192,22	78 Pt Platin 195,08
82 Pb Blei 207,2		83 Bi Bismut 208,9804		84 Po Polo- nium (209)		85 At Astatin (210)		86 Rn Radon (222)			
	104 Unq Unnil- quadium (261)	105 Unp Unnil- pentium (262)	106 Unh Unnil- hexium (263)								

64 Gd Gadoli- nium 157,25	65 Tb Terbium 158,9254	66 Dy Dyspro- sium 162,50	67 Ho Holmium 164,9304	68 Er Erbium 167,26	69 Tm Thulium 168,9342	70 Yb Ytter- bium 173,04	71 Lu Lutetium 174,967
------------------------------------	------------------------------	------------------------------------	------------------------------	---------------------------	------------------------------	-----------------------------------	------------------------------

96 Cm Curium (247)	97 Bk Berke- lium (247)	98 Cf Kalifor- nium (251)	99 Es Einstei- nium (252)	100 Fm Fermium (257)	101 Md Mende- levium (258)	102 No Nobe- lium (259)	103 Lr Lawren- zium (260)
--------------------------	----------------------------------	------------------------------------	------------------------------------	----------------------------	-------------------------------------	----------------------------------	------------------------------------

**METALLE DER
KOSMISCHEN ÄRA**



SAWITZKIJ
KLJATSCHKO

METALLE DER KOSMISCHEN ÄRA



VEB DEUTSCHER VERLAG
FÜR GRUNDSTOFFINDUSTRIE
LEIPZIG

© Издательство «Металлургия», 1978
Савицкий, Е. и Клячко, В.
«Металлы космической эры»
Издание второе, дополненное и переработанное

Von Prof. Dr. E. Sawitzkij
und W. Kljatschko
Herausgegeben von
Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Hans-Joachim Eckstein

Mit 48 Bildern

Lizenz Ausgabe von der 2. Auflage der Originalausgabe mit Genehmigung des Verlages »Metallurgija«, Moskau

Übersetzung aus dem Russischen und Bearbeitung der deutschsprachigen Ausgabe: Dr.-Ing. Dieter Peisker und Dipl.-Ing. Wilfried Richling

1. Auflage
© Deutschsprachige Ausgabe:
VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig
VLN 152-915/77/82
LSV 3019
Gestaltung: Gottfried Leonhardt, Leipzig
Illustrationen: Inge Brüh-Gohrisch, Leipzig
Printed in the German Democratic Republic
Gesamtherstellung: Grafische Werke Zwickau
Redaktionsschluß: 10. 5. 1981
Bestell-Nr.: 541 702 9
DDR 15,- M

Vorwort

Die Autoren des Buches, der bekannte Metallkundler Professor E.M.Sawitzkij und der Journalist W.S. Kljatschko, erzählen von den wichtigsten Werkstoffen der Gegenwart – den Metallen und Legierungen, ohne die es keine »Wostoks« und »Sojus« im Kosmos, keine Überschallflugzeuge und keine Kernkraftwerke gäbe.

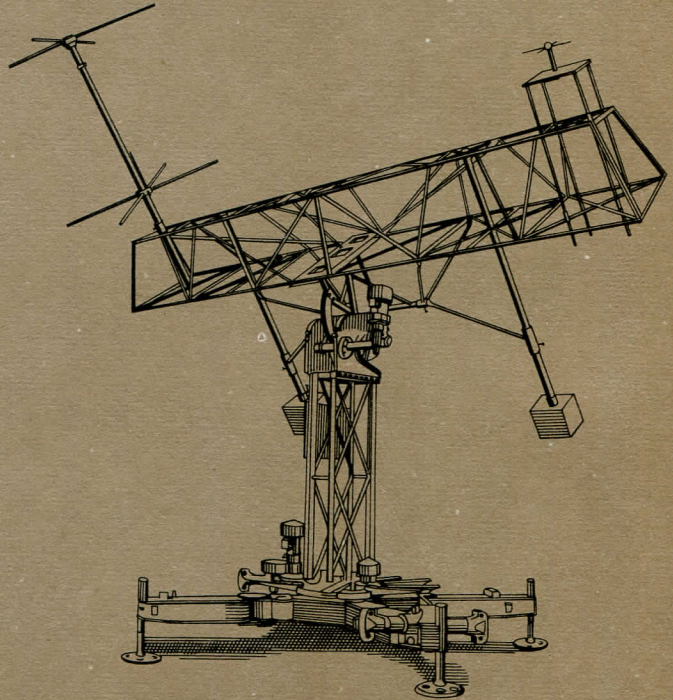
Dies ist aber auch ein Buch über die Wissenschaft, die die »angeborenen« Eigenschaften der Metalle und ihr Verhalten unter den verschiedenen »Lebensbedingungen« untersucht. Das Buch umfaßt einen breiten Geschichtsabschnitt.

Zahlreiche Beispiele und Fakten sollen das Interesse für metallkundliche Zusammenhänge wecken, die in der Gegenwart oder in der Zukunft technisch genutzt werden können. Vielfach wird von kleinen historischen Begebenheiten ausgegangen oder von Erscheinungen, die man tagtäglich beobachten kann, wie zum Beispiel die Korrosion, hinter der sich auch für den Nichtfachmann interessante metallkundliche Gesetzmäßigkeiten verbergen, über die das Buch in populärwissenschaftlicher Weise zum Nachdenken anregen möchte. Um dabei die Anschaulichkeit für einen breiten Leserkreis zu wahren, wird versucht, nicht allgemein bekannte Begriffe (im Text kursiv gedruckt) im Anhang zu erläutern.

Autoren und Bearbeiter

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	7
Der Schlüssel zur Festigkeit	9
Etwas Theorie	23
Metallurgische »Homöopathie«	26
Metalle verbinden sich	31
Das Fundament der Zivilisation	38
Die Bezwinger des Himmels und des Meeres	47
Metalle in Kernkraftwerken	57
Elektronen im Gespann	62
Eroberung der hohen Temperaturen	74
An der Spitze der Pyramide	77
Ein Sechstel des Periodensystems der Elemente	82
Die »Edlen« arbeiten	86
Auch Metalle brauchen einen Arzt	91
An Stelle eines Schlußwortes	98
Bildquellenverzeichnis	109
Begriffserläuterungen	110



Einleitung

Die wichtigsten Werkstoffe der Gegenwart

Die einen nennen unser Zeitalter das des Atoms, die anderen das kosmische, die dritten das der Plaste und Elaste. Wenn man jedoch der Tradition treu bleibt und dem Zeitalter seinen Namen nach dem Material gibt, aus dem im wesentlichen die Arbeitsmittel hergestellt werden, dann ist es treffender, unsere Zeit wie bisher als Eisenzeit oder als das Zeitalter der Metalle zu bezeichnen. Sie sind nachweisbar die Basis der gesamten materiellen Kultur der Menschheit, das Rückgrat der Industrie.

Die industrielle Technik beruht im wesentlichen auf der Nutzung von Eigenschaften der Metalle, wie z. B. der Härte, Festigkeit, Warmfestigkeit, Plastizität, Wärmeleitfähigkeit, elektrischen Leitfähigkeit, der magnetischen Eigenschaften, der Fähigkeit zur Kernspaltung, der *Supraleitfähigkeit* und weiterer spezieller Eigenschaften.

Nehmen wir als Beispiel die magnetischen Eigenschaften der Metalle. Ohne den magnetischen Zeiger des Kompasses verirren sich Seefahrer, Geologen und Touristen. Ohne Permanentmagnet in der Magnetzündanlage fängt kein Motor im Auto, Flugzeug oder Traktor an, sich zu drehen. Ohne Eisenkerne gäbe es keine Elektrogenatoren, Elektromotoren und Transformatoren, somit aber auch keine Kraftwerke, Elektrozüge und Straßenbahnen, Drehbänke und Maschinen sowie keine elektrische Beleuchtung, Fernsehapparate, Radios und Telefone.

Die Antriebsleistung kosmischer Raketen übersteigt die Energieleistung der größten Wasserkraftwerke um

ein vielfaches. Solch eine ungeheure Kraft in einem verhältnismäßig kleinen Volumen zu konzentrieren gelingt nur durch starke Erhöhung der Temperatur und des Druckes in der Brennkammer.

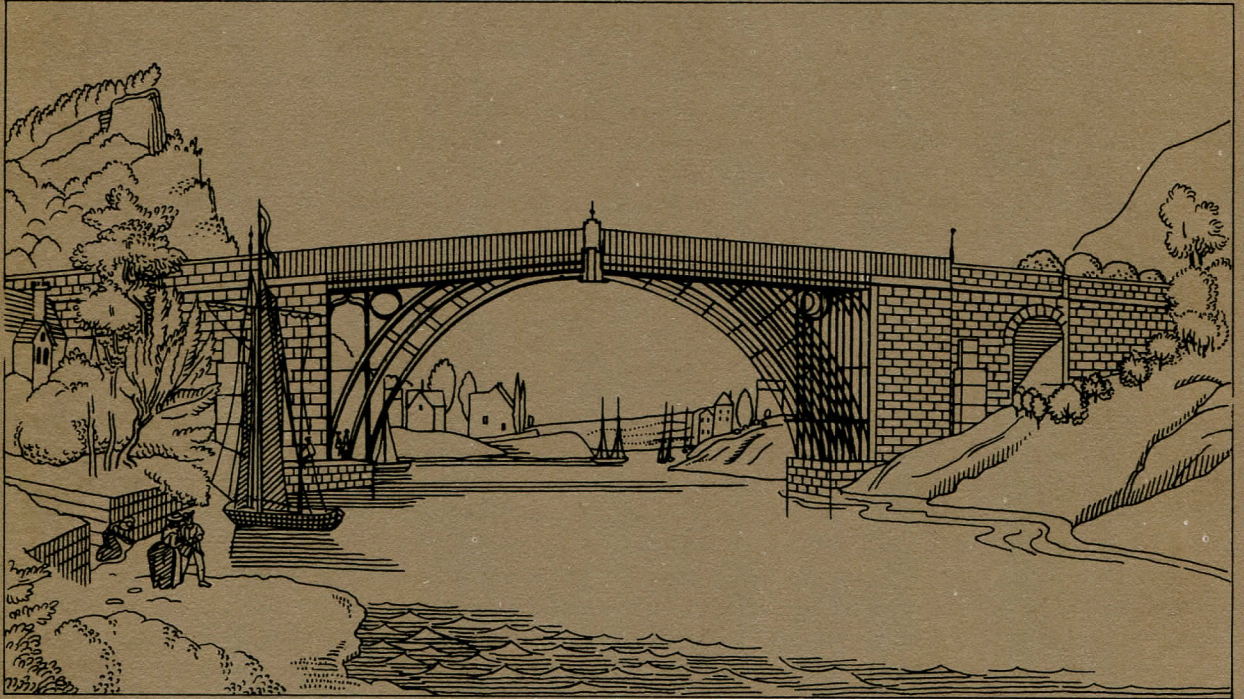
Werkstoffe, die höchsten Temperaturen und Drücken widerstehen, werden auch für Schaufeln von Gasturbinen, magnetohydrodynamischen Generatoren, Anlagen zur Synthese von Diamanten und in vielen anderen Zweigen der Technik gebraucht.

Die Kernenergietechnik benötigt Werkstoffe, die nicht nur bei hohen Temperaturen, sondern auch im Bereich durchdringender Strahlung und in aggressiven Medien stabil sind.

Die Medizin fordert von den Werkstoffen ganz besondere Qualitäten: Sie sollen nicht nur fest und stabil gegenüber den chemischen Wirkungen des lebenden Organismus sein, sondern auch gut mit ihm »zusammenwachsen«.

Auch wenn heute alle Bestrebungen dahin zielen, die wertvollen metallischen Werkstoffe sparsam zu verwenden, einzusparen und durch andere Werkstoffe – wie Glas, Keramik, Plaste – zu ersetzen, so muß doch jedes Gebiet der menschlichen Tätigkeit mit den dafür notwendigen metallischen Werkstoffen versorgt werden – das ist heute und in Zukunft die Hauptaufgabe der Metallurgen und Metallkundler.

Die Erfolge auf diesem Gebiet bestimmen das Entwicklungstempo der Metallurgie und der Werkstofftechnik, von dem die Entwicklung der gesamten Volkswirtschaft und damit auch das Lebensniveau eines jeden von uns abhängt.



Erste Gußeisenbrücke der Welt, 1779 erbaut über die Severn bei Coalbrookdale in Shropshire

Der Schlüssel zur Festigkeit

Eine traurige Chronik

Am frostigen 31. Januar des Jahres 1951 stürzte eine Autobrücke in Quebec (Kanada) zusammen, obwohl zu dieser Zeit nur ein einziges Fahrzeug über die Brücke fuhr. Drei Teile dieser Brücke mit je 54 m Länge fielen in den Fluß. Jeder wird denken, die Brücke war alt. Im Gegenteil, sie war erst 1947 für den Verkehr freigegeben worden.

In Belgien mußten von 52 geschweißten Brücken, die in den Jahren 1934 bis 1938 gebaut wurden, fast ein Fünftel bis 1940 gesperrt werden. Einige Brücken davon brachen völlig zusammen. Am 14. März 1938 stürzte eine Brücke, die gerade ein Jahr zuvor dem Verkehr übergeben worden war, mit 73,5 m Spannweite über dem Albert-Kanal nahe Hasselt ein.

Zwischen den Jahren 1947 und 1955 traten 14 weitere ähnliche Fälle auf.

Diese Beispiele aus Belgien sind leider keine Ausnahmen. Im Dezember 1951 brach in der ČSSR eine provisorische Eisenbahnbrücke von 12 m Spannweite nach der Überfahrt einer Lokomotive zusammen. Vor einigen Jahren stürzte die Reichsbrücke in Wien, ein wichtiger Teil der Verkehrsmagistrale, zusammen.

Die spektakulärsten Havarien dieser Art sind von amerikanischen Schiffen her bekannt, wo erstmalig in großem Umfang Schiffskörper geschweißt wurden.

Von 5000 während des zweiten Weltkrieges gebauten Handelsschiffen hatten bis zum April 1946 mehr als 1000 dieser Wasserfahrzeuge Risse. Zehn Tanker und drei Transporter eines bestimmten Typs brachen in der Mitte durch. Bei 25 anderen Schiffen wurden entweder die Decks oder die Böden der Schiffe vollständig zerstört. Andere Schiffe zeigten bereits Risse, bevor sie in

Dienst gestellt wurden. Im Januar 1943 brach bei ruhiger See am Kai der Schiffswerft während der Vorbereitungen zur Probefahrt der Tanker »Scanactady« mit 7230 t Wasserverdrängung entzwei.

Das gleiche Schicksal erlitt bei Windstärke 2 und leichter See sowie einer Geschwindigkeit von 14 Knoten der Tanker »Esso Manhattan« mit 10344 t Wasserverdrängung.

Im August 1964 stürzte eines der höchsten Bauwerke der Welt, der 400-m-Antennenmast am Südwestufer Grönlands, zusammen.

Vielen Lesern ist sicher aus der aktuellen Berichterstattung die bisher schwerste Katastrophe auf den Erdölfeldern der Nordsee noch in Erinnerung. Was war geschehen? Kurz nach Schichtschluß, in den Abendstunden des 27. März 1980, brach eine der fünf tragenden Säulen der fußballfeldgroßen, über 10000 t schweren Wohnplattform, der man den Namen des norwegischen Schriftstellers Alexander Kielland verliehen hatte, während eines Orkans ab. 123 Menschen kamen in den eisigen Fluten des Meeres 290 km südwestlich von Stavanger im sogenannten Ekofisk-Feld ums Leben. Die Wohnplattform war 1976 ursprünglich als Bohrinself auf einer französischen Werft bei Dünkirchen von der Compagnie Française d'Entreprise Métallique gebaut worden. Später erfolgte in Stavanger der Umbau zu einem schwimmenden Hotel. Das Deck ruhte auf fünf je 28 m hohen rohrförmigen Stützen, die von Pontons in stabiler Lage gehalten wurden. Eine der Säulen knickte plötzlich ab, und die Tragödie war nicht mehr aufzuhalten. Dabei ist dieser Unglücksfall beileibe nicht der einzige Vorfall dieser Art. Seit 1963 bis Anfang 1980 sollen etwa 300 Menschen bei Unfällen in den Erdölfeldern der Nordsee bei rauher See, Nebel und Kälte ums Leben gekommen

sein. Beispielsweise sank im März 1976 die norwegische Bohrinsel »The deep sea driller« mit sechs Bohrarbeitern ins Meer.

Natürlich wird der Leser nach den Ursachen dieser Katastrophen fragen. Warum können die Ingenieure, ausgerüstet mit allen Errungenschaften der modernen Wissenschaft, nicht genau die Festigkeit der Konstruktionen berechnen? Es zeigt sich, daß das gar nicht so einfach ist.

Fester, Immer fester

Die *Festigkeit der Metalle* hat eine entscheidende Bedeutung. Das Bronzezeitalter beendete die Steinzeit, weil die Bronze besser bearbeitbar und zäher als Stein war. Der Stahl löste die Bronze ab, da dieser sich als noch fester erwies. Heute werden aus einer Tonne Metall weit mehr Gegenstände als vor 50 Jahren hergestellt, weil es gelang, die Festigkeit wesentlich zu steigern.

Über ein Auto ist heute niemand mehr erstaunt. Doch moderne Autos verdienen tatsächlich, daß man sich über sie wundert. In einem Auto, das ohne Reparatur 50000 km zurückgelegt hat – und das ist heute schon keine Seltenheit mehr –, hat z. B. die Kurbelwelle mehr als 100000000 Umdrehungen gemacht. Dabei hat sie mehr als 7000 Stöße vom Kolben in jeder Minute erhalten. Die Welle eines elektrischen Gerätes rotiert mit 10000 bis 15000 Umdrehungen in der Minute. Es gibt Turbinen, die sogar mit 20000 und mehr Umdrehungen je Minute laufen. Diese Beispiele zeigen, welche Festigkeit diese Teile besitzen müssen. Doch für die Technik des kosmischen Zeitalters ist diese Festigkeit, von der noch unlängst die Ingenieure nur träumten, schon nicht mehr ausreichend.

Ein Strahltriebwerk ist um so leistungsfähiger und ökonomischer, je höher die Temperatur in seiner Brennkammer ist. Bisher wurde diese Temperatur noch künstlich gesenkt, weil noch keine Werkstoffe vorhanden waren, die hohe Belastungen bei 2000°C und höher längere Zeit aushielten.

Durch die Vergrößerung der Leistung der Aggregate steigt ihre Wirtschaftlichkeit stark an. So arbeitet z. B. im Kursker Kernkraftwerk ein 1000-MW-Block. Er ist wesentlich wirtschaftlicher als die bisher weit verbreiteten 440-MW-Blöcke.

Mit Erhöhung der Eintrittstemperatur des Gases vor der Turbine um je 50°C wächst der Wirkungsgrad der Turbine um 2 bis 3%. Dabei verringern sich die Masse und die Größe der Anlagen, d. h., es sinkt der Einsatz an Metall. So werden bei einer 10-MW-Turbine für jedes Kilowatt 10 kg Metall und bei einer 25-MW-Turbine nur noch 6 kg gebraucht. Damit sinkt auch der spezifische Brennstoffverbrauch. Hieraus erklärt sich das Streben der Konstrukteure, die Gastemperatur vor der Turbine zu erhöhen. Dazu werden aber Werkstoffe benötigt, die bei solchen Temperaturen beständig sind.

Obwohl die Metalle eine Reihe einzigartiger Eigenschaften besitzen (elektrische, magnetische u. a.), wird die Mehrzahl von ihnen dort eingesetzt, wo ihre hohe Festigkeit, d. h. die Fähigkeit, lange Zeit Verformungen unter Belastung zu widerstehen, erforderlich ist.

Wovon hängt die Festigkeit des Metalls nun ab? Was geht mit ihm unter Belastung vor sich? Um eine Antwort auf diese Fragen zu erhalten, wenden wir uns zunächst der Vergangenheit zu.

Das Geheimnis des Damaszener Stahls

Eine Damaszener Klinge durchdringt ein eisernes Kettenhemd, ohne stumpf zu werden, und dabei ist sie elastisch wie eine Weidengerte. Mit der Spitze fast zum Griff gebogen, bricht sie nicht, sondern streckt sich – freigegeben – mit leichtem Singen. So verhält sich echter Damaszener Stahl.

Seine Geburt liegt irgendwo im Dunkel der Jahrhunderte. Es gibt Hinweise, daß man ihn schon etwa 1300 Jahre v. u. Z. in Indien, Persien, Syrien und Ägypten herstellen konnte. Im Mittelalter wurden die Damaszener Klingen in Damaskus hergestellt, woher sich auch ihre Bezeichnung ableitet. Auch in Japan war die Herstellung eines solchen Stahls bekannt, davon zeugen die berühmten *Samurai-Schwerter*.

Das Geheimnis der Herstellung von Damaszener Klingen wurde vom Vater auf den Sohn vererbt, und nur sehr wenige kannten es. Doch selbst die Meister, die diese Klingen herstellten, waren sich nicht bewußt, warum sie Klingen mit eben diesen Eigenschaften erhielten. In der Chronik einer Kirche in Kleinasien wird im 9. Jahrhundert v. u. Z. die Verarbeitung des Damaszener Stahls folgendermaßen dargelegt: »Erhitzen, bis er leuchtet

wie die in der Wüste aufgehende Sonne, danach abkühlen bis zur Farbe des Zarenpurpurs, indem man ihn in den Körper eines muskulösen Sklaven versenkt ... Die Kraft des Sklaven, die in den Dolch übergeht, gibt auch dem Metall die Härte.«

Ein mittelalterliches Rezept ist weniger blutrünstig, doch nicht weniger sonderbar: Es wird empfohlen, das Härten der Klinge im »... Urin eines rothaarigen Knaben vorzunehmen«. (In diesem Rezept ist – nebenbeimemerkt – ein rationeller Kern: In einer Salzlösung verläuft das Härten besser als in Wasser.) Soweit die Legende!

Nach der Einführung der Feuerwaffen verloren die Damaszener Klingen ihre frühere Bedeutung, und das Geheimnis ihrer Herstellung ging verloren. Die zunehmende Entwicklung des Maschinenbaus in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts erforderte jedoch hochwertiges und dabei preiswertes Metall. Eine Vielzahl von Havarien und Katastrophen, z. B. im Verkehrswesen, in den Bergbauschächten, in der Militärtechnik, zeigten, daß eine unbedingte Notwendigkeit zur wissenschaftlichen Untersuchung der Eigenschaften und Anwendung der Metalle vorhanden war. Friedrich Engels charakterisierte in einer solchen Situation sehr treffend: »Hat die Gesellschaft ein technisches Bedürfnis, so hilft dies der Wissenschaft mehr als zehn Universitäten.«

Es war im Jahre 1820. In Indien interessierte sich der englische Reisende Scott für die Eigenschaften des indischen Stahls. Die Bohrer und Drehmeißel, Sägen und Feuerwaffen, die aus ihm hergestellt wurden, waren viel besser als die aus irgendeinem anderen Stahl. Scott kaufte in Bombay ein Schwert, brachte es in die Heimat mit und übergab es der Londoner Königlichen Gesellschaft (so heißt dort auch heute noch die Akademie der Wissenschaften). Mit der Untersuchung des Schwertes befaßte sich Faraday, der König des Experiments. Die chemische Analyse zeigte, daß die Legierung Aluminium enthielt. Lag dort das Geheimnis? Um das zu überprüfen, nahm Faraday englischen Stahliguß und schmolz ihn mit einem Gemisch von Eisen und Aluminium zusammen. Das schien erfolgreich zu sein – die Legierung erinnerte äußerlich sehr stark an Damaszener Stahl: Sie wies fast die gleiche Maserung auf, durch die sich der Damaszener Stahl von jedem anderen unterscheidet. Doch später zeigte sich, daß Faraday irrte – die Ähnlichkeit war rein äußerlich. Es gelang ihm nicht, Damaszener Stahl zu erzeugen.

1828 erfuhr der russische Eisenhüttenmann Anossow, der in Slatoust im Ural wirkte, von den Untersuchungen Faradays. Er fürchtete sich nicht, sich der Sache anzunehmen, mit der der berühmte Engländer nicht fertig geworden war. Wie auch Faraday begann Anossow mit der Suche nach dem »magischen« Zusatz, mit dem man in der Lage ist, einfachen Stahl in Damaszener Stahl umzuwandeln. Was er auch immer dem Stahl zusetzte – u. a. Silber, Gold, Platin und sogar Diamanten –, alles war vergebens. Damaszener Stahl wurde nicht daraus. Mit eben diesen anfangs erfolglosen Versuchen begann aber die systematische Ermittlung des Einflusses der unterschiedlichsten Zugaben auf die Eigenschaften von Stahl.

Bei seinen Untersuchungen verwendete Anossow ein Mikroskop. Versuche in dieser Richtung gab es schon vor ihm. Schon Hooke (1635 bis 1703) und nach ihm Réaumur studierten das Bruchgefüge von Eisensorten unter dem Mikroskop. Heute weiß jeder Werkstoff-Fachmann, daß es zur Erkundung des inneren Gefüges nicht genügt, das unpräparierte Stück Metall, z. B. eine Rasierklinge, unter das Mikroskop zu legen. Man sieht nichts weiter als die glänzende Oberfläche des Metalls. Um in das Innere einzudringen, muß die Metalloberfläche mit speziellen Säuregemischen angeätzt werden. Anossow gelang es, an so vorbehandeltem Damaszener Stahl Besonderheiten seines Gefüges zu beobachten. Auf diese Weise konnte er zeigen, daß sich die besten Stahlerzeugnisse ergeben, wenn die durch das Gefüge erzeugten Muster die Oberfläche als dichtes Netz oder in Wellenform bedecken.

Fünf Jahre lang setzte Anossow beharrlich seine zahllosen Versuche fort. Es zeigte sich, daß das Geheimnis des Damaszener Stahls nicht nur in der Zusammensetzung des Stahls selbst, sondern auch in der besonderen Herstellungstechnologie der Klingen lag. Die Meister aus Solingen, die einen berühmten Waffenstahl herstellten, glaubten das nicht. Daraufhin wurde ein »Wettkampf« der Stähle veranstaltet. Die Überlegenheit des Anossowschen Waffenstahls zeigte sich ganz augenscheinlich, die Slatouster Klinge schnitt die Klinge des deutschen Säbels mitten durch. 1841 erschien das Buch Anossows »Über den Waffenstahl«, in dem die Schlußfolgerungen aus den langjährigen Untersuchungen gezogen wurden.

Die Geburt der Metallographie

Aus ein und demselben Stahl erhielt man früher Kanonenrohre mit unterschiedlicher Haltbarkeit. Die einen hielten lange, die anderen platzten schon nach den ersten Schüssen. Warum? Diese Frage gab dem jungen Ingenieur Tschernow, der im Obuchowsker Werk in Petersburg arbeitete, keine Ruhe.

Ganze Tage, bisweilen auch Nächte verbrachte er in den Werkhallen und auf dem Artillerieschießplatz, in den mechanischen und chemischen Labors. Auf das sorgfältigste untersuchte Tschernow die Stellen, an denen die Geschützrohre gerissen waren, und bemerkte, daß das Metall der beständigeren Rohre feinkörnig, das der schnell reißenden grobkörnig war.

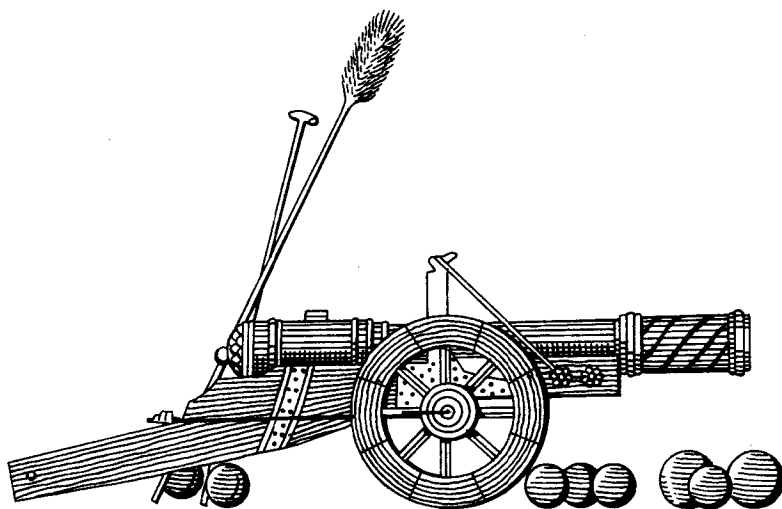
Wie kann aber ein Metall gleicher chemischer Zusammensetzung unterschiedliche Strukturen aufweisen?

Es ist klar, daß dies nur durch seine Herstellung oder Bearbeitung erfolgen kann. Tschernow stellte sich die schwierige Aufgabe, solche Behandlungsverfahren zu finden, bei denen alle Kanonenrohre höchste Qualität aufweisen.

Tschernow schmiedete Stahlblöcke bei verschiedenen Glühfarben von dunkelroter bis blendend heller Glut. Nach dem Erkalten bestimmte er ihre Festigkeit auf der Zerreißmaschine. Und so fand er die günstigste Temperaturführung, bei der die Erzeugnisse am festesten waren. Doch der Gelehrte blieb dabei nicht stehen. Er suchte beharrlich Antwort auf die Frage, was denn im Metall während der *Wärmebehandlung* vor sich geht.

Über die Ergebnisse seiner zweijährigen Untersuchungen berichtete Tschernow 1868 auf den Sitzungen der Russischen Technischen Gesellschaft. Außer dem Schmelzpunkt (er bezeichnete ihn mit dem Buchstaben c) fand Tschernow noch zwei Punkte, an denen sich die Eigenschaften des Stahls stark geändert hatten. Der erste von ihm Punkt a genannt, entspricht dunklem Kirschrot, der zweite – Punkt b – hellem Rot. Der Gelehrte bezeichnete sie als kritische Punkte.

Heute werden die kritischen Punkte, bei denen *Phasenumwandlungen* bzw. die Änderung der magnetischen Eigenschaften vorkommen, international einheitlich mit A, abgeleitet aus dem Französischen von »arret« für Haltepunkt, bezeichnet. Diejenigen Haltepunkte, die



Geschütz
des 16. Jahrhunderts

für die Abkühlung gültig sind, werden mit dem Index r versehen, wogegen die beim Erwärmen registrierten Haltepunkte mit c als Index gekennzeichnet werden. Diese Kennzeichen sind die Anfangsbuchstaben der französischen Wörter »refroidissement« und »chauffage« für Abkühlung und Erwärmung. Damit man die Haltepunkte untereinander nicht verwechselt, erhält ihre Bezeichnung – auch das ist international einheitlich – noch eine Zählnummer als Index. Beim reinen Eisen kennt man, vom Schmelz- bzw. Erstarrungspunkt einmal abgesehen, die Haltepunkte A_{c2} , A_{c3} , A_{c4} , A_{r2} , A_{r3} und A_{r4} . Dabei sind die in dieser Reihe noch fehlenden Punkte A_{c1} und A_{r1} nicht etwa vergessen worden, sondern es sind Haltepunkte, die es beim reinen Eisen nicht gibt. Sie kommen bei Eisen-Kohlenstoff-Legierungen zu den obengenannten noch hinzu. Schon sehr lange weiß man, daß die zuletzt angeführten Punkte bei etwa 700°C liegen und die anderen bei zum Teil weit höheren Temperaturen.

Daß geglühter Stahl bei schroffer Abkühlung viel härter wird, als er vorher war, wußte man schon im Altertum. Die große Bedeutung der gefundenen Punkte liegt jedoch darin, daß es nun möglich ist, mit ihrer genauen Kenntnis dem Stahl durch eine richtige Wärmebehandlung die optimalen Eigenschaften zu verleihen. Auch gegossener Stahl kann eine feinkörnige Struktur erhalten, wenn seine Wärmebehandlung richtig gewählt wird.

Gewöhnlich treten im *Stahlguß* viele Gasblasen, Fehlstellen und *Lunker* auf, die den Metallverband schwächen. Beim Schmieden werden sie zusammengedrückt und verschweißt. »Gäbe es diese Fehlstellen, wie Gasblasen und Lunker, nicht, könnte man geradewegs die Geschützrohre aus Stahl in eine Form abgießen, wie man es mit Gußeisen macht«, schrieb Tschernow, und damit hatte er völlig recht.

Heute gibt es Verfahren zur Herstellung von Guß fast ohne Gasblasen und Lunker. Für bestimmte Anwendungsfälle kann man deshalb auf das aufwendige Schmieden, das teure Anlagen und zusätzliche Energie erfordert, verzichten.

Tschernow jedoch setzte seine Untersuchungen fort. 1878 trug er der Russischen Technischen Gesellschaft Ergebnisse seiner Arbeit »Untersuchungen zur Struktur gegossener Stahlblöcke« vor, die die Schlußfolgerungen aus den Untersuchungen des Erstarrungsvorgangs und der Struktur des Stahlblockes zog.

Bei der Erstarrung einer Metallschmelze bilden sich an vielen Stellen einzelne kleine Kristallite – sogenannte *Dendriten*.

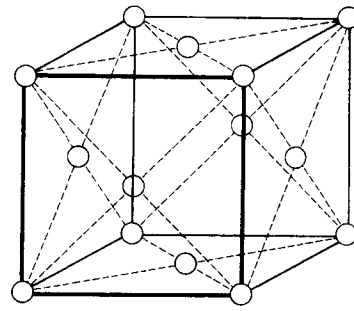
Während des Wachstums berühren und verzahnen sich die Dendriten und bilden auf diese Weise den festen Körper. Da beim Übergang flüssig-fest eine Volumenverringerung auftritt, kann man sich leicht vorstellen, daß zwischen den Dendritenästen auch kleine Hohlräume verbleiben.

Bei der Erstarrung bildet sich außerdem eine Vielzahl von Gasbläschen, weil die Löslichkeit verschiedener Gase im festen Metall viel kleiner als im flüssigen ist und der Gasüberschuß während der Kristallisation ausgeschieden wird. Dieser entweicht zum Teil in die Atmosphäre, während ein Teil im erstarrten Metall in Form von Gasblasen verbleibt.

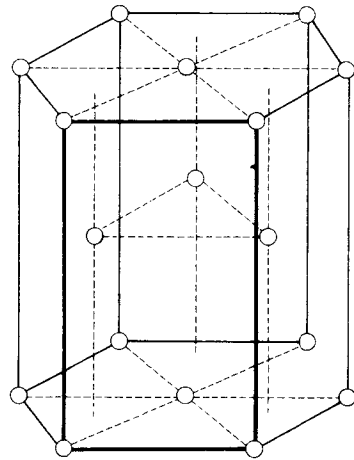
Tschernow gab nicht nur eine Analyse der wichtigsten Fehler von Stahlblöcken, sondern entwarf auch Verfahren zu ihrer Bekämpfung. Er schrieb zum Beispiel: »... Wenn der Stahl in flüssiger Form einem hohen Druck ausgesetzt wird, erhält man blasenlose und lunckerfreie Blöcke der einfachsten Formen; für die Weiterverarbeitung sind Hämmer oder Walzwerke erforderlich. Wenn auf chemischem Weg die Gasausscheidung im abgegossenen Stahl unterbrochen wird, erhält man Stahlerzeugnisse verschiedenster Form durch direkten Guß in keramische oder metallische Formen, ohne weitere Bearbeitung unter dem Hammer.«

Tschernow gab auch eine wissenschaftliche Erklärung der bemerkenswerten Eigenschaften von Damaszener Klingen. Wenn Stahl erstarrt, dann entstehen zuerst die Dendritenäste. Sie haben eine andere chemische Zusammensetzung, z. B. einen geringeren Kohlenstoffgehalt, als die später fest werdenden Metallanteile. Auf diese Weise entsteht ein feines Geflecht von unterschiedlich zusammengesetztem Metall. Damaszener Stahl wird so geschmiedet, daß die Dendriten nicht zerstört, sondern nur verformt werden. Beim Abschrecken erhalten nun die kohlenstoffreicheren Gebiete des Stahls eine wesentlich höhere Härte als die kohlenstoffärmeren. Weil jedoch hart und weich in sehr dünnen Schichten eng miteinander verflochten ist, ergibt sich ein Material, das gleichzeitig sowohl große Härte als auch große Zähigkeit besitzt. Es bestätigte sich so die Annahme Anosows, daß das charakteristische Muster des Damaszener Stahls seinen Aufbau widerspiegelt.

Natürlich hat es auch in anderen Ländern Bemühungen um die Entwicklung metallographischer Prüfverfahren und die Erkundung metallischer Strukturen gegeben. Sehr zeitig waren auf diesem Gebiet unter anderen v. Widmanstätten, der schon 1808 das Gefüge von Eisenmeteoriten untersuchte, der Engländer Sorby, der einer Sheffielder Messerschmiedfamilie entstammte und 1864 mit den positiven Ergebnissen seiner Arbeit an die Öffentlichkeit trat, und Martens erfolgreich tätig, dessen Verdienste um die Entwicklung von leistungsfähigen Metallmikroskopen auf das Jahr 1878 zurückgehen. Ihr Wirken wurde dadurch geehrt, daß man charakteristische Gefüge von Eisenlegierungen (*Ferrit* bzw. *Zementit* in Widmanstätterscher Anordnung, *Sorbit* und *Martensit*) nach ihnen benannte. Eine ähnliche bleibende Ehrung für seine wissenschaftlichen Leistungen hat auch der erste Professor für Eisenhüttenkunde und mechanisch-metallurgische Technologie an der Bergakademie Freiberg, Ledebur (1837 bis 1906), durch die Benennung der eutektischen Phase in Eisen-Kohlenstoff-Legierungen in *Ledeburit* erfahren. Nachdem der amerikanische Physiker Gibbs (1837 bis 1903) die Grundlagen für die Lehre vom heterogenen Gleichgewicht erarbeitet hatte, gelang es Osmond, Roberts-Austen, Bakhuis-Roozeboom und Heyn, die relativ komplizierten Strukturbildungen bei Eisen-Kohlenstoff-Legierungen aufzuklären. Bakhuis-Roozeboom stellte 1900 die erste Form des Eisen-Kohlenstoff-Diagramms auf, das heute zum unabdingbaren Grundwissen eines jeden Werkstofftechniklers gehört.



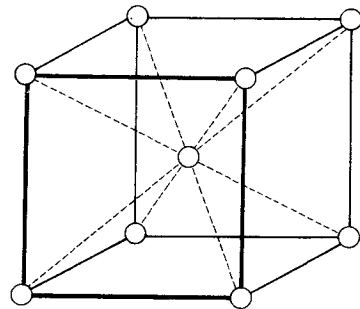
Kubisch-flächenzentrierte Elementarzelle



Hexagonale Elementarzelle

Atome in Reih und Glied

»Die gesamte Bearbeitung des Metalls wird ausschließlich durch die Kristalle bestimmt, aus denen das Metall besteht«, schrieb Tschernow. Um zu begreifen, worin das Geheimnis der Festigkeit der Metalle und Legierungen besteht, müssen wir uns näher mit dem Aufbau der Kristalle befassen, der im 20. Jahrhundert mit Hilfe von Röntgenstrahlen, des Elektronenmikroskops, der Methode der markierten Atome, mit Ultraschall und anderen modernen Untersuchungsmethoden detailliert aufgeklärt wurde. So ermöglichte es die Röntgenfeinstrukturanalyse, die Symmetrie des *Kristallgitters* jedes Stoffs und die relative Lage der Atome in ihm zu bestimmen.



Kubisch-raumzentrierte Elementarzelle

Auf dieser Grundlage konnten anschauliche Modelle der Kristalle verschiedener Stoffe entworfen werden. Im festen Zustand bestehen Metalle aus Atomen bzw. Ionen, die man sich vereinfacht kugelförmig vorstellen kann. Sie sind so angeordnet, daß sie einen optimalen gegenseitigen Elektronenaustausch gewährleisten (dabei hat das gesamte System die geringste innere Energie). Die Bedingungen für einen solchen Elektronenaustausch sind meist um so besser, je dichter die Atome zusammenliegen. Die dichtesten Anordnungen von Kugeln sind die *kubisch-flächenzentrierte* und die *hexagonale*. In beiden Fällen werden in den Modellen solcher Kristalle 74% des Volumens von den angenommenen Kugeln ausgefüllt.

Die Mehrzahl der Metalle weist eben solche Anordnungen der Atome auf: Kubisch-flächenzentriert sind Aluminium, Kupfer, Blei, Nickel, Gold, Silber, Platin u. a.; hexagonal sind Magnesium, Zink, Kadmium, Beryllium u. a.

Viele Metalle haben ein *kubisch-raumzentriertes Gitter*, bei dem die angenommenen Kugeln 68% des Volumens ausfüllen. Dazu gehören Lithium, Chrom (Chromium), Vanadium, Molybdän, Wolfram u. a.

So wie eine Tapete eine vielfache Wiederholung ein und desselben Musters ist, so stellt auch ein Kristall eine vielfache Wiederholung ein und derselben Elementarzelle dar. Wenn Sie wollen, so ist ein Kristall eine „räumliche Tapete“, bei der sich das Muster – die Elementarzelle – in allen Richtungen wiederholt.

Energetisch günstige Lagen haben die Atome nur in den Eckpunkten des Kristallgitters. Die Wechselwirkung zwischen zwei benachbarten Atomen kann man sehr anschaulich durch folgendes Modell illustrieren: Zwei Kugeln werden durch Gummischnüre zueinandergezogen und durch eine Druckfeder voneinander ferngehalten. Wenn Zug und Druck im Gleichgewicht stehen, befinden sich die Kugeln in einem bestimmten konstanten Abstand voneinander. Jede Verschiebung der Kugeln aus dieser Gleichgewichtslage erfordert einen Energieaufwand, um die Gegenwirkung der Gummischnüre oder der Druckfeder zu überwinden. Im Kristallgitter wirken ebenfalls Anziehungs- und Abstoßungskräfte zwischen den Atomen. Sie streben danach, die Atome in die Ausgangslage zurückzusetzen, wie die Gummischnüre und die Druckfeder die Kugeln in unserem Modell. Sie zwingen die von ihren Plätzen verschobenen Atome zu-

rück in die Ausgangslage. Dieses Verhalten ist charakteristisch für Metalle bei der elastischen Verformung. Wir wissen schon, daß bei der Erstarrung eines Metalls die Kristallisation gleichzeitig an verschiedenen Stellen beginnt. Die Dendriten breiten sich nach allen Seiten aus. Durch ihr Zusammenwachsen entstehen schließlich Kristallite, deren Gitter verschiedene räumliche Orientierungen aufweisen. Die Atome, die sich in den Grenzbereichen befinden, unterliegen im gleichen Maße dem Einfluß der Kristallgitter der benachbarten Körner und ordnen sich so an, daß die minimale Wechselwirkungsenergie nicht nur nach innen, sondern auch mit den Atomen der Nachbarn erreicht wird. Diese Grenz-zonen, die sogenannten Korngrenzen, bestimmen wesentlich die Eigenschaften des gesamten Metallvolumens. Das hat nicht nur seine Ursache in der beschriebenen Besonderheit der Wechselwirkungen zwischen den Atomen. Es sammeln sich nämlich an den Korngrenzen verschiedene Verunreinigungen an. Gerade dort bilden sich auch oft Gasblasen. Dies alles schwächt die Bindung der Körner untereinander noch weiter. Daher wird ein verunreinigtes Metall unter Last ziemlich leicht entlang den Korngrenzen zerstört.

Nach plastischer Verformung und Wärmebehandlung ist das Metall fester als im gegossenen Zustand. Eine plastische Verformung ist auch bei kristallinen Körpern möglich. Es erfolgt dabei ein Übergang einer größeren Gruppe von Atomen aus einer Gleichgewichtslage in eine andere. Diese Verschiebung erfolgt nur in bestimmten, am dichtesten mit Atomen besetzten kristallographischen Ebenen, die sich relativ zueinander verschieben wie Karten in einem Kartenstoß.

Die plastische Verformung bei Metallen ist ein komplizierter Prozeß: Er verändert nicht nur Maße und Form, sondern auch die physikalischen Eigenschaften des bearbeiteten Metalls.

Der ideale Kristall ist nur ein Modell des Kristallgitters. Er weist keine Störungen im Aufbau auf und ist ideal symmetrisch. Der Bau tatsächlich existierender realer Kristalle ist dagegen weit von der Vollkommenheit entfernt. Warum das so ist, versuchen wir mit folgendem Beispiel zu erklären:

Als Sie in der Kindheit einen Turm aus Bauklötzern gebaut haben, hat Sie wahrscheinlich oft geärgert, daß es Ihnen nicht gelang, einen sehr hohen Turm zu errichten. Während Sie auf den ersten Klotz den zweiten, auf den

zweiten den dritten, auf den dritten den vierten legten, schien der Bau sehr stabil zu sein. Doch mit Hinzufügen des siebenten, des zehnten oder zwanzigsten Bausteins begann der Turm zu schwanken. Wie vorsichtig Sie auch immer Klotz auf Klotz gelegt hatten, früher oder später wurde Ihr Turm instabil und stürzte zusammen. Nichts anderes erfolgt beim Wachstum der Kristalle. Solange sich das hundertste, tausendste, zehntausendste Atom anlagert, wird im Kristallgitter die ideale Anordnung eingehalten. Doch, beginnend mit irgendeinem zwölf- oder fünfzehntausendsten Atom, treten anfangs unbedeutende, nicht erfaßbare, dann aber zunehmend deutliche Abweichungen auf: Dort hat ein Atom nicht seinen richtigen Platz eingenommen; da, wo ein Atom sein sollte, ist nichts; an anderer Stelle vereinigt sich ein ideal aufgebauter Teil eines Kristalls mit einem anderen ideal gebauten Teil nicht ganz genau, und schon ergibt sich eine kleine Verschiebung. Doch auch kleine Verschiebungen können im Zusammenwirken zu sehr bedeutenden Verzerrungen des Kristallgitters führen. Ein ideales Metall, d. h. ein Metall, das nicht nur frei von Beimengungen ist, sondern auch keinerlei Gitterdefekte aufweist, das ist ebenso eine Abstraktion wie z. B. eine ideale Kugel in der Geometrie.

Welche physikalischen Ursachen sind für das Entstehen von Fehlern im Metallgitter verantwortlich?

Die Atome, die das Kristallgitter bilden, sind nicht unbeweglich. Sie schwingen mit um so größerer Amplitude, je höher die Temperatur ist. Diese Bewegung hört sogar in der Nähe des absoluten Nullpunkts nicht auf. Mit Erhöhung der Temperatur vergrößert sich die Energie der Mehrzahl der Atome. Infolge Wechselwirkung zwischen den Atomen können einige von ihnen eine so große Energie aufnehmen, daß sie die Gleichgewichtslage verlassen. Danach wandern sie entweder innerhalb des Kristallgitters oder verdampfen von der Metalloberfläche in den umgebenden Raum. Die im Kristallgitter wandernden Atome nennt man »versetzte« oder »dislozierte« Atome, den leeren Platz, von dem das Atom verschwunden ist, Leerstelle.

Nahe der Schmelztemperatur erreicht die Zahl der »versetzten« Atome 1 bis 2 % ihrer Gesamtzahl. Nicht nur ein versetztes Atom, sondern auch eine Leerstelle kann sich durch das Gitter bewegen. Zum besseren Verständnis stellen Sie sich vor, daß – sagen wir – in der 10. Reihe eines Kinosalles ein Platz in der Mitte frei ist.

Wenn jeder Zuschauer dieser Reihe links oder rechts davon beginnt, auf den freien Platz zu rücken, so sieht das so aus, als ob sich der freie Platz bis zum äußersten Rand dieser Reihe bewegt. Ebenso bewegen sich Leerstellen durch das Metallgitter, bis sie an die Oberfläche des Kristalls gelangen.

Außerdem wird das Kristallgitter durch die Einlagerung von Atomen aller möglichen Beimengungen verzerrt, die ebenfalls nicht unbeweglich sind. Da die Atome sehr klein sind, führt bereits ein geringer Prozentgehalt an Beimengungen zu erheblichen Gitterverzerrungen, und es ist nicht erstaunlich, daß diese sehr stark die Eigenschaften des Materials beeinflussen. Zum Beispiel sind 0,005 % Schwefel im Nickel ausreichend, um das im reinen Zustand plastische Metall zu verspröden. Es genügen 0,001 % Wasserstoff im Eisen, damit es schon bei Raumtemperatur spröde wird, während Reinst Eisen sogar bei der Siedetemperatur des flüssigen Heliums ($-268,8^{\circ}\text{C}$) plastisch bleibt. Geringste Spuren von Kohlenstoff rufen bei Wolfram und Molybdän Sprödigkeit hervor. Die Eigenschaften von Halbleitergermanium ändern sich sogar dann, wenn nur ein Atom einer Beimengung auf eine Milliarde Germaniumatome kommt.

Die Festigkeit und andere Eigenschaften einiger Metalle werden noch durch eine interessante Besonderheit – nämlich ihre Fähigkeit zur Ausbildung verschiedener kristalliner Strukturen in Abhängigkeit von den äußeren Bedingungen (Temperatur, Druck usw.) – beeinflusst.

Die Metall-»Chamäleons«

Die Expedition des englischen Polarforschers Scott (nicht mit dem schon erwähnten Scott zu verwechseln) zog zum Südpol. Auf dem Rückweg kamen alle Expeditionsteilnehmer ums Leben. Einer der Gründe für diese Tragödie war das Zinn – gewöhnliches Zinn, mit dem die Brennstoffkanister verlötet waren. Bei der strengen arktischen Kälte hatte sich das weiße Zinn in ein graues Pulver verwandelt, und der gesamte Brennstoff war aus den schadhaft gewordenen Kanistern ausgelaufen. Die Expedition hatte keine Wärme und kein Licht. Ihr Schicksal war besiegt ...

Dabei ereignete sich ein völlig gesetzmäßiger Vorgang:

Unter dem Einfluß der tiefen Temperaturen nahm das

Zinn eine neue Kristallstruktur an, d. h., seine Atome ordneten sich zu Kristallen einer anderen Symmetrie um. Wir erinnern uns, daß sich auch der Diamant vom Graphit nur durch die Symmetrie des Kristallgitters unterscheidet, in dem die Kohlenstoffatome angeordnet sind.

Etwa die Hälfte aller Metalle kann in Abhängigkeit von der Temperatur verschieden kristallisieren. Die Kristalle des weißen Zinns sind bei einer Temperatur oberhalb 18°C stabil. Diese Form des Zinns kann sich langsam in die graue verwandeln, wenn die Temperatur geringfügig tiefer liegt und wenigstens ein mikroskopisches Teilchen grauen Zinns vorhanden ist. Wenn solch ein Keim fehlt, dann erfolgt die Umwandlung selbst bei -20°C nicht. Bei sehr tiefen Temperaturen kann allerdings die Umwandlung auch ohne eine derartige Starthilfe erfolgen.

Die »Zinnpest« war schon lange bekannt, und Pest wurde sie nicht umsonst genannt: Die »Krankheit« ist tatsächlich ansteckend. Es genügt, wenn ein mikroskopisches Teilchen grauen Zinns auf weißes Zinn gelangt, und schon beginnt in einem kalten Raum die »Epidemie«.

Noch interessanter ist die Umwandlung des *amorphen* Antimons (das man durch Elektrolyse seiner Salze erhält) in *metallisches*. Sie erfolgt explosionsartig! Die Umkristallisation verläuft so schnell, und dabei wird soviel Wärme frei, daß das Metall zerstäubt.

Die Fähigkeit bestimmter Metalle, in Abhängigkeit von Temperatur, Druck und anderen äußeren Bedingungen unterschiedlich zu kristallisieren, wurde 1822 erstmalig von Mitscherlich beobachtet. In der Folgezeit wurde diese Eigenschaft Polymorphie genannt.

Die verschiedenen kristallinen Zustände (man bezeichnet sie auch als Modifikationen) ein und desselben Elements werden üblicherweise mit den Buchstaben des griechischen Alphabets bezeichnet. Mit dem Buchstaben »Alpha« wird die Form benannt, die bei der tiefsten Temperatur stabil ist; mit »Beta«, »Gamma« usw. folgen in der Reihe steigender Temperaturen die weiteren Formen.

Die polymorphen Metalle – Titan (Titanium), Zirkon (Zirkonium), Hafnium, Skandium, Eisen, Mangan und einige andere – weisen trotz ihrer relativ hohen Schmelztemperatur keine besonders hohe *Warmfestigkeit* auf. Das liegt daran, daß die Metall-»Chamäleons« nach der Umkristallisation, die bei wesentlich tieferen Temperaturen als der Schmelztemperatur erfolgen

kann, merklich in der Fähigkeit nachlassen, bei höheren Temperaturen äußere Kräfte zu übertragen. Eben darum können Legierungen auf der Basis von Nickel, das keinen Polymorphismus aufweist, lange Zeit bei Temperaturen über 900°C arbeiten, während Legierungen auf der Basis der oben aufgezählten Elemente, die zwar bei höheren Temperaturen schmelzen, aber Umwandlungen unterliegen, höchstens noch bei 600 bis 700°C brauchbar sind. Wie wir sehen, ist für die Metall-»Chamäleons« die Umkristallisationstemperatur daher ein eher zutreffender Kennwert für die Warmfestigkeit als die Schmelztemperatur.

Bei hohen Temperaturen weisen die Metall-»Chamäleons« immer einfachere Kristallgitter als bei niedrigen auf: ausschließlich kubisch-raumzentrierte und kubisch-flächenzentrierte. Diese Gitter sind am günstigsten für die plastische Deformation, d. h. die Verschiebung der Atome relativ zueinander ohne Zerstörung der Bindung zwischen ihnen. Auf dieser Basis wurde 1950 von Sawitzkij die »Plastizitätsregel« formuliert. Nach ihr haben die bei der höchsten Temperatur beständigen Formen aller polymorphen Metalle die beste Eignung zur plastischen Verformung.

Die Erhöhung der Plastizität der Metalle durch einen polymorphen Übergang ist besonders wirksam in den Fällen, in denen die bei tieferer Temperatur beständige Phase ein kompliziertes Kristallgitter aufweist. Beispielsweise besteht bei Alpha-Mangan, das unterhalb 705°C stabil ist, die Elementarzelle aus 58 Atomen. Das Alpha-Mangan ist hart und spröde. Das bei hohen Temperaturen existierende Gamma-Mangan hat dagegen ein einfaches kubisch-raumzentriertes Gitter und ist sehr plastisch. Ebenso ist es beim Uran. Seine bei tieferen Temperaturen beständige Alpha-Phase mit einem komplizierten rhomboedrischen Gitter ist ziemlich spröde, während die bei höheren Temperaturen (über 775°C) existente kubische Gamma-Modifikation in ihrer Verformungsfähigkeit mit einem teigigen Material verglichen werden kann. Als letztes Beispiel sei das schon erwähnte Zinn genannt. Oberhalb von 18°C ist es plastisch, während das sich durch die »Zinnpest« bildende graue Zinn schon nicht mehr zu den Metallen, sondern zu den Halbleitern gehört und die Form eines harten, spröden Pulvers annimmt.

Die Plastizitätsregel weist auch einen Weg, wie man aus einem bei normalen Bedingungen spröden, poly-

morphen Metall einen plastischen Werkstoff erhalten kann. Man muß das Metall mit solchen Elementen legieren (dieser Begriff entstammt dem Lateinischen und bedeutet »binden« bzw. »vereinigen«), die seine Hochtemperaturmodifikation bei Verformungstemperatur beständig machen.

Auf diese Weise erhielt man z. B. schon 1906 das sogenannte schmiedbare Mangan, indem man demselben 3% Kupfer zusetzte. Nachfolgende Untersuchungen haben gezeigt, daß das Kupfer die plastische Gamma-Modifikation des Mangans stabilisiert. Analog wirken auf Mangan auch Zusätze anderer Metalle, wie Eisen, Nickel und Zink. Wenn man dem Zinn z. B. Wismut (Bismut) zusetzt, kann die Zinnpest nicht mehr auftreten.

Eine überaus wichtige Besonderheit der polymorphen Metalle, die umfangreich in der Technik ausgenutzt wird, ist die unterschiedliche Fähigkeit ihrer Modifikationen, andere Elemente zu lösen. Die wichtigsten Wärmebehandlungen des Stahls beruhen z. B. auf der unterschiedlichen Fähigkeit der Eisenmodifikationen, Kohlenstoff und Legierungselemente zu lösen.

Die polymorphen Metalle weisen in den verschiedenen Modifikationen unterschiedliche physikalische Eigenschaften auf (elektrischer Widerstand, Wärmeausdehnung, magnetische und andere Eigenschaften). Daraus ergibt sich die Möglichkeit, Legierungen mit vorgegebenen physikalischen Eigenschaften zu entwickeln, indem man mit verschiedenen Zusätzen die bei hoher oder auch bei tiefer Temperatur beständige Form stabilisiert.

Die Erscheinung der Polymorphie (Bildung unterschiedlicher Kristallstrukturen bei verschiedenen Druck- und Temperaturbedingungen) tritt nicht nur in der anorganischen, sondern auch in der Pflanzenwelt auf. Rekordinhaber ist hier der Kampferr, der elf verschiedene polymorphe Modifikationen aufweist.

Man kann diese Erscheinung bisher noch nicht in allen Einzelheiten erklären, so auch, warum die polymorphen Metalle vorwiegend unter den Elementen der Gruppen II, III, IV, VII und VIII des Periodensystems der Elemente auftreten und in den Gruppen V und VI fehlen. Unbestreitbar ist jedoch eine enge Verbindung zwischen der Polymorphie und der Veränderung der *Elektronenstruktur* der polymorphen Metalle, die von Veränderungen der Temperatur, des Druckes oder der Konzentration an Beimengungen abhängt.

Am Schreibtisch gefunden

Wie bereits erwähnt, schwächen Fehler im Kristallgitter das Metall. Da es undenkbar erschien, sie vollständig zu beseitigen, begannen viele zu vermuten, daß die Festigkeitsreserven der Metalle schon erschöpft seien. Tatsächlich verlangsamte sich der durch metallurgische Maßnahmen erreichte Anstieg der Festigkeit der Metalle so, als ob er sich einem Grenzwert näherte. Doch es vergingen nur wenige Jahre, und die Erfolge der Festkörperphysik und insbesondere der Metallphysik eröffneten neue Perspektiven für eine Steigerung der Festigkeit. Es begann mit der Berechnung der idealen, theoretisch möglichen Festigkeit der Metalle. Um einen Kristall zu zerstören, müssen die Atome voneinander losgerissen oder wenigstens gegeneinander bewegt werden. Sowohl in dem einen wie im anderen Fall sind die Bindungskräfte zwischen den Atomen zu überwinden. Die Festigkeit des Metalls sollte daher dem Produkt der atomaren Bindungskräfte je Atom und der Anzahl der Atome in der Trennfläche des Kristalls proportional sein. Die Wissenschaftler berechneten sie und waren sehr überrascht: Die theoretische Festigkeit der Metalle lag um zwei, ja sogar drei Zehnerpotenzen höher als die tatsächlich gemessenen Werte.

Zunächst nahm man an, daß in der Rechnung ein Fehler verborgen sei, daß die atomaren Bindungskräfte zu hoch angenommen worden seien. Dies war aber nicht der Fall. Es half auch nicht der Versuch, die mangelnde Übereinstimmung von idealer und realer Festigkeit durch die uns schon bekannten Leerstellen des Kristalls zu erklären, die die atomaren Bindungskräfte verringern. Diese Defekte können den Kristall nur dann entscheidend schwächen, wenn sie fast das gesamte Volumen des Metalls einnehmen. Das Metall wäre dann poriger als ein Schwamm.

Eine Lösung des Widerspruchs wurde nicht gleich gefunden. In den dreißiger Jahren unseres Jahrhunderts nahmen unabhängig voneinander die Physiker Taylor, Orowan, Polani und Frenkel an, daß der Kristall nicht gleichzeitig über seinen gesamten Querschnitt gleitet bzw. sich trennt, sondern durch ihn gleichsam »Wellen« elementarer Gleitschritte verlaufen, von denen jede, wenn sie an die Oberfläche austritt, eine Verschiebung um eine Gitterperiode bewirkt, d. h. um einen Atomdurchmesser, eine Stufe einer Atomschicht.

Die »wellenförmige« Bewegung ist so zu verstehen, daß nicht alle Atome einer Gleitebene gleichzeitig ihren gegenüberliegenden Nachbarn wechseln, sondern nur ein Teil davon. Dies ist nur vorstellbar, wenn im Kristallgitter bestimmte Fehler vorliegen. Wir könnten uns z. B. vorstellen, daß in einem Teil eines Kristalls eine mit Atomen besetzte Fläche mehr vorhanden ist als in anderen Teilen. Natürlich stört diese Ebene die Gittergeometrie. In dem einen Teil des Kristalls sind die Abstände größer, im anderen kleiner. Besonders am Rande dieser zusätzlichen Ebene wird die Störung am deutlichsten. Sie zieht sich als Linie durch das Kristallgitter und sei als Versetzung bezeichnet. Liegt ein solcher Rand, d. h. die Versetzungslinie, in einer Gleitebene, kann man sich vorstellen, daß eine äußere Spannung sie auf ihr entlang bewegt und damit die zusätzliche Ebene an den Rand des Kristalls treibt. Auf diese Weise wird ein elementarer Gleitschritt nach dem eingangs beschriebenen Mechanismus realisiert. Der vorher erwähnte Ansatz zur Berechnung trifft dann nicht mehr zu. Nicht alle Atome einer Gleitebene, sondern nur ein sehr geringer Anteil muß zu einem bestimmten Zeitpunkt die atomaren Bindungskräfte zu den Nachbarn überwinden. Damit wäre der Widerspruch gelöst. Ein sehr anschauliches Bild von diesem Vorgang gab der amerikanische Wissenschaftler Mott. Er verglich die Abscherung einer Gleitebene mit der Bewegung eines Teppichs. Wenn man den völlig eben aufliegenden Teppich verrücken will, ist eine große Kraft notwendig. Legt man aber eine Falte, so läßt diese sich ohne große Anstrengung in die gewünschte »Gleitrichtung« streichen. So wie eine größere Verschiebung des Teppichs nun mehrere Falten erfordert, ist eine makroskopische Verformung des Kristalls aus vielen aufeinanderfolgenden elementaren Gleitschritten denkbar.

Anfangs hatte diese Auffassung viele Kritiker, aber nachdem es gelang, Versetzungen im Kristall direkt nachzuweisen, ist die Versetzungstheorie ein wichtiger Bestandteil der Metallphysik geworden.

Versetzungen entstehen schon während des Kristallwachstums. Auf jeden Quadratzentimeter eines Realkristalls entfallen 1 000 000 bis 100 000 000. Während der Verformung steigt ihre Zahl sogar noch auf mehr als das 1000fache.

Die Versetzungstheorie erlaubt eine ganz neue Fragestellung, wie die Festigkeit der Metalle zu erhöhen sei. Da der Hauptgrund für ihre geringe reale Festigkeit die

Bewegung der Versetzungen ist, kann man die Festigkeit der Metalle auf zwei Wegen erhöhen: Entweder erzeugt man versetzungsfreie Kristalle mit dem Ziel, die Festigkeit der Metalle der theoretisch möglichen idealen Festigkeit zu nähern, oder man erschwert die Bewegung der Versetzungen im Metall.

Superfeste Kristalle

Schon während des zweiten Weltkrieges wurde bemerkt, daß elektronische Geräte, Kondensatoren und Seekabel manchmal ohne sichtbare Ursache ausfielen. Lange quälten sich die Forscher mit diesem Rätsel ab, bis sie beobachteten, daß diese Ausfälle durch feinste fadenförmige Kristalle aus Zinn oder Kadmium hervorgerufen worden waren, die manchmal dort zu wachsen begannen, wo stählerne Konstruktionsteile mit diesen Metallen beschichtet waren. Um die Ursache dieser Ausfälle zu beseitigen, mußten die Wachstumsbedingungen und die Eigenschaften der fadenförmigen Kristalle untersucht werden, die wegen ihres Aussehens die englische Bezeichnung »Whisker« (Schnurrbart) erhielten. Zum nicht geringen Erstaunen der Wissenschaftler erwiesen sich die Whisker als die versetzungsfreien Einkristalle, um die sich die Metallurgen im Ringen um höchste Festigkeiten bemühten.

Die fadenförmigen Kristalle waren schon seit mehr als 200 Jahren bekannt, jedoch wurden sie einfach nicht beachtet. Jetzt hat sich herausgestellt, daß diese unscheinbaren Kriställchen tatsächlich außerordentlich erstaunliche Eigenschaften besitzen: Ihre spezifische Festigkeit übersteigt bei weitem die Festigkeit der gleichen Metalle, die auf gewöhnlichem Wege erzeugt worden sind. Die Festigkeit der Whisker nähert sich der idealen, theoretisch möglichen Festigkeit der Metalle. Das erklärt sich nicht nur aus dem Fehlen der Versetzungen, sondern auch daraus, daß die Whisker eine fast ideale Oberfläche besitzen, auf der sogar bei einer 40 000fachen Vergrößerung keine Rauigkeiten beobachtet werden können. Die Oberfläche von Kristallen, die mit üblichen Verfahren erzeugt werden, ist jedoch durch zahlreiche Defekte gekennzeichnet, von denen auch die Zerstörung ausgeht.

Die praktische Anwendung der versetzungsfreien, anorganischen Kristalle hat schon begonnen. Mit Saphir-

oder Graphitwhiskern armierte hochschmelzende Metalle erreichen eine Festigkeit von etwa einem Drittel der idealen, theoretisch möglichen. Das ist bereits ein großer Erfolg. Aus solchen Werkstoffen werden Schaufeln für Gasturbinen und warmfeste Teile für Raketen hergestellt.

Defekte verfestigen das Metall

Die vorhergehenden Beispiele haben gezeigt, daß Defekte das Metall schwächen. Dem aufmerksamen Leser drängt sich jetzt gewiß die Frage auf, warum das Metall nach einer plastischen Verformung, die zweifellos die Anzahl der Defekte in ihm vergrößert, nicht weicher, sondern fester geworden ist. Die Ursache liegt darin, daß für die Festigkeit nicht die Anzahl der Versetzungen, sondern ihre Beweglichkeit im Metall ausschlaggebend ist. Alle Hindernisse, die ihre Bewegung hemmen, verfestigen das Metall. Solche Hindernisse können z. B. fremde Atome, Teilchen, Korngrenzen und Versetzungen selbst sein. Letzterer Effekt wird deutlich bei der plastischen Verformung. Es wurde gesagt, daß sich dabei die Versetzungsdichte um das 1000fache erhöht. Diese vielen Versetzungen bilden dann gleichsam einen Wald, durch den sich die Gleitversetzungen nur noch schwer bewegen können.

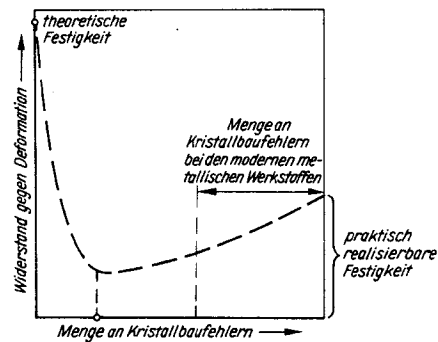
Solch eine dialektische Einheit der Gegensätze wird ziemlich häufig in der Natur beobachtet. Zum Beispiel dienen viele tödliche Gifte (Insekten-, Schlangengift, Kurare u. a.), in kleinen Dosen angewendet, als Heilmittel bei einer Reihe von Krankheiten.

Am Beispiel von Teilchen und Korngrenzen soll die Bremswirkung von Defekten noch etwas ausführlicher erläutert werden. Wenn die Versetzungen bei ihrer Bewegung auf ein ausgeschiedenes Teilchen im Stahl treffen, können sie entweder stehenbleiben oder sich weiter bewegen, indem sie das Teilchen schneiden bzw. es umgehen. Wird das Hindernis umgangen, muß die Versetzung stark gedehnt werden, wofür zusätzliche Energie erforderlich ist. Das Schneiden der Teilchen kann ebenfalls nur unter Energiezufuhr erfolgen. In allen drei Fällen ist also der Verfestigungseffekt augenscheinlich.

Wenn sich eine Versetzung in einem Einkristall bewegt, tritt sie letzten Endes auf seine Oberfläche aus. Dabei bildet sich, wie bereits geschildert, auf der Ober-

fläche des Kristalls eine Gleitstufe von der Höhe einer Atomschicht. In vielkristallinen Körpern, z. B. Stahl, wirken die Nachbarkörner diesem Austritt an die Oberfläche des betreffenden Kornes entgegen. Der Widerstand gegen die Bewegung der Versetzung wird mit der Annäherung an die Korn- oder Blockgrenze wachsen, wodurch die Versetzung aufgehalten wird, ohne bis zur Grenze zu gelangen. Die folgende Versetzung wird schon weit vor der Korngrenze aufgehalten, weil ihre Annäherung eine Vergrößerung der Gitterverzerrung bewirkt. Natürlich wird jede weitere Versetzung in noch größerem Abstand von dieser Grenze aufgehalten. Darum also ist feinkörniges Metall viel fester als grobkörniges, was – wie Sie sich erinnern – schon Tschernow bemerkte. Der Einfluß der Defekte auf die Festigkeit der Metalle ist anschaulich dem Bild zu entnehmen.

Alle Verfahren und Methoden der Gewinnung und Behandlung von Metallen haben von Urzeiten an bis in die jüngste Vergangenheit zur Festigkeitssteigerung nur den rechten Zweig der Kurve – die Erhöhung der Anzahl der Defekte – ausgenutzt. Dazu gehören z. B. das Legieren, Walzen, Schmieden, Pressen, Tiefziehen und Ziehen. Die Umformverfahren erhöhen besonders die Festigkeit, wenn sie bei Raumtemperatur angewendet werden, weil dann die *Versetzungsdichte* stark zunimmt. Die Berechnungen der Wissenschaftler haben gezeigt, daß die höchste Festigkeit, die durch Erhöhung der Versetzungsdichte erreicht werden kann, etwa ein Drittel der theoretisch möglichen Festigkeit beträgt. Je mehr Versetzungen im Metall sind, desto schwieriger ist ihre gleichmäßige Verteilung zu erreichen. Wenn die Versetzungsdichte den Betrag von 10^{12} bis 10^{13} Versetzungen



Einfluß der Defekte auf die Festigkeit der Metalle

je Quadratzentimeter übersteigt, dann führt eine weitere Verformung zur Zerstörung des Werkstücks. So ist bekannt, daß es leicht ist, einen Nagel zu verbiegen, viel schwerer dagegen, ihn wieder gerade zu biegen. (Uns erstaunt schon nicht mehr, daß die Verformung des Metalls beim Verbiegen des Nagels zur Verfestigung führt.) Wenn Sie jedoch den Nagel einige Male hin- und herbiegen, dann bricht er, weil die Zunahme der Versetzungen nicht gleichmäßig erfolgt, sondern örtlich starke Anhäufungen auftreten, die zur Rißbildung führen.

Festigkeit für den Konstrukteur

An dieser Stelle ist es notwendig, den Begriff Festigkeit näher zu erläutern. Bisher haben wir ihn sehr allgemein verwendet und darunter verstanden, daß ein metallischer Körper bzw. eine Konstruktion einer äußeren Belastung widersteht bzw. nicht versagt. Das Versagen konnte dabei eine bleibende Formänderung, ein Riß oder auch ein Bruch sein. Die Art der Belastung haben wir ebenfalls nicht exakt definiert. Wir wissen aber genau, daß ein Werkstück verschieden reagiert, wenn z. B. die gleiche Kraft bei hoher oder niedriger Temperatur einwirkt, ob sie langsam oder sehr schnell aufgebracht wird. Nehmen wir es genau, müssen wir für jede spezifische Belastungsart ein Kriterium für das Versagen definieren und erhalten damit eine große Palette von »Festigkeitseigenschaften«.

In Abhängigkeit von den Bedingungen, unter denen sich ein Bauteil bewähren muß, wird sich diese oder jene Eigenschaft als wichtig erweisen. Um z. B. den Verschleißwiderstand zu erhöhen, kann man das Bauteil oberflächenhärten. Wurde es dadurch fester? Ja, wenn man den Verschleißwiderstand betrachtet. Doch nach dem Härten ist das Bauteil spröder geworden und kann jetzt durch eine stoßartige Beanspruchung brechen, die das nichtgehärtete Bauteil leicht ertragen hätte. Wurde das Bauteil also fester? Wie Sie sehen, hängt die Antwort auf diese Frage völlig von den konkreten Bedingungen ab, unter denen das betreffende Teil belastet wird. Darum soll, wenn wir im weiteren über die Festigkeit metallischer Erzeugnisse sprechen, nicht irgendeine allgemeine Festigkeit, sondern die konkrete Fähigkeit des metallischen Bauteils, bestimmten äußeren Einwirkungen zu widerstehen, gemeint sein.

Wir kennen z. B. folgende Begriffe: statische Festigkeit, dynamische Festigkeit, Dauerschwingfestigkeit u. a.

Wenn wir über die Dauerschwingfestigkeit sprechen, ist es notwendig zu wissen, was unter der Ermüdung der Metalle verstanden wird. Man bezeichnet damit den Bruch des Materials bei wechselnder Belastung. Es gibt verhältnismäßig wenige Konstruktionen, die nur statisch belastet werden, d. h., daß auf sie konstante Kräfte einwirken. Darunter fallen hauptsächlich tragende Konstruktionen von Gebäuden und ähnliche Einrichtungen, wie z. B. Fundamente, Wände, Träger, Rohrleitungen u. a.

Bei der Mehrzahl der Maschinenteile ändert sich die Belastung ständig ihrer Größe oder ihrem Vorzeichen nach.

Sehr oft ändern sich beide Parameter gleichzeitig. Solche Bedingungen liegen bei Autos und Flugzeugen, Walzgerüsten und Dampfhämmern, Wellen und Turbinen, Federn und Achsen, Pleueln usw. vor. Die Pleuelstange einer Dampfmaschine wird z. B. so berechnet, daß sie mindestens 1 Milliarde Lastwechsel aushalten kann, die Welle einer Dampfturbine – 15 Milliarden Lastwechsel.

Bei wechselnder Belastung brechen Maschinenteile schon dann, wenn die Belastung noch deutlich unter der Festigkeitsgrenze des betreffenden Materials bei statischer Belastung liegt. Folgendes Beispiel soll die Ursachen dieser Erscheinung erklären: Es gelingt Ihnen nicht, einen gewöhnlichen Nagel zu zerreißen, indem Sie ihn an der Spitze und am Kopf fassen und ziehen. Ihre Kräfte reichen nicht. Aber den gleichen Nagel in der Mitte durch Hin- und Herbiegen zu zerbrechen ist schon gar nicht so schwierig. Dies rührt daher, daß das Metall bei wechselnder Belastung »ermüdet«. Zunächst erscheinen Mikrorisse, die mit bloßem Auge nicht zu erkennen sind. Die Risse wachsen und führen schließlich zum Bruch.

Die Vergrößerung eines Risses unter Einwirkung von zyklischen Belastungen kann sehr starke Wellen bei kleinen Lasten (im Vergleich zur Festigkeitsgrenze) glatt wie mit einem Messer durchschneiden.

Die Bewegung des Risses wird noch begünstigt, wenn Feuchtigkeit oder andere Stoffe, die die Korrosion fördern, in den Riß gelangen.

Unter bestimmten Bedingungen wird auch Metall so

spröde wie Glas. Viele niedriglegierte Baustähle verlieren bei starkem Frost ihre Plastizität. Dadurch gehen oft Fahrzeuge, Maschinen, Bauteile, wie z. B. Schienen, unter den rauen winterlichen Bedingungen Sibiriens und der Arktis zu Bruch (das ist die sogenannte Kaltsprödigkeit). Die Verluste, die die Sowjetunion dadurch jährlich erleidet, sind beträchtlich.

Eine der Ursachen für die Kaltsprödigkeit der Stähle ist die Anwesenheit von Kohlenstoff und anderer Begleitelemente, wie z. B. Schwefel und Phosphor. Der Kohlenstoff wirkt in ähnlicher Weise auch auf Chrom, Molybdän und Wolfram. Besonders *kaltzähe Stähle* haben deshalb sehr niedrige Kohlenstoff- und Schwefelgehalte in der Größenordnung von Hundertstel und sogar Tausendstel eines Prozentes.

Bevor die Serienproduktion irgendeiner Maschine aufgenommen werden darf, ist es notwendig, ihre Festigkeit zu prüfen. Die Kenngrößen für die Festigkeit werden im Zugversuch ermittelt. Dazu werden die Bauteile und oft auch die gesamte Maschine statischen und dynamischen Belastungen ausgesetzt, d. h. auf Festigkeit unter betriebsnahen Bedingungen – manchmal bis zur Zerstörung – geprüft.

Doch wie soll man den Rumpf eines Ozeanriesen oder eine Eisenbahnbrücke, eine gigantische Presse oder eine riesige Turbine auf Festigkeit prüfen? Im modernen Schwermaschinenbau werden Bauteile mit 30 bis 35 m Länge (das ist die Höhe eines 12stöckigen Hauses!), einigen Metern Durchmesser und Hunderten von Tonnen Gewicht verwendet. So hat z. B. der Rotor einer Turbine für das Krasnojarsker Wasserkraftwerk 2,3 m Durchmesser. Diese Maschinen werden tatsächlich nicht geprüft. Ihre Zerstörung würde jedoch einen kolos-

salen Verlust und möglicherweise sogar Menschenopfer bedeuten. Daher bemühen sich die Ingenieure, solche Giganten zuverlässig zu bauen und legen ihnen eine 10- oder manchmal sogar 20fache Sicherheit zugrunde.

Der Sicherheitsfaktor wird häufig als Koeffizient unserer Unkenntnis bezeichnet. Wenn der Konstrukteur nicht genau die Größe der Kräfte kennt, die auf seine Maschinen (oder Konstruktionen) bzw. auf deren einzelne Bauteile einwirken, dann bleibt ihm nichts weiter übrig, als die Festigkeitsreserve zu vergrößern, um die Sicherheit gegen ein Versagen zu erhöhen. Natürlich führt das auch zu großen Verlusten. Denn was ist denn eine Festigkeitsreserve – vor allem doch eine Erhöhung der Masse der Bauteile! Auf diese Art und Weise wird viel mehr Metall verbraucht, viel mehr Arbeit für die Fertigung aufgewendet, als tatsächlich notwendig. Solch eine Konstruktion oder Maschine hat möglicherweise eine sehr hohe Lebensdauer, was häufig gar nicht erforderlich ist. Die vergegenständlichte Arbeit kann auch auf diese Weise nicht ausgenutzt werden.

Kehren wir aber zu dem Fall zurück, wo dem Konstrukteur zwar die Belastung der Maschine bekannt, aber eine Prüfung unter betriebsnahen Bedingungen nicht möglich ist. Dem Konstrukteur stehen Kennwerte des verwendeten Metalls zur Verfügung, die an kleinen Proben gewonnen wurden. Oftmals ist aber nicht eindeutig, ob er mit diesen Zahlen rechnen darf, d. h., ob sie auch auf große Bauteile übertragbar sind. An dieser Frage arbeiten zur Zeit viele Forschungskollektive in aller Welt, und gerade in den letzten Jahren sind neue Prüfverfahren geschaffen worden, die es dem Konstrukteur ermöglichen, seine Sicherheitskoeffizienten zu verringern und ökonomisch zu bauen.

Etwas Theorie

In der heutigen Zeit werden hohe Anforderungen an die Metalle gestellt. Um diese zu erfüllen, müssen wir lernen, Werkstoffe mit vorgegebenen Eigenschaften zu erzeugen und die zukünftigen Materialien genau so sicher zu projektieren, wie die Konstrukteure gegenwärtig ein Flugzeug, eine Brücke oder ein Wohnhaus berechnen. Die Wege dorthin zeigt die moderne Wissenschaft von den Metallen.

Was versteht man unter einem Metall? Welches sind seine charakteristischen Eigenschaften? »Als Metall bezeichnet man einen hellen Körper, den man schmieden kann«, schrieb Lomonossow in seinem Buch »Erste Grundlagen der Metallurgie und des Bergbaus«. Dieses erste Lehrbuch des Berg- und Hüttenwesens in Rußland erschien vor mehr als 200 Jahren. Mehrere Generationen russischer Ingenieure nutzten es für ihre Studien. Doch heute befriedigt uns die von Lomonossow gegebene Definition nicht mehr. Viele Eigenschaften der Metalle, wie z. B. die elektrische Leitfähigkeit oder der Kristallaufbau, waren damals noch nicht untersucht; viele Eigenschaften überhaupt noch nicht bekannt. Wenn Lomonossow nur 6 Metalle zählte, nämlich Gold, Silber, Kupfer, Zinn, Eisen und Blei, so sind uns heute etwa 80 bekannt. Vier Fünftel aller Elemente des Periodensystems sind Metalle! Warum sind es so viele? Wem verdanken die Metalle ihre Eigenschaften? Auf diese und viele andere Fragen konnte erst im 20. Jahrhundert geantwortet werden.

Um den metallischen Zustand etwas genauer zu beschreiben, muß man vom Aufbau des Atoms ausgehen. Die meisten der Metalle haben auf ihrer äußersten Schale, oder, wie man auch sagt, auf dem äußersten Energieniveau, eine kleine Anzahl von Elektronen (eins, zwei, drei).

Die stabilsten äußeren Elektronenschalen besitzen die Edelgase: Helium hat hier zwei Elektronen, alle anderen je acht. Bei chemischen Reaktionen streben die Atome aller Elemente danach, solch eine Besetzung der Außenschale zu erreichen. Das kann auf zwei Wegen geschehen: Indem alle Außenelektronen (Valenzelektronen) abgegeben werden und das bloßgelegt wird, was darunter liegt, oder indem die äußerste Schale auf acht Elektronen aufgefüllt wird. Es ist natürlich, daß Metalle, die eine geringe Zahl an Außenelektronen besitzen, diese leichter abgeben, während die Nichtmetalle, die dementsprechend vier und mehr Elektronen aufweisen, bestrebt sind, die äußerste Schale aufzufüllen. Obwohl Zinn und Blei je vier, Antimon und Wismut je fünf und Polonium sogar sechs Außenelektronen haben, zeigen diese Elemente eher metallische als nichtmetallische Eigenschaften. Warum das so ist, soll im folgenden untersucht werden.

Vom chemischen Gesichtspunkt aus ist ein einzelnes Atom um so metallischer, je leichter es die Elektronen seiner äußeren Schalen abgibt. Die Energie, die aufgebracht werden muß, um ein Elektron aus der äußeren Schale eines Atoms zu entfernen, nennt man Ionisierungsenergie. Diese ist nicht nur von der Zahl der Außenelektronen, sondern vor allem auch von deren Abstand vom Atomkern, d. h. vom Atomradius abhängig. Das wird besonders deutlich beim Fluor. Sein Atom ist klein. Es besitzt nur zwei Elektronenschalen und auf der äußersten sieben Elektronen. Bis zur Acht der Edelgaskonfiguration fehlt nur ein Elektron. Fluor nimmt deshalb energisch fast jedem beliebigen Element das fehlende Elektron ab.

Wegen der großen Entfernung der äußersten Elektronenschale vom Kern ist die Ionisierungsenergie von

Zinn, Blei, Antimon, Wismut und sogar Polonium verhältnismäßig klein, und diese besitzen viele metallische Eigenschaften, obwohl sie eine große Anzahl Elektronen auf der äußersten Schale haben.

Aus dem Periodensystem (siehe vorderer Bucheinband) kann man leicht den Aufbau eines jeden Elements erkennen. Die Ordnungszahl jedes Elements ist zahlenmäßig gleich der positiven Ladung des Atomkerns. Die Nummer der Periode gibt an, wie viele Elektronenschalen um den Kern angeordnet sind, die Nummer der Gruppe entspricht der Anzahl der Außenelektronen. In der Tabelle auf dem hinteren Bucheinband ist die Anzahl der Elektronen auf allen Energieniveaus angegeben. Auf dem 1s Niveau befinden sich die dem Kern am nächsten liegenden Elektronen. Die weiteren Energieniveaus folgen einander von innen nach außen.

Nach den Gesetzen der Quantenmechanik darf sich auf jedem Energieniveau nicht mehr als eine bestimmte Zahl von Elektronen befinden: auf dem dem Kern am nächsten liegenden 2, auf dem folgenden 8, dann 18, 32 usw. Die maximal mögliche Anzahl von Elektronen in jeder beliebigen Schale beträgt $2n^2$, wobei n die Nummer der Schale ist. Dabei schließt die Schalenbesetzung jedes folgenden Elements vollständig die Schalenbesetzung des im Periodensystem vorangehenden Elements ein.

Wollen wir einmal verfolgen, wie die Elektronenschalen bei den verschiedenen Elementen im allgemeinen aufgebaut werden. In der zweiten und dritten Periode des Periodensystems der Elemente erfolgt der Einbau der Elektronen nur in den äußeren Schalen. Ehe nicht der Aufbau der unteren Schale abgeschlossen ist, wird die darüberliegende nicht besetzt. Jedes neue Elektron in der Schale verändert sehr stark die Eigenschaften des Elements. Dadurch ist der Sauerstoff dem Stickstoff überhaupt nicht ähnlich, ebenso das Chlor nicht dem Schwefel. Mit jedem hinzukommenden Elektron auf der äußeren Schale verstärken sich die nichtmetallischen Eigenschaften des Elements.

In der vierten Periode ergibt sich schon ein anderes Bild. Die dritte Schale kann maximal 18 Elektronen aufnehmen, doch das Kalium fährt nicht mit dem Aufbau dieser Schale fort, sondern beläßt dort die acht Elektronen und beginnt mit dem Aufbau einer neuen, der vierten Schale, auf der sich bei ihm gerade ein Elektron befindet. Beginnend mit dem Skandium »erinnern« sich

die Elemente plötzlich, daß die dritte Schale bei ihnen nicht fertiggestellt wurde, und fahren fort, sie aufzufüllen. Das Titan hat in der dritten Schale schon 10 Elektronen, das Vanadium 11 usw. Auf der äußersten Schale jedoch befinden sich bei allen Elementen vom Skandium bis zum Zink nicht mehr als zwei Elektronen, was – wie wir wissen – charakteristisch für die meisten Metalle ist.

Die zweite Elektronenschale von außen nimmt, wenn auch viel schwächer, an den chemischen Reaktionen teil und gibt Elektronen ab. Daher kann z. B. Mangan nicht nur zwei-, sondern auch drei-, sechs- und sogar siebenwertig sein.

Der Abschluß des Aufbaus tieferer Elektronenschalen dauert auch in den folgenden Perioden des Systems an.

Wenn man dieses System genau untersucht, erkennt man, daß jedes zusätzliche Elektron in den Hauptgruppen nur die äußerste Schale weiterbaut, in den Nebengruppen dagegen die zweite Schale von außen und bei den *Seltenerdmetallen* (Lanthaniden) oder den *Transuranen* (Aktiniden) auch die dritte Schale von außen. Bei den Elementen der Hauptgruppen können nur die Elektronen der äußersten Schale Valenzelektronen sein, bei den Elementen der Untergruppen sowohl die der äußeren als auch der nachfolgenden Schale. Bei den Lanthaniden (Lanthanoiden) und Aktiniden (Aktinoiden) können an den chemischen Reaktionen sogar die Elektronen der dritten Schale von außen teilnehmen.

Mit der Zunahme der Zahl der Elektronenschalen um den Atomkern herum verringert sich der Energieunterschied zwischen den Elektronen zweier benachbarter Schalen; deshalb sind nicht nur die Elektronen der äußersten, sondern auch der zweiten und sogar der dritten Schale von außen in der Lage, zu Valenzelektronen zu werden. So können bei den Lanthaniden die beiden Elektronen der äußersten Schale (der sechsten), ein Elektron aus der zweiten Schale von außen (der fünften) und eins aus der dritten Schale von außen (der vierten) zu Valenzelektronen werden. Ihre typische Wertigkeit beträgt daher drei, bei einigen auch vier. Bei den Aktiniden ist die dritte Schale von außen noch weiter vom Kern entfernt, und die Elektronen können sie demzufolge noch leichter verlassen. Daher können bei ihnen nicht nur die beiden Elektronen der äußersten (siebenten) Schale und ein Elektron der zweiten Schale von außen (der sechsten), sondern auch drei Elektronen der dritten Schale von außen (der fünften) zu Valenzelektronen

werden, was in der Summe eine maximale Wertigkeit von sechs ergibt. Die sowjetischen Wissenschaftler Krot, Gel'man und Mefodiewa haben entdeckt, daß Neptunium und Plutonium sogar siebenwertig sein können. In der folgenden Zeit wurde die Fähigkeit, siebenwertig zu sein, auch beim Amerizium beobachtet.

Aus dieser Diskussion des Periodensystems haben wir den Aufbau der Metallatome in den allgemeinsten Zügen kennengelernt. Zum Verständnis des Wesens aller metallischen Eigenschaften erweisen sich diese Kenntnisse allein noch als ungenügend.

»Vergesellschaftete« Elektronen

Feste Körper weisen in der Regel einen kristallinen Aufbau auf. Die Kristalle einfacher nichtmetallischer Stoffe bestehen entweder aus Atomen, wie beim Silizium oder dem Kohlenstoff, oder aus Molekülen, wie beim Phosphor oder Schwefel. Die Kristalle chemischer Verbindungen, wie z. B. Kochsalz, bestehen aus Natrium- und Chloridionen.

Die Metalle jedoch weisen ihre besondere Art eines Kristallgitters auf. Hier befinden sich in den Eckpunkten des Gitters positiv geladene Metallionen, die von freien Elektronen umgeben sind. Für einen Augenblick fängt hier das eine Ion, dort das andere Ion ein Elektron ein und wird damit Metallatom, doch gleich darauf verliert es wieder ein Elektron. Die Ionen tauschen gleichsam die Elektronen untereinander aus. Die »vergesellschafteten« Elektronen bilden das sogenannte Elektronengas, dessen Eigenschaften die charakteristischen Merkmale der Metalle bedingen. »Im weiteren Sinne sind Legierungen nicht Verbindungen zweier Metalle, sondern stellen eher eine Verbindung aller Metallatome auf der einen Seite und aller freien Elektronen auf der anderen Seite dar.« Die Definition gilt nicht nur für Legierungen, sondern auch für reine Metalle.

Bei einer relativen Bewegung der Ionen gegeneinander verlieren sie die Verbindung zu den Elektronen nicht (die Ionen fließen gleichsam innerhalb des Elektronengases), wodurch die Metalle plastisch sind, d. h., sie können ihre Form ohne Zerstörung ändern.

Die Arbeiten vieler Wissenschaftler zeigen, daß die Metalle besonders dem Elektronengas die elektrische und die Wärmeleitfähigkeit, die Kombination von mechanischer Festigkeit mit der Plastizität (Schmiedbarkeit), die

grausilbrige (bei einigen goldene) Farbe und den Glanz verdanken, d. h. die Fähigkeit, Licht und Radiowellen zu reflektieren.

Eine elektrische Spannung zwingt das Elektronengas, in eine bestimmte Richtung zu fließen; d. h., die Metalle leiten den Strom gut. Ihre elektrische Leitfähigkeit ist 10^{20} bis 10^{25} (eine Zahl mit 20 bis 25 Nullen!) mal höher als die der Nichtmetalle, die praktisch keine freien Elektronen besitzen. Diese Leitfähigkeit ist eine der wichtigsten Eigenschaften der Metalle, die sie vor anderen festen Körpern auszeichnet.

Das Elektronengas ist auch am Wärmetransport beteiligt; deshalb besitzen die Metalle eine hohe Wärmeleitfähigkeit. Sie beträgt etwa das 1000fache der Nichtmetalle, bei denen die Wärme im wesentlichen durch die Schwingungen der Atome oder Ionen im Gitter verbreitet wird. Mit steigender Temperatur verringern sich die elektrische und die Wärmeleitfähigkeit der Metalle.

Wenn sich in gewöhnlichem Gas die Mehrzahl der Teilchen mit einer Geschwindigkeit bewegt, die in der Nähe des Mittelwertes liegt, und nur wenige eine sehr große oder sehr kleine Geschwindigkeit aufweisen, so dürfen sich niemals zwei Elektronen im Atom in völlig gleicher Weise bewegen. So lauten die im Mikrokosmos herrschenden Gesetze der Quantenmechanik. Demzufolge sind im Atom die Elektronen um den Kern nicht irgendwie, sondern auf streng vorgeschriebenen Energieniveaus angeordnet. Beim Erwärmen von normalem Gas wird die zugeführte Energie auf alle seine Teilchen übertragen, wobei sich deren mittlere Geschwindigkeit erhöht.

Ein völlig anderes Bild ergibt sich im Elektronengas, wenn das Metall erwärmt wird. Hier haben die Elektronen der Reihe nach alle möglichen Energieniveaus, beginnend mit dem niedrigsten, schon eingenommen. Die Elektronen der untersten Energieniveaus können ihre Geschwindigkeit nicht erhöhen, weil alle Niveaus über ihnen schon besetzt sind. Es können nur die Elektronen beschleunigt werden, oberhalb derer auf der Stufenleiter der Geschwindigkeiten noch unbesetzte Niveaus existieren.

Der elektrische Strom im Metall wird ebenfalls von derartigen verhältnismäßig wenigen Elektronen verursacht. Unter Wirkung der elektrischen Spannung werden sie leicht beschleunigt und übertragen elektrische Ladungen; so entsteht der elektrische Strom.

Wozu wird die Reinheit benötigt?

Ein Werk liegt unter der Erdoberfläche. Die künstliche Atmosphäre in seinen Hallen besteht aus *Inertgas*. Die Menschen arbeiten in Kosmonautenanzügen.

Nein, das ist nicht das phantastische Bild einer zukünftigen Mondstadt. Solche Werke arbeiten bereits bei uns auf der Erde. Nur dort kann man höchstreine Metalle und Halbleiter produzieren, wie sie für die Atomenergiegewinnung, für die Herstellung vieler Halbleiter und Elektronenröhren, für Laser, supraleitende Legierungen und vieles andere notwendig sind.

Die ersten Forderungen nach hochreinen Metallen stellte die Atomtechnik. Zehntausendstel, ja in einigen Fällen sogar Millionstel eines Prozentes bestimmter Beimengungen machten Uran (Uranium), Thorium, Beryllium und Graphit unbrauchbar. Die Kettenreaktion konnte sich nur in hochreinem Uran entwickeln, wobei das Uran nicht nur frei von Beimengungen anderer Elemente, sondern auch frei von anderen Isotopen des gleichen Elements selbst sein mußte. Als Isotope bezeichnet man die Atome ein und desselben chemischen Elements mit unterschiedlicher Atommasse, sie unterscheiden sich aber nicht in den chemischen und nur unwesentlich in den physikalischen Eigenschaften. Alle Isotope des betreffenden Elements weisen in den Atomkernen die gleiche Protonenzahl auf und besitzen demnach die gleiche Kernladung und Elektronenzahl, was wiederum die gleichen chemischen Eigenschaften nach sich zieht. Der Unterschied liegt in der Anzahl der Neutronen im Atomkern. Darum haben die Isotope ein und desselben Elements eine verschiedene Atommasse und unterscheiden sich ein wenig in den physikalischen Eigenschaften. Ihre Bezeichnung als Isotope erhielten

sie deshalb, weil sie im Periodensystem der Elemente ein und denselben Platz einnehmen. In der Übersetzung aus dem Griechischen bedeuten »iso« – gleicher, derselbe und »topos« – Platz, Stelle. Die Kerntechnik benötigte das reine Isotop des Urans mit der relativen Atommasse 235; dieses Isotop hat am natürlichen Uran nur einen Anteil von 0,714 %. Die Trennung der Isotope und die Gewinnung des hochreinen Urans-235 war wahrscheinlich die größte Schwierigkeit auf dem Weg zur Verwirklichung der ersten gesteuerten Kernreaktion.

Sehr bald wurden auch hochreine Materialien für die Erzeugung besonders warmfester und hitzebeständiger Legierungen benötigt. Eine noch höhere Reinheit war für die Halbleiter erforderlich. So darf in vielen halbleitenden Materialien die Konzentration der Beimengungen nicht über einem Millionstel eines Prozentes liegen! Für die Halbleiter ist daneben die Vollkommenheit des Kristallaufbaus notwendig. Wenn nur ein Atom aus jeder Milliarde Atome im Germaniumkristall von seinem Platz verschoben ist, werden bei der Herstellung schon der einfachsten Transistoren etwa 80% von ihnen zu Schrott. Zuverlässig arbeitende Halbleiterbauelemente kann man nur dann herstellen, wenn im Kristallgitter nicht mehr als ein verschobenes Atom auf 1 000 000 000 000 (eine Billion) Atome vorkommt!

Nach ihrer Reinheit werden die Stoffe in drei Gruppen eingeteilt: technisch reine, chemisch reine und hochreine. Wenn ein Material bis zu 99,9% des Grundstoffs enthält, ist es technisch rein, bei einem Gehalt von 99,9 bis 99,99% chemisch rein, und bei einem Anteil über 99,999% bezeichnet man es als hochreines Material. Oft wird die Anzahl der Neunen nach dem Komma als Angabe für die Reinheit verwendet.

Seltenerdmetalle (Zer [Zerium], Lanthan sowie

Gadolinium, Samarium, Praseodymium, Yttrium) mit einer Reinheit von fünf Neunen gewinnt man heute tonnenweise. Aus Aluminium mit einer Reinheit von fünf Neunen besteht die Beschichtung der Hauptspiegel des sowjetischen 6-m-Teleskops.

Doch manchmal ist es wichtig, das Material nicht von allen, sondern nur von den besonders schädlichen Beimengungen zu reinigen. Uran z. B. ist nur dann für die Verwendung in Kernreaktoren geeignet, wenn es weniger als 0,00001% Bor, Lithium und Kadmium enthält. Von unschädlichen Beimengungen können dagegen zur gleichen Zeit die 1000fachen Gehalte auftreten. Solch ein Uran kann kaum als chemisch rein bezeichnen, wenn es auch hochrein in bezug auf eine Gruppe bestimmter Verunreinigungen ist.

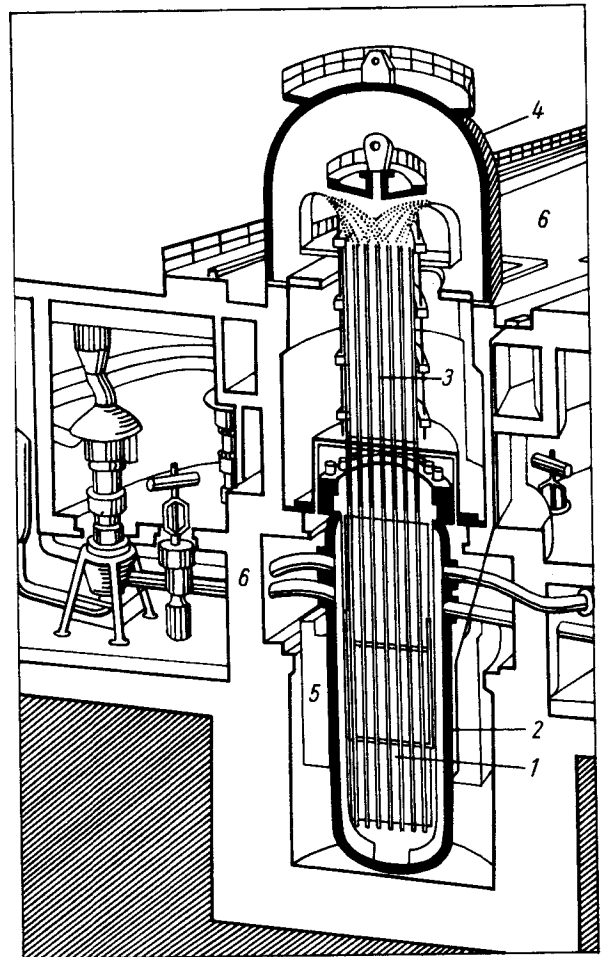
Ein anderes Beispiel: Es ist viel wichtiger, den Bor-gehalt in halbleitendem Silizium auf einen Anteil von 1:10000000000 (10 Milliarden) zu senken, als einen milligenfachen höheren Germaniumgehalt zu entfernen.

Jedes Metall hat seine besonders schädliche Verunreinigung, sozusagen einen vorrangigen Feind. Das ist z. B. Sauerstoff in Niob (Niobium), Tantal und Rhenium; Stickstoff in Chrom; Wasserstoff in Vanadium und Titan; Kohlenstoff in Wolfram und Molybdän; Gadolinium und Europium in Uran usw.

Nützliche Beimengungen

Beimengungen können nicht nur schädlich, sondern auch nützlich sein. Dem Stahl zugesetztes Bor z. B. verbessert seine *Härtbarkeit*, Aluminium führt zu Feinkörnigkeit, und Kupfer erhöht seine Witterungsbeständigkeit.

Ein ähnliches Bild ergibt sich bei der Herstellung von Halbleiterbauelementen. Zunächst wird das Germanium so lange gereinigt, bis weniger als ein Arsenatom auf eine Milliarde Germaniumatome kommt. Doch dann setzt man das gleiche Arsen erneut dem Germanium zu, jetzt jedoch genau dosiert – etwa ein Atom auf 100000000 Germaniumatome. Dabei darf sich dieser Zustand nur in dünnen Schichten verteilen (ihre Dicke beträgt Mikrometer), die an ganz bestimmten Stellen des Halbleiterkristalls liegen. Sogar Gase und nichtmetallische Beimengungen (Schwefel, Phosphor, Selen u. a.)

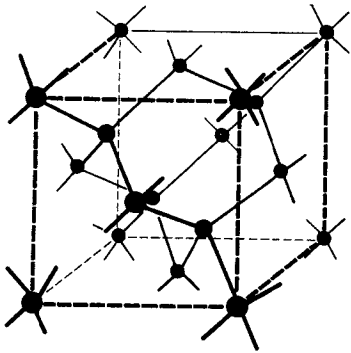


Schnitt durch den Druckwasserreaktor WWER 440 des Kernkraftwerks »Bruno Leuschner«

1 Reaktorkern, 2 Reaktordruckgefäß, 3 Antriebe für Steuer- und Sicherheitsstäbe, 4 Schutzhaube, 5 biologischer Schild, 6 Betonabschirmung

können bei der Herstellung von Legierungen als stark wirkende »homöopathische« Zusätze verwendet werden.

Die Halbleiterbauelemente führten zu einer Verringerung der Größe und damit der Masse der elektronischen Geräte um das 10- bis 100fache und haben – was noch wichtiger ist – ihre Zuverlässigkeit stark verbessert. Doch das ist nur der Anfang. Wenn man die Verteilung der Atome elektrisch aktiver Beimengungen (Arsen,



Räumliche Anordnung der Germaniumatome im Germaniumgitter

Bor, Aluminium, Phosphor u. a.) in hochreinen regelmäßig gebauten Kristallen steuert, kann man mikroskopische Zonen schaffen, die die Rolle von Dioden und Transistoren, von Kondensatoren und Widerständen spielen, d. h. eine höchstkomplizierte Schaltung in einem Miniaturkristall realisieren!

Die Eigenschaften hochreiner Metalle

Die wahren Eigenschaften eines Stoffes zeigen sich nur dann, wenn er in besonders reinem Zustand geprüft wird. Die Schmelztemperatur des Urans z. B. wurde sehr lange als unter 1850°C liegend angegeben. Um wieviel sie tatsächlich niedriger liegt, ergaben Messungen aus immer reinerem Uran. 1932 ermittelte man 1650°C, 1935 1400°C und 1956 nur noch 1133°C.

1910 gelang es, die ersten Gramm des Metalls Titan herzustellen. Die damals durchgeführten Untersuchungen haben ergeben, daß Titan ein sprödes, schwer verarbeitbares Metall mit geringer Festigkeit ist. Sehr lange wurde es daher nur zum Legieren von Stahl und zur Herstellung von weißen Pigmenten verwendet. In der Folgezeit ergab sich, daß die beobachtete Sprödigkeit von Beimengungen herrührte. Hinreichend reines Titan ist hochplastisch und fest. Als spröde wurden lange Zeit auch viele andere Metalle angesehen: Chrom, Wolfram, Molybdän, Tantal, Wismut, Zirkon u. a. In genügend reiner Form bleiben sie auch bei tiefen Temperaturen plastisch, korrodieren nicht und weisen noch weitere wert-

volle Eigenschaften auf. Damit wurden die Metalle für viele Industriezweige neu entdeckt. Eine solche Wiedergeburt haben auch Kupfer, Zink, Zinn und Aluminium erlebt, deren Eigenschaften mit zunehmender Reinheit meist kontinuierlich verbessert, aber z. T. auch völlig verändert werden.

Zink mit einer Reinheit von fünf Neunen reagiert z. B. überhaupt nicht mit Salzsäure, während »gewöhnliches« Zink eine so starke Reaktion zeigt, daß dieser Versuch oft in den Chemiestunden der Schule vorgeführt wird.

Seit langer Zeit ist bekannt, daß alle Metalle mit kubisch-raumzentriertem Gitter (darunter auch Eisen) bei tiefen Temperaturen spröde werden. Es gab jedoch keine theoretische Erklärung für diese Erscheinung. Nach den bisherigen Erkenntnissen müßten Metalle mit dieser Kristallstruktur sehr plastisch sein und dürften jene Eigenschaft auch bei tiefer Temperatur nicht verlieren. Es zeigte sich, daß an allem die Verunreinigungen schuld sind. Die Atome des Kohlenstoffs, Sauerstoffs, Wasserstoffs, Stickstoffs und Bors bewirken Veränderungen im Gitter, die das Entstehen von Rissen erleichtern und damit zur Kältsprödigkeit führen.

Im Laboratorium für hochschmelzende und seltene Metalle und Legierungen des Baikow-Instituts für Metallurgie der Akademie der Wissenschaften der UdSSR wurde experimentell das Nichtvorhandensein der Kaltbrüchigkeit an Einkristallen hoher Reinheit bei vielen kubisch-raumzentrierten Metallen nachgewiesen.

Sicher haben Sie bemerkt, daß wir bisher niemals von absolut reinen Metallen gesprochen haben. Das ist kein Zufall. Sogar wenn im Metall weniger als ein Milliardstel eines Prozentes an Beimengungen vorhanden ist, sind immer noch in jedem Mol desselben mehr als 10000000000 Fremdatome enthalten. Bis zur absoluten Reinheit ist es – wie Sie sehen – noch sehr, sehr weit. Die absolute Reinheit ist das Ideal, nach dem wir streben, dem wir uns auch immer weiter nähern, das wir aber niemals erreichen werden. Denn je weniger Fremdatome im Grundstoff zurückbleiben, desto schwieriger wird es, jedes einzelne von ihnen zu entfernen. Außerdem wird es mit zunehmender Reinheit immer komplizierter, diese zu bewahren. Auf der Erde ist es unmöglich, den betreffenden Stoff völlig vor äußeren Einwirkungen zu schützen. Bezeichnend ist in dieser Beziehung ein kurioser Fall, von dem der bekannte deutsche

Physiker Heisenberg berichtete. Während der Arbeit an einem Massenspektrographen zeigte das Gerät an, daß Goldatome synthetisiert wurden, obwohl das nicht hätte sein dürfen. Der Effekt verschwand, sobald Heisenberg seine Brille mit Goldfassung abgenommen und sie fortgelegt hatte.

Jedes Metallatom, das in Kontakt mit der Luft steht, wird bei Raumtemperatur in jeder Sekunde von etwa einer Milliarde Molekülen bombardiert! Mit steigender Temperatur wächst diese Zahl schnell an.

Wir wissen, daß die Luft in Industriegebieten durch Abprodukte der Betriebe verunreinigt wird. Das schadet nicht nur unserer Gesundheit, sondern auch den Metallen. Für die Herstellung sehr genauer und zuverlässiger elektronischer Bauelemente wird z. B. gefordert, daß in einem Kubikmeter Luft in einer Stunde nicht mehr als *ein* Stäubchen von weniger als einem Mikrometer Durchmesser auftritt. Es ist unmöglich, solche Bedingungen in einer gewöhnlichen Atmosphäre zu schaffen. Daher wird in vielen Betrieben der elektronischen Industrie die Luft besonders gereinigt und aufbereitet. Für chemisch aktive Metalle (besonders im erhitzten Zustand) ist selbst die Luft schädlich. Darum müssen unterirdische Werke gebaut werden, die völlig von der Außenwelt isoliert sind; dort besteht die Atmosphäre aus inertem Gas (meistens Argon), und die Menschen müssen in Kosmonautenanzügen arbeiten.

Doch auch das Inertgas schützt die Metalle nicht vollständig vor Verunreinigung, da dessen Moleküle in das Metall dringen können. Am besten ist es, das Schmelzen und die weitere Verarbeitung im Vakuum vorzunehmen. Doch das ist kompliziert und teuer. Selbst bei einem Vakuum von 10^{-7} Pa sind in jedem Kubikzentimeter immer noch 32000000 Moleküle enthalten. Aus diesen Gründen orientieren die Wissenschaftler auf die Ausnutzung des kosmischen Vakuums (10^{-12} bis 10^{-14} Pa).

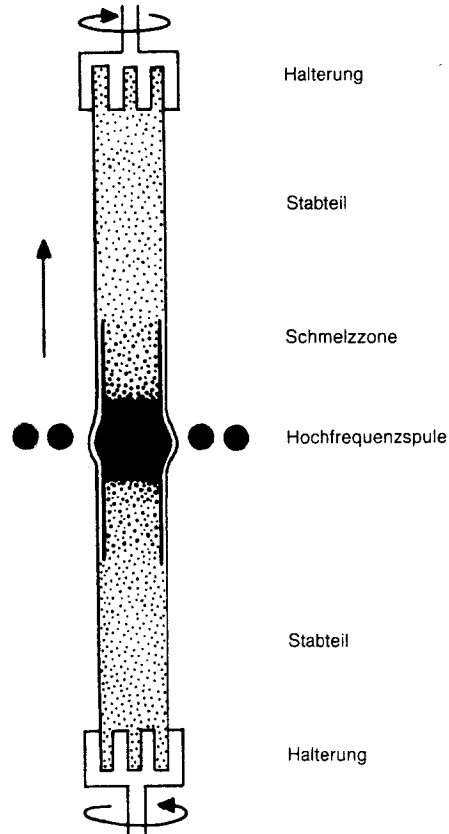
Die Notwendigkeit, hochreine Metalle zu erzeugen, führte zur Entwicklung neuer Schmelzmethoden und Verfahren für die Herstellung von Legierungen.

Die Herstellung von Legierungen

Eine der Methoden ist das sogenannte *Zonenschmelzen*. Es beruht darauf, daß bei der Kristallisation aus der Schmelze eines beliebigen Stoffes die in ihm gelösten

Beimengungen in der Schmelze verbleiben. (Daher ist das Eis, das sich aus salzigem Meerwasser bildet, fast salzfrei.)

Nehmen wir einen langen Metallstab, den wir von den in ihm gelösten Verunreinigungen reinigen wollen, und erhitzen ihn an einem Ende z. B. durch Hochfrequenzströme oder Elektronenstrahlen, bis eine schmale Zone des Stahls schmilzt. Diese geschmolzene Zone bewegen wir langsam durch den Stab, indem wir die Wärmequelle bewegen oder umgekehrt. Die gelösten Beimengungen konzentrieren sich dabei in der Schmelze. Erreicht die geschmolzene Zone das Stabende, frieren die Beimengungen dort ein. Wenn wir dies einige Male wiederholen, erhalten wir ein immer reineres Metall. (Man kann gleichzeitig auch mehrere Zonen über den Stab



Schematische Darstellung des vertikalen Zonenschmelzens

bewegen.) Das Ende des Stahls mit den Verunreinigungen wird dann einfach abgeschnitten, und es bleibt ein Stück Metall mit besonders hoher Reinheit.

Wenn man den Erzählungen der Jäger glauben darf, befreien sich auf eine ganz ähnliche Weise die Füchse von den Flöhen. Der Fuchs nimmt etwas Wolle zwischen die Zähne und steigt langsam rückwärtsgehend ins Wasser. Die Flöhe fürchten das Wasser sehr und flüchten auf den Kopf des Fuchses. Der taucht inzwischen soweit unter, daß nur noch die Schnauze mit der Wolle über dem Wasserspiegel verbleibt. Den Flöhen bleibt nichts weiter übrig, als sich in der Wolle, dem einzigen trockenen Platz, zu sammeln. Dann läßt der Fuchs plötzlich die Wolle aus den Zähnen gleiten und springt ans Ufer, um sich trocken zu schütteln. Die »Operation« ist beendet.

Durch Zonenschmelzen mit Elektronenstrahlbeheizung wurden im Laboratorium hochschmelzender und seltener Metalle des Baikow-Instituts für Metallurgie der AdW der UdSSR Einkristalle aller hochschmelzenden Metalle erhalten. Um eine Verunreinigung des zu reinigenden Metalls zu vermeiden, isoliert man es gewöhnlich von der Luft durch eine Quarz- oder Stahlarmatur, in der man ein Vakuum oder eine *Schutzgasatmosphäre* schafft.

Heute kann man schon *Einkristalle* aller Metalle und vieler Legierungen züchten. In dem Laboratorium wurden auch Methoden zur Züchtung von Einkristallen mit vorgegebener Orientierung sowie von Einkristallen aus Legierungen hochschmelzender Metalle, wie z. B. Wolfram mit Tantal, Rhenium, Molybdän, Niob mit Molybdän und Wolfram, entwickelt. Die Ausnutzung der Ungleichheit (der Anisotropie) der Eigenschaften eines Metall-

kristalls in verschiedenen Richtungen erlaubte es, die Qualität von vakuumelektronischen Bauelementen und Geräten deutlich zu erhöhen. Heute sind Einkristalle keine Seltenheit mehr, sie werden bereits industriell erzeugt.

Aus Einkristallen einer warmfesten Nickellegierung werden auch Turbinenschaufeln hergestellt, die einen wesentlich höheren Kriechwiderstand haben, wodurch die Betriebsdauer der Schaufeln in der Turbine auf ein Mehrfaches erhöht werden kann. So beträgt die Standfestigkeit der einkristallinen Probe aus der warmfesten Nickellegierung 100 h bei einer Temperatur von 1050°C und einer Belastung von 190 N/mm² und die des polykristallinen Materials nur 16 h.

Die Einkristallschaufeln haben viele Vorzüge: Sie sind plastisch, geben im Vakuum kein Gas ab und verändern nicht Form und Maße bei langem Betrieb unter hohen Temperaturen. Die Verwendung von Wolframeinkristallen, von Band, Folie und Draht aus Molybdänekristallen führte zu einer 10fachen Steigerung der Betriebsdauer einiger heute gebräuchlicher vakuumelektronischer Apparaturen sowie zur Entwicklung neuer Geräte mit höchster Empfindlichkeit und Zuverlässigkeit. Die Bedeutung der Einkristalle und deren Erzeugnisse als wichtige Bauteile modernster Geräte und Anlagen wächst laufend.

Heutzutage wird das Niveau der technischen Entwicklung eines Landes im wesentlichen nicht nur durch die Höhe der Erzeugung von Stahl, Roheisen oder Buntmetallen bestimmt, sondern auch durch die Produktion von Werkstoffen besonders hoher Reinheit sowie von seltenen Metallen, die oft neue, sehr wertvolle Eigenschaften aufweisen.

Metalle verbinden sich

Die überwiegende Mehrzahl aller metallischen Gegenstände wird aus Legierungen hergestellt. Sowohl die Bronze als auch das Messing, der Stahl und das Gußeisen – alle sind Legierungen. In der modernen Technik werden viele tausend Legierungen mit den unterschiedlichsten Eigenschaften verwendet.

Was ist eine Legierung?

Wenn ein Metall ein oder mehrere andere Elemente enthält, deren Anwesenheit für eine bestimmte Veränderung der Eigenschaften des Werkstoffs notwendig ist, sprechen wir von einer Legierung. An Hand von Beispielen wollen wir versuchen, mehr über diesen Begriff zu erfahren.

Wenn Sie durch ein Mikroskop ein Stück einer Legierung aus Blei und Antimon betrachten, so können Sie ein Mosaik aus verschiedenartigen Kristallen erkennen. Die einen werden vom Blei gebildet, die anderen vom Antimon. Man bezeichnet es als ein mechanisches Gemisch. Von dieser Art sind auch die Legierungen aus Aluminium mit Silizium, Wismut mit Kadmium usw. Aus den Aluminium-Silizium-Legierungen stellt man z. B. Teile von Flugzeugmotoren her, aus einer Legierung aus Blei, Kupfer und Antimon z. B. Lagerschalen. Die mechanischen Gemische haben eine kaum vorstellbare Kombination nützlicher Eigenschaften.

Man kann auch Legierungen solcher Metalle herstellen, wie z. B. Blei und Eisen oder Wismut und Eisen, die sich im schmelzflüssigen Zustand überhaupt nicht mischen. Diese Legierungen werden üblicherweise auf pulvermetallurgischem Wege erzeugt, d. h., man *sintert* die Pulver dieser Metalle bei hohen Temperaturen.

Neben den mechanischen Gemischen existieren sogenannte feste Lösungen – die Mischkristalle. Ihre Bezeichnung weist darauf hin, daß es sich um die atomare Vermischung eines Metalls mit einem anderen handelt. Kupfer und Nickel können sich – wie auch viele andere Metallpaare – unbegrenzt ineinander lösen. Im schmelzflüssigen Zustand sind viele Metalle ineinander löslich, d. h., die Atome des einen Metalls befinden sich zwischen den Atomen des anderen. Aber was geht bei der Erstarrung vor sich? Wenn die Atome des einen Metalls etwa die gleiche Größe wie die des anderen haben (genauer, wenn sich ihre Größe um nicht mehr als 15% unterscheidet), dann können sich die Atome gegenseitig auf ihren Gitterplätzen ersetzen. Solche Kristalle nennt man Substitutionsmischkristalle. Dazu gehören die Legierungen aus Eisen und Chrom oder Nickel, Kobalt und Eisen, Kupfer und Nickel. Sie finden eine breite Anwendung. In der Sowjetunion werden z. B. die kleinen Münzen, die in der Umgangssprache als »Silber« bezeichnet werden, aus einer Kupfer-Nickel-Legierung hergestellt. Wenn jedoch die Atome des gelösten Elements wesentlich kleiner als die des lösenden Metalls sind, dann erhält man die sogenannten Einlagerungsmischkristalle. In diesem Fall befinden sich die Atome des gelösten Elements zwischen den auf den Gitterplätzen sitzenden Atomen des Lösungsmetalls. Die metallischen festen Lösungen sind fest und plastisch. Die Mehrzahl der technischen Werkstoffe (nichtrostender Stahl, Messing, Duralumin) stellt eine derartige Lösung dar. Zwischen den Mischkristallen und den mechanischen Gemischen gibt es eine endlose Vielzahl von Übergangsstrukturen, in denen neben den Substitutions- und Einlagerungsmischkristallen auch selbständige Kristalle jedes einzelnen Metalls möglich sind.

Viele Metalle können sich unbegrenzt ineinander lösen. Diese Eigenschaften besitzen jedoch nur im Periodensystem einander naheliegende Elemente, die einen ähnlichen Aufbau der Elektronenschalen haben. Wenn sie sich in ein und derselben Gruppe befinden, weisen sie in der Regel den gleichen Gittertyp auf. Eine begrenzte Löslichkeit kann bei Elementen mit verschiedenem Kristallgittertyp auftreten. Viele Metalle bilden nur bis zu einer bestimmten Konzentration eines Metalls im anderen Mischkristalle. Die gegenseitige Löslichkeit ist um so geringer, je größer der Unterschied zwischen den relativen Atommassen der Elemente ist. Metalle, die sehr weit voneinander im Periodensystem entfernt sind, bilden entweder mechanische Gemische oder Verbindungen. Legierungen können also auch Verbindungen von Metallen mit Nichtmetallen oder verschiedenen Metallen untereinander enthalten.

Verbindungsbildung tritt bevorzugt zwischen solchen Elementen auf, die sich stark im Aufbau ihrer äußeren Elektronenhüllen unterscheiden, d. h., die im Periodensystem weit voneinander entfernt sind. Dabei kann man die verschiedensten Typen der Bindung zwischen den Elementen antreffen. Am häufigsten sind Verbindungen mit gemischtem Bindungscharakter; deshalb sind aus den Formeln solcher Verbindungen auch nicht die üblichen Wertigkeiten zu erkennen, z. B. $MgZn_5$, $NaZn_{12}$, JB_{104} . Sind vorwiegend Metalle beteiligt, spricht man auch von intermetallischen Verbindungen. Ein und dasselbe Metallpaar kann verschiedene Verbindungen bilden, z. B. Natrium mit Zinn insgesamt neun!

Im Unterschied zu Metallen, die eine verhältnismäßig einfache Kristallstruktur mit nur einigen Atomen in der Elementarzelle besitzen, weisen intermetallische Verbindungen oft einen sehr komplizierten Aufbau auf. So hat die Beta-Phase der Aluminium-Magnesium-Legierung 104 Atome, die Verbindung zwischen Yttrium und Bor sogar 1700 Atome in der Elementarzelle!

Die Vielfalt der Bindungstypen zwischen den Atomen und in den Kristallgittern führt bei den Verbindungen zu einem breiten Spektrum besonderer physikalisch-chemischer, elektrischer, magnetischer, mechanischer und anderer Eigenschaften. So können sich z. B. die elektrischen Eigenschaften einer Reihe solcher Verbindungen von der Supraleitfähigkeit in flüssigem Helium bis zu halbleitenden Eigenschaften bei Raumtemperatur verändern.

Sowohl die Supraleiter als auch die Permanentmagnete mit außergewöhnlichen Werten sind intermetallische Verbindungen. Verbindungen sind auch in den Legierungen enthalten, die einen sehr hohen Schmelzpunkt haben (hafniumkarbidhaltiges Titan schmilzt bei 4215°C). Die sogenannten Hartmetalle bestehen zu 90% aus Verbindungen (Wolframkarbiden u. a.). In den Werkzeugstählen ist eine bedeutende Menge von Karbiden des Eisens, Bors, Chroms, Mangans, Vanadiums, Wolframs, Molybdäns und anderer Metalle enthalten.

In den Lagermetallen spielen die intermetallischen Verbindungen die Rolle harter Inseln in der zähen Grundmasse, z. B. die Kupfer-Zinn-Verbindungen in der Zinngrundmasse.

Gerade die intermetallischen Verbindungen sind es, die die Festigkeit der Leichtmetall-Legierungen nach der Wärmebehandlung erhöhen.

Bei normalen Bedingungen zeichnen sich die intermetallischen Verbindungen durch sehr hohe Härte und Sprödigkeit aus. Darum sahen viele Metallkundler vor nicht allzu langer Zeit noch keine Perspektive für deren industrielle Anwendung. Es hat sich jedoch gezeigt, daß die intermetallischen Verbindungen nur bei gewöhnlicher Temperatur spröde sind. Bei Untersuchungen, die von Sawitzkij im Institut für allgemeine und anorganische Chemie der AdW der UdSSR durchgeführt worden waren, fand man, daß sich bei Temperaturen in einem gewissen Bereich unterhalb der Schmelztemperatur alle intermetallischen Verbindungen wie plastische Körper verhielten. Damit konnte man eine Technologie zur Herstellung von Erzeugnissen aus diesen Stoffen aufstellen.

Später wurde noch eine andere wichtige und interessante Erscheinung beobachtet: das Anwachsen der Festigkeit der intermetallischen Verbindungen und der Halbleiter (Germanium, Silizium, Diamant) bei Erwärmung auf Temperaturen, die 50 bis 80% der Schmelztemperatur betragen. (Bei plastischen Metallen und Legierungen fällt dagegen die Festigkeit mit steigender Temperatur.) Diese Erhöhung der Festigkeit erreicht mitunter Hunderte von Prozenten! Eine vollständige Erklärung dafür wurde aber bis heute noch nicht gefunden. Neben dem großen wissenschaftlichen Interesse hat dieser Effekt auch eine sehr wichtige praktische Bedeutung insbesondere für die Entwicklung neuer warmfester Werkstoffe.

Legierungen bilden sich nicht nur beim Schmelzen von Metallen, sondern auch beim Sintern ihrer Pulver sowie bei der Diffusion von Metall- oder Nichtmetallatomen in die Oberflächenschicht eines metallischen Teils. Mit solchen Verfahren kann man optimale Kombinationen von Eigenschaften herstellen, z.B. einen zähen Kern und eine harte, verschleißarme Oberfläche bei Kurbelwellen und Zahnrädern. Diese Teile stellt man aus weichem Stahl mit geringem Kohlenstoffgehalt her und bringt sie bei 900 bis 950°C mit Kohlenstoff zusammen, der sich in der Oberflächenschicht löst. Auf dem elastischen und zähen Kern des Teils wird also gleichsam eine Schutzschicht, ein Panzer aus hartem Stahl mit hohem Kohlenstoffgehalt, gebildet. Auf ähnliche Weise kann man die Oberflächenschicht mit Stickstoff anreichern, um damit eine hohe Härte zu erzielen, mit Chrom, um eine hohe Korrosionsfestigkeit herbeizuführen, u. a.

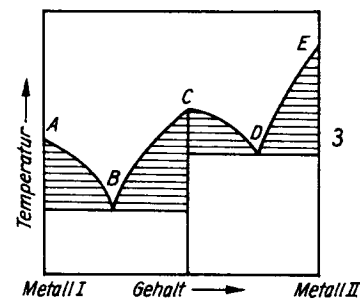
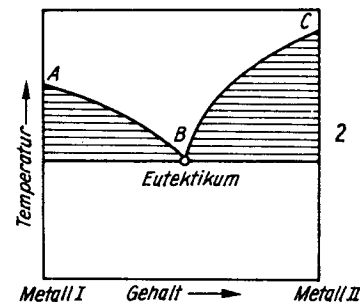
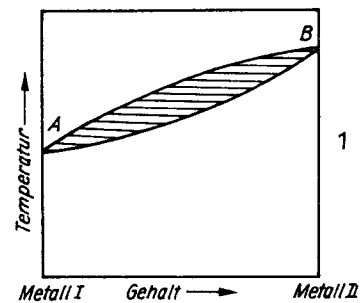
Mit der weiteren Erforschung von Legierungen wächst ihre Zahl ständig. Wie allein die 26 Buchstaben des Alphabets – verschieden kombiniert – den ganzen Reichtum einer Sprache ergeben, so erhält man aus 80 Metallen eine endlose Vielzahl von Legierungen mit den unterschiedlichsten Eigenschaften. Im Prinzip kann also jeder beliebige Werkstoff, der benötigt wird, geschaffen werden.

Die »topographische Landkarte« der Legierungen

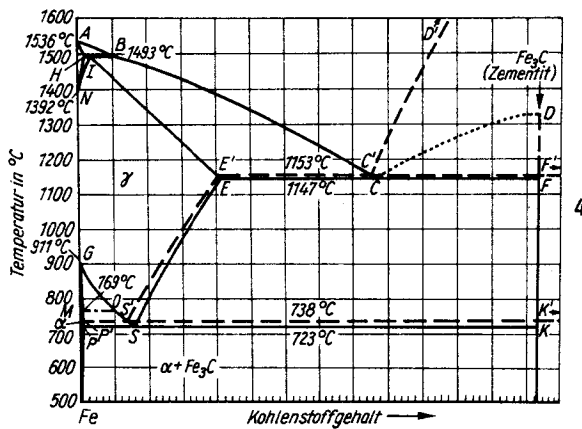
Der Ausruf des griechischen Mathematikers Archimedes »Heureka!« (Ich hab's gefunden!) informierte die Welt nicht nur von der Entdeckung eines Naturgesetzes, das jetzt seinen Namen trägt, sondern auch von der Geburt der physikalisch-chemischen Analyse. Tatsächlich konnte Archimedes schon im dritten Jahrhundert v. u. Z. durch Messung der Dichte der Königskrone deren chemische Zusammensetzung bestimmen und daraus ableiten, ob sie aus reinem Gold oder aus einer Legierung hergestellt worden war. Viele Methoden der physikochemischen Analyse von Legierungen wurden seitdem entwickelt und vervollkommen. So hat das sowjetische Akademiemitglied Kurnakow zur Verbesserung der thermischen Analyse, einem Verfahren, das zur Untersuchung von Legierungssystemen unschätzbare Dienste geleistet hat, beigetragen. Die kontinuierliche Veränderung der Zusammensetzung einer Legierung hat eine

laufende Veränderung ihrer physikalischen Eigenschaften, der Dichte, der Schmelz- und Siedetemperatur, der elektrischen Leitfähigkeit u. a. zur Folge. Für sehr viele Legierungen werden diese Werte in sogenannten Zustandsdiagrammen und Zusammensetzungs-Eigenchafts-Schaubildern festgehalten.

Die Sprache dieser Diagramme ist wie die Sprache der chemischen Formeln international. Wie eine topographische Karte dem, der sie zu lesen versteht, ermöglicht, sich schnell in einer unbekanntenen Gegend zu orientieren, ihm Wege, Sümpfe, Anhöhen usw. zeigt, so helfen auch diese Schaubilder dem Metallurgen und metallverarbeitenden Ingenieur, sich schnell über ein bestimmtes Legierungssystem zu informieren.



Zustandsdiagramme



Eisen-Kohlenstoff-Diagramm

Wenn die Komponenten einer Legierung uneingeschränkt ineinander löslich sind, wie Kupfer und Nickel und andere Metallkombinationen, dann hat das Diagramm die Form, die im Bild 1 dargestellt ist. Dort wird in horizontaler Richtung die Zusammensetzung angegeben und in vertikaler Richtung die Temperatur. Der Punkt A bezeichnet die Schmelztemperatur des ersten Metalls, der Punkt B die des zweiten. Das Schmelzverhalten von Legierungen aus beiden Komponenten wird durch die zwei Verbindungslinien gekennzeichnet. Offensichtlich haben alle Legierungen keine konstante Schmelztemperatur, sondern ein Temperaturintervall, in dem sie aufschmelzen oder, wenn man sie aus der Schmelze abkühlt, erstarren. Unterhalb der unteren Linie sind alle Legierungen fest und liegen als Mischkristall bzw. feste Lösung der jeweiligen Zusammensetzung vor. Oberhalb der oberen Linie ist alles flüssig und atomar vermischt. Zwischen den Linien sind die Kristalle neben der Schmelze beständig, und zwar liegen für eine bestimmte Legierung in diesem Fall immer B-reichere Kristalle neben A-reichere Schmelze vor.

Die Legierung B hat in Bild 2 wie die reinen Komponenten nur einen Schmelzpunkt, der niedriger als der der beiden Metalle liegt. Alle anderen Zusammensetzungen weisen wieder ein Temperaturintervall auf, in dem reine Kristalle A neben C-reicher Schmelze (links von B) oder reine Kristalle C neben A-reicher Schmelze vorliegen (rechts von B).

Das eutektische Diagramm zeigt deutlich, daß man hier vergebens Legierungen sucht, die warmer als das niedrig schmelzende Metall sind. Dafür besitzen diese Legierungen ausgezeichnete Gießeigenschaften und haben als Lötmaterialien eine große Bedeutung.

Das Zustandsschaubild im Bild 3 gilt für ein Legierungssystem, in dem eine Verbindung C aus den beiden Metallen auftritt. Daß hierbei ein neuer Stoff mit einer eigenen Kristallstruktur und speziellen Eigenschaften vorliegt, ist daran erkennbar, daß man sich das Schaubild aus zwei Diagrammen des Typs 2 zusammengesetzt denken kann.

Wenn aber nun die die Legierung bildenden Komponenten sowohl Mischkristalle als auch gleichzeitig eine chemische Verbindung bilden, dann entsteht ein so kompliziertes Diagramm, wie Bild 4 zeigt. Es stellt das reale Zustandsdiagramm Eisen-Kohlenstoff, die »topographische Karte« des Gußeisens und der Stähle, dar. Schon zu Beginn unseres Jahrhunderts hat Kurnakow die Gesetzmäßigkeit bei der Veränderung vieler physikalischer Eigenschaften von Zweistofflegierungen in Abhängigkeit von ihrer Zusammensetzung und Struktur festgestellt.

Von sowjetischen Wissenschaftlern wurden mehr als 40% der in der Literatur veröffentlichten Zustandsdiagramme und Zusammensetzungs-Eigenschafts-Schaubilder metallischer Systeme aufgestellt. In ihnen werden knapp und anschaulich alle Beziehungen zwischen Zusammensetzung, Struktur und Gefüge sowie den Eigenschaften der Legierungen wiedergegeben, weswegen sie als theoretische Grundlage für die rationelle Auswahl von Legierungen dienen.

In den letzten Jahren wurde im Baikow-Institut für Metallurgie der AdW der UdSSR zur Erleichterung und Beschleunigung der Aufstellung der Zustandsdiagramme und der Zusammensetzungs-Eigenschafts-Schaubilder mit Erfolg die elektronische Datenverarbeitung eingesetzt.

Vor nicht allzulanger Zeit hätte man damit das Kapitel beschließen können. Metalle und Legierungen werden jedoch nicht nur als kompakte Werkstücke eingesetzt. Schon lange ist bekannt, daß man zum Schutze eines ungenügend korrosionsbeständigen Metalls dessen Oberfläche mit einem anderen, chemisch beständigeren Metall bedeckt. So verzinkt man z.B. Konservendosen, d. h., man bedeckt sie mit Zinn, das von organi-

schen Säuren und anderen aggressiven Stoffen, die in den Speisen vorhanden sind, nicht angegriffen wird. Verchromte, vergoldete, versilberte, vernickelte oder verzinkte Gegenstände hat wahrscheinlich schon jeder gesehen.

Das gemeinsame Warmwalzen zweier Metallstreifen verbindet die Deckschicht fest mit dem Grundmetall. Nach dieser Methode können Bleche, Drähte und andere Erzeugnisse aus verschiedenen Metallen und Legierungen hergestellt werden. Auch im Institut für Hydrodynamik der sibirischen Abteilung der AdW der UdSSR beschäftigt man sich mit einem zukunftsreichen Verfahren zur Verbindung zweier Metalle – dem Explosionsschweißen. Welche Möglichkeiten bietet dieses Verfahren? Mit Hilfe einer Explosion kann man zwei, drei und mehr Schichten verschiedener Metalle über ihre gesamte Fläche verbinden. Auf diese Weise wurden z. B. die Schaufeln des Turbinenrades des Krasnojarsker Wasserkraftwerks mit nichtrostendem Stahl plattiert. Es wäre sehr teuer geworden, hätte man die gewaltigen Schaufeln vollständig aus nichtrostendem Stahl hergestellt. Dieses Verfahren erlaubt nicht nur die Produktion ebener Bleche aus Bimetallen (aus zwei Metallen), sondern es ermöglicht auch, Oberflächen mit komplizierten Krümmungen außen und innen zu belegen. Mit dem Verfahren kann man auch Metalle verschweißen, die anders überhaupt nicht zu verbinden sind.

Verbundwerkstoffe

Der französische Gärtner Joséphe Monier züchtete Palmen. Eines Tages geschah es, daß er nicht genug Geld für Kübel hatte, in denen er eine Partie Palmen nach England senden wollte. Der Gärtner versuchte, Kübel aus Beton herzustellen, den er gerade vorrätig hatte. Die Kübel wurden schwer, und was noch schlimmer war, sie waren nicht sehr stabil. Dazu kam, daß die wachsenden Palmen mit ihren Wurzeln die Betonwände sprengten. Deshalb armierte Monier die Kübel mit Eisenstäben. Die von dem eisernen Käfig gehaltenen Kübel waren stabil, aber sie sahen nicht schön aus. Monier beschloß, das Eisenskelett auch von außen mit Beton zu verputzen. Die Kübel wurden glatt und erstaunlich stabil. Um Zement zu sparen und die Masse zu verringern, machte der Gärtner die Wände dünner und dünner. So ist 1867 der

Stahlbeton geboren worden – der Vertreter einer ganzen Klasse von Verbundwerkstoffen, bei denen die positiven Eigenschaften der sie bildenden Komponenten kombiniert werden.

Verbundwerkstoffe anderer Art wurden schon im alten Ägypten verwendet: 1450 v. u. Z. hat man durch Schilfverstärkung von Ziegeln aus Nilschlamm die Festigkeit auf etwa 20 N/mm² anheben können, d. h., die Festigkeit wurde verdreifacht. Der Turm zu Babylon bestand aus Lehmquadern, die mit Ziegenhaaren verstärkt waren. Die Körper pflanzlicher und tierischer Lebewesen sind auch nichts anderes als Stoffverbunde.

Die Eigenschaften der Verbundwerkstoffe sind manchmal einzigartig. So ist z. B. bei 1130°C die Zeitstandfestigkeit eines Verbundwerkstoffs auf Nickelbasis, armiert mit Wolfram- und Molybdänfäden, doppelt so hoch wie bei Nickellegierungen mit der höchsten Warmfestigkeit.

Wenn sich zerstäubtes Aluminium auf einem Geflecht von Stahldrähten absetzt, ergibt sich ein silbriger



Zum ersten Mal wurden von Monier Bewehrungseisen in Betonbottichen für Palmen eingesetzt

durchsichtiges Band, das weich und plastisch ist. Unter einer Presse kann man daraus leicht Teile beliebiger Form herstellen, die keinerlei nachfolgende mechanische Bearbeitung erfordern. Dieses Material hat die Dichte von Aluminium und die Festigkeit von Stahl. Die Herstellung eines solchen Verbundwerkstoffs wurde im Baikow-Institut erprobt.

Wenn eine Grundmasse aus Aluminium mit langen Borfäden armiert wird, erhält man einen Verbundwerkstoff, der in seiner Festigkeit und seinem *Elastizitätsmodul* die besten Aluminiumlegierungen um das 2- bis 3fache übertrifft. Ein solcher Werkstoff ist z. B. in der Sowjetunion entwickelt worden. Es werden daraus Verstärkungen hergestellt, die den Holm eines Flugzeugs verstärken und dessen Steifigkeit um fast das 1,5fache erhöhen.

Wenn man mit Fäden aus Kohlenstoff Kunststoffe armiert, so erhält man einen Verbundwerkstoff, mit dem man die Masse von Flugzeugbauteilen um das 2fache verringern kann. Aus ihm stellt man sowohl Blätter von Hubschrauber-Rotoren als auch Holme und Heckleitwerke her. Auch für Erzeugnisse des Massenbedarfs, wie Tennisschläger oder Angelruten, wird dieser Verbundwerkstoff verwendet.

Wenn man Nickel mit hochschmelzenden Metallen verfestigt, erhält man einen Verbundwerkstoff, der bei Temperaturen über 1000°C eingesetzt werden kann.

Es ist auch möglich, ein plastisches Metall, z. B. Titan, mit superharten Einkristallen oder Drähten (sagen wir aus Molybdän) zu armieren. Die Wissenschaftler hoffen, daß durch die Armierung von Metallen mit superfesten Einkristallen schon in naher Zukunft Werkstoffe geschaffen werden, deren Festigkeit sich der theoretisch möglichen nähert. Einige Erzeugnisse aus Titan, das mit Molybdändraht armiert wurde, sind viel langlebiger geworden. Die Schaffung von armierten Werkstoffen auf der Basis von Aluminium- und Berylliumoxid könnte zu einer Erhöhung der Festigkeit auf das 5- bis 10fache der Festigkeit der besten gegenwärtig bekannten Stähle führen.

Neue Verbundwerkstoffe, die interessante Eigenschaften besitzen, sind die Metallpolymere. Diese neuen Materialien erwerben einige metallische Eigenschaften und behalten gleichzeitig die Vorzüge der Polymere: Elastizität, geringe Dichte, leichte Verarbeitbarkeit zu Erzeugnissen u. a.

Verbundwerkstoffe sind auch die Schaummetalle. Schaumaluminium z. B. kann bei ausreichender Festigkeit 5mal leichter als Wasser sein, d. h. die gleiche Dichte wie das leichteste Holz – Balsa genannt – haben (aus ihm wurde das berühmte Floß »Kon-Tiki« gebaut). Die Festigkeit von gepreßtem Schaumaluminium ist die gleiche wie die des gegossenen Metalls bei dem halben Wert der Dichte ($1,4 \text{ g/cm}^3$). Dieses Material hat nicht nur eine breite Anwendung im Flugzeug- und Raketenbau gefunden, sondern man stellt aus ihm auch Türpaneele, Fensterrahmen, ganze Wände und Decken her. Das Schaumaluminium hat nicht die Mängel des Holzes. Man kann es ohne Mühe sägen, bohren und biegen, man kann Nägel einschlagen, es leicht kleben, löten und schweißen. Während die Festigkeit des Holzes bei Belastung quer zu den Fasern in einigen Fällen bis zum 30fachen geringer ist als parallel zu ihnen, weist das Schaumaluminium die gleiche Festigkeit in allen Richtungen auf. Es ist beständig gegen Feuchtigkeit, fault und brennt nicht. Bei Serienfertigung sind die Gegenstände aus Schaumaluminium nicht teurer als aus Holz.

Schaumwerkstoffe wurden auch schon aus Magnesium, Nickel, Kupfer, Gußeisen und Stahl hergestellt. Der metallische Schaum bildet sich bei der Zerlegung von Stoffen im flüssigen Metall, die dabei viel Gas abgeben. Wichtig ist, den Schaum schnell abzukühlen, ehe die Gase entweichen können.

In der letzten Zeit begann auch die Herstellung von Verbundwerkstoffen durch Beschießen der Oberfläche eines Elements mit Ionen eines anderen Elements, die in modernen Elementarteilchenbeschleunigern gewonnen wurden.

Die Pulvermetallurgie

Metallurgische Verbundwerkstoffe werden nach den verschiedensten Verfahren erzeugt.

Eines davon ist die Pulvermetallurgie, die es erlaubt, durch Pressen und Sintern aus pulverförmigen Metallen, Graphit, Karbiden, Oxiden und anderen Stoffen insbesondere Kleinteile herzustellen. Pulvermetallurgisch erzeugte Hartmetalle können sowohl Glas als auch Porzellan und Gestein bearbeiten. Hartmetalle ersetzen oft den teuren und spröden Diamant, mit dem sie in der Härte konkurrieren.

Mit den Methoden der Pulvermetallurgie gelingt die Erzeugung von Verbindungen auf der Basis von Kobalt mit Seltenerdmetallen, die die Herstellung von Permanentmagneten mit Rekordwerten gestatten.

Die Pulvermetallurgie ermöglicht auch die Herstellung von Verbundwerkstoffen aus Keramik und Metall, von

denen schon lange die Architekten und Bauleute geträumt haben. Dieses Metall kann bei kolossalen Druckbelastungen und starken Biegebeanspruchungen eingesetzt werden. Möglich ist, daß dank diesen Werkstoffen Hochbauten errichtet werden, die noch höher als der Fernsehturm in Moskau-Ostankino sind.

Das Fundament der Zivilisation

Die Eisenzeit dauert an

Die Epochen der menschlichen Geschichte wurden nach dem in der betreffenden Zeit wichtigsten Werkstoff benannt. Folgt man dieser Tradition, muß auch unsere Zeit als Eisenzeit bezeichnet werden. Mindestens 90 % aller Konstruktionsteile bestehen auch heute noch aus Eisenwerkstoffen.

Nach der Diskussion allgemeiner Fragen der Metallkunde wenden wir uns nun den einzelnen Metallen zu



Griechischer Schmied, dargestellt auf einer attischen Schwarzfiguren-Vase

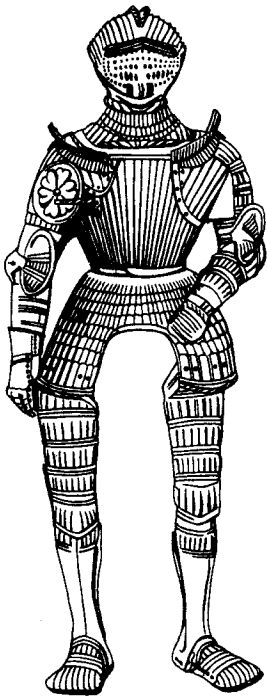
und beginnen deshalb mit dem Eisen – einem der Fundamente der Zivilisation, wie es W. I. Lenin nannte.

Bei den alten Ägyptern hieß das Eisen »vaajepere«, was »von Himmelsherkunft« bedeutet. »Stein des Himmels« nannten es auch die Kopten. Kosmische Boten spielen hierbei jedoch überhaupt keine Rolle. Das erste Eisen, mit dem der Mensch bekannt wurde, war Meteor-eisen. Gegenstände aus himmlischem Eisen wurden schon seit undenklichen Zeiten hergestellt. Die Erschmelzung aus Erzen erfolgte erst viel später, gelang es doch vorerst nicht, die dazu notwendige Temperatur zu erreichen.

Es gab Zeiten, in denen das Eisen höher im Kurs stand als Gold. So wird in der »Geographie« des altgriechischen Geographen und Historikers Strabo gesagt, daß einige afrikanische Völker für Eisen die 10fache Masse an Gold gegeben haben. In der »Odyssee« Homers wird erzählt, daß dem Sieger in den Spielen als Auszeichnung ein Stück Gold und ein Stück Eisen übergeben worden ist.

In einem Brief an den Hethitenkönig bittet einer der ägyptischen Pharaonen darum, ihm Eisen im Austausch für Gold zu schicken. Von dem außerordentlichen Wert des Eisens im Altertum zeugen auch die Waffen, die in skandinavischen Gräbern gefunden worden sind: Nur die Schneiden der Schwerter waren aus Eisen, alles übrige war aus Bronze hergestellt.

Die Bedeutung des Eisens in der Geschichte der Menschheit erkannte man schon im Altertum. Der alt-römische Gelehrte Plinius der Ältere schrieb in seiner »Naturgeschichte«: »Die Bergarbeiter in den Eisenerzgruben gewinnen dem Menschen das vorzüglichste und verderblichste Werkzeug. Denn mit diesem Werkzeug brechen wir die Erde auf, setzen Sträucher, bearbeiten



Maximiliansharnisch, 1520–1530

Gärten und zwingen die Weinreben, sich jedes Jahr zu verjüngen, indem wir ihre wilden Triebe beschneiden. Mit diesem Werkzeug bauen wir Häuser, spalten Steine und verwenden das Eisen für alle möglichen Bedürfnisse. Doch mit dem gleichen Eisen führen wir Krieg, schlagen Schlachten, rauben und benutzen es nicht nur in der Hand, sondern werfen es »geflügelt« in die Ferne, sei es aus Schießscharten, sei es von kräftiger Hand oder als befederter Pfeil. Das ist meiner Meinung nach die allerschändlichste menschliche List. Damit der Tod den Menschen schneller ereile, beflügelt man ihn und gibt dem Eisen Federn. Die Schuld daran ist aber dem Menschen zuzuschreiben, nicht der Natur.«

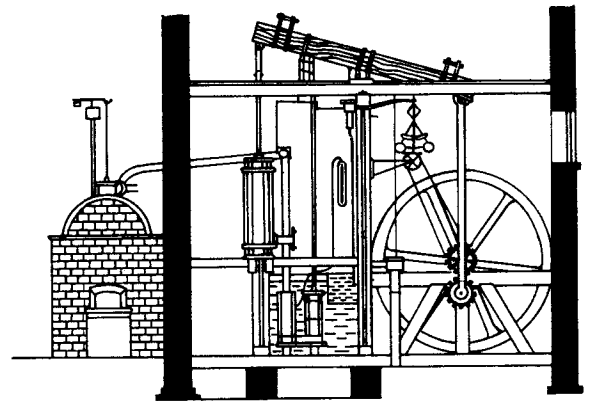
Die eisernen Werkzeuge erhöhten die Produktivität der Landwirtschaft um ein vielfaches. Ohne sie wäre auch die Entwicklung des Handwerks unmöglich gewesen. Doch das alles war erst die Vorgeschichte des Eisenzeitalters. Der Triumphzug dieses Metalls begann im 19. Jahrhundert (wenn auch die Historiker der Meinung

sind, daß das Eisenzeitalter nicht allzulange vor unserer Zeitrechnung zu Ende ging): Im Jahre 1800 erreichte die Eisenerzeugung in der gesamten Welt keine halbe Million Tonnen, gegen Ende des 19. Jahrhunderts betrug sie jedoch schon 3,5 Millionen Tonnen je Jahr und übersteigt in unseren Tagen 700 Millionen Tonnen. Nach kühnen Prognosen amerikanischer Wissenschaftler besteht die Wahrscheinlichkeit, daß im Jahre 2000 3 Milliarden Tonnen Eisen produziert werden.

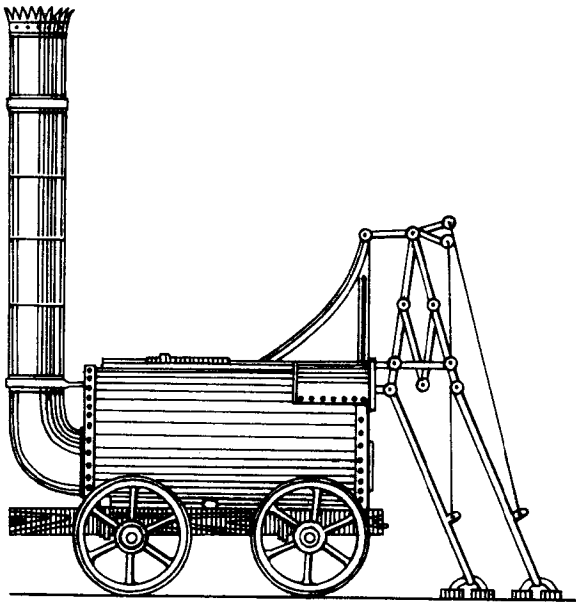
1977 wurden in der Sowjetunion 147 Millionen Tonnen Stahl und 107 Millionen Tonnen Roheisen erschmolzen sowie 118 Millionen Tonnen Walzgut, davon wurden 102 Millionen Tonnen Fertigerzeugnisse hergestellt. In der Sowjetunion werden mehr Roheisen und Stahl als in jedem anderen Land erzeugt.

Eisen heute – das sind Wasserkraftwerke und Masten für Hochspannungsleitungen, Stahlskelette für Gebäude und Brücken. Das sind Rohrleitungen für Wasser, Erdöl und Gas. Das sind Autos, Traktoren und Eisenbahnen. Das ist das Herzstück der gesamten Industrie – Metallbearbeitungsmaschinen, ohne die kein Auto, kein Fernsehgerät, kein Raumschiff gebaut werden kann. Das sind die Dächer der Häuser sowie Konservendosen, Kinderwagen, Messer, Nägel, Nadeln usw.

Doch Eisen heute – das sind auch der Schutz der Panzer, die Läufe der Artilleriegeschütze, Gewehre und Maschinenpistolen. Das sind Atom-U-Boote, Flugzeuge und Raketen. Das sind Geschosse, Minen, Bomben und eine Vielzahl anderer Werkzeuge der Zerstörung und des Todes.



Wattsche Dampfmaschine



Lokomotive mit Stelzen, erbaut 1813 von Thomas Brunton

Nicht nur die ökonomische, sondern auch die militärische Stärke eines Landes wird in erster Linie durch die Höhe der Stahlerzeugung bestimmt. Eisen ist der wichtigste Werkstoff der Gegenwart.

Eisen ist auf der Erde weit verbreitet. Es ist nach Aluminium das zweithäufigste Metall: In der Erdkruste lagern mindestens 775 000 000 Milliarden Tonnen Eisen. Die Sowjetunion besitzt praktisch unerschöpfliche Reserven davon. Allein die Kursker Magnetanomalie birgt 40 Milliarden Tonnen Eisen.

Der Charakter des Eisens

Reines Eisen ist ein silberweißes, zähes, gut schmiegbares Metall. Es ist so weich und läßt sich so gut walzen, daß man aus ihm z. B. Bleche, die dünner als Zigarettenpapier sind, herstellen kann. Eisen schmilzt bei 1536°C und siedet bei etwa 3200°C.

In der Natur existieren vier stabile Isotope des Eisens. Am häufigsten ist das Isotop mit der relativen Atommasse 56 (91,68%). In der äußersten Schale des Eisen-

atoms befinden sich 2, in der nächsten 14 Elektronen. Da das Atom leicht die beiden Außenelektronen abgibt, kann das Eisen zweiwertig sein. Doch auch ein Elektron der nächsten Schale kann dieselbe verlassen, und deshalb ist dieses Metall oft dreiwertig.

Reines Eisen ist jedoch nicht sehr fest. Alle Gegenstände, die man gewöhnlich als eisern bezeichnet, bestehen im allgemeinen aus Stahl oder Gußeisen, d. h. aus Eisen-Kohlenstoff-Legierungen.

Eisen ist eines der »Chamäleons« unter den Metallen und hat bei verschiedenen Temperaturen unterschiedliches Kristallgitter. Wenn man es langsam erwärmt, verhält es sich bei bestimmten Temperaturen sehr sonderbar: Bei 769°C, 911°C, 1392°C und 1536°C bleibt die Temperatur trotz ständiger Wärmezufuhr eine bestimmte Zeit konstant. Wo bleibt hierbei die Wärmeenergie? Der *Energieerhaltungssatz* wird natürlich nicht verletzt. Bei 769°C verliert das Eisen seine ferromagnetischen Eigenschaften, das Alpha-Eisen verwandelt sich in das Beta-Eisen. Bei 911°C erfolgt eine Änderung des Gitteraufbaus. Dabei wird das kubisch-raumzentrierte Gitter in ein kubisch-flächenzentriertes umgebaut. Das ist das Gamma-Eisen. Bei 1392°C erfolgt noch eine Umwandlung – das Gitter wird erneut kubisch-raumzentriert, jedoch mit größeren Atomabständen als beim Beta-Eisen. Diese letzte Form ist das Delta-Eisen. Für eben diese Umwandlungen wird die Energie verbraucht, wenn die Temperatur des Eisens trotz ständiger Wärmezufuhr nicht steigt. Bei der Abkühlung des geschmolzenen Eisens erfolgt alles in umgekehrter Reihenfolge.

Die Festigkeit ... wird durch Kohlenstoff verliehen!

Wir wissen schon, daß reines Eisen so weich ist, daß es weder für die Herstellung von Maschinen, Geräten, Brücken oder die Armierung von Häusern noch für Dachbleche geeignet ist. Zum Konstruktionsmaterial wird es erst durch die Zugabe von Kohlenstoff. Der weiche Ruß oder die Holzkohle kann tatsächlich das weiche Eisen in harten Stahl und Gußeisen verwandeln. In der modernen Metallurgie verwendet man dafür Koks. Alle Gußeisensorten und Stähle sind Legierungen von Eisen und Kohlenstoff.

Wenn im Eisen 0,05 bis 0,3% Kohlenstoff enthalten sind, dann läßt sich der Stahl gut zu Blechen walzen, im

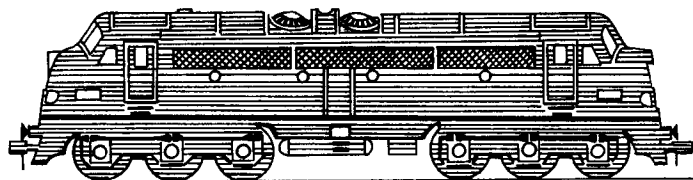
kalten Zustand biegen, pressen, tiefziehen. Ein Schneidestahl hebt leicht einen langen, nichtbrechenden Span von ihm ab. Solche Stähle lassen sich ausgezeichnet schweißen und brennschneiden, aber kaum härten. Aus Stahl mit 0,3 bis 0,45 % Kohlenstoff stellt man z. B. Wellen und Achsen her, aus Stahl mit 0,5 bis 0,7 % Schienen. Diese Stähle nennt man Baustähle.

Damit sind die Vorzüge, die das Eisen bietet, noch lange nicht erschöpft. Eine seiner herausragenden Eigenschaften ist neben dem Modifikationswechsel die Fähigkeit, außer Kohlenstoff noch andere Legierungselemente aufzunehmen. Auf diese Weise kommt man zu legierten Stählen, ähnlich wie durch das Legieren von Kupfer mit Zink und Zinn Messing, Bronze und Rotguß entstehen. Die wichtigsten Legierungselemente für Stahl sind Mangan, Chrom, Nickel, Silizium, Wolfram, Molybdän, Vanadium. Aber auch solche Elemente wie Aluminium, Titan, Niob, Zirkon, Bor und das bereits genannte Vanadium haben Bedeutung für die Stahlmetallurgie als sogenannte Mikrolegierungselemente vor allem gerade deshalb, weil sie schon in kleinen Gehalten von wenigen hundertstel bzw. zehntel Prozent bemerkenswerte positive Veränderungen der Stahleigenschaften bewirken können. Kupfer, Stickstoff, Phosphor, Blei und Schwefel kommen begrenzt als Legierungselemente für bestimmte Zwecke in Frage. Dagegen sind Edelmetalle niemals Legierungselemente für Stahl, auch nicht für den sogenannten Silberstahl. Schließlich soll nicht unerwähnt bleiben, daß jedoch dem Stahl in Sonderfällen auch sehr seltene Elemente zulegiert werden, wie Zer, Selen und Tellur, wobei zu bedenken ist, daß das Vorkommen von Selen in der Erdkruste geringer als das von Silber ist und die Tellurvorkommen sogar nur etwa halb so groß wie die von Platin oder Gold sind.

Die Legierungselemente verändern die Eigenschaften von Eisen oft so drastisch, daß die Eisenlegierungen

oder legierten Stähle in vieler Hinsicht dem reinen Eisen überhaupt nicht mehr ähnlich sind. Wie bereits beschrieben wurde, ist das Gitter des reinen Eisens bis 911 °C kubisch-raumzentriert und die kubisch-flächenzentrierte Modifikation erst oberhalb dieser Temperaturgrenze stabil. Je nach der Größe ihres Atomvolumens verschieben die Legierungselemente diese charakteristische Temperatur entweder nach oben oder nach unten, wie Osmond schon 1890 gefunden hat. Mangan, Nickel und Kobalt in Gehalten von mehreren Prozent stabilisieren die kubisch-flächenzentrierte Phase so weit, daß die entsprechenden Eisenlegierungen auch bei Raumtemperatur und noch weit tieferen Temperaturen eben dieses Grundgitter mit allen seinen Eigenarten besitzen. Kohlenstoff und Stickstoff unterstützen diese Wirkung noch. Gefüge des kubisch-flächenzentrierten Grundgittertypes bei Stählen bezeichnet man überall auf der Erde zu Ehren des auf diesem Gebiet verdienstvollen Forschers Roberts-Austen als Austenit. Daher rührt auch die Bezeichnung »austenitische Stähle«. Austenitische Stähle sind hochlegiert. Man kann sich denken, daß sie, bedingt durch den hohen Legierungsgehalt, nicht zu den billigsten Stählen gehören; trotzdem kann man sie wirtschaftlich einsetzen und in vielen Fällen nicht auf sie verzichten. Im Gegenteil, sie sind begehrt, weil sich der Austenit durch besondere Eigenschaften auszeichnet. Austenitische Stähle sind unmagnetisch und lassen sich auch nicht ohne weiteres magnetisieren. Diese Eigenschaften machen solche Stähle z. B. für den Elektromaschinenbau interessant.

Eine Legierungsgruppe der austenitischen Stähle, die hochlegierten Chrom-Nickel-Stähle, ist rost- und säurebeständig. Nachdem schon lange vorher Beobachtungen zur höheren Säurebeständigkeit der Chrom-Eisen-Legierungen gemacht worden waren, gelang im Jahre 1912 Strauss und Maurer, der später auch in der metall-



Lokomotive neuerer Bauart

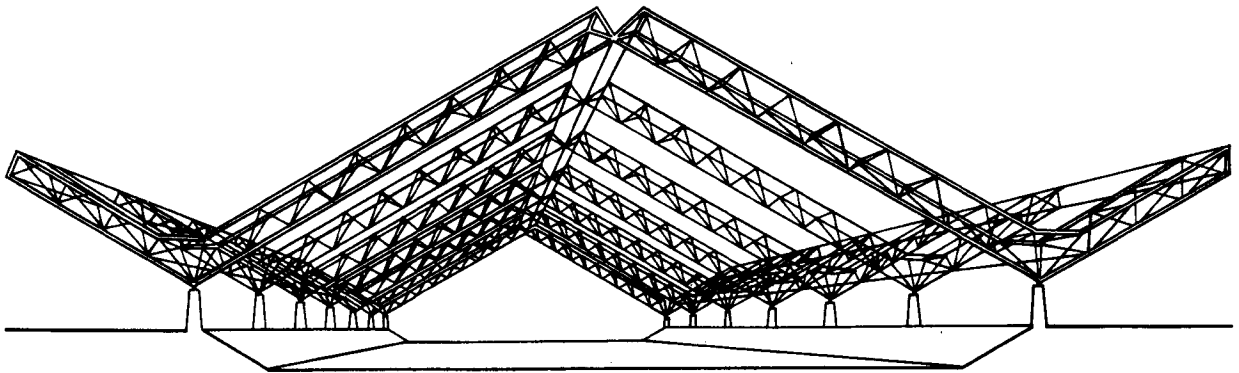
urgischen Lehre als Professor an der Bergakademie Freiberg erfolgreich tätig war, der volle Durchbruch bei der Entwicklung rost- und säurebeständiger Stähle. Mancher Autofahrer, der verzweifelt gegen den Rost ankämpft, wird hier vielleicht aufhorchen, zumal sich diese Stähle auch ausgezeichnet plastisch verformen lassen, z. B. zu Blech walzen lassen. Es ist der im Vergleich zu den üblichen Automobilblechen hohe Preis, der solche Gedanken schnell zur Illusion werden läßt. Beim Auto muß man sich anderer Schutzmaßnahmen gegen Korrosion bedienen, aber im Chemieanlagenbau, wo die Anforderungen in bezug auf die chemische Beständigkeit des Werkstoffs ungleich höher sind als beim Auto, werden solche Stähle eingesetzt.

Ein weiterer Vorzug austenitischer Stähle ist ihre relativ hohe Zähigkeit bei tiefen Temperaturen, d. h. bei Temperaturen unterhalb -100°C . Obwohl solche Temperaturen als natürliche Außentemperaturen nicht vorkommen, sind sie doch von erheblicher technischer und ökonomischer Bedeutung beim Transport, bei der Lagerung und der Verarbeitung von verflüssigten Gasen. Ein einfacher Zahlenvergleich soll das beweisen: Beispielsweise ist das Volumen von gasförmigem Stickstoff 683- und von Erdgas 600mal größer gegenüber dem verflüssigten Zustand der gleichen Stoffe. Daraus ergibt sich, daß zur Lagerung von etwa $700\,000\text{ m}^3$ gasförmigem Sauerstoff ein Kugelbehälter mit etwa 2000 t Masse benötigt würde, wogegen die gleiche Menge im verflüssigten Zustand in einem Behälter mit etwa 25 t Masse untergebracht werden kann. Nur muß man sich daran erinnern,

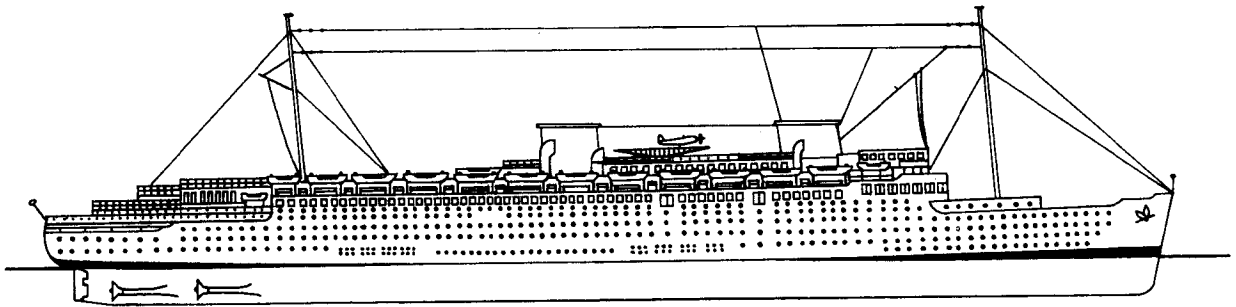
daß zur Gasverflüssigung bis zum Siedepunkt des Gases heruntergekühlt werden muß. Die Siedepunkte der Gase liegen physikalisch bedingt zum Teil sehr niedrig: für Sauerstoff bei -183°C und für Stickstoff bei -196°C . An das Material für Druckbehälter und Anlagen werden hohe Anforderungen in bezug auf Schweißbarkeit, Festigkeit und vor allem Zähigkeit, d. h. Sicherheit gegen spröden Bruch bei eben diesen niedrigen Beanspruchungstemperaturen, gestellt. Die Forderungen sind für Stahl ungewöhnlich hoch. Sie lassen sich mit unlegierten Stählen, die bei den genannten extrem niedrigen Temperaturen fast so spröde wie Glas sind, nicht erfüllen. Aber ebenso wie auch nichtaustenitische Stähle rost- und säurebeständig sein können, gibt es auch nichtaustenitische kaltzähe Stähle, die unter Beachtung materialökonomischer Aspekte eingesetzt werden und für viele Verwendungszwecke ebenfalls alle Anforderungen erfüllen können.

Auch für den umgekehrten Fall, d. h. für die Anwendung bei hohen Temperaturen in Kraftwerken, Industrieöfen und Schmelzaggregaten, bringen austenitische Stähle günstige Voraussetzungen mit.

Von einem Bauteil, das bei 600°C mechanisch hoch beansprucht wird, verlangt man, wie übrigens auch bei anderen Anwendungsfällen, eine möglichst sichere Konstanz der Eigenschaftswerte über eine lange Beanspruchungsdauer hinweg. Aber gerade diese Konstanz der Eigenschaften, z. B. der Festigkeit, ist bei höheren Temperaturen durch komplizierte metallkundliche Vorgänge im Inneren des Metalls gefährdet. Viel For-



Raumfachwerk, das aus Gelenkrahmen besteht und auskragt



Fahrgastschiff »Europa« bzw. »Bremen«

schungsarbeit ist schon geleistet worden, um die sogenannte *Kriechfestigkeit* des Werkstoffs zu erhöhen. Heute reicht die Palette der warmfesten Werkstoffe von niedriglegierten nichtaustenitischen Stählen bis zu sehr teuren Superlegierungen auf der Basis von Nichteisenmetallen wie Nickel, Kobalt und Molybdän. Der Werkstoff muß nach dem Verwendungszweck ausgewählt bzw. ihm angepaßt werden.

Die Masse der erzeugten Stähle ist unlegiert. Sie sind von enormer volkswirtschaftlicher Bedeutung für die Herstellung von Nägeln, Schrauben, Drähten, Ketten, Seilen bis hin zu gigantischen Schweißkonstruktionen im Stahlhochbau, Maschinen-, Fahrzeug-, Schiff- und Kranbau, im Rohrleitungs- und Containerbau sowie beim Bau von Erdbewegungs- und Erdbearbeitungsmaschinen. In den meisten dieser Anwendungsfälle steht neben den Festigkeits- und Zähigkeitsforderungen die Notwendigkeit nach guter Schweißbarkeit, d. h. nach der Eignung des Werkstoffs, beim Schweißen eine feste, rißfreie Materialverbindung einzugehen, im Vordergrund. Gerade in dieser Beziehung sind unlegierte bzw. leichtlegierte Stähle mit niedrigem Kohlenstoffgehalt anderen Werkstoffen auf Eisenbasis überlegen, vom niedrigeren Herstellungspreis und den geringeren Verarbeitungskosten einmal abgesehen.

Und das ist noch lange nicht alles über Stahl. Stahl soll einerseits sehr fest sein, z. B. in Form von Drähten, darunter Klaviersaitendrähten, und Seilen. Viel hängt davon ab – vom Klang des Klaviers bis zur Gesundheit und zum Leben des Menschen. Andererseits soll Stahl weich sein und gut bearbeitbar durch Fräsen, Drehen, Hobeln, Bohren, Schleifen, aber auch durch Biegen,

Ziehen, Tiefziehen, Strecken, *Profilieren* und Walzen. Des weiteren soll er geeignet sein zur Oberflächenveredlung durch Aufkohlen, Nitrieren, Karbonitrieren, Borieren, Phosphatieren, Sulfatisieren, aber auch durch Aufbringen von metallischen Schutzschichten aus Aluminium, Kupfer, Kadmium, Chrom, Zinn und Zink, um nur einige zu nennen. Diesen Wünschen entsprechend, hat man Stähle entwickelt, wie Automatenstähle für die spanabhebende Kleinteilefertigung, Tiefziehstähle, Stähle für Feinblech und Band, Einsatz- und Nitrierstähle und andere mehr. Interessant dabei ist: Holz wird bearbeitet mit Werkzeugen aus *Stahl*, Stein wird bearbeitet mit Werkzeugen aus *Stahl*, Plast wird bearbeitet mit Werkzeugen aus *Stahl*, Nichteisenmetalle werden bearbeitet mit Werkzeugen aus *Stahl*, und Stahl selbst muß ebenfalls bearbeitet werden mit Werkzeugen aus *Stahl*. So werden Bleche, Bänder, Profile, Rohre, Drähte mit Stahlwalzen gewalzt, das Pressen und Schmieden erfolgt mit Stahlwerkzeugen, und auch schneidende Werkzeuge für Stahl sind aus Stahl – sogenanntem Werkzeugstahl mit extremem Verschleißverhalten. Man kann ohne Übertreibung sagen, im Hinblick auf die Variabilität der Eigenschaften wird Stahl von keinem anderen Werkstoff übertroffen. Dabei haben wir an vieles noch gar nicht gedacht. Was wäre der Wohnungs-, Industrie- und Verkehrsbau ohne Beton- und Spannbetonstähle, der Maschinen- und Fahrzeugbau ohne Wälzlager-, Vergütungs- und Federstähle, die Elektrotechnik ohne Relais-, Transformatoren- und Dynamostähle, die Eisenbahn ohne Schienenstähle? Eisen und Stahl – das ist tatsächlich ein wichtiges Fundament der Zivilisation!

Wenn der Kohlenstoffgehalt über 2 bis 2,5% liegt,

spricht man schon nicht mehr von Stählen, sondern von Gußeisen.

Die verschiedenen Gußeisensorten haben ein breites Anwendungsfeld. Aus ihnen gießt man Maschinenbetten, Motorenhäuser und eine Vielzahl gewichtiger Gegenstände, die keine oder fast keine Bearbeitung nach dem Gießen erfordern. Weil Gußeisen die Gußformen sehr gut ausfüllt, werden aus ihm auch Zaunelemente für Parks, Tore sowie alle möglichen Skulpturen gegossen.

Warum ändern sich die Eigenschaften dieser Legierungen so stark bei relativ geringen Veränderungen des Kohlenstoffgehalts im Eisen?

Jede der Modifikationen des Eisens bedingt eine unterschiedliche Löslichkeit des Kohlenstoffs. Im Kristallgitter des Alpha-Eisens ist sehr wenig Platz für den Einbau der Kohlenstoffatome. Deshalb ist die Kohlenstofflöslichkeit im Alpha-Eisen vielfach geringer als im Gamma-Eisen, wo die Platzverhältnisse für den Einbau von Kohlenstoffatomen günstiger sind. Bei ein und derselben Temperatur – sagen wir bei 723°C – können im Alpha-Eisen nur 0,02 %, dagegen im Gamma-Eisen 0,8 % Kohlenstoff gelöst werden. Das ist das 40fache. Bei 1147°C kann im Gamma-Eisen die größte Menge Kohlenstoff gelöst werden, nämlich 2 %.

Wenn man einen Stahl mit 0,8 % Kohlenstoff auf eine Temperatur erwärmt, bei der sich das Eisen in die Gamma-Modifikation umwandelt, geht der Kohlenstoff in Lösung. Bei langsamer Abkühlung verläuft der Prozeß umgekehrt: Das Eisen wandelt sich in die Alpha-Modifikation um, der überschüssige Kohlenstoff scheidet sich als Eisenkarbid aus und bildet ein einheitliches Gemisch von Ferritkristallen und Zementitplatten. Ferrit ist eine feste Lösung, bei der der Kohlenstoff im raumzentrierten Gitter des Alpha-Eisens eingelagert ist. Er enthält höchstens 0,02 % Kohlenstoff.

Völlig anders verläuft der Prozeß bei schneller Abkühlung, wenn der zu härtende Stahl z. B. in kaltes Wasser getaucht wird. Die *Diffusion* der Eisen- und Kohlenstoffatome, die für die Umkristallisation und die Ausscheidung des Kohlenstoffs aus dem Gitter erforderlich ist, kann nicht erfolgen. Jedes Atom behält seinen Nachbarn, wodurch auch bei tiefen Temperaturen der Zustand der festen Lösung des Kohlenstoffs im Gamma-Eisen erhalten bleibt. Das flächenzentrierte Gitter des Gamma-Eisens ist bei tiefen Temperaturen jedoch außer bei austenitischen Stählen sehr instabil, so wie

das weiße Zinn bei starken Frösten. Sein Umbau erfolgt trotzdem – wenn auch unter Schwierigkeiten. Dabei bilden sich Verzerrungen: Es ergibt sich ein gedehntes Kristallgitter, das dem Alpha-Eisen ähnlich ist. Es enthält aber solch eine große Menge Kohlenstoff, wie sie gewöhnlich nur im Gamma-Eisen auftreten kann. Das ist die Grundkomponente des gehärteten Stahls, die Martensit genannt wird.

Das alles war schon relativ lange bekannt; jedoch die tiefere Ursache für die hohe Härte und Festigkeit des Martensits blieb noch ein Rätsel. Inzwischen ist es auch auf diesem Gebiet gelungen, Licht in das Dunkel zu bringen. Sehr erfolgreich und anerkannt haben Professor Kurdjumow und seine Mitarbeiter in ihrem Moskauer Forschungsinstitut an der Aufklärung der Struktur und der Eigenschaften des Martensits gearbeitet.

Noch einige Bemerkungen zur Verfestigung

Mit Hochfrequenzströmen kann man sehr schnell eine dünne Oberflächenschicht von Stahlteilen erhitzen. Nach dem Härten wird diese Schicht hart und fest, während der Kern des Teils zäh und plastisch bleibt. Das gleiche kann man, wie Sie sich erinnern, durch Einsatzhärten (Aufkohlen: Sättigung der Oberflächenschicht eines Stahlteils mit Kohlenstoff) oder Nitrieren (Sättigung der Oberflächenschicht mit Stickstoff) erreichen. Die Sättigung der Oberflächenschicht von Stahlteilen mit Aluminium gibt ihnen Hitzebeständigkeit, mit Bor Verschleißfestigkeit, mit Silizium chemische Beständigkeit in Säuren usw.

Die Härte des Martensits steigt mit dem Kohlenstoffgehalt, gleichzeitig aber auch seine Sprödigkeit: Gehärtete Werkzeugstähle können fast wie Glas zerspringen! Zu hohe innere Spannungen entstehen im Kristallgitter bei der Bildung des Martensits. Wenn gehärteter Stahl nochmals auf Temperaturen über 200°C erwärmt wird, zerfällt der Martensit und bildet ein weiches und zähes Gemisch von Ferritkristallen und Zementitplättchen. Solch eine erneute Erwärmung gehärteten Stahls nennt man Anlassen.

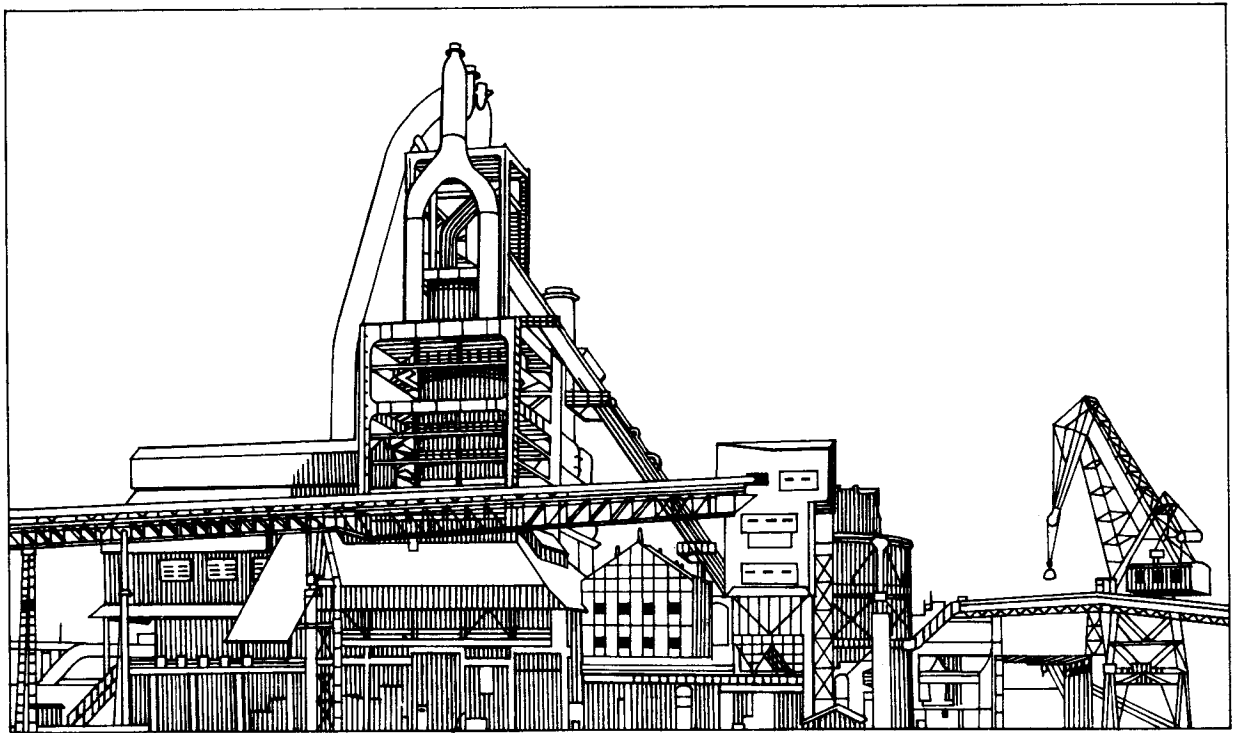
Um Werkzeugstähle von einer störenden Sprödigkeit zu befreien, erwärmt man sie auf 150 bis 200°C. Es erfolgt dabei ein Spannungsabbau im Gefüge. Die Sprödigkeit wird vermindert, und gleichzeitig gelingt es, eine

hinreichende Härte des Stahls zu bewahren. Maschinen- und Konstruktionsteile sowie andere Gegenstände, für die nicht nur die Härte, sondern auch Plastizität und Zähigkeit wichtig sind, erwärmt man auf 500 bis 600°C. Solch eine Erwärmung wird als Hochtemperaturanlassen bezeichnet. Dabei zerfällt der Martensit vollständig. Das erhaltene Gemisch von Ferrit und Zementit hat eine hohe Plastizität und Zähigkeit und behält dabei noch eine ausreichend hohe Festigkeit.

Wir haben schon erwähnt, daß sich Gußeisen von Stahl durch seinen höheren Kohlenstoffgehalt unterscheidet. Wenn das Gußeisen langsam erstarrt, scheidet sich der Kohlenstoff in ihm als Graphit aus. Graues Roheisen ist wie von vielen Rissen durchzogen, die mit Graphit gefüllt sind, was dessen geringe Festigkeit verursacht. Es folgt daraus, daß das Metall um so fester wird, je geringer die Oberfläche dieser Risse ist. Die kleinste Oberfläche hat bekanntlich die Kugel. Man hat festge-

stellt, daß das Gußeisen entschieden fester wird, wenn man den Graphitkörnern Kugelform gibt. Das kann durch geringe Zugaben von Magnesium oder Zerkol zum flüssigen Metall erreicht werden. Solch ein Gußeisen wird modifiziert genannt. Man kann daraus druckbeanspruchte Rohre und sogar gegossene Kurbelwellen für Verbrennungsmotoren, z. B. für Traktoren und Dieselloks, und vieles andere herstellen, was man vor nicht allzu langer Zeit ausschließlich aus Stahl erzeugte. Da geringe Gehalte von Beimengungen die Eigenschaften des Metalls sehr stark verändern, darf auch im Edelstahl nur sehr wenig Schwefel, Arsen und Phosphor enthalten sein.

Die Sprödigkeit von Eisen und Stahl bei tiefen Temperaturen wird von Kohlenstoff sowie den Beimengungen Sauerstoff, Stickstoff und Wasserstoff hervorgerufen. Nach Aufklärung dieses Tatbestandes gelang es, Nickelstähle bzw. Chromnickelstähle mit geringsten Gehalten



Hochofen

an jenen obigen Elementen zu erzeugen. Beide Stahlgruppen fürchten weder arktische noch kosmische Kälte.

Wenn man stählernes Halbzeug auf solche Temperaturen erwärmt, bei denen eine Lösung des Kohlenstoffs im Gamma-Eisen erreicht wird, und dann schnell abkühlt, aber nicht durch Eintauchen in Wasser wie beim Härten, sondern in eine Salzschieme von 300 bis 550°C, dann bildet sich noch nicht Martensit, und das Gamma-Eisengitter mit hohem Kohlenstoffgehalt bleibt zunächst erhalten. Danach walzt oder schmiedet man dieses Halbzeug und härtet es. Das Verfahren bezeichnet man als thermomechanische Behandlung. Die Festigkeit der Stähle wird dadurch beträchtlich erhöht. Auf diese Weise kann man jedoch nur legierte Stähle behandeln. Bei Kohlenstoffstählen bleibt das bei den Umformtemperaturen instabile Gamma-Eisen nicht lange genug erhalten. Außerdem hat die Mehrzahl der Stähle bei Temperaturen von 300 bis 550°C nur eine unzureichende Plastizität und läßt sich deshalb schwer verformen. Um diese Schwierigkeiten zu vermeiden, wendet man ein anderes Verfahren an: Nach dem Erwärmen verformt man das Halbzeug bei 800 bis 900°C und härtet es anschließend. Bei diesen Temperaturen sind die Atome noch hinreichend beweglich. Dadurch werden die Verzerrungen des Kristallgitters infolge der Verformung wieder abgebaut, und der Verfestigungseffekt der Verformung geht teilweise verloren. Doch dafür ist der Stahl plastischer und zäher als beim ersten Verfahren. Es verringern sich die Sprödigkeit bei tiefen Temperaturen und die Empfindlichkeit gegenüber Kerbwirkung.

In beiden Fällen erfolgt die Martensitbildung beim Härten schon in Kristallen, die durch die Verformung stark verkleinert worden sind. Die sich unter diesen Umständen bildenden Martensitkristalle sind daher mehrfach kleiner als gewöhnlich. Nach Verformung und anschließendem Härten erhält man also eine außergewöhnlich feine Struktur, woher die hohe Festigkeit und die gute Zähigkeit rühren.

Die Anwendung von thermomechanischen Verfahren befindet sich noch in den Anfängen. Sie hat aber eine große Perspektive, weil man die ohnehin notwendige Umformung von Halbzeug- und Fertigprodukten dabei direkt nutzen kann. Die auf diese Weise erreichte Verfestigung ist billiger als z.B. die durch Kaltumformung, Wärmebehandlung oder Legieren. Das zu erreichende Festigkeitsniveau ist auch sehr hoch und kann mit dem bisher wirksamsten Verfahren, der Kaltumformung, in Wettbewerb treten. Heute gibt es bereits Stähle mit einer Zugfestigkeit von 4000 MPa, und zukünftig könnten auch 7000 MPa erreicht werden. Das Wort »eisern« ist nicht ohne Grund zum Synonym für Festigkeit geworden.

Nicht umsonst hat Lenin dieses Metall als eines der Fundamente der Zivilisation bezeichnet. Eisen wird auch weiter das wichtigste Material der modernen Technik bleiben. In den sich am schnellsten entwickelnden Zweigen, wie der Luftfahrt, der Kosmonautik, der Atomindustrie, der Radioelektronik, gewinnen jedoch andere Metalle immer stärker an Bedeutung. Von denen mit den größten Perspektiven wird im folgenden zu lesen sein.

Die Bezwingler des Himmels und des Meeres

Leichter, immer leichter

Die Konstrukteure von Flugzeugen, Hubschraubern und anderen Flugapparaten, die schwerer als Luft sind, führen einen beharrlichen Kampf gegen jedes überflüssige Kilogramm. Für die Werkstoffe, die auf die Luftreise geschickt werden, ist nicht die Festigkeit schlechthin, sondern die spezifische Festigkeit, d. h. die auf die Masseinheit entfallende Festigkeit, ausschlaggebend. Die »fliegenden« Metalle müssen leicht sein, und das bei hoher absoluter Festigkeit. Bei Überschallgeschwindigkeiten kann selbst der Regen bedeutende Beschädigungen der Oberfläche hervorrufen. An die Werkstoffe für die Motoren der Flugapparate werden noch höhere Forderungen gestellt.

Das erste »fliegende« Metall

Aluminium wurde das erste »fliegende« Metall. Zunächst verdrängte es das hölzerne Gerippe und dann auch den Stoffbezug der ersten Flugzeuge. Heute entfallen zwei Drittel bis drei Viertel der trockenen Masse (d. h. ohne Treibstoff) eines jeden Flugzeugs auf Aluminiumlegierungen.

Aluminium ist chemisch sehr aktiv, so daß es z. B. bei Erwärmung an Luft sogar bei Raumtemperatur aufflammen kann. Aluminiumkochtöpfe, wie auch alle anderen Gegenstände aus Aluminium, entzünden sich nur deshalb nicht von selbst, weil sich ihre Oberfläche mit einem äußerst dünnen (in der Größenordnung von 0,001 mm) Oxidfilm überzieht, der die Hauptmasse des Aluminiums zuverlässig schützt.

Aluminium ist ein guter Leiter für Wärme und elektri-

schen Strom; es wird hinsichtlich der elektrischen Leitfähigkeit nur noch von Silber, Kupfer und Gold übertroffen. Vergleicht man jedoch die spezifische elektrische Leitfähigkeit, dann steht Aluminium an erster Stelle, weil es viel leichter als die anderen Metalle ist. Reines Aluminium ist sehr weich, doch die spezifische Festigkeit einiger seiner Legierungen ist 1 1/2mal höher als bei üblichem Baustahl.

Wie man sieht, weist das Element, das im Periodensystem den »Unglücks«-Platz Nr. 13 einnimmt, eine glückliche Zusammenstellung von Eigenschaften auf. Die Vorräte an Aluminium in der Erdkruste sind praktisch unerschöpflich: Es ist das in der Natur häufigste Metall.

Für die Verwendung von Aluminium als Konstruktionswerkstoff mußten hinreichend feste Legierungen entwickelt werden. (Am Beispiel des Eisens und der Stähle war schon bekannt, daß Legierungen um ein vielfaches fester als die sie bildenden Grundmetalle sein können.) An dieser Aufgabe arbeiteten viele Wissenschaftler, doch der erste, dem der große Wurf gelang, war der Deutsche Wilm.

Nach zahlreichen Versuchen hat er herausgefunden, daß Zusätze von Kupfer und Magnesium in bestimmten Verhältnissen die Festigkeit des Aluminiums auf das 3- bis 5fache erhöhen. Das war bereits nicht wenig. Doch Wilm versuchte die Festigkeit noch weiter zu erhöhen. Er erwärmte die Legierung auf 500°C und schreckte sie in Wasser ab. Die Zugversuche zeigten, daß die abgeschreckte Legierung tatsächlich fester als die nicht abgeschreckte war. Doch um wieviel? Die Messungen brachten aus irgendeinem Grunde unterschiedliche Ergebnisse. Der Wissenschaftler kam zu dem Schluß, daß das Prüfgerät schuld sein müsse, und gab es zur Kontrolle. Nachdem das Gerät sorgfältig überprüft worden

war, beobachtete Wilm mit Erstaunen, daß die Festigkeit der Legierung sich nochmals fast verdoppelt hatte. Solch ein Irrtum war einfach unmöglich. Er wiederholte den Versuch, und die Festigkeit stieg tatsächlich nach einer Lagerzeit an. Eine derartige Wärmebehandlung, die in groben Zügen dem Anlassen des Stahls gleicht, nennt man auch Aushärtung.

Wilm führte noch Hunderte von Versuchen durch und bestimmte die günstigste Zusammensetzung und die Art der Wärmebehandlung seiner Legierung. Nachdem er ein Patent darauf erhalten hatte, verkaufte er es an eine deutsche Firma, die bald darauf in der Stadt Düren die Legierung unter dem Namen »Duralumin« erzeugte. In der Umgangssprache nennt man es oft Duraluminium oder Dural.

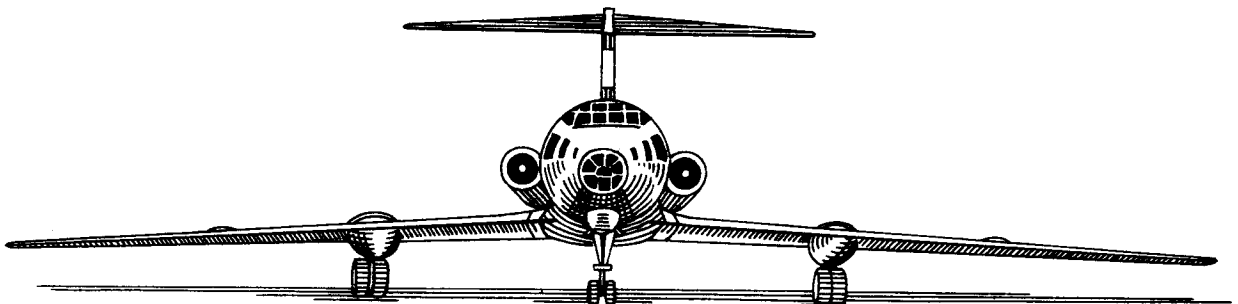
Werkstücke aus aushärtenden Legierungen werden sofort nach dem Erschmelzen bzw. nach der Verformung des Halbzeugs hergestellt, ehe sie aushärten und die maximale Festigkeit annehmen. Viele Aluminiumlegierungen stehen in ihrer Festigkeit nicht hinter der mancher Stähle zurück. Sie behalten ihre Festigkeit nicht nur bei arktischer Kälte, sondern sogar bei den Temperaturen des flüssigen Heliums.

Aluminium wurde zu Recht eines der ersten kosmischen Metalle. Die Hülle des ersten sowjetischen Sputniks bestand aus Aluminiumlegierungen. Sie werden auch für die Herstellung der Raketen vom Typ »Luft – Luft« und »Luft – Erde« sowie für meteorologische Raketen verwendet. Militärfahrzeuge mit Amphibiencharakter haben eine ganzgeschweißte Aluminium-Kon-

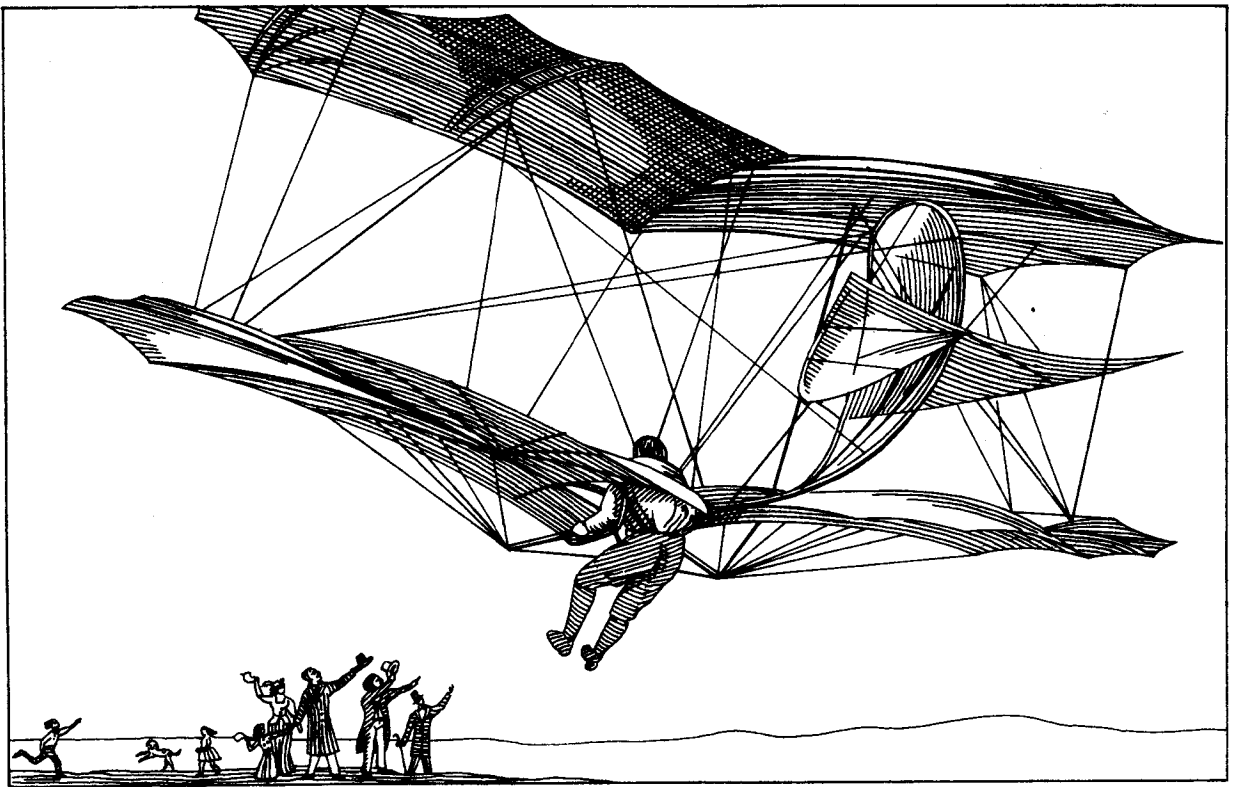
struktion. In großem Umfang wird Aluminium auch in Militärtransportmitteln für Kernwaffenraketen, für Startrampen und Raketentransportwagen, in gepanzerten Fahrzeugen und sogar für mittlere Panzer eingesetzt. Die Verwendung von Aluminium, Titan, Magnesium und Beryllium in Panzern und gepanzerten Fahrzeugen senkt deren Masse wesentlich und erhöht damit sehr stark ihre Beweglichkeit. Aluminiumlegierungen werden sogar bei der Artillerie gebraucht. Eine amerikanische Haubitze, die leichteste von den 105-mm-Waffen, erreicht ihr geringes Gewicht durch den Einsatz von Aluminiumlegierungen.

Das erste der »fliegenden« Metalle, das Aluminium, bleibt auch weiterhin das wichtigste Metall im Flugzeugbau. 75 % aller Werkstoffe, die für den Bau der Flugzeuge IL-18, IL-62, TU-134 und andere verwendet werden, sind Aluminiumlegierungen. Im Flugzeug »Antäus« (AN-22) ist eine Aluminiumlegierung das wichtigste Material, aus dem die Mehrzahl der tragenden Teile der Konstruktion hergestellt werden. Auch die Überschallpassagiermaschine TU-144 besteht im wesentlichen aus Aluminiumlegierungen. (Aus Titanlegierungen werden nur die Motorgondeln, die Querruder und die Seitenruder hergestellt.)

Aluminium wird auch im Automobilbau verwendet. 1976 wurden in jedem Auto etwa 40kg Aluminium eingesetzt (nach Angaben der amerikanischen Vereinigung der Aluminiumindustrie). Nach Prognosen sollte der Aluminiumanteil im Auto bis 1980 auf 67,5 bis 95kg anwachsen. Das Streben, Stahl durch Aluminium zu erset-



Flugzeug des 20. Jahrhunderts



Lilienthals Gleitflugzeug

zen, ist voll verständlich: Die Gewichtsverminderung des Autos führt zu einer Einsparung von teurem und knappem Benzin.

Der Ersatz von Stahl durch Aluminium verringert die Masse der Transportmittel fast auf ein Drittel, was wiederum bedeutet, daß ohne erhöhten Aufwand das Doppelte bis Zweieinhalbfache an Nutzlast transportiert werden kann. Daher werden auch schon Autobusse, Eisenbahnwaggons, Trolleybusse, U-Bahnwagen, LKWs, Tankwagen, Kipper, Fluß- und Seeschiffe aus Aluminiumlegierungen hergestellt.

Ein weiterer Vorteil dieser Legierungen ist die Korrosionsbeständigkeit gegenüber Meerwasser. Sie ist bedeutend höher als bei Stahl. Die Rümpfe der Tragflächenschiffe »Raketa« und »Meteor« sind aus Aluminiumlegierungen. Das gleiche gilt für die in Serie herge-

stellten großen Tragflächenschiffe »Sputnik« und »Vichr« für 300 Passagiere. 1971 bewies das Motorschiff »Kometa« mit einer erfolgreichen Reise vom Schwarzen Meer nach Leningrad rund um Europa, daß sowjetische Schiffe, bei denen in großem Umfang Aluminiumlegierungen verwendet werden, eine ausgezeichnete Seetüchtigkeit und eine sehr zuverlässige Konstruktion aufweisen. Aus Aluminiumlegierungen werden auch Luftkissenboote und Tauchapparate für große Tiefen gefertigt.

1960 wurde in der BRD der Tanker »Alumina« in Dienst gestellt, dessen Rumpf aus Aluminiumlegierungen geschweißt wurde. Die Länge des Schiffs beträgt 66,8m. Trotz der höheren Gestehungskosten sind in Serie gefertigte Tanker aus Aluminiumlegierungen wegen ihrer höheren Tragfähigkeit effektiver als stählerne.

In den USA werden aus Aluminiumlegierungen Lastkähne für den Transport von flüssigen Chemikalien gebaut. Die Verwendung von Aluminium in der chemischen Industrie erklärt sich vor allem aus dessen Korrosionsbeständigkeit. Es korrodiert nicht einmal in Salpetersäure.

Fast vollständig aus Aluminiumlegierungen besteht auch das amerikanische Unterseeboot »Aluminaut«, worauf sein Name hinweist.

In Frankreich wurde ein Passagierschiff mit einer Tragfähigkeit von 50000t gebaut. Nicht nur sein Rumpf, der eine Länge von 315m hat, sondern auch die Möbel in den Kajüten bestehen aus Aluminium.

Sowjetische Konstrukteure projektieren einen Superexpress mit dem poetischen Namen »Russische Trojka«. Dieses Zugwunder kann mit Flugzeuggeschwindigkeit über die Schienen dahinjagen. Es ist daher nicht erstaunlich, daß es aus dem »fliegenden« Metall gefertigt wird. Die graublauen Waggons des Zuges werden von einem Rigaer Betrieb aus einer Aluminiumlegierung hergestellt. Dieser Express wird zwischen Moskau und Leningrad verkehren und etwa 800 Passagiere in höchstens 4 Stunden von einer Stadt zur anderen befördern.

In immer stärkerem Maße verwendet jetzt die Bauindustrie Aluminium. Schon 1969 wurden in den USA mehr als 1 Million Tonnen Aluminiumlegierungen im Bauwesen verwendet. Es findet Anwendung im Brückenbau, bei der Herstellung von Bohrtürmen, zum Teil für im Meer verlegte Rohrleitungen, für Gas- und Erdölleitungen, für Kranausleger, Baugerüste und Treppen.

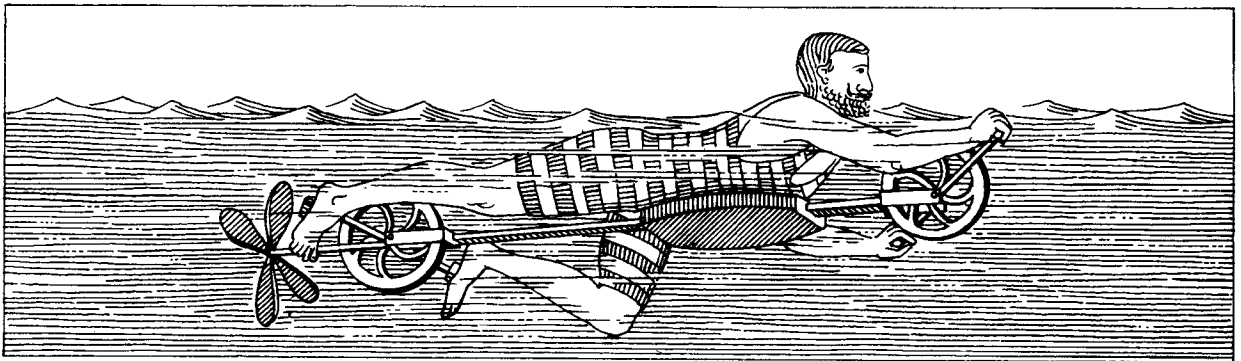
1956 wurde über den Segen in Kanada eine Bogenbrücke von mehr als 150m Länge aus einer Aluminiumlegierung errichtet. Die Brücke wiegt die Hälfte einer analogen Stahlbrücke und erfordert auch nicht das regelmäßige Farbkonservieren zum Schutz vor Korrosion.

Eine Überlandleitung mit Masten aus einer Aluminiumlegierung wurde im Kaukasus in der UdSSR errichtet. Besondere Bedeutung haben solche Überlandleitungen für schwer zugängliche Gebiete, denn ein Aluminiummast wiegt nur 40 bis 50 % eines Stahlmastes. Daher kann man ihn leichter zum Bestimmungsort transportieren. Aluminiumlegierungen werden in großem Umfang für tragende Deckenkonstruktionen von Gesellschaftsbauten, Ausstellungspavillons, Flughafengebäuden, Turmbauten sowie für Fensterrahmen, Türen, Durchgänge, Hängedecken, innere Wände usw. eingesetzt. Aluminium wurde auch beim Ausbau des Kremipalastes in Moskau verwendet.

In der Erdöl-, Erdgas- und der chemischen Industrie verwendet man Behälter, Tanks, Rohrleitungen und Vorratsbehälter aus Aluminiumlegierungen. In Vorratsbehältern aus Aluminium lagert man auch verflüssigte Gase, weil Aluminium bei sehr tiefen Temperaturen nicht versprödet. Aluminium bildet auch keine Funken, so daß die Lagerung von leicht entzündlichen und explosiblen Stoffen völlig ungefährlich ist.

Über die chemische Beständigkeit des Aluminiums wurde bereits gesprochen. Es ist nicht erstaunlich, daß es im Chemieanlagenbau breite Verwendung findet.

Aluminium und seine Legierungen werden auch in



Richardsons Schwimmapparat mit Schraubenantrieb

Kernreaktoren eingesetzt. Die Schutzhüllen für Brennstoffelemente, Rohrleitungen, Tanks und viele Hilfseinrichtungen der Arbeitszone des Reaktors werden daraus hergestellt.

Im Aluminiumgeschirr bleiben alle Vitamine erhalten. Darum stellt man aus Aluminium verschiedene Geräte und Verpackungsmaterial für die Lebensmittelindustrie her. Dazu gehören nicht nur Küchengeräte, sondern auch Tanks für den Milchtransport, die Aufbewahrung von Säften und Konzentraten sowie Konservendosen. Während 1960 in den USA für Konservendosen nur 18000t Aluminiumblech verarbeitet wurden, waren es 1970 schon 317000t. Dieser starke Anstieg hat zwei Ursachen: Zum einen fehlt es an Zinn für die Herstellung von Weißblech, zum anderen kann man die verwendeten Aluminiumdosen wieder einschmelzen und neu verwenden, während die Schwierigkeiten bei der Trennung von Zinn und Eisen die Aufarbeitung der gewöhnlichen Weißblechdosen unrentabel machen. Eine Konservendose aus Aluminium ist halb so schwer wie eine Weißblechdose; außerdem erleichtert sie die Müllaufbereitung. In den USA werden jährlich Milliarden von Konservendosen aus Aluminium hergestellt. Dabei werden mehr als die Hälfte nach ihrer Verwendung wieder eingeschmolzen.

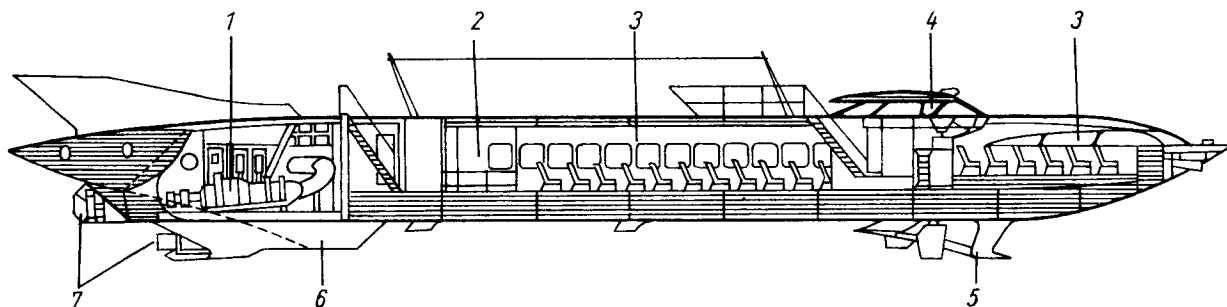
Wenn man textiles Gewebe mit einer sehr dünnen Aluminiumschicht versieht, dann wird ein Vorhang aus solchem Stoff nur die Lichtstrahlen durchlassen und die Wärmestrahlen aufhalten, wenn er mit der Metallschicht der Außenseite zugewandt ist. Es ist sicher kaum nötig,

darüber zu sprechen, welche Bedeutung das für die sonnigen Gebiete der UdSSR und noch mehr für die tropischen Länder hat. Zweifellos werden in den heißen Ländern Hüte und Panamas, Kittel und Schirme aus solchem Stoff Verwendung finden können. Wendet man jedoch den Stoff mit der metallischen Schicht in Richtung auf das Zimmer, dann wird die Wärme im Gebäude festgehalten. Das trägt zur Einsparung von Millionen Tonnen Brennstoff im Winter bei. Aus solch einem »Wunderstoff« kann man Jacken, Anzüge und Mäntel fertigen, die so nötig von Stahlwerkern, Feuerwehrleuten, Fischern, Geologen, Polarforschern und Touristen benötigt werden. Er ist auch für die Herstellung von Zelten und Schutzanzügen geeignet.

Schaumaluminium ist leichter als Kork und hat trotzdem eine ausreichende mechanische Festigkeit.

Aus Aluminium werden auch Möbel, Kühlschränke, Waschmaschinen, Garagen, Benzinkanister und vieles andere hergestellt. Amerikanische Wissenschaftler und Ingenieure haben ein Verzeichnis aller Erzeugnisse aus Aluminium aufgestellt. Es umfaßt mehr als 2000 Artikel. Das alles wurde nur möglich, weil die Herstellungskosten des Aluminiums in den letzten 100 Jahren ungefähr auf ein Tausendstel sanken. Fachleute nehmen an, daß das Aluminium, wenn sein Preis auf etwa ein Zehntel des heutigen fällt, sogar Gußeisen und Stahl verdrängen und damit zu einem der neuen Fundamente einer Zivilisation der Zukunft werden kann.

Aus Aluminiumlegierungen, die mit Borfäden armiert sind, stellt man z. B. viele Teile des amerikanischen Flug-



Tragflächenschiff »Sturmvogel«, UdSSR

1 Gasturbinentriebwerke, 2 Büfett, 3 Fahrgasträume, 4 Ruderraum, 5 vordere Tragfläche, 6 hintere Tragfläche, 7 Ruder

zeugs »Phantom« her. Die Masse dieser Teile ist um 60 % geringer als bei den ursprünglich verwendeten Werkstoffen.

Aluminiumlegierungen werden auch mit Beryllium und Glasfäden armiert. Einige dieser Verbundwerkstoffe weisen eine einzigartige Kombination von Eigenschaften auf.

Leichter als Aluminium sind noch Magnesium (Dichte $1,738 \text{ g/cm}^3$) und Beryllium (Dichte $1,82 \text{ g/cm}^3$).

Leichter als Aluminium

Magnesium ist ein silberweißes, chemisch sehr aktives Metall. Es oxydiert an der Luft nur deshalb nicht, weil es von einem Oxidfilm geschützt wird. Beim Erhitzen verbrennt es mit blendend weißer Flamme. Magnesium wird in der Hauptsache als Legierungskomponente von Leichtmetall-Legierungen verwendet; einige von ihnen, z. B. eine Legierung aus Lithium mit Magnesium, sind sogar leichter als Wasser!

Aus Magnesiumlegierungen werden viele Teile moderner Flugzeuge, so auch des Antriebs, hergestellt. Im Raketen- und Sputnikbau finden sie ebenfalls Anwendung. Die Wärmekapazität des Magnesiums ist etwa 2,5mal größer als die von Stählen. Das heißt, daß es sich bei Aufnahme der gleichen Wärmemenge 2,5mal weniger als Stahl erwärmt. Daher überhitzen sich Legierungen aus Magnesium im kurzzeitigen Flug trotz der verhältnismäßig niedrigen Schmelztemperatur nicht. In Raketen, z. B. vom Typ »Luft-Luft«, die nur kurze Flugzeiten benötigen, beträgt der Anteil von Magnesiumlegierungen an der Konstruktionsmasse maximal 90 %.

Magnesiumlegierungen wurden in den amerikanischen Lenkgeschossen und den Raketen »Titan«, »Jupiter«, »Thor«, »Polaris« sowie in Überschallflugzeugen verwendet. Dadurch vermindert sich das Gewicht der Raketen um 20 bis 30 %. Das hat nicht nur wesentlich ihre Reichweite und Tragfähigkeit erhöht, sondern führt zu einer erheblichen finanziellen Einsparung. Etwa 85 % der Ankopplungsvorrichtung des Weltraumschiffs »Geminis« bestanden ebenfalls aus Magnesiumlegierungen.

Magnesiumlegierungen werden auch im Automobilbau verwendet. So setzt die Firma »Volkswagen« für die Herstellung eines jeden Motors etwa 18 kg Magnesium ein.

Das Interesse am Magnesium ist völlig verständlich:

ist es doch 1,5mal leichter als Aluminium, 2,6mal leichter als Titan, 4,5mal leichter als Stahl. Die spezifische Festigkeit der Magnesiumlegierungen ist höher als die von Aluminium und Eisen.

In der UdSSR werden Magnesiumlegierungen für verschiedene Einzelteile von Flugzeugen und Hubschraubern, für kosmische Geräte sowie für den Motor des Kleinwagens »Saporoshez« eingesetzt.

Die hochfeste Knetlegierung (Aluminium-Zink-Magnesium-Kupfer), aus der das tragende Gerüst des Flugzeugs »Antäus« hergestellt wird, verringert dessen Gewicht um 2t. Diese Legierung wird auch beim Bau des Verkehrsflugzeugs JAK-40 und für die Herstellung vieler anderer wichtiger Teile eingesetzt. Es ist festzustellen, daß eine analoge Legierung in den USA erst etwa 10 Jahre später entwickelt wurde.

Eine hochfeste und warmfeste Legierung aus Aluminium, Kupfer und Lithium mit einem geringen Zusatz von etwa 0,1 % Kadmium wird in dem ersten sowjetischen Überschallpassagierflugzeug TU-144 eingesetzt.

Aus derartigen Legierungen können Teile gegossen werden, die fast keine nachfolgende mechanische Bearbeitung erfordern; daher sind diese Teile billiger als solche aus Aluminium.

Magnesium ist nach Aluminium und Eisen das in der Erdkruste dritthäufigste Metall.

Noch erstaunlichere Eigenschaften besitzt Beryllium, ein festes Metall, das erst bei 1284°C schmilzt. (Der Schmelzpunkt des Aluminiums beträgt 660°C und der von Magnesium 651°C .) Besonders wertvoll ist der Umstand, daß Beryllium – $1\frac{1}{2}$ mal leichter als Aluminium – trotzdem fester als viele Sonderstähle ist. Bis zu Temperaturen von 500 bis 600°C ist seine spezifische Festigkeit höher als bei jedem bekannten Konstruktionswerkstoff. Beryllium vereinigt in sich sowohl Leichtigkeit und Festigkeit als auch eine ziemlich hohe Warmfestigkeit. Es verliert seine nützlichen Eigenschaften bis zu Temperaturen von 700 bis 800°C nicht. Seine Steifigkeit ist 1,5mal größer als die von Stahl, 2,5mal größer als die von Titan und 4mal größer als die von Aluminium.

Beryllium verleiht den Legierungen Härte, Festigkeit, Warmfestigkeit und Korrosionswiderstand. Eine mit Beryllium gesättigte Stahloberfläche erhält eine besondere Härte und Standfestigkeit bis zu Temperaturen von 800°C . Der »Beryllium-Panzer« verleiht den Stahlteilen trotz seiner geringen Dicke (0,15 bis 0,4 mm) nicht nur

Wärmefestigkeit, sondern auch Widerstandsfähigkeit gegen Meerwasser und sogar gegen Salpetersäure.

Weil bei hoher Wärmefestigkeit die Wärmeleitfähigkeit des Berylliums das 7fache der von Stahl beträgt und die Wärmekapazität höher als bei allen anderen Metallen ist, wird es als Wärmeschutzschild bei Raumschiffen und Raketen verwendet.

In seiner spezifischen Wärmekapazität übertrifft Beryllium alle Metalle. Es weist weiterhin eine hohe Korrosionsfestigkeit sowie gute Wärme- und elektrische Leitfähigkeit auf. Beryllium hat die besten Kennwerte als Konstruktionswerkstoff für Kernreaktoren: Es schluckt weniger *thermische Neutronen* und reflektiert bzw. streut sie besser als die anderen Metalle.

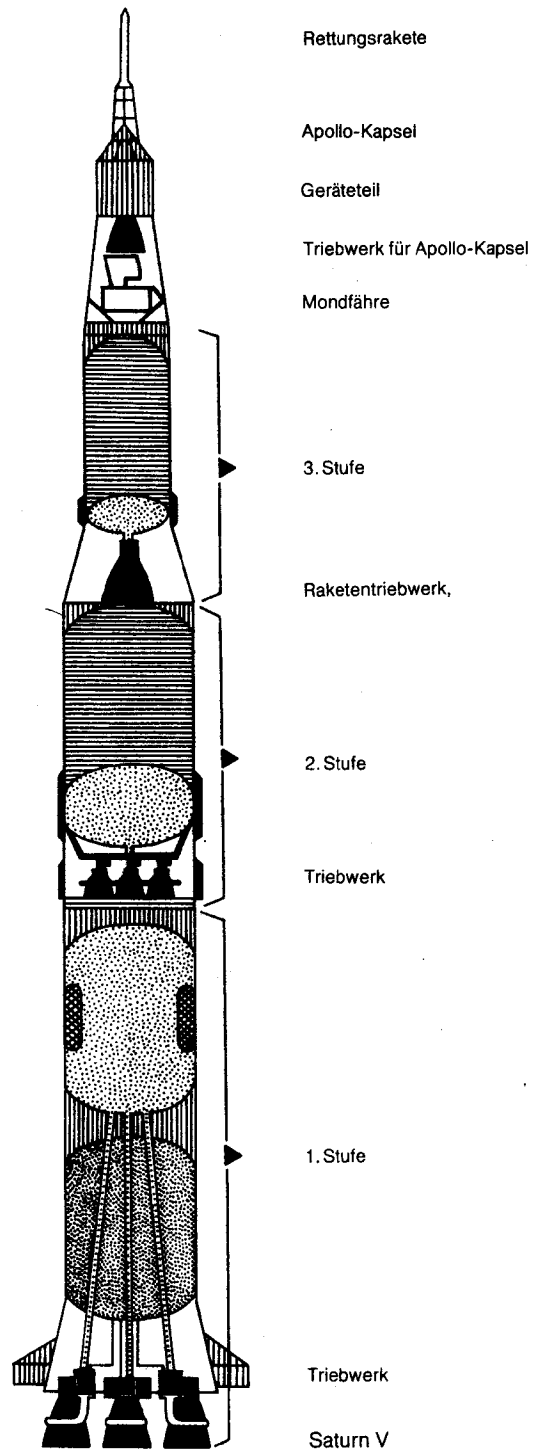
In England durchgeführte Untersuchungen haben ergeben, daß durch die Verwendung von Beryllium das Gewicht der tragenden Konstruktion der Sputniks um mindestens 35% zu senken ist. Bleche aus Beryllium und Titan wurden für die Herstellung der Außenhaut des Raumschiffs »Gemini« sowie für Teile vieler Raketen, z. B. der »Minutman«, verwendet.

Aus Beryllium werden die Antennensysteme der Raumschiffe und Sputniks, die Steuer der kosmischen Apparate, die Wärmeschilde derselben für die Rückkehr auf die Erde gefertigt.

Beryllium wurde auch in den »Apollo«-Raumschiffen, z. B. in der Kommandosektion der Mondlandefähre und den tragbaren Gerätecontainern, benutzt. Die Verwendung von Beryllium hat die Kosten dieser Raumschiffe und die des »Apollo«-Programms insgesamt gesenkt.

Auch beim Bau von Brennkammern und Düsen der Raketenmotoren finden Beryllium und dessen Legierungen Anwendung. So wurde der Motor der automatischen interplanetaren Station »Mariner-71«, der insgesamt nur 7,7kg wog, aus solchen Werkstoffen hergestellt. Das gleiche gilt für die Brennkammer des Antriebs des Raumschiffs »Gemini«. Da Beryllium sowohl eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit als auch eine außerordentliche Wärmekapazität aufweist, werden die Düsen aus diesem Metall sogar bei Arbeitstemperaturen von 3000°C nicht zerstört.

Die Verwendung von Beryllium in Raketenmotoren führte zu einer Erhöhung des Schubs auf ungefähr das Doppelte und senkte die Masse der Motoren wesentlich. Aus Beryllium-Aluminium-Legierungen werden auch die Außenhülle der Lenkraketen hergestellt.



In der Luftfahrt – insbesondere im Überschallbereich – steht an erster Stelle unter den Anforderungen an die Werkstoffe die Steifigkeit der Konstruktion (keine Längsdurchbiegung bei minimaler Dicke der Konstruktion). Beryllium behält seine Steifigkeit auch bei erhöhten Temperaturen und bei Vibrationen.

Die Verwendung von Beryllium vermindert erheblich die Masse eines Flugzeugs. So verringert sich z. B. die Masse des Rumpfes von einem Transportflugzeug auf die Hälfte, wenn man die Aluminiumlegierungen durch Berylliumlegierungen ersetzt. Aus Beryllium kann man bis zu 80% der Konstruktion eines Flugzeugs herstellen. Daher wird Beryllium verstärkt im Flugwesen und ganz besonders im Überschallbereich verwendet, z. B. in den amerikanischen Flugzeugen »Phantom«, »Boeing-707«, »Boeing-747« und einigen anderen Typen.

Beryllium ist das geeignetste Material für Antennen kosmischer und wahrscheinlich auch aller anderen Flugapparate.

Die großflächigen Träger für die Sonnenbatterien der kosmischen Apparate werden ebenfalls aus Beryllium gefertigt, so auch die Spiegel der optischen Teleskope, die mit Raketen über die Erdatmosphäre hinaus getragen werden. Die Masse eines Berylliumspiegels ist etwa um ein 5faches geringer als die der Spiegel, die für die gleichen Zwecke auf der Erde verwendet werden.

Aus Beryllium bestand z. B. das optische Teleskop des Raumschiffs »Apollo-12«.

Beryllium ist auch für die Schaffung neuer tieftauchender Apparate vorgesehen. Moderne Kampf-U-Boote können etwa 350 bis 400m tief tauchen. Für tiefer tauchende U-Boote müssen neue Werkstoffe eingesetzt werden. Die Konstrukteure sind der Ansicht, daß dafür Titan- und Aluminiumlegierungen, verschiedene Verbundwerkstoffe auf Glas-Kunststoff-Basis und Beryllium geeignet sind.

Aus diesem erstaunlichen Metall werden auch superfeinste Federn hergestellt. Solche aus gewöhnlichem Stahl halten 800 tausend bis 850 tausend Stöße aus. Berylliumfedern können jedoch bis zu 20 Milliarden Stöße vertragen. Sie sind praktisch ewig haltbar.

Unersetzlich ist Beryllium in der Atomindustrie (siehe Abschnitt »Metalle in Kernkraftwerken«).

Als besondere Eigenschaft des Berylliums ist hervorzuheben, daß es für Röntgenstrahlen und Elektronen 17mal durchlässiger als Aluminium ist. Daher werden die

besten »Fenster« für Röntgenapparate aus Beryllium gefertigt.

Durch den Zusatz von Berylliumoxid erhält man Spezialgläser, die infrarote und ultraviolette Strahlung durchlassen.

Einige Verbindungen von Beryllium mit anderen Metallen übertreffen in ihrer spezifischen Festigkeit die Wolfram- und Molybdänlegierungen sowie das Borkarbid. Sie sind entschieden leichter als ihnen in der Festigkeit nahekommende nichtrostende Stähle und warmfeste Legierungen.

Durch ihre Verwendung kann man merklich die Arbeitstemperaturen im Vergleich zu denen steigern, die die Kobalt-, Nickel- und Nioblegierungen aushalten.

Die Aufzählung der nützlichen Eigenschaften des Berylliums könnte noch lange fortgesetzt werden.

Doch dieses bemerkenswerte Metall hat auch ernsthafte Mängel. Wegen seiner Härte und Sprödigkeit läßt es sich sehr schwer bearbeiten: Man kann es weder walzen noch schmieden, noch schneiden. Üblicherweise stellt man Teile aus Beryllium mit den Verfahren der Pulvermetallurgie her, was kompliziert und teuer ist. Außerdem ist es sehr giftig, es ruft Geschwüre und Geschwülste sowie eine gefährliche chronische Erkrankung, die Beryllose, hervor. Die Verarbeitung erfolgt daher nicht nur in besonderen Räumen, es sind auch spezielle Schutzanzüge erforderlich, was die ohnehin nicht einfache Technologie noch weiter kompliziert. Trotzdem wird dieses Metall von der Industrie unbedingt gebraucht, und seine Produktion wächst ständig.

Das Metall, das seinen Namen rechtfertigt

Neben dem Eingang der Volkswirtschaftsausstellung der UdSSR in Moskau befindet sich das Monument für die Kosmosbezwinger. Es werden Jahrhunderte vergehen, ohne daß sich sein metallischer Glanz verdunkelt, da es aus Titan besteht, dem Metall, das eine außerordentliche chemische Beständigkeit aufweist: Es »fürchtet« weder feuchte Luft noch Meerwasser, weder Schwefel-, Salpeter- oder Salzsäure noch »Königswasser«, das sogar Gold löst. Diese erstaunliche chemische Beständigkeit resultiert aus der sehr großen Stabilität und Festigkeit des Oxidfilms, der seine Oberfläche bedeckt.

Titan ist um 40 % schwerer als Aluminium (seine Dich-

te beträgt $4,5\text{g/cm}^3$), doch dafür ist es 6mal fester, so daß die spezifische Festigkeit des Titans viel höher ist; außerdem hat es eine viel höhere Schmelztemperatur.

Der Einsatz von Titan und seinen Legierungen senkt die Masse der Konstruktionen um etwa das $1\frac{1}{2}$ fache, doch oft sind Maschinen, Mechanismen und Apparate, die aus Titanlegierungen hergestellt werden, 3- bis 5mal leichter als solche aus Stahl.

Die Herstellung von Titan ist auch heute noch kompliziert, so daß das Metall sehr teuer ist. Die Metallurgen arbeiten hartnäckig an einer Vereinfachung und Verbilligung seiner Produktion, die ungewöhnlich schnell wächst: Sie beträgt das 3fache als seinerzeit die Aluminiumgewinnung! Doch der Bedarf an diesem bemerkenswerten Material wächst schneller.

Bei Flügen mit Überschallgeschwindigkeit erhitzt sich die Oberfläche der Flugzeuge und Raketen sehr stark. Die Außenhaut von Flugkörpern muß bei 3 *Mach* eine Temperatur von 270 bis 350°C ertragen, bei 7 *Mach* sogar 1550°C . Duralumin verliert seine Festigkeit schon bei 300°C . Nur durch die Verwendung von Titan konnten Geschwindigkeiten erreicht werden, die die Schallgeschwindigkeit 2- oder sogar 3mal übertreffen.

Die Verwendung von Titan macht das Flugzeug leicht und damit tragfähiger bei gleicher Motorleistung; daher wird es auch schon häufig bei vielen Passagiermaschinen, die noch nicht mit Schallgeschwindigkeit fliegen, eingesetzt. Das Überschallflugzeug »Boeing-733« besteht vollständig aus Titanlegierungen.

Das Traggerüst, die äußere und innere Beplankung, viele Einzelteile von Raketen und Raumschiffen werden aus Titan gefertigt. Es wurde auch in der vierten Stufe des Raumschiffs »Pioneer IV« sowie den Raumschiffen »Apollo« und »Merkur« eingesetzt.

Sowjetische Konstrukteure verwenden ebenfalls Titan- und Aluminiumlegierungen für mit flüssigen Brennstoffen betriebene Raumtriebe.

Ebenso hat sich die Anwendung von Titan in den Triebwerken der Zivilluftfahrt wesentlich entwickelt. Damit sinkt die Masse eines Triebwerks um 20 %.

In den letzten 10 Jahren ist der Preis für Titan in der UdSSR um mehr als das 2,5fache gesunken. Es ist geplant, den Preis für Titanhalbzeug bis auf den von nichtrostenden Stählen zu senken. Das wird die Möglichkeit für eine noch stärkere Verwendung von Titan und seinen Legierungen eröffnen.

Titan wird nicht nur in der Kosmonautik, im Raketenbau und im Flugwesen erfolgreich eingesetzt, sondern auch in Maschinen für die chemische und petrochemische Industrie, in Maschinen, Mechanismen und Apparaten für die Nahrungsmittel- und pharmazeutische Industrie sowie für die Mikrobiologie, in der Metallurgie, Medizin und anderen Zweigen der Technik.

In der chemischen Industrie stellt man aus Titanlegierungen z.B. Pumpen und Leitungen für den Transport von Salpeter-, Schwefel- oder Salzsäure sowie ihrer Salzlösungen her. Wärmetauscher aus Titan funktionieren in Chlor 20 Jahre lang, aus nichtrostendem Stahl dagegen nur 2 Jahre. Ein Titangebläse in einer Apparatur zur Herstellung von Chlordioxid arbeitet 8 Jahre, während eins aus Stahl keine 2 Wochen hält. Pumpen aus Titan arbeiten in chemisch aggressiven Medien länger als 10 Jahre; Pumpen aus nichtrostendem Stahl dagegen fallen schon nach 2 bis 5 Monaten aus. Wir nehmen an, daß die angeführten Beispiele ausreichen, den Leser von den Vorzügen der Apparaturen aus Titan zu überzeugen. Ein bedeutender Teil der Chemieausrüstungen in der Sowjetunion wird bereits aus Titan bzw. seinen Legierungen hergestellt.

Bei der Elektrolyse von Nickel wurden früher Katoden aus nichtrostendem Stahl verwendet (auf diesen Katoden scheidet sich das Elektrolytmetall ab). Katoden aus Titan dagegen sind 3mal leichter als stählerne und 10- bis 15mal beständiger. In einem Titan-Magnesium-Kombinat wurde ein 120 m hoher Schornstein errichtet, der vollständig aus Titanblechen geschweißt wurde (gewöhnlich stellt man solche Schornsteine aus Stahlbeton her und kleidet sie innen mit feuerfesten Steinen aus). Dieser Schornstein kann Jahrhunderte in Betrieb sein. Er wiegt nur 200t, während ein solcher aus Stahlbeton 4500t wiegen würde.

Für den Betrieb in chemisch aggressiven Medien sind Elektroden erforderlich, die nicht korrodieren. Ein idealer Werkstoff dafür ist platinisiertes Titan.

Es kann zweckmäßig sein, Titan auch für die Herstellung von Diesel- und anderen Motoren zu verwenden (in erster Linie für Pleuel, Ventile, Schalldämpfer).

In immer breiterem Umfang werden Titan und seine Legierungen für die Herstellung medizinischer Ausrüstungen, insbesondere für chirurgische Instrumente, verwendet.

Sogar reines Titan, das 2mal leichter als nichtrostend-

der Stahl ist, steht ihm in der Festigkeit nicht nach. Einige seiner Legierungen sind jedoch bei gleicher Dichte mehrfach fester als rostfreier Stahl. Dabei hat die Erforschung der Titanlegierungen gerade erst begonnen, und die wichtigsten Entdeckungen stehen noch bevor.

In vielen Fällen ist es nicht notwendig, die gesamte Apparatur aus Titan herzustellen, es genügt, die Oberfläche der Teile z. B. aus Stahl mit einer Titanschicht von etwa 5 bis 10 % der Gesamtdicke zu überziehen. Solch ein Bimetall ergibt eine sehr große Einsparung an Titan.

Wenn man Titan nur als Überzug in Verbundmetallen verwendet, z. B. Stahl-Titan, so kann der Verbrauch an teurerem Titan ungefähr um 80 %, in einigen Fällen sogar bis zu 90 % gesenkt werden.

Viele sehen in Titan den Konkurrenten des Eisens. Wenn es gelingen sollte, die Kosten für die Herstellung anzugleichen, kann das Titan das Eisen verdrängen. Damit erhebt es ebenfalls Anspruch auf die Rolle eines Wegbereiters der Zukunft.

Der Brennstoff für Raumschiffe

Während des zweiten Weltkrieges wurden in großem Umfang Brandbomben eingesetzt. Diese waren meistens mit Thermit, einem Gemisch aus Magnesium- und Aluminiumpulver, gefüllt, bei dessen Verbrennung Temperaturen von über 3000 °C entstanden.

Der Krieg ist vorbei, für die brennenden Metalle wurde im friedlichen Leben Verwendung gefunden. Es erwies

sich, daß gerade sie einen der besten Brennstoffe für die Raumschiffe darstellen: Bei ihrer Verbrennung entsteht die größte Wärmemenge, bezogen auf ein Kilogramm. Wenn bei der Verbrennung von einem Kilogramm eines Gemisches aus Kerosin und Sauerstoff 9210 kJ frei werden, bei Wasserstoff mit Sauerstoff etwas mehr als 12000 kJ, so ergibt ein Gemisch aus Aluminium und Sauerstoff 29500 kJ, Lithium 43030 kJ und Beryllium 63060 kJ.

Demzufolge stellen also Metalle einen ausgezeichneten Raketenbrennstoff mit dem größten spezifischen Impuls (d. h. dem Schub, der bei der Verbrennung einer Masseinheit erhalten wird) dar.

Warum ist das so? Wird doch bei der Verbrennung von 1 kg Wasserstoff 4mal mehr Wärme frei als bei der Verbrennung von 1 kg Aluminium. Die Antwort liegt darin, daß für die Verbrennung von 1 kg Wasserstoff 8 kg Sauerstoff erforderlich sind, während es für die Verbrennung von 1 kg Aluminium nur 0,9 kg sind. Da den kosmischen Raketen sowohl der Brennstoff als auch das Oxidationsmittel mitgegeben werden muß, erweist sich hier sogar das Aluminium – schon gar nicht vom Beryllium zu sprechen – vorteilhafter als Wasserstoff.

Die Idee von der Verwendung dieser Metalle als Raketenbrennstoff ist nicht neu. Sie wurde bereits von dem russischen Erfinder Kondratjuk ausgesprochen. Der bekannte Enthusiast des sowjetischen Raketenbaus, Zander, entwickelte diese Idee weiter und schlug vor, nach dem Aufbrauchen des Raketenbrennstoffs auch den metallischen Brennstoffbehälter zu verbrennen.

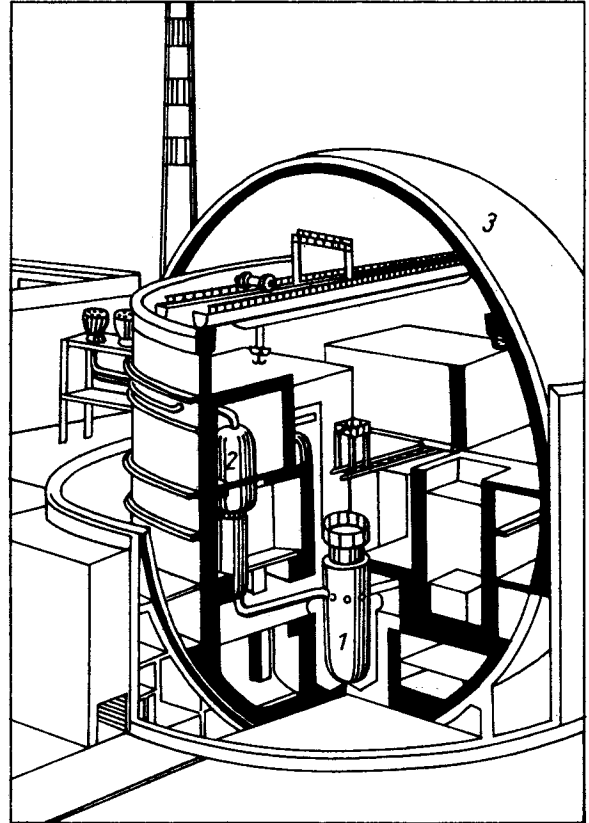
Metalle in Kernkraftwerken

Die Steuerung der »Atomflamme«

Das erste technische Kernkraftwerk in der Geschichte der Menschheit wurde in der Sowjetunion gebaut. Die Mitteilung über seine Inbetriebnahme wurde am 27. Juni 1954 veröffentlicht.

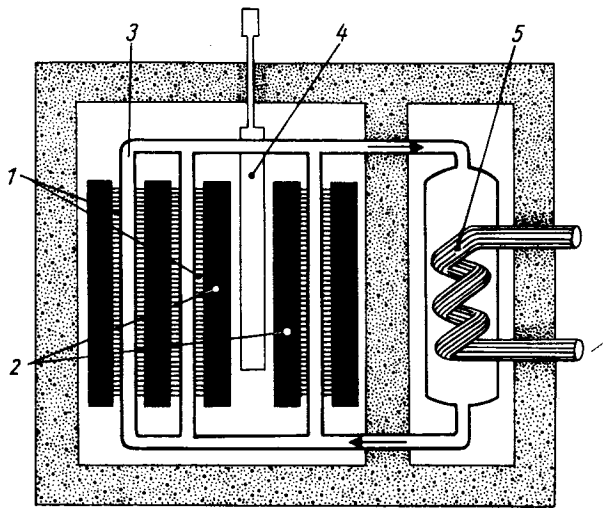
Wie arbeitet nun das Herz eines Kernkraftwerkes – der Reaktor? Natürliches Uran, Uranoxid oder Plutonium, das sorgfältig von allen Beimengungen gereinigt ist, die in der Lage sind, Neutronen aufzunehmen, wird zu kleinen Platten oder Zylindern geformt. Diese werden in der Bremssubstanz für die Neutronen untergebracht, d. h. in gut gereinigtem Graphit oder in Wasser.

Damit der Reaktor nicht überhitzt wird und die Uranblöcke nicht aufschmelzen, muß man kontinuierlich und schnell die entstehende Wärme abführen. In einem gewöhnlichen Dampfkessel dient Wasser als Wärmeträger. Es kann für das gleiche Ziel auch im Kernreaktor verwendet werden. Je höher dabei die Temperatur in der Arbeitszone des Reaktors ist, um so höher ist sein Wirkungsgrad. Doch bei Temperaturen von einigen hundert Grad ist Wasser nur dann verwendbar, wenn man hohe Drücke anwendet. Das kompliziert die Konstruktion des Reaktors beträchtlich. Man kann als Wärmeträger auch Stoffe verwenden, die bei höheren Temperaturen als Wasser sieden, so z. B. das Natrium, dessen Siedetemperatur etwa 900°C beträgt, oder noch besser Lithium, das bei 1350°C siedet. Das letztere Metall besitzt dazu noch eine doppelt so hohe Wärmekapazität wie Natrium. Schon während des zweiten Weltkrieges wurden Wärmetauscher entwickelt, die eine außerordentliche Wärmeleitfähigkeit besitzen. In ihnen wird die Wärme durch Verdampfung und Kondensation irgendeiner Flüssigkeit übertragen. In Rohren, die im Temperaturbereich von 100



Druckwasserreaktor eines Kernkraftwerks

1 Reaktor, 2 Dampferzeuger, 3 Sicherheitsbehälter (56m Durchmesser, Stahl)



Schema eines Druckröhrenreaktors

1 Brennelemente, 2 Graphit, 3 Druckröhren, 4 Steuerstab, 5 Dampferzeuger

bis 1200°C arbeiten, wird die Wärme durch flüssige Metalle, wie Natrium, Rubidium oder Zäsium (Zaesium) transportiert, während im Bereich von 1200 bis 2000°C Lithium, Gallium, Blei, Indium oder Silber verwendet werden. Auf diese Weise realisiert man auch die Wärmeabfuhr aus der amerikanischen Rakete »Atlas« sowie der Wohnsektion der kosmischen Station »Skylab«.

Es ist vorgesehen, mit Hilfe solcher Wärmeröhre auch die Wärme von gesteuerten Kernreaktoren abzuführen. Doch die Verwendung flüssiger Metalle stellt die Konstrukteure vor eine Reihe neuer Schwierigkeiten: Natrium und Lithium sind chemisch sehr aktive Elemente, und daher ist es nicht leicht, ein Material für die Rohre zu finden, das nicht einer Korrosion durch das Natrium oder das Lithium unterliegt.

Damit die Kernspaltungsreaktion nicht der Kontrolle entgleitet und der Reaktor nicht explodiert, werden Stäbe aus Materialien verwendet, die sehr stark Neutronen schlucken. Gewöhnlich nimmt man für diese Zwecke Kadmium oder Hafnium. Werden diese Stäbe völlig in den Reaktor eingefahren, bricht die Kettenreaktion ab: Die Mehrzahl der Neutronen wird von den Atomen dieser Stäbe aufgenommen. Um die Kettenreaktion zu starten, werden die Stäbe aus dem Stapel langsam heraus-

gezogen, und der Neutronenstrom innerhalb des Reaktors vergrößert sich um ein vielfaches. Das dauert so lange, bis der Vervielfachungskoeffizient der Neutronen, wie die Physiker sagen, den Wert 1 erreicht. Das bedeutet, daß jedes Neutron, das bei der Teilung eines Uran-235-Kerns gebildet wird, durch die Teilung neuer Kerne schon 2 bis 3 Neutronen freisetzt. Diese Reaktion würde unaufhörlich anwachsen, wenn sie nicht gebremst würde, und früher oder später zur Explosion führen. Die Automatik arbeitet jedoch zuverlässig: Die Regulierungsstäbe werden wieder in den Reaktor gerade so weit eingefahren, daß der Vervielfachungskoeffizient der Neutronen genau 1 beträgt. Dann brennt die »Atomflamme« ruhig, ohne auszugehen oder außer Kontrolle zu geraten. Dieser Vorgang verläuft natürlich nicht kontinuierlich. Die sich während der Kernreaktion bildenden Kerne neuer Atome schlucken ebenfalls Neutronen. Während der Arbeit des Kernreaktors sammelt sich diese »Atomasche« in immer stärkerem Maße an, schluckt immer mehr Neutronen und unterbricht letzten Endes die Kettenreaktion. Der Reaktor muß angehalten, die Uranblöcke müssen aus ihm entnommen und von den in ihnen angesammelten Spaltprodukten gereinigt werden. Während dieser Zeit sind sie durch neue zu ersetzen.

Der Kampf um die Energie

Der Weltbedarf an allen Energieformen wächst um mehr als das Doppelte innerhalb von 20 Jahren, bei Elektroenergie ist es sogar das 4fache! Dieses Wachstum ist verständlich. Die Energieerzeugung ist die Voraussetzung für das Wachstum aller Industriezweige; jedoch ist ein weiterer Anstieg der Energieerzeugung mit immer größeren Schwierigkeiten verbunden. So wird z.B. schon heute die Erzeugung von Elektroenergie im europäischen Teil der UdSSR durch die Brennstoffreserven begrenzt. (In der Gesamtbilanz an Elektroenergie haben die Wasserkraftwerke nur einen geringen Anteil. Über 80% wird in Wärmekraftwerken erzeugt, die mit Kohle, Erdöl oder Erdgas betrieben werden.) Bald reicht im europäischen Teil der UdSSR der Vorrat an organischen Brennstoffen nicht mehr aus. Wie soll es weitergehen? Die naheliegende Antwort lautet: Die Kernenergieerzeugung muß in den nächsten Jahren in weitem Umfang ausgebaut werden.

Wissenschaftler haben berechnet, daß Kernkraftwerke, die mit thermischen Neutronen arbeiten, in einer Gesamtkapazität von einigen Milliarden Kilowatt gebaut werden können: Für mehr reicht aber das Uran nicht. Die Industrie der Zukunft erfordert jedoch eine etwa 10mal größere Kapazität.

Die Grundlagen der Energietechnik der zukünftigen Jahrzehnte sind die schnellen Brüter.

In jeder Tonne natürlichen Urans sind nur 7 kg Uran-235 enthalten. In den schnellen Brütern wird fast das gesamte Uran-238 zu Plutonium umgewandelt. Durch die Arbeit eines solchen Reaktors wird die Menge an Kernbrennstoff nicht vermindert, sondern im Gegenteil sogar vergrößert.

Im Weltmaßstab werden einige zehntausend Tonnen Uran im Jahr gefördert. Doch wie groß sind die Vorräte dieses Brennstoffs? Uran kommt fast in allen Mineralien vor, leider in äußerst geringer Konzentration. Heute wird es in der Hauptsache aus dem Mineral Uranit, das etwa 40% Uranoxid enthält, gewonnen. Noch reicher ist eine besondere Form des Minerals, die sogenannte Pechblende. Sie enthält bis zu 75% Uranoxid. Es gibt noch andere Uranerze. Auch wenn die Vorräte an Uran begrenzt sind, kann die Menschheit noch lange ihren Energiehunger stillen.

Uran ist nicht der einzige natürliche Kernbrennstoff für den Reaktor. Der Kern des Thoriumatoms, eines anderen radioaktiven Elements, verwandelt sich nach Aufnahme eines Neutrons in Uran mit der relativen Atommasse 233. Dieses Isotop ist nicht schlechter spaltbar als das Uran-235. Auch Thorium kann also als Brennstoff zur Gewinnung von Kernenergie dienen, es kommt in der Erdkruste etwas häufiger als Uran vor.

Im Uran und Thorium ist insgesamt die 20fache Energiemenge eingeschlossen als in allen anderen Formen organischer Energieträger, wie Kohle, Erdöl, Erdgas, Torf, Brennholz usw.

Die größten Hoffnungen der Energiefachleute der Welt liegen bei der gesteuerten *Kernfusionsreaktion*.

Atom-»Bremsen« und Atom-»Spiegel«

Zu den Metallen der Kernkraftwerke gehören nicht nur die, die als Kernbrennstoff dienen. Nicht weniger wichtig

sind die Metalle, die die Menschen vor der durchdringenden Strahlung schützen. Die Kernkraftwerke mit Spaltbrennstoff könnten nicht ohne Moderatoren und Reflektoren arbeiten, die die Neutronen bremsen und reflektieren, sowie ohne Regulierstäbe, mit denen die Kernreaktion im Zaum gehalten wird.

Als Schutzmittel, das den Menschen zuverlässig vor dem Strom der geladenen Teilchen und den *Gammastrahlen* schützt, kann man Blei verwenden. Doch für Neutronen sind sogar dicke Bleiplatten keine Barriere. Dafür werden diese Teilchen sehr stark von den Atomkernen einiger Elemente, wie Kadmium, Hafnium oder Gadolinium, aufgenommen. Eine dünne Platte aus diesen Metallen versperrt fast allen Neutronen den Weg. Man kann daraus auch die Regulierstäbe und den Havarieschutz für die Kernreaktoren herstellen.

Das Beryllium ist in der Lage, Neutronen zu bremsen, ohne sie aufzunehmen. Es reflektiert die Neutronen und schickt sie in die aktive Zone des Reaktors zurück, wodurch diese Zone wesentlich verkleinert und die Arbeitstemperatur erhöht wird. Das verbessert die Ausnutzung des Kernbrennstoffs.

In schnellen Brütern ist jedoch Beryllium nicht verwendbar, weil es die Neutronen abbremst. Hier wird als Reflektor gewöhnlich Zirkonium eingesetzt. Die erstaunliche »Gleichgültigkeit« des Zirkoniums gegenüber den Neutronen wurde schon 1947 theoretisch vorausgesagt. Doch nicht sofort übernahm dieses Metall seine wichtigste Rolle im Kernkraftwerk. Das liegt daran, daß es einen chemischen Doppeltgänger gibt, das Hafnium, das sich in seinen chemischen Eigenschaften fast nicht vom Zirkonium unterscheidet. Es ist daher äußerst schwierig, Zirkonium von seinem natürlichen Begleiter Hafnium zu trennen. Hafnium nimmt jedoch stark Neutronen auf. Nachdem man gelernt hatte, Zirkonium und Hafnium zu trennen, begann die Welterzeugung an Zirkonium in ungekanntem Tempo zu steigen: So wuchs sie von 1949 bis 1959 etwa auf das 1000fache! Zirkonium ist sehr beständig gegenüber Korrosion und schmilzt erst bei 1850°C. Alle seine Eigenschaften machen es unersetzlich beim Bau verschiedener Elemente von Kernreaktoren. Aus Zirkonium stellt man Mäntel her, die die Brennstoffelemente vor der Korrosion im Kernreaktor schützen, sowie Kühlrohre für die Reaktoren in den Kernkraftwerken, Atomeisbrechern usw.

Kostbarer Abfall

Durch die Kernspaltung bilden sich einige sehr radioaktive Elemente. Jedes Kilogramm dieser »wertvollen Asche« entspricht in seiner Strahlungsintensität etwa 2t Radium!

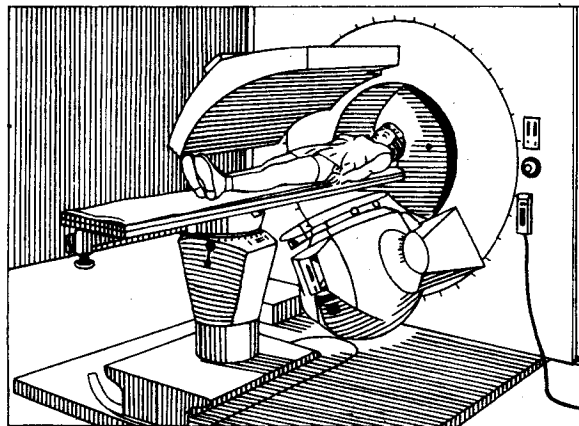
Radioaktive Stoffe werden in weitem Umfang in der modernen Wissenschaft, Industrie und Medizin als Strahlungsquellen eingesetzt. Mit ihrer Hilfe heilt man Krebsgeschwüre, sterilisiert Arzneien und medizinische Präparate. Chemiker und Biologen verwenden sie als »markierte Atome«, mit deren Hilfe man den Lauf chemischer Stoffe in lebenden Organismen und der unbelebten Natur verfolgen kann. Radioaktive Stoffe helfen massive Maschinenteile aus Metall, Beton und anderen undurchsichtigen Stoffen zu »durchleuchten«. In der chemischen Industrie beschleunigen sie die Polymerisation vieler organischer Stoffe. Das Strontium-90 wird mit Erfolg für den Bau von elektrischen Atombatterien verwendet, die die Geräte in den kosmischen Raketen, den Sputniks, den automatischen meteorologischen Stationen u. a. Geräten speisen. Chemische Batterien arbeiten höchstens 1/2 Jahr, Atombatterien dagegen länger als 5 Jahre.

Eine kleine »Tablette« aus Plutonium mit der relativen Atommasse 238 kann einen Herzschrittmacher für 25 Jahre mit Energie versorgen.

Einige radioaktive Isotope von in der Natur gewöhnlich stabilen Elementen werden in den Kernreaktoren künstlich erzeugt. Dazu gehört z. B. Kobalt-60. Unter Einwirkung des mächtigen Neutronenstroms im Kernreaktor verwandelt sich das nichtradioaktive Kobalt-59 in das sehr radioaktive Isotop Kobalt-60, das ein starker Gammastrahler ist. Es genügt, darauf hinzuweisen, daß nur 17g dieses Stoffes die gleiche Strahlung wie 1 kg Radium aussenden.

Seine *Halbwertszeit* beträgt 5,3 Jahre. Mit seiner Hilfe durchleuchtet man Anlagen und Bauteile. Eine geringe Menge billigen radioaktiven Kobalts ersetzt in der Industrie riesige komplizierte und teure Röntgenanlagen. Kobalt-60 wird mit Erfolg überall dort eingesetzt, wo eine kompakte, doch starke Quelle für durchdringende Gammastrahlen erforderlich ist, z. B. für die Bestrahlung von Krebsgeschwüren.

In modernen Flugzeugen gibt es viele für eine Inspizierung sehr schwer zugängliche Stellen. Dabei ermög-



Kobaltkanone zur Strahlentherapie mit Kobalt-60

licht aber bis heute nur eine solche »Durchsicht« ein rechtzeitiges Erkennen von Korrosionserscheinungen. In den USA wurde mit der Herstellung von tragbaren Anlagen zur Neutronenradiographie begonnen, für die als Strahlungsquelle Kalifornium-252 benutzt wird. Die Methode beruht darauf, daß das Aluminiumhydroxid als das wichtigste Korrosionsprodukt in den Flugzeugen die Neutronen schluckt. Aluminium wie auch seine Legierungen sind dagegen für eine Neutronenstrahlung durchlässig. Die durch die Korrosion geschädigten Stellen werden deshalb auf den Filmen dunkel. Mit Hilfe einer solchen Neutronenradiographie kann z. B. die Korrosion im Brennstofftank eines Flugzeugs in 150 Stunden festgestellt werden, während eine gewöhnliche Inspektion mindestens 5000 Arbeitsstunden erfordert.

Wo endet das Periodensystem der Elemente?

Heute sind 107 chemische Elemente bekannt, aber wieviel gibt es überhaupt?

Diese Frage erregt die Wissenschaftler, wie auch der Umstand, daß einige Elemente in der Natur häufig vorkommen, andere außerordentlich selten. Die Antworten auf diese Fragen wurden erst unlängst gefunden, als die Kernchemie in der Lage war, zu erklären, wovon die Stabilität der Atomkerne abhängt.

Wie bekannt ist, sind Elemente mit kleiner Kernladung im allgemeinen stabiler als solche mit großer. Die gleich-

namigen Ladungen stoßen einander ab, und ein Kern, der viele Protonen enthält, wird deshalb instabil. Die Kerne mit Ladungen, die größer sind als beim Uran, zerfallen deshalb fast sofort nach ihrer Bildung.

Während beim Uran die Halbwertszeit 10^{16} Jahre, bei einigen Isotopen des Plutoniums 10^4 Jahre, beim Kalifornium 10^2 Jahre beträgt, so dauert sie beim Element mit der Ordnungszahl 100, dem Fermium, nur noch Stunden. Mendelevium, das nächste in der Reihe, zerfällt in Minuten und das Element 104, das Kurtschatowium (auch Unnilquadium genannt), in zehntel Sekunden. Für die noch schwereren Kerne verkürzt sich die Lebensdauer auf Augenblicke. Berechnungen ergeben, daß z. B. das Element mit der Ordnungszahl 110 und der relativen Atommasse 241 eine Halbwertszeit von tausendstel Sekunden besitzen müßte. Es ist verständlich, daß sich in der Natur keine bemerkbare Menge dieser Elemente ansammeln kann.

Die ersten drei Dutzend der stabilsten Elemente des Periodensystems bilden die Hauptmasse der Erdkruste. Das ist jedoch nur eine allgemeine Tendenz. Die Physiker haben erkundet, daß die Stabilität der Atomkerne auch davon abhängig ist, welches Verhältnis zwischen den Protonen und den Neutronen im Kern vorliegt. Als am wenigsten stabil erweisen sich die Kerne, in denen sowohl die Zahl der Protonen als auch die Zahl der Neutronen ungerade ist. (Eine Ausnahme bilden nur die ersten vier Elemente des Periodensystems.) Stabiler sind die Kerne mit einer geraden Anzahl von Protonen und einer ungeraden Anzahl von Neutronen. Noch stabiler sind die Kerne, in denen sowohl die Zahl der Protonen als auch die der Neutronen gerade ist. Besonders stabil sind solche Kerne, die die sogenannten »magischen« Zahlen von Protonen oder Neutronen enthalten: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 114, 126, 184. Nickel hat z. B. 28 Protonen und das Zinn 50 Protonen. Die stabilsten Kerne sind die »doppelmagischen«, bei denen die Zahlen der Protonen und Neutronen »magisch« sind. Dazu gehören Helium (2 Protonen und 2 Neutronen), Sauerstoff (8 Protonen und 8 Neutronen), Kalzium (20 Protonen und 20 Neutronen), Blei (82 Protonen und 126 Neutronen) usw.

Das Geheimnis der »magischen« Zahlen wurde durch die Quantenmechanik gelöst. Die Elektronen umkreisen den Atomkern nicht wahllos. Sie nehmen nur ganz bestimmte Energieniveaus ein. Ähnliche Verhältnisse liegen auch im Atomkern vor.

Protonen und Neutronen können sich entsprechend den Gesetzen der Quantenmechanik in einem System (in diesem Fall im Atomkern) nicht gleichzeitig auf gleichen Energieniveaus befinden. Die »magischen Zahlen« geben an, wieviel Protonen oder Neutronen sich auf verschiedenen Energieniveaus innerhalb des Atomkerns befinden können. Ähnlich wie die Atome, bei denen die Elektronenschalen vollständig gefüllt sind, zu den stabilsten chemischen Elementen gehören, wie z. B. die Edelgase, so sind auch die Kerne der Atome, bei denen alle den Protonen erlaubten Energieniveaus gefüllt sind, die stabilsten.

Daraus folgt, daß auch Kerne einiger transuraner Elemente, z. B. des 114. oder des 126., genügend stabil sein können. Der Kern des Elements mit der Ordnungszahl 114 und der relativen Atommasse 298 muß 114 Protonen und 184 Neutronen enthalten, d. h. doppelt magisch sein. Das gleiche tritt bei dem Kern des Elements 126 mit der relativen Atommasse 310 ein: Hier müssen im Kern 126 Protonen und 184 Neutronen vorhanden sein. Berechnungen zeigen, daß die Halbwertszeit dieser Elemente einige 10 Milliarden Jahre betragen müßte.

Das Element der Ordnungszahl 114 nimmt im Periodensystem einen Platz in der 7. Periode ein und muß ein Analogon des Bleis sein (eka-Blei nach der Terminologie von Mendelejew), während das 126. Element schon völlig neue, bisher unbekannte Eigenschaften besitzen wird. Es hat nämlich seinen Platz in der uns bisher noch unbekanntem 8. Periode, die mit dem Element 119 beginnen muß. In den Atomen der Elemente dieser Periode beginnt der Aufbau einer neuen Elektronenschale, die 18 Elektronen aufnehmen kann. Das 126. Element gehört in diese neue Familie von sehr ähnlichen Elementen, die sich nach den Berechnungen chemisch nur unbedeutend unterscheiden. Insgesamt müssen in der 8. Periode 50 Elemente vorkommen, und zwar vom 119. bis einschließlich zum 168. Eine ähnliche Struktur wird auch die 9. Periode des Systems aufweisen, die die Elemente der Ordnungszahlen 169 bis 218 umfaßt. »Stabilitätsinseln« müßten auch hier auftreten.

So ist also nicht nur die Entdeckung neuer Elemente, sondern auch neuer Perioden im Periodensystem der Elemente möglich. Hier können wir auf völlig neue, uns bisher unbekannte physikalische und chemische Eigenschaften treffen.

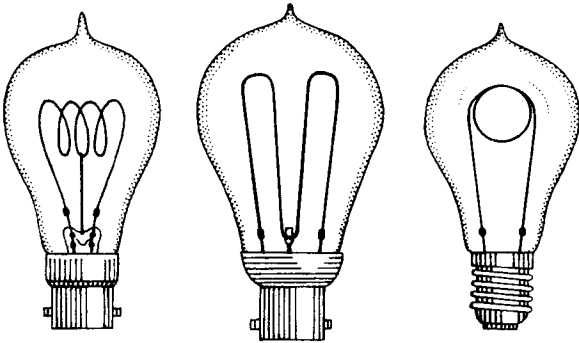
Elektronen im Gespann

Der Blitz der Kolben

Das Leben eines modernen Menschen kann man sich gar nicht mehr ohne elektrische Beleuchtung vorstellen; d. h. ebensowenig ohne Telegrafen, Telefon, Radio- und Fernsehgeräte, Tonfilm, elektronische Rechenmaschinen, Röntgenapparate, Elektronenmikroskope, Straßenbahnen, Trolleybusse, ohne Metro und andere Formen des elektrisch betriebenen Transports, ohne Staubsauger, Kühlschränke, Magnettongeräte, Generatoren, Fotoelemente und alle möglichen Elektromotoren.

Dies alles konnte nur ermöglicht werden, weil die Metalle besondere elektrische und magnetische Eigenschaften besitzen.

Im Jahre 1752 hat Franklin entdeckt, daß der blendende Blitz eines Gewitters durchaus nicht der »himmlische Pfeil« ist, mit dem der Herrgott die sündigen Menschen



Glühlampen aus der Anfangszeit der elektrischen Beleuchtung für unterschiedliche elektrische Spannungen: 90 bis 125 V, 200 bis 230 V, 220 V

strafft, sondern einfach einen gigantischen elektrischen Funken darstellt. Ein unwiderlegbarer Beweis dafür ist die Erfindung des Blitzableiters durch Franklin.

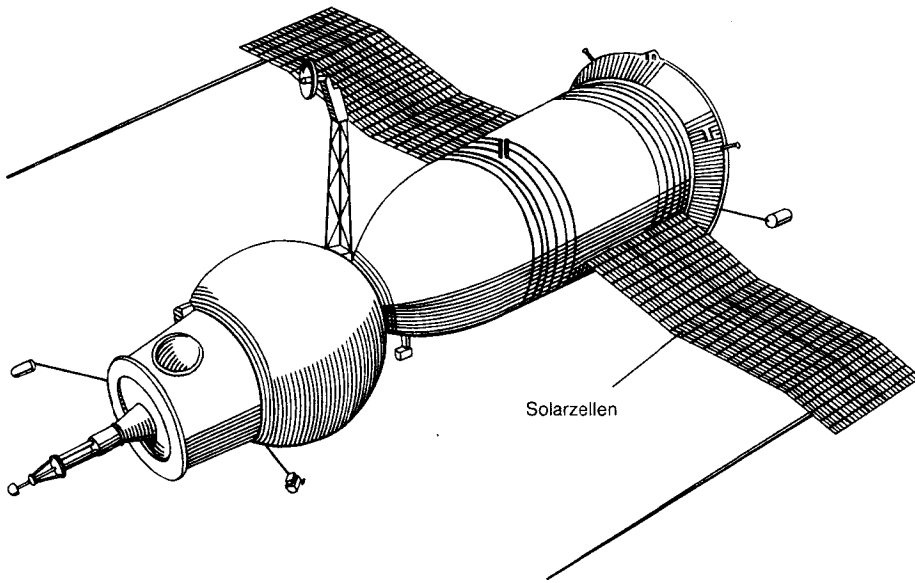
Am 23. November 1802 gelang es dem damals noch jungen russischen Physiker Petrow, zum ersten Mal elektrisches Licht in seinem Laboratorium erstrahlen zu lassen.

1849 wurde eine Lichtbogenlampe auf der Spitze des Admiraltätspalasts in Petersburg entzündet. Nach ihrer Vervollkommnung durch den russischen Erfinder Jablotschkow, worüber 1876 in der Pariser Akademie der Wissenschaften berichtet worden war, begann der Triumphzug »der russischen Sonne«, so nannte man das blendende Licht der elektrischen Lampen. »Der Blitz im Kolben« beleuchtete Straßen und Plätze von Paris, London, Berlin und anderen großen Weltstädten, den Lesesaal der Bibliothek des Britischen Museums, Restaurants, Konzertsäle, die Paläste des persischen Schahs und des Königs von Kambodscha sowie anderer reicher Leute der damaligen Zeit.

1876 wurden in Petersburg die Schaufenster eines der vornehmsten Wäschegeschäfte mit Glühlampen beleuchtet.

Man hat in der Folgezeit festgestellt, daß das Wolfram das beste Material für die Fäden der Glühlampe ist.

Zu den Milliarden Glühlampen kommen in jedem Jahr mehr und mehr Tageslichtlampen. Eine moderne Stadt kann man sich einfach nicht ohne vielfältige Reklamebeleuchtung vorstellen. Wie auch beim Polarlicht wird das Leuchten in allen Gasentladungslampen durch einen Strom von Elektronen hervorgerufen, die sich in verdünntem Gas bewegen. Voraussetzung für solch einen Elektronenstrom sind Metalle, die von ihrer Oberfläche Elektronen aussenden.



Raumfahrzeug »Sojus«

Wichtiger als Kernenergie

Am Eingang der Moskauer Metrostationen stehen äußerlich anscheinend harmlose Automaten, die die Arbeit der Kontrolleure erleichtern. Wenn Sie 5 Kopeken einwerfen, können Sie ungehindert durch die Sperre gehen. Versuchen Sie jedoch, unentgeltlich hindurchzuschlüpfen, versperren Ihnen zwei stählerne Arme sofort den Weg. Der Aufbau eines solchen Automaten ist nicht kompliziert. Auf der einen Seite des Durchgangs ist ein Fotoelement angeordnet, auf der anderen eine Lichtquelle. Sowie Sie den Lichtstrahl unterbrechen, schaltet das Fotoelement die Arme ein, die Ihnen den Weg versperren. Wenn Sie jedoch 5 Kopeken einwerfen, wird der Mechanismus ausgeschaltet.

Die Wirkung des elektrischen Auges des Fotoelementes beruht darauf, daß es Stoffe gibt, die in der Lage sind, Elektronen auszusenden, wenn auf sie Licht fällt.

1888 begann der russische Physiker Stoletow eine weitere Untersuchung der zuvor von Hertz entdeckten interessanten Erscheinung des Auftretens von elektrischem Strom unter der Einwirkung des Lichtes. Die Versuche zeigten, daß das Licht aus dem Metall negative Ladungen herausreißt. Die theoretische Erklärung dafür wurde von Planck und Einstein gegeben, die annahmen, daß das Licht von dem Stoff nicht kontinuierlich, sondern

in einzelnen Portionen, den sogenannten Quanten, aufgenommen worden sei. Später erhielten diese »Lichtteilchen« die Bezeichnung Photonen.

Wenn die Photonen mit den Elektronen des Metalls zusammenstoßen, übertragen sie auf diese eine zusätzliche Energie, dank derer die Elektronen die Möglichkeit haben, sich aus dem Kristallgitter zu entfernen, gleichsam von der Metalloberfläche zu »verdampfen«. Es ist verständlich, daß am leichtesten ein weit vom Kern entferntes, einzelnes Elektron abzuspalten ist. Darum sind für die Fotoelemente die Alkalimetalle am besten geeignet, die im unteren Teil des Periodensystems angeordnet sind. Beim Zäsium z. B. wird ein Elektron vom Kern nicht nur unter der Einwirkung des sichtbaren Lichtes, sondern auch von infraroten Strahlen losgeschlagen, die eine geringe Energie besitzen. Weniger aktive Metalle geben die Elektronen nur unter dem Einfluß kürzerer und damit energiereicherer elektromagnetischer Wellen frei, z. B. bei ultravioletter, Röntgen- oder Gammastrahlung.

Zäsium ist eins der chemisch aktivsten Metalle. An der Luft entzündet es von selbst. Kommt es mit Wasser, Schwefel, Chlor oder Phosphor in Berührung, explodiert es. Sogar mit Eis reagiert es sehr heftig. Es ist nicht erstaunlich, daß Zäsium nur im Vakuum verwendet werden kann.

Zäsium ist ein sehr seltenes Element und dazu noch in der Natur sehr fein verteilt. Sein Haupteinsatzgebiet sind Fotoelemente, Aufnahmeröhren für das Fernsehen und Bildschirme, die schon in weitem Umfang verwendet werden, so wie Thermoemissionswandler, deren Siegeszug gerade erst beginnt.

Fotoelemente zählen Einzelteile, die sich an ihnen auf Bändern vorbeibewegen, sortieren Zigaretten, Strümpfe, Kugellager. Sie schalten die Straßenbeleuchtung ein, wenn es dunkelt, bewachen Eingänge in Läden, Banken oder Hafeneinfahrten und schalten sofort eine Maschine aus, wenn die Hände des Arbeiters in die gefährliche Zone geraten. Ohne sie gäbe es keine Fernsehgeräte, keine Bildtelegraphie, keinen Tonfilm. Sie ermöglichen es, sogar in der Dunkelheit und durch undurchsichtige Körper zu sehen.

Zäsium wird in den Aufnahmeröhren der Fernsehapparaturen ebenso verwendet wie in den Ionentriebwerken für Raketen, wo es als Arbeitsmedium dient. Es verwandelt sich in ionisiertes Gas, das durch ein elektrisches Feld auf hohe Geschwindigkeit beschleunigt wird und aus der Raketendüse ausströmt. Dieser Ionenstrahl bewirkt den Schub des Triebwerks. Die Verwendung von Zäsium und von Ionentriebwerken verspricht sowohl eine Senkung der Masse der Rakete als auch ihrer Kosten um ungefähr zwei Drittel.

Im August 1968 wurde von Kap Kennedy eine Rakete »Atlas Centaurier« gestartet, die einen künstlichen Erdsatelliten auf die Bahn brachte, der mit zwei Zäsium-Ionentriebwerken ausgerüstet war, mit deren Hilfe eine Bahnkorrektur vorgenommen werden konnte.

Die Firma Lockheed hat ein Zäsium-Ionentriebwerk mit einem Wirkungsgrad entwickelt, der nahe bei 98 % liegt. Zäsium-Ionentriebwerke sind für die Verwendung in kosmischen Flugkörpern vorgesehen, die in der Lage sind, Menschen auf den Mars und dann wieder zurück auf die Erde zu bringen.

Noch wichtiger ist die Tatsache, daß Fotoelemente in der Lage sind, Sonnenenergie in elektrische Energie umzuwandeln.

Mendelejew hat einmal gesagt, daß man einen Ofen auch mit Geldscheinen heizen könnte. Erdöl, Steinkohle, Erdgas, Brennholz sind äußerst kostbare chemische Rohstoffe. Außerdem sind die Vorräte an organischem Brennstoff genau wie die von spaltbarem Kernmaterial begrenzt, während die Sonnenenergie für uns ewig ist.

Darum hat der berühmte französische Physiker, ein Spezialist auf dem Gebiet der Kernenergie, Joliot-Curie, gesagt, daß die Lösung der Probleme zur Ausnutzung der Sonnenenergie vermutlich wichtiger ist als die Bezwungung der Energie des Atomkerns.

Wandler, die die Sonnenenergie in elektrische verwandeln, gibt es bereits. Sie versorgen verschiedene Apparaturen in Raumschiffen und in künstlichen Erdsatelliten sowie die Motoren der sowjetischen Mondfahrzeuge. Moskauer Wissenschaftler haben die Möglichkeit der Umwandlung von Sonnenenergie in elektrische mit einem Wirkungsgrad von 65 bis 70 % bewiesen. Es wurden Sonnenbatterien geschaffen, die in der Lage sind, bis zu 85 % des auf sie fallenden Lichtes umzuwandeln. Ihre Verluste für die Rückstrahlung betragen nicht mehr als 10 %. Sie sind folgendermaßen aufgebaut: Auf die Oberfläche, die die Sonnenstrahlen sammelt, wird eine Schicht von Magnesiumoxid und Gold aufgetragen (die Dicke der Goldschicht beträgt etwa 0,15 μm). Dieser Film läßt das Licht der Sonne durchtreten, verhindert jedoch das Austreten von infraroten Strahlen. Der zweite Film ist dreischichtig. Dieses »Butterbrot« besteht aus zwei Schichten von Titandioxid, zwischen denen eine äußerst dünne, etwa 1 μm dicke Silberschicht eingeschlossen ist.

Zuverlässige und einfache Sonnenkraftwerke, die mehr als 20 Jahre ununterbrochen arbeiten können, sind bereits im Betrieb. Es sind Anlagen entwickelt worden, die mit Hilfe der Sonnenenergie Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff spalten (vorläufig sind allerdings Anlagen am produktivsten, bei denen dieser Prozeß durch Mikroorganismen oder Wasserpflanzen realisiert wird). Der Wasserstoff kann als idealer Brennstoff anstelle von Benzin, Petroleum, Erdöl oder Kohle verwendet werden, bilden sich doch bei seiner Verbrennung keinerlei für die Umgebung schädlichen Stoffe, sondern nur Wasserdampf und damit wieder der Ausgangsstoff für die Wasserstoffherzeugung.

Der »Elektronendampf« arbeitet

Am 14. August 1964 ist in der Sowjetunion die erste Anlage der Welt ohne Dampfkessel, Turbinen und andere bewegliche Teile in Betrieb genommen worden, die Kernenergie in Elektroenergie verwandelt. Wegen ihrer

äußerlichen Ähnlichkeit mit einer Feldblume erhielt sie die poetische Bezeichnung »Romaschka«, d. h. Kamille.

Am 26. März 1971 wurde in der sowjetischen Presse mitgeteilt, daß die komplexen Erprobungen einer sowjetischen Thermoemissionsanlage unter unmittelbarer Umwandlung von Kernenergie in elektrische Energie erfolgreich durchgeführt worden war. Die Leistung dieser Anlage erreicht einige Kilowatt. Das ist die erste Anlage dieses Typs in der Welt.

Erfolgreich wurden auch die Thermoemissions-Kernreaktoren »Topas« erprobt. Ihre Verwendung in der industriellen Energiewirtschaft steht bevor: Mit ihrer Hilfe kann man den Wirkungsgrad von thermischen Kraftwerken bis auf 50% (in der Perspektive bis auf 60%) und darüber erhöhen.

Die Thermoemissionswandler beruhen auf dem gleichen Prinzip wie die Radoröhren – auf der Fähigkeit der Metalle, im erhitzten Zustand von ihrer Oberfläche Elektronen abzugeben.

Der Wandler besteht aus zwei Elektroden, die durch ein Vakuum getrennt sind. Durch Erhitzen der Katode wird diese zur Emission von Elektronen angeregt, die zur Anode und weiter durch den äußeren Stromkreis fließen. Dieser elektrische Strom verrichtet auch die Nutzarbeit. In den Thermoemissionswandlern gibt es also, abgesehen von den Elektronen, keinerlei bewegliche Teile.

Wenn durch kontinuierliche Zufuhr eine ausreichende Wärmemenge garantiert wird, so daß der Austritt von Elektronen aus der Oberfläche der Katode kontinuierlich erfolgt, erhält man im äußeren Stromkreis einen konstanten Strom.

Worin liegt die revolutionierende Rolle der Thermoemissionswandler? Warum haben sie eine solche große Bedeutung?

In allen bis zur heutigen Zeit arbeitenden Kernkraftwerken erleidet die Energie eine ganze Reihe von Umwandlungen. Zunächst wird die Kernenergie in Wärmeenergie umgeformt. Diese wiederum erwärmt einen besonderen Wärmeträger und wandelt ihn in Dampf um. (Wie bereits erwähnt, fungieren als Wärmeträger nicht nur Wasser, sondern auch Metalle, z. B. Natrium.)

Der Dampf des Wärmeträgers bewegt die Turbine, die ihrerseits die Welle der Elektrogenatoren dreht, in denen die Elektroenergie erzeugt wird. Bei den Thermoemissionswandlern gibt es alle diese Zwischenstadien nicht. Das ist ihr erster großer Vorzug.

Von großer Bedeutung ist außerdem das Fehlen aller beweglichen Teile. Damit kann die Arbeitstemperatur wesentlich erhöht werden. Zur Erhitzung der Katode kann man Wärmequellen mit den höchsten Temperaturen (nicht nur den Kernreaktor und radioaktive Isotope, sondern auch die Sonnenenergie, Plasma u. a.) verwenden.

Da es keine beweglichen Teile gibt, fallen natürlich auch die Reibungsverluste und der mechanische Verschleiß weg. Die Beseitigung der Reibung ist besonders wichtig für kosmische Energiequellen, da im kosmischen Vakuum die Schmiermittel äußerst schnell verdampfen.

Von Bedeutung ist auch, daß die Thermoemissionswandler sehr kompakt und zuverlässig im Betrieb sind. Sie können lange Zeit ohne systematische Kontrolle und Wartung durch den Menschen arbeiten.

Vor nicht allzu langer Zeit erfunden, haben sie bereits einen Wirkungsgrad von etwa 27% erreicht. Für die zukünftige Entwicklung der Energiewirtschaft, insbesondere bei der Verwendung von Kernenergie und im Kosmos, ist die Bedeutung der Thermoemissionswandler kaum zu überschätzen.

Werden zwei verschiedene Metalle verschweißt, dann bildet sich an der Kontaktstelle bei der Erwärmung ein Potentialunterschied, weil die Konzentration der Elektronen im »Elektronengas« (bildhaft gesprochen: der Druck des »Elektronengases«) bei den verschiedenen Metallen nicht gleich ist.

In einem Stromkreis aus verschiedenen Metallen fließt ein elektrischer Strom, wenn die Schweißstellen sich auf unterschiedlicher Temperatur befinden. Je größer die Temperaturdifferenz ist, um so kräftiger ist der Strom. Auf diese Weise kann man Wärmeenergie unter Umgehung aller Zwischenstadien unmittelbar in Elektrizität verwandeln. Nach diesem Prinzip könnte man Elektroenergie aus der inneren Wärme unserer Erde oder aus Wärme, die in den Kernreaktoren frei wird, erzeugen.

Die »Betten« der elektrischen Ströme

Allgemein bekannt sind die prophetischen Worte von W. I. Lenin: »Kommunismus, das bedeutet Sowjetmacht + Elektrifizierung des ganzen Landes«.

Den Elektrifizierungsplan nannte Lenin das zweite Parteiprogramm. Es ist sicher nicht unwichtig, daran zu erinnern, daß 1970 die gesamte Leistung der Kraftwerke der Sowjetunion 100mal die Leistung überstieg, die in diesem Plan vorgesehen war. 1977 betrug die Elektroenergieerzeugung in der Sowjetunion 1150 Milliarden Kilowattstunden, und 1980 waren 1340 bis 1380 Milliarden Kilowattstunden geplant. Diese Ströme von Elektroenergie erreichen ihre Verbraucher, die Werke und Fabriken, die Elektrozüge und Trolleybusse, die Fernsehgeräte und Radioempfänger nur, wenn sie in ihren »Betten«, den elektrischen Leitungen, fließen.

Den Metallen kommt hierbei eine große Bedeutung zu. Die elektrische Leitfähigkeit von Kupfer ist beispielsweise 10^{24} mal (eine Zahl mit vierundzwanzig Nullen!) größer als die von Paraffin. Die Ursache für die hohe elektrische Leitfähigkeit der Metalle ist uns bereits bekannt: Die Elektronen sind nicht an die Atome »angebunden« wie bei den Isolatoren, sondern »spazieren« frei im Kristallgitter herum und bilden das sogenannte »Elektronengas«. Beim Fehlen eines elektrischen Feldes bewegen sie sich ungeordnet wie Moleküle in einem normalen Gas. Verbindet man jedoch das Metall mit einer Stromquelle und schließt den Stromkreis, so »marschieren« die Elektronen gerichtet in strenger Ordnung. Ihr gerichteter Strom wird zum elektrischen Strom. Bei der Bewegung im Metall treffen die Elektronen auf Ionen und übertragen auf sie einen Teil ihrer Energie. Die Ionen in den Gitterpunkten schwingen schneller, wodurch die Temperatur des metallischen Leiters steigt.

Je schneller jedoch die Ionen schwingen, desto öfter treffen sie mit den Elektronen zusammen und stören damit immer stärker ihre Bewegung. Darum steigt der elektrische Widerstand der Metalle mit der Temperatur und verringert sich bei sinkender Temperatur.

Im Kristallgitter verschiedener Metalle treffen die Elektronen auf unterschiedliche Widerstände. Am geringsten ist der von Silber. Wenn man dessen elektrische Leitfähigkeit mit 1 ansetzt, so ist die von Kupfer 0,94, die von Aluminium 0,55, von Eisen und Quecksilber 0,02 und von Titan 0,003.

Legierungen leiten im allgemeinen den elektrischen Strom viel schlechter als reine Metalle. Darum verwendet man für elektrische Leitungen Kupfer, das nicht mehr als 0,05 % Verunreinigungen enthält, oder hinreichend sauberes Aluminium, während für Widerstände oder

Heizspiralen Legierungen mit großem elektrischem Widerstand verwendet werden.

Kupfer leitet den elektrischen Strom 2mal besser als Aluminium, ist jedoch 3,3mal schwerer. Daher wird das Kupfer vom Aluminium verdrängt; bei gleicher elektrischer Leitfähigkeit ist ein Aluminiumleiter leichter als ein kupferner. Die Masse eines Aluminiumkabels ist 2mal geringer als die eines kupfernen, und das Aluminiumkabel ist 2- bis 3mal billiger bei gleicher übertragener Leistung. Es ist daher nicht erstaunlich, daß jetzt etwa 85 % aller Leistungskabel Adern aus Aluminium besitzen.

Vorläufig bleibt jedoch Kupfer das wichtigste Metall der Elektrotechnik. Fast die Hälfte der Produktion wird für die Herstellung von elektrischen Leitungen verwendet.

Die »sich liebenden Steine«

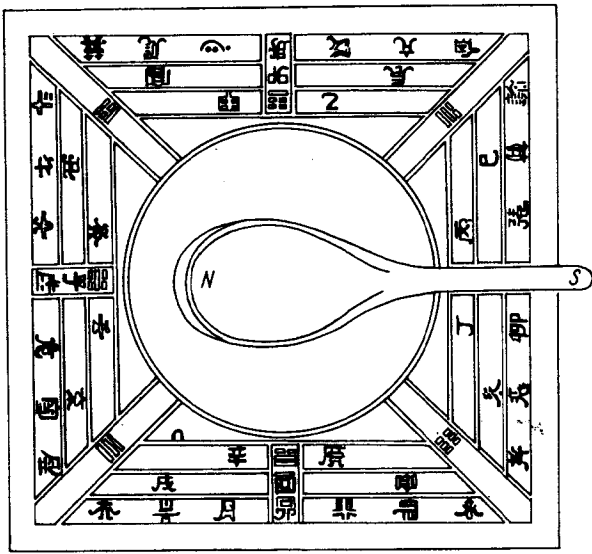
Das Leben eines Kindes ist in Gefahr: In den Bronchien hat sich ein Nagel festgesetzt. Er ist tief in die Wand der Luftröhre eingedrungen, und die Ärzte können ihn nicht mit Pinzetten erreichen. Durch einen langen und festen magnetischen Draht wurde der Nagel entfernt und damit das Leben des kleinen Patienten gerettet. Das Entfernen von Eisenspänen aus den Augen mit Hilfe eines starken Permanentmagneten hat schon oft das Sehvermögen von Menschen gerettet. Diese und ähnliche chirurgische Operationen wurden erst im 20. Jahrhundert möglich, als neue Magnetlegierungen geschaffen worden waren, deren Magnetismus viel stärker als der von Stahlmagneten ist.

Die Anwendung von Magneten in der Chirurgie ist jedoch bei weitem nicht neu. Schon im alten Indien wurden Magnete für die Entfernung von Eisensplintern aus dem menschlichen Körper verwendet.

Die Fähigkeit eines Magneten, eiserne Gegenstände anzuziehen, ist dem Menschen seit undenklichen Zeiten bekannt. Wahrscheinlich fand er in der Natur vorkommende Stücke von Magnet Eisenstein.

Sowohl die Chinesen als auch die Franzosen und einige andere Völker nannten die magnetischen Steine »sich liebende Steine«. Sie verglichen damit die magnetische Kraft mit der Anziehung, die liebende Herzen miteinander vereint.

Auch die Bezeichnung »Herkules-Steine« für Magnete ist überliefert.



Altertümlicher Kompaß aus China. Das Modell besteht aus einem auf einer polierten Kupferplatte liegenden Magnetilöffel

Die wichtigste praktische Anwendung fand der Magnet im Altertum als Kompaß. Die Kompaßnadel spielte in der Geschichte der Menschheit vermutlich keine geringere Rolle als das eiserne Schwert.

Der Kompaß sah zu diesen Zeiten sehr originell aus: Er bestand aus kleinen Figuren, die auf einem Wägelchen angeordnet waren. Ihre ausgestreckten Hände zeigten immer nach Süden. Erfunden wurde der Kompaß vor etwa 3000 Jahren. Doch in Europa wurde er erst im 13. Jahrhundert bekannt. Ohne Kompaß wären die großen geographischen Entdeckungen des Mittelalters undenkbar gewesen.

In den 30er Jahren unseres Jahrhunderts sind Legierungen geschaffen worden, deren Magnetismus den des gewöhnlichen magnetisierten Stahls um mehr als das 10fache übersteigt. Außer Eisen enthalten diese Legierungen Nickel, Kobalt, Aluminium und Kupfer. Sie erhielten die Bezeichnung »Alnico«. Noch besser sind Legierungen aus Platin und Kobalt. Einen sehr hohen Magnetismus weisen unlängst entdeckte Legierungen aus Kobalt mit Samarium-Praseodym oder Zr auf. Die wirksamsten Permanentmagnete können eine Last halten, die einige 100mal schwerer als ihr eigenes Gewicht ist. Vor noch nicht allzu langer Zeit bezeichnete man Eisen

als gut magnetisiert, wenn es eine Last hielt, die etwa seinem Gewicht entsprach. Eisenkerne verstärken die Kraft von Elektromagneten auf ein mehr als 100faches im Vergleich zu Spulen ohne Kern.

Von Gilbert bis Ampère

Die mathematische Untersuchung der Natur des Magnetismus begann im 16. Jahrhundert. Im Jahre 1600 erschien in London das Buch von Gilbert, dem Leibarzt der Königin, mit dem Titel »Über Magnete, magnetische Kräfte und den großen Magnet – unsere Erde«. Gilbert wird zu Recht als Vater der Wissenschaft von Magnetismus und Elektrizität bezeichnet. Er führte auch die Bezeichnung Elektrizität ein.

Im Juli 1820 wurde die Mitteilung über die Entdeckung der magnetischen Wirkung des elektrischen Stroms durch Oersted veröffentlicht, und schon im September des gleichen Jahres begann der berühmte französische Physiker Ampère Vorlesungen in der Pariser Akademie der Wissenschaft, in denen er die von ihm entwickelte Theorie der Wechselwirkung elektrischer Ströme darlegte und den genialen Gedanken über die Natur des Magnetismus der Metalle aussprach.

Seine Überlegungen bestanden in folgendem: Zwei parallele Leiter, in denen der Strom in gleicher Richtung fließt, ziehen einander an. Wenn jedoch die Richtung der Ströme entgegengesetzt ist, dann stoßen sich die Leiter ab.

Bei der Untersuchung der magnetischen Eigenschaften eines Leiters, der zu einem Kreis gebogen war, vermutete Ampère, daß die magnetische Wirkung wesentlich verstärkt würde, wenn man einige solcher Ringleiter vereinigt. Er wickelte den Leiter zu einer schraubenförmigen Spirale, die an eine Röhre erinnerte. Die stromführende Spirale nannte Ampère Solenoid (auf griechisch bedeutet Solenoid röhrenförmig). Die magnetische Wirkung des Solenoides entsprach einem Permanentmagneten, der die gleiche Form und Größe hatte. Doch während die Pole eines Permanentmagneten unveränderlich waren, wechselten die Pole des Solenoides ihre Plätze, wenn die Stromrichtung umgekehrt wurde.

Aus diesen Fakten hat Ampère den Schluß gezogen, daß jeder Permanentmagnet eine Sammlung von natürlichen Solenoiden, d.h. von Kreisströmen sei, die in

jedem Molekül des Stoffes fließen. Daraus folgte, daß der Magnetismus nicht irgendeine besondere selbständige Kraft in der Natur ist, sondern nur eine der Folgeerscheinungen des elektrischen Stroms. Ampère nahm an, daß die magnetischen Eigenschaften aller Körper durch Kreisströme in jedem Teilchen dieses Stoffes hervorgerufen werden. Diese Ströme sind immer vorhanden, doch solange ihre Achsen innerhalb des Körpers ungeordnet in alle Richtungen zeigen, weist der Körper insgesamt keine magnetischen Eigenschaften auf. Wenn jedoch Eisen, Stahl und einige andere geeignete Metalle magnetisiert werden, dann richten sich ihre elementaren Teilströme parallel zueinander in die gleiche Richtung aus, und der Magnetismus wird äußerlich wirksam.

Fast ein Jahrhundert vor der Entdeckung des Aufbaus der Atome hat Ampère auf diese Weise die modernen Vorstellungen von der Bewegung der Elektronen um den Atomkern vorweggenommen und hat eine Hypothese geschaffen, die bis heute die Grundlage der modernen Theorie des Magnetismus bildet. Maxwell hat ihn völlig zu Recht den »Newton der Elektrizität« genannt.

Tausend mal »Warum?«

Haben Sie einmal darüber nachgedacht, warum die einen Stoffe (Eisen, Kobalt, Nickel, Mangan u. a.) vom Magneten angezogen, während andere (Zink, Kupfer, Gold, Blei, Schwefel, Wismut usw.) im Gegensatz dazu abgestoßen werden? In der ersten Gruppe gibt es darüber hinaus Elemente (Eisen, Nickel, Kobalt, Gadolinium, einige Seltenerdmetalle und Legierungen dieser Metalle), die extrem stark angezogen und außerdem selbst zu Magneten werden. Solche Metalle werden ferromagnetisch genannt. Für die beiden erstgenannten Gruppen werden die Bezeichnungen para- und diamagnetische Stoffe verwendet.

Wie ist nun das Besondere im Verhalten der ferromagnetischen Stoffe zu erklären? Man kann sich sehr vereinfacht vorstellen, daß nach dem Verschwinden oder nach dem Entfernen eines äußeren Magnetfeldes die Elementarmagnete bei der Mehrzahl der Stoffe aufs neue auseinanderstreben wie Rekruten nach dem Kommando »Rührt euch!« (zum Begriff »Elementarmagnet« siehe folgender Abschnitt »Die Natur des Magnetismus«).

Bei den Ferromagneten bleiben die Elementarmagnete wie erfahrene Soldaten aus Trägheit in Reih und Glied stehen.

Solche Analogien helfen, sich ein anschauliches Bild von den Erscheinungen zu machen. Doch sie können keine Antwort auf die Hauptfrage geben: Warum verläuft alles so und nicht anders?

Die Untersuchungen über die Natur des Magnetismus in Metallen und besonders in Ferromagneten haben die Wissenschaftler vor neue Rätsel gestellt. Warum z. B. werden Ferromagnete 10 Millionen mal leichter als paramagnetische Stoffe magnetisiert? Unverständlich war auch die Tatsache, warum die Magnetisierung von Ferromagneten nicht kontinuierlich, sondern sprunghaft erfolgt.

Ein Versuch, theoretisch die Eigenschaften von Ferromagneten zu erklären, wurde von dem russischen Physiker Rosing schon im Jahre 1892 gemacht. Er nahm an, daß in solchen Metallen zusätzliche molekulare Magnetfelder existieren. Diese Hypothese wurde 1907 von dem französischen Wissenschaftler Weis weiterentwickelt. Doch wie das nicht selten in der Wissenschaft geschieht, war es eine formale Beschreibung der Erscheinung, deren wahrer physikalischer Sinn vorläufig unklar blieb.

In den 20er Jahren unseres Jahrhunderts erschien es vielen, als ob die Theorie der magnetischen Eigenschaften der Stoffe ihrer Vollendung nahe sei. Tatsächlich war auf der Basis des vor Bohr geschaffenen Bildes über den Atombau der physikalische Gedanke der molekularen Kreisströme Ampères deutlich geworden. Doch galt auch hier das Sprichwort: »Je weiter in den Wald – desto mehr Holz«. Bald hat man erkannt, daß die Elektronen im Atom nicht nur um den Kern kreisen wie Planeten um die Sonne, sondern auch um ihre Achsen (in der Quantenmechanik nennt man diese Erscheinung Spin – abgeleitet vom englischen Wort für rotieren, sich drehen).

Diese Rotationsbewegung des Elektrons muß man wie jede andere Kreisbewegung einer elektrischen Ladung ebenfalls als elektrischen Kreisstrom betrachten, der unweigerlich ein magnetisches Moment nach sich zieht (das magnetische Moment ist eine Vektorgröße, die das Verhalten eines Stromkreises in einem äußeren Magnetfeld beschreibt). Die absolute Größe dieses Vektors wird von der Stromstärke bestimmt, während die Richtung, d. h. die Lage der Pole, von der Richtung des

Kreisstroms mit oder gegen den Uhrzeigersinn festgelegt wird.

Damit hat sich erwiesen, daß die wichtigste Rolle bei vielen magnetischen Erscheinungen nicht die Rotation der Elektronen um den Atomkern, sondern die Rotation um ihre eigene Achse spielt. Die magnetischen Momente, die durch die Bewegung jedes der Elektronen um den Kern wie auch um ihre eigene Achse gebildet werden, addieren sich und bilden ein magnetisches Gesamtmoment des gesamten atomaren »Planetensystems«.

Die moderne, im Vergleich zu der von Ampère weitergehende Theorie des Magnetismus wurde auf der Basis der Vorstellungen der Quantenmechanik entwickelt. Ihre Grundlagen wurden in den 20er Jahren unseres Jahrhunderts durch die Arbeiten von Pauli gelegt und im weiteren durch Frenkel sowie Heisenberg entwickelt. Es ist interessant, daß die Wissenschaftler parallel und unabhängig voneinander arbeiteten. Die Mitteilungen über ihre Untersuchungen wurden fast gleichzeitig veröffentlicht: von Frenkel im Juni und von Heisenberg im Juli 1928. Die Theorie der magnetischen Domänen (siehe folgender Abschnitt) wurde von den sowjetischen Physikern Landau und Lifschitz begründet und im Jahre 1935 veröffentlicht. Diese Publikationen waren Meilensteine auf dem Wege zur modernen Theorie des Magnetismus.

Die Natur des Magnetismus

Bei den paramagnetischen Stoffen ist jedes Atom ein kleiner Magnet. Doch die magnetischen Momente der einzelnen Atome stehen in ganz geringer Wechselwirkung untereinander wie die Teilchen im Gas. Beim Fehlen eines äußeren Magnetfeldes sind die Pole dieser Magnete völlig ungeordnet orientiert. Ein äußeres Magnetfeld dagegen versucht, die Atome der paramagnetischen Stoffe so anzuordnen, daß die Richtungen ihrer Magnetmomente mit der Richtung der Kraftlinien zusammenfällt. Diesem Bestreben wirkt aber die Wärmebewegung der Teilchen des Stoffes entgegen. Dadurch werden die paramagnetischen Stoffe sehr schwach magnetisiert. Rechnungen zeigen, daß äußerst starke Magnetfelder, die in der Größenordnung von Millionen Ampere je Meter liegen, notwendig sind, um alle Atome solch eines Stoffes in die nötige Richtung zu drehen und

gemeinsam auszurichten. Für die Magnetisierung eines Ferromagneten werden nur Bruchteile eines Ampere je Meter benötigt.

Bei den diamagnetischen Stoffen weist kein Atom ein magnetisches Moment auf. Ein äußeres Magnetfeld stört das Gleichgewicht der magnetischen Momente der Elektronen in solchen Atomen. Das kann man sich so vorstellen, als ob im Atom bestimmte Ströme auftreten. Wenn ein Magnet an einen diamagnetischen Stoff gehalten wird, so ergibt sich auf der Seite, die zum Nordpol des Magneten gewendet ist, ebenfalls ein Nordpol und auf der Seite, die zum Südpol zeigt, ein Südpol. Wie bekannt ist, stoßen sich gleichnamige Pole ab. Daher ziehen sich diamagnetische Stoffe und Magnete nicht an, sondern stoßen sich ab.

Während die magnetischen Momente der Atome bei den paramagnetischen Stoffen ebenso schwach in der Wechselwirkung sind wie die Atome eines Gases, kann man bei den Ferromagneten die Wechselwirkung der magnetischen Atommomente mit der Wechselwirkung zwischen den Teilchen einer Flüssigkeit vergleichen. So richten sich große Gruppen von Atomen, die einige Millionen umfassen, so aus, daß alle ihre magnetischen Momente in die gleiche Richtung längs einer der Achsen des Kristallgitters ausgerichtet sind. Diese aus eigener Kraft magnetisierten Gebiete erhielten die Bezeichnung Domänen. Hier ist das Metall bis zur Sättigung magnetisiert. Und eben diese Domänen und nicht einzelne Atome sind die Elementarmagnete in den ferromagnetischen Stoffen. Die Grenzen der Domänen kann man im Mikroskop sichtbar machen, wenn man die Oberfläche eines Magneten mit sehr feinem Eisenpulver bestreut. Das magnetische Moment jeder Domäne ist längs einer der Achsen des Kristallgitters ausgerichtet. Doch im Kristall gibt es viele solcher Achsen. Die Richtung der magnetischen Momente verschiedener Domänen fällt daher gewöhnlich nicht zusammen, und so ergibt es sich, daß das magnetische Gesamtmoment aller Domänen ferromagnetischer Stoffe etwa bei Null liegt. Tatsächlich wird Eisen nur dann zum Magneten, nachdem es magnetisiert worden ist.

Unter dem Einfluß eines äußeren Magnetfeldes richten sich die magnetischen Momente aller Domänen in die gleiche Richtung wie eine Kompanie Soldaten aus. Dabei erfolgt das gleiche wie bei der Zusammenstellung eines zerbrochenen langen Magnetstabes. Wenn man

seine Teile in der Ordnung zusammenlegt, wie sie im ganzen Stab vorhanden war, so erhält man wieder den einheitlichen Magneten. Der Nordpol jedes kleinen Magneten im Stab stößt an den Südpol des Nachbarstücks, so daß sich ihre äußeren Magnetfelder gegenseitig kompensieren, außer an den Enden des Magneten.

Die Wärmebewegung der Teilchen ist nicht in der Lage, diese magnetische Ordnung bis zu dem Zeitpunkt zu stören, bei dem die Energie dieser Bewegung eine bestimmte kritische Größe übersteigt. Der Punkt auf der Temperaturskala, bei dem die Wärmebewegung der Teilchen die magnetische Ordnung zerstört, erhielt die Bezeichnung Curie-Punkt (nach dem Namen des bekannten französischen Physikers, der ihn entdeckt hatte). Wie bei den anderen Fixpunkten, z.B. den Schmelzpunkten, hat jeder Ferromagnet seinen bestimmten Curie-Punkt. Beim reinen Eisen liegt er z.B. bei 769°C.

Eine starke Erschütterung (ein Herunterfallen oder ein Schlag mit dem Hammer) kann ebenfalls den Elementarmagneten zusätzliche Energie vermitteln, durch die die magnetische Ordnung gestört wird und der Permanentmagnet teilweise entmagnetisiert wird.

Der Magnetismus gehört zu den wichtigsten und interessantesten, doch bei weitem noch nicht vollständig erforschten Erscheinungen, der Natur. Vor einigen Jahrzehnten hat der Physiker Dirac die Vermutung ausgesprochen, daß in der Natur Elementarteilchen des Magnetismus existieren müßten, genauso, wie Elementarteilchen der elektrischen Ladung, die Elektronen.

Dieses magnetische Teilchen hätte eine magnetische Ladung. Da diese sowohl »nördlich« als auch »südlich« sein müßte, werden die vermuteten Teilchen als »magnetische Monopole« bezeichnet. Wenn ein solcher Monopol einmal entstanden ist, kann er nicht eher verschwinden, bis er mit einem Monopol zusammentrifft, dessen magnetische Ladung das entgegengesetzte Vorzeichen hat. Die Monopole müßten sich auf große Geschwindigkeiten im Magnetfeld der Beschleuniger beschleunigen lassen, und danach könnte man diese »magnetischen Kugeln« aus dem beschossenen Objekt wieder entfernen und erneut beschleunigen. Vorläufig sind solche magnetischen Monopole nicht gefunden worden. Der Magnetismus wird als Nebenprodukt der Elektrizität angesehen: Er tritt nur als Ergebnis der Bewegung elektrisch geladener Teilchen auf. Die Existenz

eines magnetischen Monopols würde in die Theorie der Elektrizität und des Magnetismus eine gewisse Symmetrie bringen, die im modernen Bild dieser Erscheinungen bisher fehlt. Es wird angenommen, daß unter dem Einfluß der langjährigen Bombardierung durch kosmische Strahlen Monopole in Meteoriten auftreten müßten, doch bisher hat man sie dort nicht gefunden. Ebensoviele konnte man sie in Eisenerzen nach Bestrahlung in den stärksten Beschleunigern für Elementarteilchen, über die wir verfügen, entdecken. Doch die Physiker forschen hartnäckig weiter, bis sie sie gefunden oder eine Theorie entwickelt haben, die überzeugend beweist, daß der Monopol kein gesetzliches Recht auf Existenz in unserer Welt hat.

Am Schluß dieses Abschnitts zum Wesen des Magnetismus soll ein bildhafter Vergleich stehen, der die große technische Bedeutung dieser Naturerscheinung unterstreicht.

Der Rekordhalter im Heben schwerer Lasten ist offensichtlich die Ameise. Sie kann Lasten schleppen, die das 25- bis 30fache ihres Gewichts betragen.

Heute gibt es Permanentmagnete, die in der Lage sind, Lasten, die 500mal ihr Eigengewicht übersteigen, zu heben. Ein 2-kg-Magnet kann einen PKW »Lada« mit den in ihm sitzenden Passagieren anheben. Solche Magnete werden aus Legierungen von Seltenerdmetallen und Kobalt hergestellt.

Nahe dem absoluten Nullpunkt

Den Elektromagnet mit Eisenkern erfand 1825 Sterden, ein Autodidakt, Sohn eines englischen Schuhmachers und in seiner Jugend selber ein Schuhmacher.

In der kleinen Türklingel, im gigantischen *Synchrophasotron*, in Telegrafen, Telefonapparaten, Elektrogeneneratoren, Elektromotoren – überall dient uns zuverlässig der Elektromagnet. Nicht umsonst nennt man ihn das Herz jeder elektrischen Maschine, fast jedes modernen elektrischen Gerätes oder Apparates.

Haben Sie schon einmal darüber nachgedacht, daß der Elektromagnet ein Gerät ist, in dem die gesamte zugeführte Energie praktisch umsonst verbraucht wird? So ist es tatsächlich: Die gesamte dem Elektromagnet zugeführte Energie wird zur Überwindung des Widerstands der Wicklung verbraucht und verwandelt sich in

unnütze Wärme (analog der Erwärmung eines Elektrorisierers oder Staubsaugers). Zur Aufrechterhaltung des Magnetfeldes selbst wird kaum Energie benötigt. Ein Bruchteil wird nur im Moment des Einschaltens zur Erregung des Feldes verbraucht.

Am Beispiel der Entdeckung der Kernspaltung von Uran wird deutlich, daß das anscheinend Unmögliche realisierbar wird, wenn größere wissenschaftliche Entdeckungen gemacht werden. Dazu gehört auch die Entdeckung der Supraleitfähigkeit.

Lange und beharrlich verfolgte der holländische Wissenschaftler Kamerlingh-Onnes sein ersehntes Ziel: die maximale Annäherung an den absoluten Nullpunkt, d. h. Null Grad auf der Kelvin-Skala.

1908 gelang es ihm als ersten, das Gas Helium in eine Flüssigkeit zu verwandeln. Dieses Gas wollte sich lange Zeit nicht verflüssigen lassen. Erst als die Temperatur auf -271°C erniedrigt wurde (Helium siedet bei $4,22\text{ K}$, das entspricht $-268,94^{\circ}\text{C}$), hat es sich als letztes der Gase ergeben.

Nachdem er diesen Rekord für tiefe Temperaturen erreicht hatte, begann der Wissenschaftler sorgfältig zu untersuchen, wie sich bei außergewöhnlich tiefen Temperaturen verschiedene Stoffe verhalten und wie diese oder jene Prozesse verlaufen. Auch das Quecksilber kam an die Reihe.

Kamerlingh-Onnes nahm einen Quecksilberdraht (bei solch einer tiefen Temperatur ist das sonst flüssige Quecksilber so fest wie Eisen bei Raumtemperatur) und brachte ihn in ein Gefäß mit flüssigem Helium. Er begann zu messen, welchen Widerstand das Quecksilber dem elektrischen Strom entgegensetzt. Es erwies sich: überhaupt keinen! Der Strom floß durch den Draht, ohne schwächer zu werden, tagelang, wochenlang, auch wenn er nicht von außen gespeist wurde.

Kamerlingh-Onnes schrieb von seiner Entdeckung den Wissenschaftlern der holländischen Stadt Utrecht. Doch sie glaubten ihm nicht, und man kann sie leicht verstehen: Ein Strom, der durch einen Leiter ohne jeden Widerstand fließt, erschien übernatürlich, als Realisierung der Idee eines Perpetuum mobile. Da nahm Kamerlingh-Onnes ein Gefäß mit flüssigem Helium, legte den zum Kreis geschlossenen Draht hinein, erregte in ihm einen elektrischen Strom und setzte sich in den Zug. Als er in Utrecht ankam, floß der Strom durch diesen Draht wie eh und je. Diese Entdeckung wurde 1911 gemacht.

Die Wissenschaftler begannen von Elektromagneten zu träumen, die praktisch keinen Strom verbrauchen, von Überlandleitungen, aus denen keine Energie verloren geht, und von vielem vielem anderen. Doch alles erwies sich als nicht so einfach.

Das Magnetfeld des durch den Supraleiter fließenden Stroms wirkte auf die Supraleitfähigkeit zurück wie senkende Hitze auf ein Eiskrümchen; sie verschwand. Den Wissenschaftlern war bekannt, daß ein Metall oder eine Legierung, die auch bei relativ hoher Temperatur supraleitfähig bleiben, bei tieferen Temperaturen auch stärkere Magnetfelder aushalten würden. Die Suche nach einem solchen Metall oder einer solchen Legierung dauerte viele Jahre. Manchmal schien es den Forschern, daß die Suche zwecklos sei.

1957 gelang es, eine Theorie aufzustellen, die die Erscheinung der Supraleitfähigkeit hinreichend erklärte. Bis heute ist die Supraleitfähigkeit bei 42 Elementen und vielen tausend Legierungen und Verbindungen beobachtet worden. Theoretisch ist die Supraleitfähigkeit bei der Mehrzahl der Elemente, darunter auch der Gase – einschließlich Wasserstoff bei seinem Übergang in die metallische Modifikation – wahrscheinlich.

Mit Hilfe supraleitender Spulen sind schon Magnetfelder mit einer Stärke von über $200\,000\text{ A/m}$ erzeugt worden, z. B. im Kurtschatow-Institut für Kernenergie, wo Experimente mit dem in der Welt stärksten supraleitenden Magneten durchgeführt werden. Das übersteigt die Feldstärke des Magnetfeldes der Erde um das $500\,000$ fache und ist noch nicht die Grenze.

Nachdem der elektrische Strom eingeschaltet worden ist und sich die Spule mit dem Magnetfeld umgeben hat, kann man die Stromversorgung wieder unterbrechen. Der Strom wird jetzt ohne Zufuhr von Energie beliebig lange in der Spule zirkulieren, wenn nur die notwendige tiefe Temperatur aufrechterhalten wird. Solch ein supraleitender Elektromagnet wird in jeder beliebigen Maschine oder Anlage unermüdet arbeiten – theoretisch ewig arbeiten und keine Energie verbrauchen! Einem Menschen, der nicht in die Feinheiten der Physik eingeweiht ist, möchte es letzten Endes erscheinen, als ob nun doch das Perpetuum mobile, der Jahrhunderte lange, doch nicht erreichbare Traum vieler Erfinder, realisiert worden sei. Die supraleitende Spule hat mit dem Perpetuum mobile jedoch nichts gemeinsam!

Jedes Kilogramm eines modernen supraleitenden

Magneten schafft ein Magnetfeld, das in seiner Kraft etwa einem 20-t-Elektromagneten entspricht.

Das Problem der Beherrschung der Kernfusion kann offenbar ohne Verwendung moderner, starker, supraleitender Magnete nicht gelöst werden. Das Plasma, das für die Erzeugung einer praktisch interessanten Thermo-fusionsreaktion notwendig ist, muß eine Temperatur von etwa einer Milliarde Grad haben und etwa 10^{15} Teilchen in jedem Kubikzentimeter aufweisen. Es ist natürlich, daß solch ein Plasma nur mit Hilfe superstarker magnetischer Felder beherrscht werden kann. Diese Felder in verhältnismäßig kleinen Volumina können nur mit Hilfe von supraleitenden Spulen erzeugt werden.

Wenn man einen Thermofusionsreaktor mit gewöhnlichen Elektromagneten baute, dann würde fast die gesamte von ihm erzeugte Energie für die Erwärmung der Spulen der Elektromagnete verbraucht werden.

Supraleiter sind auch für die Übertragung von großen Leistungen an Elektroenergie auf große Entfernungen ohne Verluste sowie für die Schaffung hocheffektiver MHD-Generatoren, für Laser, Teleskope, Kreisel und Lager ohne Reibung erforderlich.

Supraleitende Energieübertragungssysteme, in denen nicht nur die Kabel, sondern auch die Transformatoren supraleitend sind, werden es ermöglichen, einen großen Teil der erzeugten Energie einzusparen, der bisher verlorengeht und sich in nutzlose Wärme verwandelt.

Die Ausnutzung der Supraleitfähigkeit eröffnet auch prinzipiell neue Möglichkeiten. Energiefachleute haben beispielsweise berechnet: Wenn man in der Sowjetunion alle Elektroenergiesysteme verbindet und die Elektroenergie in Abhängigkeit von der Verschiebung der Spitzenzeit im Verlauf des Tages vom Osten nach Westen weiterleitet, so entspräche dies der Inbetriebnahme von zusätzlich etwa 30% der Leistung aller modernen sowjetischen Kraftwerke.

Durch die Ausnutzung der Supraleitfähigkeit könnte auch das Problem der Vorratshaltung von Elektroenergie vorteilhaft gelöst werden. In einem geschlossenen System von Supraleitungen, die das ganze Land umfassen, würde der Strom ohne Verluste zirkulieren, bis die Energie von irgendeinem Verbraucher benötigt wird.

Verhältnismäßig kleine supraleitende Sammler für Energie wären in der Lage, ebensoviel Energie zu speichern, wie heute das Kraftwerk am Dnepr in einer Schicht erzeugt.

Die Verwendung supraleitender Werkstoffe in Elektromotoren, Generatoren und Transformatoren führt zu einer Verringerung ihres Volumens, einer Senkung ihres Gewichts um 80% und einer Erhöhung ihres Wirkungsgrades auf 98%.

Ein Motor eines Unterseebootes, der unter Verwendung von Supraleitern hergestellt wird, ist fast 3mal leichter als ein normaler Motor.

Weil eine supraleitende Metallkugel, z.B. aus Niob oder einer seiner Legierungen, in Luft oder im Vakuum in Wechselwirkung mit einem äußeren Magnetfeld rotieren kann, würde sie, wenn sie einmal auf Touren gebracht ist, zum idealen Kreisel eines Gyroskops werden. Solch ein Gyroskop wäre genauer und zuverlässiger als ein normales. Das Gyroskop ist das wichtigste Gerät für die Orientierung von Raumschiffen.

Von Interesse ist auch die Verwendung von Supraleitern in Form von Zylindern und Stäben als »magnetische Pumpen«, die es erlauben, ein Magnetfeld aus einer großen Öffnung in eine kleine zu transportieren und damit seine Stärke zu vergrößern, sowie die Verwendung als Reflektoren von Magnetfeldern usw.

Die weitere Entwicklung der Technik der Supraleiter wird durch die schlechten mechanischen Eigenschaften vieler supraleitender Legierungen erschwert. So erinnert eine Legierung aus Niob mit Zinn eher an Keramik als an Metall. Daraus einen Draht herzustellen und ihn zu einer Spule zu wickeln ist fast ebenso schwer, als würde man dies mit einer Porzellantasse versuchen.

Die Hauptschwierigkeit, die die umfassende Verwendung supraleitender Materialien in der Technik bremst, ist jedoch die Notwendigkeit, das sehr teure flüssige Helium zu verwenden. Es ist schon schwer, die supertiefen Temperaturen zu erreichen, und noch schwerer, sie kontinuierlich konstant zu halten.

Nach ausländischen Angaben bleibt das Germanid des Niobs (Nb_3Ge) bis zu $-250^{\circ}C$ im supraleitenden Zustand. Das ist bisher der absolute Rekord. Es gibt schon eine Reihe von Legierungen und metallischen Verbindungen, die im supraleitenden Zustand bei Temperaturen des flüssigen Wasserstoffs bleiben, d.h. etwas oberhalb von $-253^{\circ}C$. Doch der flüssige Wasserstoff ist aus einer Reihe technischer Gründe und wegen der schwierigen Sicherheitstechnik wenig geeignet für einen umfassenden Einsatz in der Industrie. Die generelle Aufgabe, über deren prinzipielle Lösungsmöglich-

keit die existierenden physikalischen Theorien der Supraleitfähigkeit bisher nichts Bestimmtes aussagen können, ist die Schaffung supraleitender Stoffe für den Betrieb im flüssigen Stickstoff (das sind schon viel höhere Temperaturen im Vergleich zum Helium, etwas oberhalb von 77 K, d. h. -196°C).

Nicht nur wissenschaftliche Phantasten, sondern auch Wissenschaftler und Ingenieure träumen davon, Supraleiter zu entdecken, die überhaupt keine Kühlung brauchen und bei Raumtemperatur oder sogar höheren Temperaturen betrieben werden können. Berechnungen des Professors Little von der Universität in Kalifornien und des sowjetischen Akademiemitgliedes Ginsburg haben gezeigt, daß das aus der Sicht der Theorie möglich ist. Allerdings werden nach ihrer Meinung die Hochtemperatur-Supraleiter schon nicht mehr metallische, sondern

polymere Materialien sein. Mit der Entwicklung der Hochtemperatur-Supraleiter würden viele Träume von Phantasten verwirklicht werden.

Zahlreiche große Firmen und staatliche wissenschaftliche Einrichtungen aller entwickelten Industrieländer beschäftigen sich in erster Linie mit der Erforschung supraleitender Magnete, aber auch mit der Entwicklung supraleitender Werkstoffe und Geräte.

In Moskau wurde ein Koordinationszentrum des RGW für die Entwicklung und Schaffung supraleitender Energieübertragungssysteme gebildet.

Was noch unlängst ein Traum utopischer Schriftsteller war, ist jetzt schon Thema wissenschaftlicher Entwicklungsarbeiten und wird in nicht zu ferner Zukunft zum Alltag gehören.

Eroberung der hohen Temperaturen

Warum ist Hitze für Metalle schädlich?

Für den Laien ist es sicherlich erstaunlich, daß durch Feuer mehrstöckige Häuser zerstört werden können; brennt doch ihr stählernes Gerüst nicht und schmilzt nicht einmal. Alles erklärt sich daraus, daß mit steigender Temperatur die Festigkeit der verwendeten Baustähle geringer wird und die verwendeten Träger bereits bei geringer Belastung ihre Form verändern.

Bei Temperaturen von etwa 300 bis 400 Grad unterhalb des Schmelzpunktes wird Eisen so weich und plastisch wie Blei bei Raumtemperatur. Dabei verliert es mehr als das 20fache seiner Festigkeit. Dank dieser Eigenschaft lassen sich jedoch Eisen und Stahl schmieden, pressen, walzen oder mit anderen Verfahren der plastischen Umformung verarbeiten.

Die Technik des kosmischen Zeitalters benötigt dringend Werkstoffe, die lange unter Belastung bei sehr hohen Temperaturen ihre Form behalten. Je höher die Arbeitstemperatur einer Gasturbine ist, um so leistungsfähiger ist das Triebwerk bei gleicher Masse und desto geringer ist der spezifische Brennstoffverbrauch (d. h. die Brennstoffmenge, die je Leistungseinheit des Motors verbraucht wird).

Die Turbinenschaufeln der Flugzeugtriebwerke arbeiten heute schon bei Temperaturen bis zu 1100°C. Die Werkstoffe der Brennkammern müssen ihre Festigkeit auch oberhalb 1100°C behalten. Bei den Triebwerken neuester amerikanischer Kriegsflugzeuge erreicht die Gastemperatur am Eintritt in die Turbine 1370°C. Es ist nicht erstaunlich, daß solch ein Triebwerk zu 50 bis 60 % aus warmfesten Legierungen hergestellt wird. Es werden bereits Gasturbinenanlagen mit Arbeitstemperaturen bis 1700°C projektiert.

Ein weiteres Anwachsen der Leistung wird durchaus nicht von den Möglichkeiten des Brennstoffs, sondern nur von der Fähigkeit der vorhandenen Werkstoffe begrenzt, zuverlässig und wirksam bei noch höheren Temperaturen zu arbeiten.

Wie werden Werkstoffe entwickelt, die in der Lage sind, solche hohen Temperaturen auszuhalten? Um das zu verstehen, muß zunächst geklärt werden, wovon die Festigkeit der Metalle und Legierungen bei hoher Temperatur abhängt.

Es ist verständlich, daß kein Konstruktionswerkstoff in der Lage ist, im geschmolzenen Zustand Belastungen aufzunehmen. Die Schmelztemperatur ist aber um so höher, je fester die Bindung der Ionen im Kristallgitter ist. Die höchste Schmelztemperatur hat Wolfram mit 3380°C.

Je höher die Temperatur ist, um so stärker weitet sich das Kristallgitter des Metalls auf, und um so geringer sind die Bindungskräfte zwischen den Gitterbausteinen. Unter der Einwirkung äußerer Spannungen laufen deshalb die Vorgänge bei der Deformation eines Metalls leichter ab, d. h., die zu einer bleibenden Formänderung führende Bewegung und Neubildung von Versetzungen erfolgt schon bei einer niedrigen Spannung. Oberhalb einer bestimmten Temperaturschwelle tritt auch keine Verfestigung bei der plastischen Verformung mehr ein. Dies hat folgende Ursachen: Die erhöhte Temperatur führt, wie bereits erläutert, zur Vergrößerung der Bewegungsenergie der Atome und als Folge davon zur Möglichkeit, daß einzelne Atome ihre Gleichgewichtslagen verlassen können. Durch plastische Verformung eingebrachte Gitterfehler können deshalb wegen der vorhandenen Beweglichkeit von Atomen wieder ausheilen, wodurch die zunächst bei der Deformation auftretende Verfestigung mehr oder weniger schnell wieder abgebaut wird. Die

Mechanismen dieser Entfestigung sind sehr mannigfaltig. Am wichtigsten ist die sogenannte Rekristallisation. Hier entstehen in einem verformten Werkstück mit hoher Versetzungsdichte völlig neue Kristallite, in denen sehr viel weniger Versetzungen vorhanden sind. Auf diese Weise wird die Ausgangsfestigkeit wieder eingestellt, und die plastische Formänderung kann ununterbrochen mit der gleichen äußeren Spannung weiter fortschreiten. Unter diesen Bedingungen arbeiten die erwähnten Warmumformverfahren. Bei der Belastung eines warmfesten Werkstoffs darf ein solcher Zustand natürlich nicht eintreten. Die Einsatztemperatur soll also unterhalb dieser Rekristallisationstemperatur liegen, d. h., warmfeste Stähle sollen eine möglichst hohe Rekristallisationstemperatur haben.

Unter der Einwirkung der Belastungen kann es auch an den Korngrenzen eines erwärmten Metalls allmählich zur Ausbildung von hohen mechanischen Spannungen kommen, die zu einer Zerstörung des Metallgegenstandes führen. Besonders stark tritt das bei Metallen auf, die ein hexagonales Kristallgitter haben. Das liegt daran, daß sich bei Erwärmung die Körner in verschiedene Richtungen ungleichmäßig ausdehnen: in die eine stärker, in die andere schwächer. Dabei kann dieser Unterschied ziemlich groß werden, er kann das 4fache betragen. Jedes Korn des Metalls dehnt sich auf seine Weise aus. Dabei wird es jedoch von den benachbarten Körnern gestört, was zur Entstehung von hohen mechanischen Spannungen an den Korngrenzen führt. Besonders deutlich tritt das z. B. beim Titan auf.

Bei kubisch-raumzentrierten und besonders bei kubisch-flächenzentrierten Metallen sind die Korngrenzen bei Erwärmung auf diese Weise weniger gefährdet. Daher nimmt die Festigkeit bei Temperaturerhöhung wesentlich langsamer ab.

Da, wie schon erwähnt, das Gamma-Eisen ein kubisch-flächenzentriertes Gitter aufweist, dient es als Basis für die Erzeugung warmfester Stähle.

Wie kann man dem Metall helfen?

Um die Bindung zwischen den Ionen des Eisens zu verstärken sowie die Rekristallisation zu erschweren, legiert man das Eisen mit hochschmelzenden Metallen: Wolfram, Molybdän, Niob.

Damit die Bewegungen der Versetzungen erschwert werden, gibt man dem Eisen Elemente zu, die schwer lösliche Teilchen, z. B. Karbide oder Nitride, bilden. Von Nachteil sind Elemente, die sich an den Korngrenzen einfinden und die Bindungskräfte schwächen.

Wenn sich Schwefel, Blei oder Wismut an den Korngrenzen ansammeln, wird die Warmfestigkeit stark gemindert. Daher ist es für die Erzeugung warmfester Legierungen unbedingt notwendig, besonders reine Ausgangsstoffe zu verwenden, die möglichst arm an diesen Elementen sind. Moderne warmfeste Legierungen enthalten manchmal über zehn Legierungszusätze.

Während der Wärmebehandlung treten die Legierungsatome aus dem übersättigten Mischkristall aus und bilden sehr feine Teilchen, die gleichmäßig in der Legierung verteilt sind. Wenn diese bei der Beanspruchungstemperatur stabil sind, behindern sie die Versetzungsbewegung und verfestigen damit das Metall.

Als erste warmfeste Legierungen wurden in den 40er Jahren die austenitischen Stähle entwickelt, die feine Teilchen von Karbiden enthielten. Die aus ihnen hergestellten Gasturbinenschaufeln konnten bis zu Temperaturen von 600 bis 700°C betrieben werden. Aus diesen Legierungen stellte man auch das Traggerüst und die Beplankung von Flugzeugen und Raketen her. Die Basis der späteren warmfesten Legierungen wurden die Nachbarlemente des Eisens im Periodensystem – Nickel und Kobalt. Sie haben eine ziemlich hohe Schmelztemperatur, die Verbindung zwischen ihren Atomen ist hinreichend fest, und ihr Gitter ist kubisch-flächenzentriert.

Doch sowohl die Eisen- als auch Nickel- und Kobaltlegierungen können nicht bei Temperaturen verwendet werden, die wesentlich höher als 1000°C liegen. Zur Schaffung von Werkstoffen mit höherer Warmfestigkeit müssen als Legierungsbasis hochschmelzende Metalle verwendet werden.

Uns ist bereits bekannt, daß der Schmelzpunkt von der Energie der Bindung zwischen den Atomen abhängt. Bei den Übergangsmetallen der 4. bis 7. Gruppe im Periodensystem stehen nicht nur die äußeren Elektronen in Wechselwirkung, sondern auch die Elektronen der inneren, nicht vollständig besetzten Schalen. Besonders stark ist die Wechselwirkung, wenn diese Schalen zur Hälfte gefüllt sind. Darum gehören zu den höchstschmelzenden Metallen in jeder Periode die Elemente

der 6. Gruppe: Chrom (etwa 1900°C), Molybdän (2620°C), und Wolfram (3380°C).

Reines Wolfram weist allerdings keine Warmfestigkeit auf, weil schon bei Temperaturen oberhalb 700°C sich sein Oxid sehr schnell verflüchtigt (bei unedlen Metallen bildet aber gerade das Oxid den wichtigsten Schutz bei der Oxydation). Im Vakuum oder in inertem Gas droht dem Wolfram keine Oxydation, und deshalb eignet es sich z. B. ausgezeichnet als Glühfaden in der elektrischen Lampe. Für den Betrieb an der Atmosphäre muß man komplizierte Legierungen bilden oder die Oberfläche des Wolframs mit korrosionsbeständigen Überzügen schützen. Die Herstellung von Legierungen auf der Basis von Wolfram oder anderen schwerschmelzenden Metallen ist jedoch nicht so einfach: Viele Metalle verdampfen schon, ehe das Wolfram schmilzt. Die Legierungen werden daher im Lichtbogenofen, im Elektronenstrahl-ofen, im Vakuum-Lichtbogenofen, durch Plasmaschmelzen sowie auf pulvermetallurgischem Wege erzeugt.

Den zweithöchsten Schmelzpunkt hat Rhenium (3160°C). Es »fürchtet« keine Korrosion, ist sehr fest und verschleißbeständig. Doch dieses sehr seltene Element ist gegenwärtig fast ebenso teuer wie Platin.

Aus Molybdänlegierungen stellt man Teile für Flugzeuge, Raketen und Raumschiffe her, die bei hohen Temperaturen und gleichzeitig großen Belastungen arbeiten müssen. Insbesondere werden aus diesen Legierungen die Düsen von Raketentriebwerken mit festem

Brennstoff, die Spitzen von Raketen und Überschallflugzeugen sowie Wärmeschutzschilde erzeugt.

Eine Legierung aus Tantal mit Wolfram (8 %) und Hafnium (2 %) behält ihre hohe Festigkeit bis zu Temperaturen von 2000°C und wird bis zum absoluten Nullpunkt nicht spröde. Gleichzeitig läßt sie sich gut bearbeiten und schweißen. Das sind außergewöhnliche Kennwerte. In vielen Ländern werden aus dieser und ähnlichen Legierungen z. B. Brennkammern und die Beplankung von Raketen gefertigt.

Die Schmelztemperaturen der Karbide übersteigen wesentlich den Rekord des Wolframs: Das Niobkarbid schmilzt bei 3770°C, das Zirkoniumkarbid bei 3800°C, das Tantalkarbid bei 4150°C und das Hafniumkarbid bei 4200°C!

Die Härte einiger Karbide nähert sich der des Diamanten, doch die Karbide sind sehr spröde, und trotzdem machte der Mensch sie sich für seine Zwecke dienstbar. Mit den Methoden der Pulvermetallurgie oder durch Tränkung der porigen Karbidkeramik mit geschmolzenen Metallen erhält man Werkstoffe, in denen kleine Karbidkörner gleichmäßig in einer plastischen Metallbasis verteilt sind.

Diese Werkstoffe nennt man Cermets. Aus ihnen stellt man z. B. die Düsen für Raketentriebwerke her.

Es ist nicht ausgeschlossen, daß in Zukunft Metalle mit noch höherem Schmelzpunkt als Wolfram gefunden werden, die unter den relativ beständigen Isotopen der Elemente oberhalb der Ordnungszahl 100 auftreten können.

An der Spitze der Pyramide

Das Metall der Feingerätetechnik

Wie aus dem Roman von Gogol »Tote Seelen« bekannt, kaufte Tschitschikow die toten Seelen auf, die, wie es den Anschein hatte, zu nichts zu gebrauchen waren und nur ihre Besitzer unnötig belasteten. Ähnlich ging auch eine solide englische Firma vor. 1929 schlug sie dem Direktor eines sibirischen Buntmetallwerkes vor, ihr die rings um das Werk liegenden Abraumhalden für eine beträchtliche Summe zu verkaufen. Während Tschitschikow die Toten nicht aus der Erde graben mußte, stand den Engländern der Transport zehntausender Tonnen auf eine Entfernung von etwa einem Viertel des Erdumfangs bevor.

Was für Hintergründe barg dieses Geschäft? Eine sorgfältige chemische Analyse zeigte, daß in dem Abraum ein äußerst seltenes Element, das Rhenium, enthalten war. Der Kauf kam verständlicherweise nicht zustande.

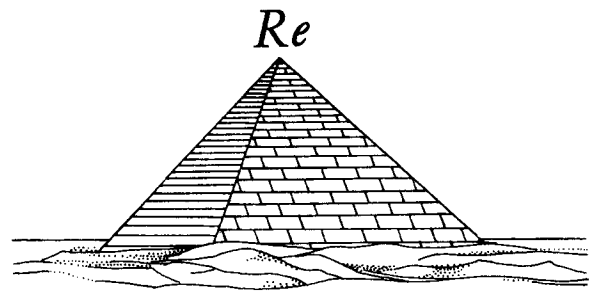
Das Rhenium wurde schon 1871 von Mendelejew vorausgesagt, aber erst 1925 von den deutschen Chemikern Walter Noddack und Ida Tacke im Mineral Kolumbit entdeckt. Das Element 75 erhielt die Bezeichnung Rhenium nach dem Rheinland, der Heimat von Ida Tacke.

Die ersten Milligramm des Metalls wurden 1926 gewonnen. Es war viel teurer als Gold. 1930 betrug die Welterzeugung insgesamt etwa 3g. Das ist nicht erstaunlich, Rhenium ist eins der seltensten Elemente auf der Erde. Wenn man die verschiedenen Metalle unserer Erde nach ihrer Menge in Form einer Pyramide anordnet, dann bilden Aluminium und Eisen die breite Basis, während sich Rhenium an der Spitze befindet.

Rhenium ist nicht nur eins der seltensten, sondern auch eins der am stärksten in der Natur verstreuten Ele-

mente. Es weist keine eigenen Erze auf. Um einige Krümel dieses Metalls zu gewinnen, muß man im wörtlichen Sinne Berge von Material verarbeiten. Es wird als Begleitelement z. B. aus Industriestaub gewonnen, der bei der Verarbeitung von Molybdänerzen anfällt. Noch heute ist die Welterzeugung von Rhenium einige hundert mal geringer als die von Gold.

Die Eigenschaften des Rheniums wurden im Labor für schwerschmelzende und seltene Metalle und Legierungen im Baikow-Institut der Akademie der Wissenschaften der UdSSR an reinsten Einkristallen gründlich untersucht. Es wurden über 30 Zustandsdiagramme mit Rhenium aufgestellt. Auf dieser theoretischen Basis sind eine Reihe von Rheniumlegierungen mit schwerschmelzenden Metallen und die technologischen Prozesse zur Herstellung verschiedener Halbfabrikate und Erzeugnisse entwickelt worden. Gegenwärtig werden die Struktur und die Eigenschaften von Rheniumlegierungen mit einer Vielzahl von Elementen erforscht.



Rhenium bildet unter den Metallen die Spitze der Seltenheitspyramide

Rhenium ist ein sehr festes, silberweißes Metall und erinnert äußerlich an Platin. Es ist fast 3mal schwerer als Eisen und steht in seinem Schmelzpunkt nur hinter Wolfram zurück. Die chemische Beständigkeit dieses Metalls ist einfach verblüffend. Es oxydiert nicht an Luft und wird nur ganz schwach von Säuren und Basen angegriffen.

Die hohe Schmelztemperatur, die bedeutende mechanische Festigkeit und Härte, die außergewöhnliche Stabilität gegenüber Korrosion, der Widerstand gegen Gase sowie wertvolle elektrische Eigenschaften machen das Rhenium zu einem äußerst interessanten Material für die Kernenergetik, kosmische Geräte, die Elektrotechnik, Radioelektronik und den Gerätebau.

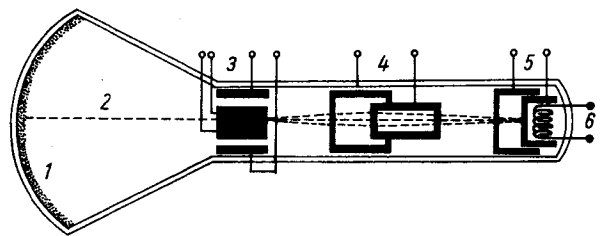
Rheniumkontakte sind unersetzlich in Elektorelais und vielen anderen Geräten. Bei Vibration, atmosphärischer, tropischer und Meeresskorrosion, wo Wolframkontakte schon nach wenigen Tagen ausfallen, sind Rheniumkontakte monate- und sogar jahrelang betriebsfähig.

Katoden aus Rheniumlegierungen können mit Erfolg in großen Senderöhren, in *Magnetrons* und anderen vakuumelektrischen Geräten verwendet werden.

Rhenium übertrifft Wolfram in einigen Kennwerten, die für vakuumelektrische Geräte wichtig sind. So zerstäubt es weniger und ist beständiger gegenüber dem Einfluß verschiedener Gasspuren, die nach der Evakuierung in den Röhren verbleiben.

Die Verwendung von Rhenium und seinen Legierungen erhöht wesentlich die Betriebsdauer einer Reihe von Apparaturen und ermöglicht die Konstruktion völlig neuer, in Qualität und Zuverlässigkeit besserer Typen vakuumelektrischer Geräte. Rheniumheizfäden vergrößern die Betriebsdauer von Fernsehbildröhren auf das 5- bis 10fache. Für die genaue Temperaturmessung bei 2000 bis 2500°C sind Rhenium-Wolfram-Legierungen am besten geeignet. Die Spitzen für Federn von Füllfederhaltern, die aus Rheniumlegierungen hergestellt sind, verleihen diesen tatsächlich das »ewige Leben«, weil sie sehr verschleißfest sind. Aus dem gleichen Grunde stellt man aus solchen Legierungen auch qualitativ hochwertige Achsen und Zeiger für Kompass und andere empfindliche Geräte her.

Von dem Laboratorium für schwerschmelzende und seltene Metalle und Legierungen des Baikow-Instituts der Akademie der Wissenschaften der UdSSR wurde gemeinsam mit dem Leningrader Werk »Vibrator« eine



Aufbau der Braunschen Röhre

1 Leuchtschirm mit Leuchtschicht, 2 Elektronenstrahl, 3 Ablenkplatten zur Steuerung des Elektronenstrahls, 4 Zylinderanoden, 5 Wehneltzylinder der Katode, 6 Heizung

Rheniumlegierung für Torsionsfedern entwickelt, mit denen empfindliche Elemente von Gyroskopen und anderen Geräten aufgehängt werden. Die Verwendung dieser Torsionsfedern in Gyroskopen erhöht deren Genauigkeit und Zuverlässigkeit sowie Betriebsdauer. Wir erinnern uns, daß sich mit Gyroskopen vor allem Kosmonauten im Raum orientieren. Die Torsionsfedern sind die wichtigsten Teile in diesen Geräten. Sie bestehen aus einer Molybdän-Rhenium-Legierung, die etwa 50% Rhenium enthält.

Rheniumlegierungen sind überall dort unersetzlich, wo äußerst dünne, doch superfeste Drähte erforderlich sind. Solche Drähte, die 2- bis 3mal dünner als ein Menschenhaar sind, tragen eine Last von mehr als 70 kg! Die Torsionsfedern, die aus diesen Fäden hergestellt werden, übertreffen in ihrer Qualität alle bekannten ausländischen Erzeugnisse. Im Baikow-Institut der Akademie der Wissenschaften der UdSSR wurde eine Reihe neuer Rheniumlegierungen geschaffen, und zwar für Heizleiter, Katoden und als Gitterwerkstoffe für Elektronenröhren. Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Betriebsdauer der Geräte werden durch die Verwendung von Rhenium deutlich erhöht. Viele Rheniumlegierungen sind schon in die Produktion eingeführt.

Ihre Verwendung in Katoden von Elektronenstrahlröhren hat deren Betriebsdauer auf 16000 Stunden erhöht.

Die Bildröhren der Fernsehgeräte würden mit solchen Katoden praktisch ewig halten. Das ist jedoch nicht erforderlich. Ein Fernseher veraltet schnell und wird durch ein modernes Gerät ersetzt; aber in hochgenauen Apparaten, die unter schwierigen Bedingungen arbeiten, ist diese Legierung unersetzlich.

Wenn für den Betrieb eines Apparates nur die Stabilität der Oberfläche entscheidet, ist es nicht notwendig, das Teil vollständig aus teurem Rhenium herzustellen. Man braucht es nur mit einem Schutzüberzug zu versehen. Eine solche Behandlung des Wolframfadens einer elektrischen Glühlampe erhöht ihre Lebensdauer um ein mehrfaches.

Eine große Bedeutung hat in der modernen Technik auch die Verwendung von Rhenium zum Legieren von Wolfram und Molybdän. Bei Raumtemperatur und tieferen Temperaturen sind Wolfram und Molybdän von technischer Reinheit spröde, fast wie Glas. Der Zusatz von Rhenium macht sie plastisch und für eine technologische Verarbeitung geeignet; ohne diese Eigenschaften ist es schwieriger, Werkstoffe auf der Basis höchstschmelzender Metalle herzustellen.

Das Legieren mit Rhenium verbessert auch die Eigenschaften vieler anderer Legierungen. So erhöht sich bei Chrom-Nickel-Legierungen die Schmelztemperatur nach einem Zusatz von Rhenium um 200 bis 250°C. Die Betriebsdauer von Gegenständen, die aus solchen Legierungen hergestellt sind, vergrößert sich auf das 10fache.

Der Untersuchung der Eigenschaften des Rheniums und seiner Legierungen wird in der Sowjetunion große Aufmerksamkeit geschenkt.

Wegen ungenügender Kenntnisse ihrer Eigenschaften werden viele seltene Elemente bis jetzt nur wenig in der Industrie verwendet. Rhenium ist aber bereits zu einem sehr knappen Metall geworden. Jede verfügbare Menge wird von der Industrie dringend benötigt.

Welche Elemente gehören zu den seltenen?

Mendelejew nahm an, daß die seltenen Elemente deshalb so genannt werden, weil in der Natur die Mineralien, aus denen sie gewonnen werden, relativ selten vorkommen und sie praktisch auch selten verwendet werden.

Von den 107 chemischen Elementen, die gegenwärtig bekannt sind, zählen mehr als 50 zu den seltenen. Man kann sie in 6 Gruppen einteilen: leichte, schwerschmelzende, sehr verstreut vorkommende, Seltenerdmetalle, radioaktive und edle Metalle.

Mit zunehmender Verwendung in der Volkswirtschaft hören viele Elemente auf, seltene zu sein, und treten in die Reihe der gewöhnlichen Metalle.

Im Altertum war sogar Eisen ein seltenes Metall; vor einem Jahrhundert gehörte auch Aluminium zu den seltenen Metallen, unlängst wurde Titan noch zu den seltenen gerechnet. Heute sind gerade die »seltenen Metalle« Wegbereiter für die Entwicklung der Kosmonautik, der Radioelektronik, der Kerntechnik und vieler anderer Zweige der modernen Technik.

Der Beruf der seltenen Metalle

Wolfram ist eines der ältesten Metalle. Es wurde im 18. Jahrhundert entdeckt. In unserem Jahrhundert erlebte es seine zweite Geburt. Es wird nicht umsonst als »Erneuerer der Metallurgie« bezeichnet. Ohne Wolfram gäbe es viele Edeltähle und Hartmetalle nicht, die der moderne Maschinenbau dringend benötigt. Die entscheidende Wirkung in diesen Legierungen kommt den Wolframkarbiden zu.

Niob und seine Legierungen werden in Teilen von Überschallflugzeugen, Raketen und kosmischen Geräten verwendet, von denen äußerste Warmfestigkeit gefordert wird, so z. B. in Schaufeln von Gasturbinen, Spitzen von Raketen und Flugzeugen.

Niob hat außerdem noch eine erstaunliche Widerstandsfähigkeit in geschmolzenem Alkalimetall, deshalb werden Niob und seine Legierungen, genau wie Zirkonium, in Kernreaktoren, im Maschinenbau und in der chemischen Industrie angewendet.

Seine breite Verwendung in der Atomindustrie, der Überschallflugtechnik, der kosmischen Technik führte zu einem starken Anwachsen der Niobproduktion. So erhöhte sich z. B. in den USA von 1958 bis 1970 die Produktion auf mehr als das 700fache! Niob ist die Basis für supraleitende Legierungen. Doch das Hauptanwendungsgebiet ist auch heute noch der Einsatz bei Qualitätsstählen für Rohre (für Gas- und Erdölleitungen) und härteste Stähle im allgemeinen, allerdings in nur geringen Konzentrationen. Man zählt es deshalb in der Stahlmetallurgie zu den sogenannten Mikrolegierungselementen, zu denen als wichtigste noch das Vanadium und das Titan gehören.

Lagerschalen, deren Oberfläche mit Indium bedeckt ist, halten 5 mal länger als gewöhnliche. Dieser Überzug ermöglicht die Herstellung von Spiegeln, die besser reflektieren als Silberspiegel. Sie verfälschen das Licht

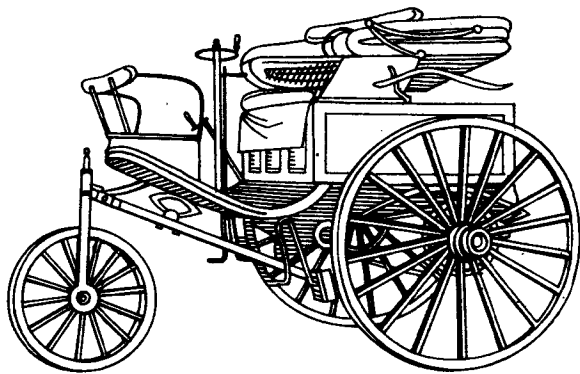
nicht und werden mit der Zeit nicht dunkel. Spiegel aus diesem Metall sind in genau arbeitenden astronomischen Geräten unersetzlich.

Sehr interessant sind die Eigenschaften des Galliums. Es schmilzt bei einer Temperatur von 30°C (in der Wärme der Hände) und siedet erst oberhalb 2200°C. Aus Gallium werden daher Thermometer für hohe Temperaturen hergestellt. Bemerkenswert sind auch seine Eigenschaften als Wärmeträger in Kernreaktoren der Zukunft.

Zur Zeit werden Indium und Gallium hauptsächlich in der Halbleiterindustrie eingesetzt.

Interessant ist die Geschichte der Einführung des Vanadiums in der Industrie, das heute eines der wichtigsten Legierungselemente des Stahls ist. 1905 wurden in England Automobilrennen durchgeführt. Als ein Fahrzeug, das daran teilnahm, zu Bruch ging, gerieten Teile des Motors in die Hände des amerikanischen Automobilkönigs Ford. Er war erstaunt über die Härte dieser Teile. Die von ihm veranlaßten Untersuchungen zeigten, daß diese Vanadium enthielten. Der in den Laboratorien von Ford entwickelte Vanadiumstahl war nicht nur hart, sondern 3- bis 4 mal verschleißfester als gewöhnlicher Kohlenstoffstahl. Damit besiegte Ford seine Konkurrenten. Später soll Ford geäußert haben: »Wenn es kein Vanadium gegeben hätte, dann würde es auch keine Ford-Automobile geben.«

Der Zusatz von Vanadium verbessert auch andere



Fahrzeug aus dem Jahre 1888

Metalle: Titan wird dadurch wesentlich fester, 3% Vanadium machen Aluminium viel härter. Außerdem sind seine Legierungen gegenüber feuchter Luft und Meerwasser beständig und werden deshalb in der Seefliegerei und im Schiffbau eingesetzt.

Das Interesse an reinem Vanadium ist deshalb in der heutigen Zeit sehr groß. So wurde auch an der Verbesserung der Herstellungstechnologie dieses Metalls gearbeitet.

Über die Verwendung von Wolfram, Molybdän, Niob, Tantal und deren Legierungen als hochwärmefeste Werkstoffe wurde bereits gesprochen.

Tantal, auch Niob und eine Reihe anderer seltener und edler Metalle sind, wie im Abschnitt »Die Edlen arbeiten« noch gezeigt wird, für die Unfallchirurgie unentbehrlich.

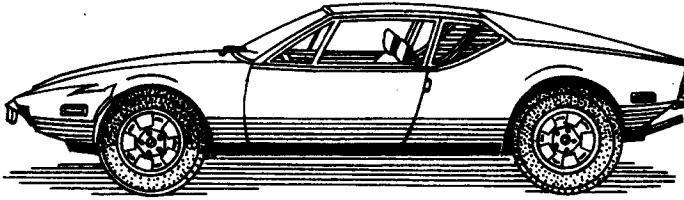
Einige Wissenschaftler sind der Ansicht, daß die Anwendung der wertvollen Eigenschaften vieler seltener Metalle schon begann, als die Menschen von ihrer Existenz noch gar nichts wußten. Der Damaszener Stahl wurde aus Erzen erschmolzen, die Wolfram enthielten. Die Samurai-Schwerter wurden aus Stahl hergestellt, für dessen Gewinnung molybdänhaltige Erze verwendet worden waren. Dank der Tatsache, daß das Eisen von Natur aus legiert war, gelang es den Meistern des Altertums, einen Stahl so hoher Qualität zu erzeugen. Aus dem gleichen Grunde konnte er auch nicht an anderen Orten hergestellt werden: Das Geheimnis seiner Zusammensetzung beruhte auf den örtlichen Erzvorkommen. Als die Vorräte aufgebraucht waren, wurde auch die Herstellung des Damaszener Stahls eingestellt.

Das wichtigste Einsatzgebiet der seltenen Metalle ist auch heute noch die Verwendung als Legierungsmittel. Qualitätsstähle der heutigen Technik wären ohne sie einfach undenkbar.

Das zaristische Rußland verfügte über keine eigene Produktion seltener Metalle. Sogar für Laboruntersuchungen wurden sie bis zur Revolution im Ausland gekauft. Jetzt ist die sowjetische Industrie in der Lage, alle Elemente des Periodensystems zu erzeugen, die die sowjetische Wirtschaft benötigt.

Das seltene Edelmetall Gold spielt die Rolle der Ware der Waren, der allgemeinen Wertverkörperung.

Einst kannte die Menschheit überhaupt kein Geld, d. h. ein allgemeines Äquivalent des Wertes, das gegen jede beliebige Ware ausgetauscht werden kann. In der Urgemeinschaft tauschten die Menschen selten einen



Fahrzeug aus dem Jahre 1977

Gegenstand gegen einen anderen ein. Sie handelten noch nicht systematisch und benötigten deshalb kein Geld. Als jedoch der Warenaustausch zur Regelmäßigkeit wurde, entstand die Notwendigkeit, eine Ware der Waren zu finden, für die man jeden beliebigen Gegenstand eintauschen konnte. Bei manchen Völkern dienten

Häute als Geld, bei anderen Vieh, Muscheln oder Öl.

Allmählich verdrängte das Gold alle anderen Formen und wurde zum allgemeinen Wertäquivalent. Das war kein Zufall: Für seine Gewinnung mußte viel Arbeit aufgewendet werden, es ist sehr beständig und außerdem leicht zerteilbar. Deshalb wurde es zur Ware der Waren!

Ein Sechstel des Periodensystems der Elemente

Das Wohnheim mit der Hausnummer des Lanthans

Im Periodensystem folgt auf das Kästchen mit der Nummer 57, in dem das Lanthan angeordnet ist, das Kästchen mit der Nummer 72 – die Wohnung des Hafniums. Womit erklärt sich diese Unterbrechung in der Numerierung der »Wohnungen« der chemischen Elemente?

Das liegt daran, daß das Kästchen des Lanthans keine Einraumwohnung, sondern ein ganzes Wohnheim ist, in dem gemeinsam mit dem Lanthan noch 14 chemisch nahe Verwandte wohnen: Zerk, Praseodym, Neodym (auch Zerkium, Praseodymium und Neodymium genannt), Promethium, Samarium, Europium, Gadolinium, Terbium, Dysprosium, Holmium, Erbium, Thulium, Ytterbium und Lutetium, die die Nummern 58 bis 71 aufweisen und die sogenannten Lanthanide (Lanthanoide) darstellen. Zusammen mit Skandium, Yttrium und Lanthan befinden sie sich in der dritten Nebengruppe und werden auch als Seltenerdmetalle bezeichnet, auf die fast ein Sechstel aller heute der Wissenschaft bekannten Elemente entfallen. Früher bezeichnete man sie als »seltene Erden«, obwohl das in vieler Hinsicht nicht stimmte. In der Sprache der Alchimisten waren »Erden« feste, schwer reduzierbare Oxide. Doch die Seltenerdmetalle sind durchaus keine Oxide. Sie stellen selbständige chemische Elemente dar. Viele von ihnen sind auch nicht selten: In der Erdkrinde kommen manche viel häufiger vor als z. B. Blei oder Zinn.

Wo ist nun ihr Platz im Periodensystem? Mit dieser Frage haben sich lange Zeit sogar die Schöpfer des Periodensystems und viele andere Chemiker abgemüht. Man versuchte, jedes dieser Elemente in einem Kästchen neben dem anderen anzuordnen. Doch damit wurde die Harmonie des gesamten Systems zerstört: Diese

Elemente hatten nichts mit der »Bevölkerung« der anderen Gruppen des Systems gemeinsam. Obwohl jedes chemische Element in einer Einzelwohnung – seinem Kästchen – »wohnt«, mußten alle Metalle der Ordnungszahlen 58 bis 71 zusammen im Wohnheim, dem Kästchen des Lanthans, untergebracht werden. Daher rührt auch ihre zweite Bezeichnung – Lanthanide.

Uns ist bekannt, daß bei fast jedem Element Isotope auftreten. Die Isotope ein und desselben Elements haben eine unterschiedliche relative Atommasse, doch die gleichen chemischen Eigenschaften. Diese werden durch den Aufbau der Elektronenschalen des Atoms bestimmt, der von der Ladung des Kerns abhängig ist.

Die Lanthanide weisen jedoch verschiedene Ordnungszahlen auf und somit unterschiedliche Kernladungen. Wieso sind sie dann in chemischer Beziehung einander so ähnlich wie Zwillinge? Das Rätsel der Lanthanide wurde erst in unserem Jahrhundert gelöst, nachdem die Wissenschaftler gelernt hatten, diese Metalle in reiner Form zu erhalten, und mit Hilfe der *Röntgenstrukturanalyse* und anderer komplizierter Methoden den Aufbau der Elektronenschalen aller Elemente entschlüsselt hatten.

Nach den Gesetzen der Quantenmechanik kann auf den einzelnen Elektronenschalen nur eine bestimmte Anzahl von Elektronen angeordnet sein; auf der dem Kern nächsten Schale 2, auf der zweiten 8, auf der dritten 18, auf der vierten 32 usw. Die Elektronenschalen sind wie folgt aufgebaut: Wasserstoff hat ein einziges Elektron, Helium hat schon zwei. Damit ist der Aufbau der dem Kern am nächsten liegenden Schale abgeschlossen. Bei den weiteren 8 folgenden Elementen – vom Lithium bis zum Neon – wird die zweite Schale aufgefüllt. Ihr Aufbau ist mit dem Neon abgeschlossen.

Die dritte Elektronenschale kann 18 Elektronen aufnehmen. Doch bei der Auffüllung dieser Schale wird es kompliziert. Im Abschnitt »Etwas Theorie« wurde darauf hingewiesen, daß bei allen Elementen, die sich in den Hauptgruppen des Periodensystems befinden, jedes neue Elektron nur die äußerste Schale besetzt. Bei den Elementen der Nebengruppen dagegen erfolgt der Einbau jedes hinzukommenden Elektrons in die nicht vollständig aufgefüllten, tiefer liegenden Schalen.

Wie erfolgt nun die Besetzung der Elektronenschalen bei den Lanthaniden?

Auf der dritten Schale von außen können bei diesen Metallen maximal 32 Elektronen vorhanden sein. Als Erbe der vorangehenden Elemente weist dort das Lanthan 18 Elektronen auf. Zur vollständigen Schalenbesetzung sind noch 14 Elektronen erforderlich. Bei dem nahen Verwandten des Lanthans wird mit steigender Ordnungszahl das neu hinzukommende Elektron dieser Schale zugefügt. Die äußeren Elektronenschalen bleiben unverändert. Die chemischen Eigenschaften eines Elements werden jedoch wesentlich von der äußersten Elektronenschale bestimmt. Einen geringeren Einfluß übt die zweite, darunter liegende Schale aus, und die dritte hat fast überhaupt keinen Einfluß mehr.

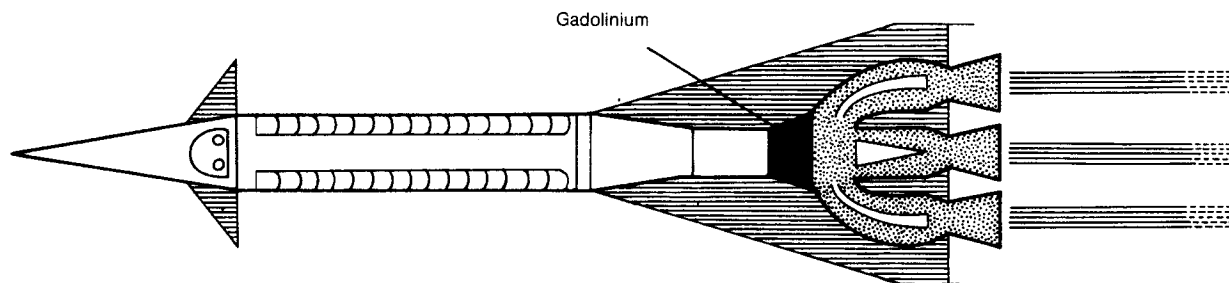
Ein weiterer Grund für die chemische Ähnlichkeit der Lanthanide ist darin zu finden, daß ihre Atomradien fast gleich sind.

Bei der Mehrzahl der Elemente verringern sich mit steigender Kernladung allmählich die Atomradien durch die stärkere Anziehung der äußeren Elektronen an den Kern (natürlich bei gleicher Anzahl der Elektronenschalen). Bei den Lanthaniden werden die Elektronen der beiden äußeren Schalen vom Kern durch die sich allmählich auffüllende dritte Schale abgeschirmt. Daher erfolgt bei ihnen solch eine Verringerung des Atomradius mit steigender Kernladung fast gar nicht.

Die Lanthanide werden in zwei Untergruppen, die Zerkund die Yttriumgruppe, unterteilt. Jede umfaßt sieben Elemente. Die Unterteilung erklärt sich daraus, daß die Rotation der Elektronen auf der aufzufüllenden Schale entgegengesetzt gerichtet ist (die Physiker sagen, die Elektronen haben einen entgegengesetzten Spin).

Die Eigenschaften der Lanthanide, die sich in den verschiedenen Untergruppen befinden, unterscheiden sich etwas. Das wirkt sich vor allem auf ihre Verbreitung in der Natur aus: Die Elemente der Zerkgruppe kommen etwa 10mal häufiger vor als die der Yttrium-Gruppe.

In der Natur finden sich Lanthanide stets vergesellschaftet, und man kann sie sehr schwer voneinander trennen. Nicht umsonst wurden die Proben des erstmalig in hinreichend reiner Form gewonnenen Lanthans, Zers und Neodyms auf der Weltausstellung in Paris im Jahre 1900 als großer Erfolg der Wissenschaft gezeigt. Heute ist man in der Lage, alle Lanthanide in chemisch



Flugzeug mit Atomtriebwerk (Modell)

reiner Form zu gewinnen. Das Promethium wurde sogar künstlich im Kernreaktor erzeugt (1947).

Die Mehrzahl der Lanthanide gehört zu den chemisch aktiven Metallen. Einige sind in ihren Eigenschaften den *Erdalkalimetallen* ähnlich.

In ihren physikalischen Eigenschaften unterscheiden sich die Lanthanide bedeutend stärker. Während Zer bei etwa 805°C schmilzt, weist Lutetium einen Schmelzpunkt von etwa 1650°C auf. Zer nimmt fast keine thermischen Neutronen auf, während Gadolinium sie 6300000mal aktiver schluckt und damit zu einem ausgezeichneten Material für die Regelstangen in Kernreaktoren wird. Sehr lange blieb die Familie der Lanthanide »arbeitslos«. Heute jedoch gehören sie zu den Metallen mit der größten Perspektive in der modernen Technik, die ohne die Lanthanide kaum bestehen könnte.

Enträtsele Geheimnisse

Als ein Kranker von der Entdeckung der Röntgenstrahlen gehörte hatte, wandte er sich an den Wissenschaftler Röntgen mit der Bitte, ihm einige Strahlen zur Durchleuchtung seines Brustkorbs zu schicken. Der Wissenschaftler erwiderte ihm scharfsinnig, daß es besser sei, wenn der Kranke ihm, Röntgen, seinen Brustkorb schicke.

Doch Spaß beiseite, vor noch nicht allzulanger Zeit mußte der Kranke zum Röntgenapparat gebracht werden, um eine Röntgenaufnahme anzufertigen. Den unhandlichen und schweren Apparat nach Hause zu bringen war nicht immer möglich. Wenn man jedoch eines der radioaktiven Isotope des Seltenerdmetalls Thulium (Thulium-170) benutzt, das weiche Gammastrahlen aussendet, die sich wenig von den Röntgenstrahlen unterscheiden, dann kann man die Durchleuchtung zu Hause vornehmen, d.h. die Strahlen zum Kranken bringen! Derartige Geräte wurden bereits hergestellt, sie sind unkompliziert. Sie bestehen aus einem Stahlrohr in einem Bleimantel, in dem sich höchstens 0,1 bis 0,2 g des radioaktiven Thuliums befinden. Solch eine Strahlenquelle wiegt weniger als 2 kg.

Die Seltenerdmetalle besitzen so viele wertvolle Eigenschaften, daß es schwer ist, alle Einsatzgebiete aufzuzählen. Wir werden darum nur einige – die allerwichtigsten – erwähnen.

Geringe Zusätze dieser Elemente verbessern die Eigenschaften sehr vieler Legierungen. Besonders gute Ergebnisse sind bei Stählen und Gußeisen erreicht worden. Ihre Wirkung beruht auf unterschiedlichen Mechanismen. Sawitzkij fand insgesamt 12 Wirkprinzipien, nach denen die Seltenerdmetalle auf die Eigenschaften einwirken. Hervorzuheben sind ihre entschwefelnde und *desoxydierende Wirkung* und die Begünstigung der kugelförmigen Ausbildung von Graphit im Gußeisen, worüber bereits gesprochen wurde. Bisher hat bei Stahl und Gußeisen der zur Zeit noch sehr hohe Preis die industrielle Anwendung gebremst. In anderen Bereichen werden aber Legierungen mit Seltenerdmetallen bereits mit großem Nutzen technisch verwertet. So erhöht ein Zusatz von Zer zu Nickel-Chrom-Legierungen die Betriebsdauer von daraus gefertigten Heizelementen um das 10fache. Schon erwähnt wurden die hervorragenden magnetischen Eigenschaften der Legierungen des Kobalts mit Samarium, Gadolinium oder Dysprosium.

Für die Hochspannungsleitungen sind hochfeste und leichte Drähte äußerst notwendig. Solche Leitungen erhält man durch Legieren von Aluminium mit Seltenerdmetallen. Bei höherfesten Leitungen kann der Abstand zwischen den Masten vergrößert werden, wodurch der Bau von Hochspannungsleitungen wesentlich verbilligt wird.

In Japan wurde eine Aluminiumlegierung mit Seltenerdmetallen entwickelt, aus der man Kolben, Zylinderköpfe, Werkzeugteile, Auto- und Flugzeugteile u.a. im Druckgußverfahren erzeugt. Aus Magnesiumlegierungen mit Seltenerdmetallen stellt man Ultraschallverzögerungsleitungen sowie Dämpfungsglieder für Konstruktionen her, die unempfindlich gegen Vibration sind. Nach amerikanischen Angaben verwendet man Magnesiumlegierungen mit einem Zusatz von 2,5% eines Gemisches aus Seltenerdmetallen in Hubschraubern, Getrieben und Flugzeugchassis.

In den Jahren von 1973 bis 1974 begannen die Untersuchungen der Nickel-Kobalt-Legierungen mit Seltenerdmetallen als Wasserstoffspeicher, wovon noch im weiteren ausführlich gesprochen wird. Sehr geringe Zusätze der Lanthanide gestatten es, Glas in den unterschiedlichsten Farben herzustellen, die besten Leuchtfarben für Farbfernsehgeräte zu schaffen und die Lebensdauer von Tageslichtlampen auf das 10fache zu erhöhen. Sie verbessern die Qualität von *Laserkristallen*, von supra-

leitfähigen Legierungen und Verbindungen und machen Keramik »durchsichtig« für Radiowellen.

Das Flugwesen und die Raketentechnik benötigen dringend leichte Magnesiumlegierungen. Ein großer Mangel war lange Zeit ihre geringe Festigkeit bei erhöhten Temperaturen. Das Legieren mit Seltenerdmetallen führte zu einer mehrfachen Steigerung des zulässigen Wärmestroms. In der heutigen Zeit verwendet man diese Legierungen in Düsenflugzeugen, Raketen, Lenkrameten und Satelliten.

Eines der schwierigsten Probleme bei der Schaffung von Atomtriebwerken für Flugzeuge und Raumschiffe ist der Schutz der Besatzung und der Passagiere vor der Neutronenstrahlung des Reaktors. Vorläufig verwendet man dafür in erdgebundenen Kraftwerken und in Atom-U-Booten massive Wände. In Flugzeugen und um so mehr in Raumschiffen ist das natürlich nicht möglich. Doch ein Blech, bestehend aus dem Lanthanid Gadolinium, schluckt so aktiv die Neutronen, daß es bei einer Dicke von einigen Zentimetern nicht weniger zuverlässig schützt als eine meterdicke Betonwand.

Die Seltenerdmetalle verwendet man auch als Gettermetalle, d. h., sie binden die noch in evakuierten Geräten verbleibenden Gasspuren ab. Auch als Katodenmaterial haben sie sich bewährt. Es muß hervorgehoben werden, daß sie nicht nur teure Edelmetalle ersetzen, sondern auch die Qualität der Geräte erhöhen, in denen sie eingesetzt werden.

Die Seltenerdmetalle finden auch in der Kerntechnik Anwendung, und zwar in den Regelstäben als Neutronenabsorber (wie schon erwähnt), vorrangig jedoch als Strahlungsschutz und Konstruktionswerkstoff für Kernreaktoren.

Es ist tatsächlich schwer zu glauben, daß noch vor einem Vierteljahrhundert die Seltenerdmetalle ein »vergessenes Gebiet« der Chemie, die Stiefkinder der Metallfamilie waren. Ihre vermutlich einzige praktische Anwendung war die Ausnutzung des Zeroxids als Poliermittel für Glas.

Die Sowjetunion besitzt große Rohstoffreserven zur Erzeugung der Seltenerdmetalle. Die Anzahl der Mineralien, in denen sie enthalten sind, erreicht 250. Die meisten Lanthanide gewinnt man aus komplexen Erzen neben hochschmelzenden und radioaktiven Metallen. Einige Erze des Titans, Niobs, Tantals, Urans und Thoriums bestehen oft bis zu einem Drittel aus Seltenerdmetallen. Außerdem bilden sich diese Elemente in den Kernreaktoren bei der Spaltung des Urans und des Plutoniums.

Der Bedarf der sowjetischen Volkswirtschaft an den erforderlichen Lanthaniden kann gedeckt werden. Institute und Betriebe vieler Länder befassen sich mit der Untersuchung der Seltenerdmetalle, um neue Eigenschaften zu entdecken und die Qualität von Werkstoffen, Maschinen und Geräten noch weiter zu verbessern zum Nutzen der Wirtschaft ihres Landes.

Die »Edlen« arbeiten

Menschen sterben um des Goldes willen ...

Unheilschwer ist die Rolle des Goldes in der Geschichte der Menschheit. Auf der Jagd nach ihm wurden zahlreiche Verbrechen begangen. Erinnern Sie sich an Goethes »Faust«?

»Nach Golde drängt,
Am Golde hängt
Doch alles ...«

Abergläubische Menschen schrieben das der verderbenbringenden, übernatürlichen Kraft des Goldes selbst zu. Es versteht sich, daß das Element der Ordnungszahl 79 keinerlei böse Zauberkraft besitzt. Das Gold hat an menschlichem Unglück genau so wenig schuld wie das Uran an der Tragödie von Hiroshima und Nagasaki.

Heute verschwindet eine beträchtliche Menge des gewonnenen Goldes in den Kellern der Banken. Neben den Edelsteinen und anderen Aktiva der Staatsbank der UdSSR garantiert das Gold gemeinsam mit allen in der UdSSR erzeugten Waren die Stabilität des sowjetischen Rubels.



Goldmünze aus Karthago

Ohne dieses Metall ist auch in unserem Jahrhundert ein Welthandel unmöglich: Das internationale Zahlungsmittel ist nach wie vor Gold. So sind Lenins Worte von 1921 auch heute noch aktuell: »... mit Gold muß man sparsam umgehen, es möglichst teuer verkaufen und möglichst viele Waren dafür einlösen«.

Die Berufe der »Edlen«

Gold, Silber, Platin, Iridium, Osmium, Palladium und einige andere Metalle nennt man wegen ihrer außerordentlich hohen chemischen Stabilität »edel«. Gold oxydiert sogar in geschmolzenem Zustand nicht, und es schmilzt erst bei 1064°C. Gold wird von den stärksten Basen nicht angegriffen. Auch Säuren tun ihm nichts an. Nur ein »Höllengemisch«, das man Königswasser nennt, kann es lösen (das Königswasser enthält drei Teile Salzsäure und einen Teil Salpetersäure). Es gibt jedoch Metalle, die noch »edler« sind als das Gold, so z. B. Iridium und Osmium. Sie werden selbst vom Königswasser nicht angegriffen.

Gold ist ein außergewöhnlich gut schmiegbares und ziehbares Metall. Aus einem Gramm Gold kann man einen Draht vom 3,5 km Länge ziehen! Silber ist etwas härter als Gold, doch ebenfalls hinreichend weich, plastisch und ziehbar. Wesentlich härter sind Platin und besonders Iridium und Osmium. Letzteres ist der Rekordhalter bezüglich der Dichte: Sie beträgt 22,5 g/cm³. Bei Silber beträgt dieser Wert 10,57 g/cm³, bei Gold 19,3 g/cm³ und bei Platin 21,5 g/cm³. Dafür ist Silber, gefolgt von Kupfer und Gold, der Spitzenreiter in der elektrischen Leitfähigkeit und der Wärmeleitfähigkeit.

Bedeutende Mengen der Edelmetalle werden für die

Herstellung von Schmuck sowie für Zahnprothesen verbraucht. In der modernen Industrie benötigt man die Edelmetalle hauptsächlich im Gerätebau und in der Chemie einschließlich der Erdölchemie. Etwa 80 % aller Edelmetalle werden dafür verwendet.

Während früher nur die Kuppeln von Kirchen und Tafelgeschirr vergoldet wurden, überzieht man heute Teile von Raketen, Erdsatelliten, Raumschiffen, *Elementarteilchenbeschleunigern* und sogar auch einige besonders wichtige Teile von Flugzeugen mit Gold.

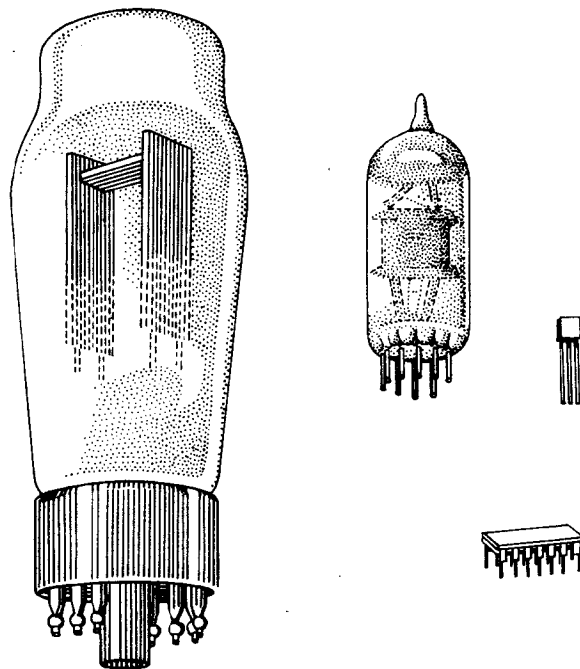
Vergoldet werden auch elektrische Kontakte, besitzt doch Gold außer seiner chemischen Beständigkeit noch andere wertvolle Eigenschaften, wie z.B. eine große elektrische und thermische Leitfähigkeit. Mit einer äußerst dünnen Goldschicht (ein Millionstel eines Millimeters) bedampft man auch die Gläser der Kosmonautenhelme. Das sichtbare Licht kann ungehindert hindurchtreten, während 60% der Wärmestrahlung reflektiert werden.

Gold wirkt als Katalysator bei einigen chemischen Reaktionen, z. B. bei der Vereinigung von Atomen des atomaren Sauerstoffs (einzelne Atome des Sauerstoffs werden als atomarer Sauerstoff bezeichnet) zu Molekülen. Wissenschaftler und Konstrukteure träumen davon, die Energie dieser Reaktion für Stratosphärenflugzeuge auszunutzen, die dann keinen Brennstoff mehr mitnehmen müßten. In den Gebieten oberhalb der Wolken gibt es nahezu unbeschränkte Mengen atomaren Sauerstoffs, da das Sonnenlicht die Sauerstoffmoleküle in die Atome zerlegt. Damit könnte ein interkontinentaler Überschall-Liner in nicht ferner Zukunft kostenlosen Brennstoff direkt aus seiner Umgebung schöpfen. Bei der Verwirklichung dieses Traums könnte das Gold helfen.

Goldhaltige Legierungen werden auch in der Mikroelektronik, dem Feingerätebau, in der Unfallchirurgie und Orthopädie verwendet.

Die höchsten Auszeichnungen der Sowjetunion – der Goldene Stern eines Helden der Sowjetunion und eines Helden der Sozialistischen Arbeit sowie der Leninorden – sind aus einer Goldlegierung hergestellt.

Auf unserem Planeten gibt es gar nicht so wenig Gold. Es ist mit 0,0000005 % bzw. 5 mg je Tonne Gestein in unserer Erdkruste enthalten. In einem Kubikkilometer sind fast 14 t Gold und in der 20 km starken Kruste etwa 100 000 000 000 t! Dazu muß noch das Gold in den Welt-



Entwicklungsetappen der Elektronik: Elektronenröhre, Transistor (rechts), integrierter Schaltkreis (darunter)

meeren gerechnet werden. Gold existiert in ganz geringen Mengen in fast allen Mineralien. Obwohl es in gediegener, d. h. elementarer Form vorliegt, ist seine Gewinnung wegen der geringen Anteile nicht leicht. Um eine Tonne Gold zu erhalten, müssen viele Tonnen goldhaltigen Gesteins verarbeitet und dabei Millionen von Kilowattstunden verbraucht werden. Die Weltproduktion beträgt einige tausend Tonnen im Jahr. In der ganzen Geschichte der Menschheit wurden nicht mehr als 100 000 t Gold gewonnen. Wenn man aus dieser Menge eine Kugel herstellte, wäre ihr Durchmesser nicht größer als 45 m.

In weitaus größerem Umfang als Gold verwendet man in der modernen Technik andere Edelmetalle wie Silber, Platin und Palladium.

Schon vor sehr langer Zeit bemerkte man, daß Wasser in Silbergefäßen nicht verdirbt. Diese Eigenschaft der Silbergefäße nutzten die Priester: Sie bewahrten in ihnen sogenanntes heiliges Wasser. Den Umstand, daß

die Zeit keinen Einfluß auf das Wasser hatte, gaben sie als Wunder aus. Silbernes Geschirr schützte vor Magen- und Darmerkrankungen. Schon die alten Ägypter wußten, daß eine auf eine offene Wunde gelegte Silberplatte das Eitern verhindert und den Heilprozeß beschleunigt. Das alles schrieben abergläubische Menschen den angeblichen übernatürlichen Kraft des Silbers zu. Die Erklärung liegt jedoch darin, daß Silber in äußerst geringem Umfang wasserlöslich ist und die sehr schwache Lösung Mikroorganismen tötet. Auch heute – im Zeitalter des Penicillins und der Antibiotika – wird die keimtötende Wirkung des Silbers in der Medizin und dem Sanitätswesen in weitem Umfang ausgenutzt. Zum Beispiel wurde dem Trinkwasser der Kosmonauten Silber zugesetzt.

Die reflektierende Fläche der Spiegel ist nichts anderes als eine Schicht von Silber oder Aluminium, die auf Glas aufgetragen wurde. Die gleiche Schicht gibt den Weihnachtsbaumkugeln ihren schönen Glanz.

Silber leitet besser als alle anderen Metalle Wärme und elektrischen Strom (bei Raumtemperatur). Daher stellt man daraus Leiter für hochgenaue physikalische Geräte und besonders wichtige Elektrokontakte her. Den größten Effekt bewirkt das Silber in der Hochfrequenztechnik. Die Hochfrequenzströme fließen in einer sehr dünnen Oberflächenschicht der Metalle. Sowohl Kupfer als auch Aluminium sind stets mit einer Oxidhaut bedeckt. Wie dünn auch immer dieser Film sein mag, er stellt einen großen Widerstand für die Hochfrequenzströme dar. Doch in einer blanken, nicht oxydierten Silberschicht fließen diese Ströme ungehindert.

Da das Silber die Wärme ausgezeichnet leitet, verwendet man es in verschiedenen thermischen Meßgeräten, z. B. in Widerstandsthermometern für Flugzeuge.

Einige Silbersalze, z. B. das Silberbromid, zerfallen unter dem Einfluß des Lichtes. Diese Eigenschaft nutzt man in der Fotografie aus.

Ein Elektroschweißer bereitet sich mit heller Brille auf den Beginn seiner Arbeit vor! Der blendende Lichtbogen blitzt auf, und die Gläser seiner Schutzbrille werden augenblicklich dunkel. Der Lichtbogen verlischt, und die Gläser werden wieder so durchsichtig, wie sie zu Beginn waren. Das Wirkungsprinzip dieser sogenannten fotochromen Gläser ist nicht kompliziert. Bekanntlich erhält man fotografische Platten, Fotopapier oder Kinofilme dadurch, daß man auf einen Träger Silbersalze, gewöhnlich Silberbromid, aufträgt. Unter der Einwirkung des Lichtes

zerfällt das Silberbromid und scheidet Teilchen elementaren Silbers aus, die das fotografische Bild darstellen. Beim Erschmelzen der fotochromen Gläser setzt man der Schmelze Silberchlorid zu. Unter der Einwirkung des Lichtes zerfällt es wie das Silberbromid, doch die Teilchen des metallischen Silbers sind hier feiner, man kann sie nur im Elektronenmikroskop sehen. Im Gegensatz zu dem, was beim Fotografieren vor sich geht, ist bei den fotochromen Gläsern der Vorgang umkehrbar: Unter Lichteinwirkung zerfällt das Silberchlorid in Silber- und Chloridionen, bei Dunkelheit vereinigen sie sich wieder zu Silberchloridmolekülen. Daher werden die fotochromen Gläser bei Licht dunkel und in der Dunkelheit erneut hell.

Die Industrie stellt fotochrome Gläser vorläufig nur für Brillen her. Möglicherweise werden fotochrome Gläser in Zukunft auch für Fenster von Archiven, Museen und ähnliches eingesetzt.

Fotochrome Gläser werden außerdem als Speicherelemente für elektronische Rechenmaschinen verwendet.

Gegenwärtig übertrifft die Silberproduktion die des Goldes um das 5fache (etwa 10000 t jährlich in der Welt). Silber ist ein verhältnismäßig billiges Edelmetall und wird deshalb in weitem Umfang eingesetzt. Leider nehmen die Silbervorräte rapide ab.

Die Geschichte des Platins begann damit, daß fast alle seine Vorräte im Meer versenkt wurden. Wie kam es dazu? Die spanischen Eroberer in Südamerika fanden am Ufer des Platino-del-Pino ein unbekanntes Edelmetall, das dem Silber ähnlich war. Sie nannten es Platina – »Silberlein«. (Plata bedeutet im Spanischen Silber.) Nach Spanien wurde soviel von diesem Metall eingeführt, daß es billiger als Silber wurde. Die Juweliere hatten schnell festgestellt, daß eine Gold-Platin-Legierung fast nicht von reinem Gold zu unterscheiden war, da die Dichte dieser Metalle nahe beieinanderlag. (Archimedes wäre es bedeutend schwerer gefallen, die Täuschung aufzudecken, wenn die Krone aus einer Gold-Platin-Legierung hergestellt worden wäre.) Man fing also an, Platin für die Herstellung von falschen Goldmünzen einzusetzen. Die Regierung geriet in Panik und kam auf keinen besseren Gedanken, als alle Platinvorräte im Meer zu versenken.

Platin besitzt eine ausgezeichnete Kombination von Eigenschaften. Bei gleicher chemischer Beständigkeit wie Gold weist es noch relativ gute Werte der Wärme-

und elektrischen Leitfähigkeit auf. Gleichzeitig zeichnet es sich durch hohe Härte, mechanische Festigkeit und Hitzebeständigkeit aus (es schmilzt erst bei 1770°C).

Dank diesen Eigenschaften wird Platin in weitem Umfang genutzt. Hier nur einige Beispiele: Aus Platin stellt man chemische Geräte, Apparaturen für Laboratorien und die chemische Industrie sowie Elektroden für besonders genaue Meßgeräte her. Platin mit geringen Zusätzen anderer Edelmetalle ist ein unersetzliches Material für die Gefäße, in denen optisches Glas geschmolzen wird, d. h. Glas für optische Geräte.

Eine sehr wichtige Anwendung hat dieses Edelmetall in der chemischen Industrie als Katalysator für viele Reaktionen gefunden. Viele Herstellungsverfahren wären ohne Platin einfach unmöglich.

Platinspiegel weisen eine einseitige Durchsichtigkeit auf: Von der Schattenseite aus ist durch einen solchen Spiegel alles sichtbar wie bei gewöhnlichem Glas, während auf der Seite der Lichtquelle ein gewöhnlicher Spiegel erscheint.

Die Gewinnung von Platin ist ziemlich aufwendig, und deshalb ist es vorläufig noch teurer als Gold, was natürlich seine Anwendung einschränkt.

Das Edelmetall mit der größten Zukunft ist das Palladium. Es ist zwar in der Reihe der Edelmetalle chemisch weniger stabil, doch dafür am billigsten.

Ein Zusatz von Palladium zu nichtrostenden und hochchromhaltigen Stählen in der Größenordnung von 0,1 bis 1,0% erhöht ihre Beständigkeit z. B. gegen Schwefelsäure wesentlich. Wenn man dem Titan nur 0,1% Palladium zusetzt, dann hält diese Legierung sogar heißer Salz- und Schwefelsäure stand. Palladium hat auch eine Perspektive als Baustoff im Chemieanlagenbau.

Sehr wertvolle Eigenschaften besitzen Legierungen aus Palladium und Titan. Chemieanlagen aus diesen Legierungen haben unter speziellen Bedingungen eine viel höhere Lebensdauer als nichtrostende Stähle. Diese Legierungen sind nur um 25% teurer als reines Titan.

Die anderen Edelmetalle werden wegen ihrer Seltenheit und ihrer Kosten in geringerem Umfang und nur dort eingesetzt, wo man ohne sie absolut nicht auskommen kann.

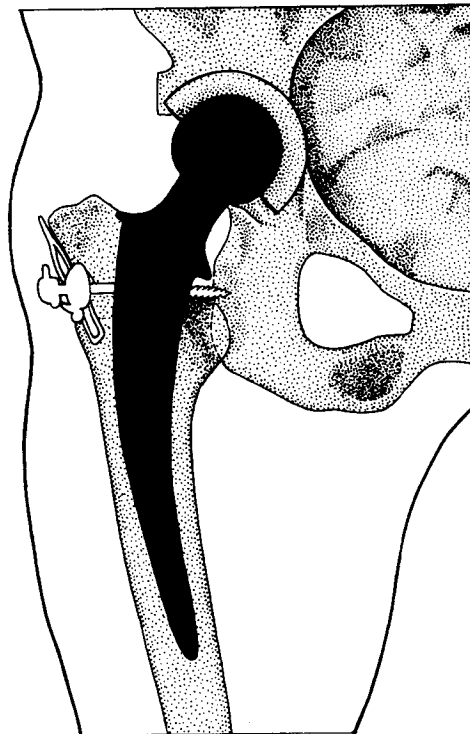
Hier sei nur ein Beispiel angeführt. Eine ausgezeichnete Härte und Verschleißfestigkeit in Kombination mit einer Gold und Platin übertreffenden chemischen Beständigkeit machen Iridium unersetzlich in sehr präzise

arbeitenden Geräten. Weiter wird es als Schneide für chirurgische Instrumente und bei besonders wichtigen Elektrokontakten verwendet. Aus einer Iridium-Osmium-Legierung stellt man Lager für hochgenaue Geräte und die »ewig« haltenden Federn für Füllfederhalter her.

Die Edelmetalle erhöhen die Qualität vieler Gegenstände.

»Ersatzteile« für den Menschen

Bei archäologischen Ausgrabungen wurde eine Mumie gefunden, bei der ein Teil des Schädelknochens durch ein Goldplättchen ersetzt worden war. Sorgfältige Untersuchungen zeigten, daß diese Operation noch zu Lebzeiten des Menschen vor einigen tausend Jahren durch-



Für die Totalprothese der Hüfte verwendet man Titanlegierungen oder Legierungen aus Kobalt-Chrom-Molybdän. Die Gelenkpfanne besteht aus Polyäthylen

geführt worden war. So wurden also schon im Altertum Edelmetalle in der Unfallchirurgie verwendet.

In vielen Werken der USA hängt folgendes Plakat: »Denken Sie daran, daß Gott, als er den Menschen schuf, nicht an Ersatzteile für ihn gedacht hat!« Nach Meinung der Betriebsinhaber soll das offenbar den Arbeitsschutz ersetzen. Den Chirurgen ist jedoch nicht nach Späßen zumute. Für sie sind »Ersatzteile« zum menschlichen Organismus im wörtlichen Sinne außerordentlich notwendig.

Durch jahrelange Arbeit von Chemikern und Metallurgen sind Kunststoffe und Metalle geschaffen worden, die verschiedene Stoffe oder sogar Organe ersetzen können, die durch Krankheit oder Unfall ausgefallen sind. Es sollen nur einige Anwendungsbeispiele genannt werden: Der menschliche Organismus ist ein ziemlich aggressives elektrochemisches Medium. Implantate müssen diesem Medium widerstehen und dürfen dabei keine unerwünschten Folgen hervorrufen (so können sich z.B. in Ersatzblutgefäßen aus bestimmten Kunststoffen Tromben bilden). Eine Reihe von Metallen und Legierungen (Tantal, Zirkon, Gold und seine Legie-

rungen mit Kupfer, Platin, Iridium, rostfreier Stahl u.a.) vertragen sich mit dem menschlichen Organismus. Sie korrodieren nicht und beeinflussen auch das lebende Gewebe nicht. Besser als alle anderen Metalle fügt sich das Tantal in den lebenden Organismus ein. Es erleidet keinerlei Veränderungen in dem chemisch aggressiven Medium und wirkt überhaupt nicht auf das umgebende lebende Gewebe ein.

Mit Tantalplatten schließt man Durchbrüche im Schädelknochen, ein Gespinnst aus Tantalfäden kann Muskelfasern ersetzen, und Tantalnetze werden in Augenprothesen verwendet. Tantalfäden können die Funktion von Sehnen und sogar von Nerven übernehmen.

Als »Ersatzteile« für den lebenden Organismus können auch eine Reihe anderer Metalle verwendet werden, z.B. viele seltene Metalle, Titan, einige nichtrostende Stähle und sogar Leichtmetall-Legierungen.

Mit metallischen Nägeln und Schrauben kann man nicht nur Knochen zusammenhalten, sondern auch ganze Gelenke befestigen.

In Zukunft wird es möglich werden, selbst Organe künstlich herzustellen.

Auch Metalle brauchen einen Arzt

Woran »erkranken« Metalle?

Es gibt Menschen, die die Eisensäule zu Delhi als wichtigen Beweis für den Aufenthalt kosmischer Wesen auf der Erde betrachten. Wie gelang es den alten indischen Metallurgen, ein derart reines Eisen zu erschmelzen? Können sich doch selbst in der heutigen Zeit nur einige der größten Institute der Welt seiner Gewinnung rühmen. Die Säule ist ziemlich gewichtig: 7,3 m hoch, 30 bis 40 cm Durchmesser und wiegt etwa 6,5 t. Schon andert-halb Jahrtausende steht sie auf dem Platz in Delhi, und trotz des warmen Klimas in Indien hat sich in dieser Zeit kein Rostfleck auf der Säule gebildet. Eisen vom Mond oxidiert auf der Erde ebenfalls nicht. Wie ist das zu erklären?

Jährlich werden auf der ganzen Welt Hunderte von Millionen Tonnen Metalle erzeugt. Zur gleichen Zeit wird ein Teil des vorher erzeugten Metalls durch die Korrosion vernichtet. Genau wie die Menschen »sterben« metallische Erzeugnisse selten durch vollständigen Verschleiß. Ein großer Teil des Metalls »kommt durch Krankheit um«. Woran »erkranken« nun aber Metalle?

Im zaristischen Rußland wurden einst die Knöpfe der Uniformmäntel aus weißem Zinn hergestellt. Während eines kalten Winters griff in einem Lager für Militärbekleidung in Petersburg die uns schon bekannte »Zinnpest« um sich. Die weißen, glänzenden Knöpfe verwandelten sich in graues Pulver. Alles verlief wie bei jeder Epidemie: Die Kranken steckten die Gesunden an, und nach einigen Tagen war von allen Knöpfen nur ein Häufchen graues Pulver übrig.

Außer der Zinnpest sind auch andere »Krankheiten« von Metallen bekannt, wie z. B. die »Wasserstoffkrankheit« des Kupfers, die »Wasserstoffsprödigkeit« bei

Stahl und der »weiße Rost« bei Zinküberzügen. Solche Krankheiten sind unter den Metallen verhältnismäßig selten. Es gibt jedoch ein Leiden, das – wenn auch in unterschiedlichem Maße – alle Metalle in Mitleidenschaft zieht. Das ist die Korrosion.

Sogar Edelmetalle können mit einigen Stoffen in chemische Reaktion treten. Die aktiveren Metalle reagieren besonders mit dem Sauerstoff der Luft. Als Ergebnis dieser Reaktion verschwindet allmählich das reine Metall oder die Legierung und verwandelt sich in das Oxid oder eine andere chemische Verbindung.

Die Korrosion ist vergleichbar mit der Verbrennung, nur verläuft sie langsamer; aber die Verluste durch Korrosion sind trotzdem wesentlich größer als die, die durch alle Brände verursacht werden. Die Menschheit hat seit der Urgeschichte bis zu unseren Tagen mindestens 20 Milliarden Tonnen Eisen erschmolzen. Etwa 6 Milliarden Tonnen existieren davon in Form von Maschinen und Mechanismen zu Lande und zu Wasser. Die restlichen 14 Milliarden Tonnen sind schon vom Rost »aufgefressen« worden.

In der modernen Technik müssen die Werkstoffe, aus denen Maschinen, Apparate und Ausrüstungen hergestellt werden, bei immer höheren Temperaturen, Drücken, Geschwindigkeiten, in immer aggressiveren Medien arbeiten. Immer häufiger wirken auf den Werkstoff gleichzeitig aggressive Medien und hohe mechanische Belastungen ein. Es ist daher nicht erstaunlich, daß die Korrosion der Metalle und Legierungen unter solchen Bedingungen gefördert wird. So gehen z. B. Baustähle in Kernreaktoren zu Bruch. Es sind Fälle bekannt, in denen die Ausbeutung reicher Erdöl- und Erdgaslagerstätten nur deshalb unterbrochen werden mußte, weil in dem Lagerstättenwasser viel Schwefelwasserstoff und Koh-

lensäure enthalten waren. Das führte dazu, daß die Bohrausrüstung schnell unbrauchbar wurde, so daß sich die Erdöl- und Erdgasgewinnung an jenen Stellen als Verlustgeschäft erwies.

Die Verluste durch die Korrosion sind gewaltig. Allein für die Reparatur von vorzeitig durch Korrosion ausgefallener Ausrüstung mußten in der Sowjetunion 1974 über 7 Milliarden Rubel aufgewendet werden, der gleiche Betrag war für den Korrosionsschutz erforderlich. Jeder sechste Hochofen arbeitet nur dafür, die Eisenverluste durch Korrosion und andere »Krankheiten« auszugleichen. Doch die Verluste betreffen nicht nur das Eisen selbst, sondern auch die daraus hergestellten Erzeugnisse. Ihre Kosten liegen viel höher als die für die gleiche Masse Eisen in Form von *Masseln* bzw. Blöcken. Doch das ist – wie man so sagt – erst die halbe Tragödie. Die Korrosion führt zu Produktionsausfällen, zur Senkung der Produktivität der Maschinen und Anlagen und zur Verringerung der Qualität. Wenn man alle Verluste infolge der Korrosion und die Aufwendungen für den Schutz gegen die Korrosion addiert, erreicht man allein für die Sowjetunion astronomische Ziffern, nämlich 35 bis 40 Milliarden Rubel im Jahr!

Es geht nicht nur der Arbeitsaufwand für die Herstellung des Metalls verloren, sondern auch der für die Weiterverarbeitung und die Herstellung der Fertigerzeugnisse, außerdem muß viel Arbeit aufgewendet werden, um die korrodierten Teile durch neue zu ersetzen. Um z. B. eine tief in der Erde liegende Wasserleitung oder ein Telefonkabel mit beschädigter Isolierung auszuwechseln, muß man tiefe Gräben ziehen. In der Stadt wird dazu der Asphalt aufgebrochen, der manchmal erst kurz zuvor aufgebracht worden ist. Um Teile an einer chemischen Anlage auszuwechseln, muß die Produktion angehalten werden, oder um die Beplankung des Unterwasserteils eines Schiffes auszuwechseln, ist eine Generalreparatur im Trockendock erforderlich. Manchmal zieht die Korrosion auch tragische Folgen nach sich. Ihretwegen z. B. brach die »Silberne Brücke« über dem Ohio gerade in dem Moment zusammen, als sie von einem Personenzug befahren wurde. Deshalb ist der Kampf gegen die Korrosion eine der erstrangigen Aufgaben der Wissenschaft von den Metallen.

Es ist verständlich, daß mit wachsender Produktion von Metall auch eine ständig größer werdende Metallmasse »aufgefressen« werden kann und damit auch die

Verluste anwachsen. Damit das nicht eintritt, müssen wirksame Maßnahmen zum Kampf gegen die zahllosen »Krankheiten« der Metalle wirksam werden.

Um einen Feind zu besiegen, muß man ihn gut kennen. Daher haben viele Wissenschaftler die Erscheinung der Korrosion gründlich untersucht, und das Wesen dieses Prozesses ist jetzt ziemlich gut bekannt. Es entstand ein neues Wissensgebiet von der Korrosionsbeständigkeit der Werkstoffe.

In vollkommen trockener und von Stickstoffoxiden freier Luft oxydieren bei Raumtemperatur nur die Erdalkalimetalle. Gewöhnliches Eisen rostet unter diesen Bedingungen nicht, nur bei starker Erwärmung beginnt es zu oxydieren. In der uns umgebenden Luft sind jedoch ständig Feuchtigkeit, feinste Salzkristalle (sogar Regenwasser stellt eine schwache Salzlösung dar), Oxide des Kohlenstoffs und des Stickstoffs vorhanden. Die Luft industrieller Zentren enthält noch Schwefeldioxid, das bei der Verbrennung von Kohle und Erdöl, die fast immer Schwefel enthalten, entsteht. Wenn sich diese Gase in Wasser lösen, bilden sie bekanntlich Säuren.

Gewöhnliches Eisen rostet sogar bei Minusgraden. Bei Erwärmung beschleunigt sich dieser Vorgang sehr, so daß man bei 250 bis 300°C die Bildung des Rostfilms direkt beobachten kann. Bei 600°C bedeckt sich das Eisen schnell mit einer dicken Oxidschicht, die aus einem Gemisch verschiedener Eisenoxide besteht. Die Rostschicht ist porös und kein Hindernis für die Korrosionsmedien. Eisengegenstände können völlig durchrosten.

Es wurde schon erwähnt, daß Aluminium, Titan und einige andere Metalle durch die Atmosphäre nicht gefährdet werden. Das hängt jedoch nicht damit zusammen, daß sie chemisch weniger aktiv als Eisen sind, sondern damit, daß sich auf ihrer Oberfläche ein dünner, doch dichter Oxidfilm bildet, durch den kein weiterer Sauerstoff hindurchdringen kann. Dieser Film schützt die Hauptmasse des Metalls nicht nur vor der weiteren Oxydation, sondern oft auch vor der Wirkung von Säuren und anderen chemisch aktiven Stoffen. Diesem Film verdanken Aluminium, Titan, Chrom und andere Metalle ihre gute Korrosionsbeständigkeit.

Der Mechanismus der Korrosion von Metallen in Säuren und anderen flüssigen *Elektrolyten*, zu denen auch Salzlösungen, wie z. B. Meerwasser, Fluß- und sogar Regenwasser, gehören, ist komplizierter als in Gasen. Die Funktionsweise eines galvanischen Elements soll

uns nun diesen Korrosionsmechanismus verdeutlichen.

Die Zinkionen sind aktiver als die Wasserstoffionen und verdrängen sie deshalb aus den Salzsäuremolekülen, um ihre Plätze einzunehmen. Jedes Zinkatom verwandelt sich durch Abgabe seiner zwei äußeren Elektronen in ein Ion. Wenn sie in die Lösung »tauchen«, »ziehen« sich die Zinkatome gleichsam aus und lassen diese Elektronen wie Bekleidung »am Ufer« der von ihnen verlassenen Platte zurück. Dadurch lädt sich die Zinkplatte negativ auf. Zur gleichen Zeit setzen sich die aus den Säuremolekülen verdrängten Wasserstoffionen auf der Kupferplatte ab. Da diese Ionen positiv geladen sind, nimmt die Platte eine positive Ladung an. So entsteht zwischen der Zink- und der Kupferplatte eine Potentialdifferenz. Da aber beide Platten durch einen elektrischen Leiter verbunden sind, können die Elektronen von der Zinkplatte zur Kupferplatte wandern. Dieser elektrische Strom kann z. B. die Glühlampe einer Taschenlampe zum Aufleuchten bringen.

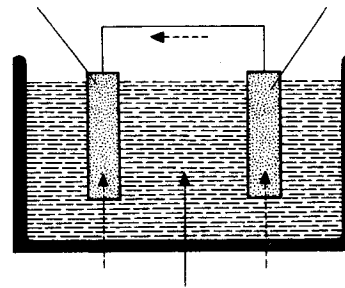
Die auf der Kupferplatte angekommenen Elektronen vereinigen sich mit den an der Platte »klebenden« Wasserstoffionen. Die sich bildenden Gasmoleküle sammeln sich allmählich zu Blasen und steigen in die Atmosphäre auf.

Der elektrische Stromkreis wird durch den Elektrolyten geschlossen; deshalb können immer neue Zinkionen in Lösung gehen, und die von ihnen verdrängten Wasserstoffionen streben zur Kupferplatte.

Während dieses Vorgangs wird nur das Zink aufgelöst. Die Kupferplatte bleibt unversehrt.

Es folgt daraus, daß man bei Konstruktionen, die in einem Elektrolyten betrieben werden müssen, die Kombination verschiedener Metalle vermeiden muß. Doch in der Praxis wird das manchmal vergessen. Die Folgen sind immer tragisch. Typisch ist z. B. folgender Fall: Ein reicher Amerikaner ließ sich eine Jacht bauen. Er sparte nicht mit Geld, und die Erbauer der Jacht führten den Schiffsboden aus dem ziemlich teuren Monelmetall aus, einer Kupfer-Nickel-Legierung, die sehr widerstandsfähig gegenüber der Meerwasserkorrosion ist. Die mechanische Festigkeit dieser Legierung ist jedoch gering, weswegen viele Teile der Jacht aus Spezialstählen hergestellt werden mußten. Als nun die Jacht zu Wasser gelassen wurde, begannen überall dort, wo Stahl und Monelmetall im Kontakt waren, mächtige galvanische Elemente zu arbeiten. Der Boden der Jacht war schon

Wasserstoffabscheidung Zink löst sich



Schematische Darstellung der elektrochemischen Korrosion

Katode (z. B. Kupfer) Elektrolyt (z. B. verdünnte Schwefelsäure) Anode (z. B. Zink)

zerstört worden, ehe sie sich aufs offene Meer begeben konnte.

Zur Korrosion führt auch die Berührung von Stahlteilen mit Edelmetallen, die in dem sich bildenden galvanischen Element die gleiche Rolle wie die Kupferplatte in unserem Beispiel spielen.

Wenn man nur eine Zinkplatte in die Säure taucht, dann sollte vermutlich nichts geschehen, weil sich eine Potentialdifferenz anscheinend nicht ausbilden kann. Doch dieser Fall tritt nur bei sehr reinem Zink ein, das sogar mit konzentrierter Säure nicht reagiert. Zink von technischer Reinheit löst sich auch in verdünnter Säure ziemlich schnell. Das hängt damit zusammen, daß die Rolle der Platte des anderen Metalls von den Beimengungen des Zinks übernommen wird. Auf der Oberfläche des Zinks bilden sich sehr viele mikroskopische galvanische Elemente, in denen das Zink gleich zwei Funktionen übernimmt: die der einen Platte und die des elektrischen Leiters. Je stärker das Zink zerfressen wird, um so mehr wird die Korrosion beschleunigt, weil sich auf der Kontaktfläche zur Säure immer mehr Körner von Beimengungen finden, die – wie die Kupferplatte in unserem Beispiel – nicht zerstört werden.

Dieser Vorgang verläuft analog auch mit allen anderen Metallen, deren Ionen in einer Lösung aktiver als die des Wasserstoffs sind. In der sogenannten Spannungsreihe der Metalle wird das verdeutlicht: Kalium, Kalzium, Natrium, Magnesium, Aluminium, Zink, Eisen, Nickel, Zinn, Blei, Wasserstoff, Kupfer, Silber, Quecksilber, Platin, Gold. Alle Metalle, die in dieser Reihe links vom Wasserstoff angeordnet sind, verdrängen ihn um so energischer

aus Säuren, je weiter links (zum Kalium hin) sie stehen. Die rechts vom Wasserstoff stehenden Metalle werden dagegen durch den Wasserstoff aus ihren Salzlösungen verdrängt. Dabei bilden sich die Atome der Metalle und die Säure.

Potentialunterschiede in Elektrolytlösungen können sogar zwischen Inhomogenitäten im Aufbau ein und desselben Metalls entstehen.

Metalle vor diesen Lösungen zu schützen ist nicht nur im Meerwasser und in der Erde, sondern auch im Süßwasser der Flüsse und Seen sowie an der Atmosphäre fast unmöglich.

»Heilung« und Prophylaxe

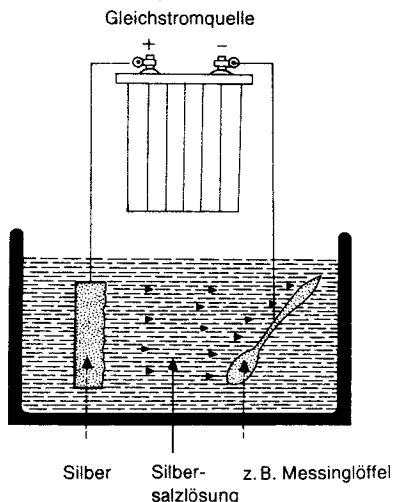
Der Kampf gegen die Korrosion begann mit der Herstellung metallischer Erzeugnisse.

Das Vergolden, Versilbern, Verzinken, Verzinnen, das Aufbringen von Lacken oder Farben wird schon seit undenklichen Zeiten angewendet. Bei allen diesen Verfahren wird die Oberfläche des Metalls durch einen für Luft und Wasser undurchdringlichen Überzug geschützt. Das ist keine billige Angelegenheit. So wurden für das Farbkonservieren des Eiffelturms schon mehr Mittel verbraucht als für seine Errichtung ausgegeben wurden.

Dem Leser ist bereits bekannt, daß im Verlauf von Jahrhunderten die Klingen der Damaszener Schwerter nicht rosten, weil sie ein dünner, doch sehr stabiler Oxidfilm schützt, der sich während der Verarbeitung auf dem Metall gebildet hat. Die alten Waffenschmiede hatten schon längst bemerkt, daß brüniertes, d. h. oberflächlich leicht oxydierter Stahl nicht rostete. Sie wußten nichts über die Schutzfunktion des Oxidfilms, führten jedoch die Verarbeitung ihrer Erzeugnisse so aus, daß sich auf der Oberfläche dieser Film bildete. Eine ähnliche Verarbeitung ist auch heute noch üblich.

Einer Art Schutzfilm verdankt auch der nichtrostende Stahl seine chemische Beständigkeit.

Einige Leser mögen uns des Widerspruchs bezichtigen – erst haben wir festgestellt, daß sich auf Eisen kein schützender Film ausbildet, und jetzt behaupten wir, daß man diesen durch eine besondere Verarbeitung schaffen kann. Tatsächlich gibt es hier keine Widersprüche: Der Oxidfilm bildet sich nicht auf reinem Eisen, sondern auf dem stählernen Erzeugnis, wenn man dem Stahl Me-



Schematische Darstellung der galvanischen Versilberung. Unter Wirkung des elektrischen Stroms wandern die Silberionen zu dem als Kathode geschalteten zu versilbernden Gegenstand, wo sich das Silber als feste Schicht abscheidet

talle (Aluminium, Chrom, Silizium, Nickel, Yttrium u. a.) zusetzt, auf denen solch ein Film entstehen kann.

Um nichtrostenden Stahl zu erzeugen, setzt man dem Eisen 12 bis 30 % Chrom beziehungsweise 16 bis 20 % Chrom und 8 bis 11 % Nickel zu. Aus Chrom-Nickel-Stahl besteht z. B. die bekannte Skulptur von Muchina »Der Arbeiter und die Kolchosbäuerin«, die sich vor dem Nordeingang des Geländes der Volkswirtschaftsausstellung in Moskau befindet. Diese Skulptur ist auch als Emblem des Kinostudios »Mosfilm« bekannt.

Die Metalle können durch verschiedene Schutzüberzüge vor der Korrosion gerettet werden. Wir verwenden emaillierte Kochtöpfe sowie verzinkte Eimer und Waschwannen. Man verzinkt Wasserrohre, Dachblech, Gießkannen und Drähte für Stahlseile sowie vieles andere. Etwa 40 % der Weltproduktion an Zink werden dafür benötigt.

Ungefähr die Hälfte des in der Welt erzeugten Zinns wird für die Herstellung von Weißblech verwendet, das in der Hauptsache für die Fertigung von Konservendosen dient. Zinn wird nicht von organischen Säuren angegriffen, es ist unschädlich und verhältnismäßig billig. In Zukunft wird jedoch vermutlich das Aluminium das wichtigste Material für Konservendosen werden.



Bild einer Schmiede (aus G. Agricola »De Re Metallica«, 1556)

Einen sehr wirksamen Korrosionsschutz bietet das Verchromen und Vernickeln, d. h. die Abscheidung von Chrom- oder Nickelschichten auf der Stahloberfläche. Diese Schichten werden mit Hilfe des elektrischen Stroms aus elektrolytischen Bädern abgeschieden.

Walzgut kann man mit einem fertigen Korrosionsschutzüberzug herstellen. Die Kosten eines so behandelten Materials sind etwa 20% höher als die eines gewöhnlichen Walzstahls, doch dafür hat es eine bessere Witterungsbeständigkeit. Eine daraus hergestellte Autokarosserie hält 3- bis 5mal länger als eine gewöhnliche. Dies führt zu erheblichen Einsparungen.

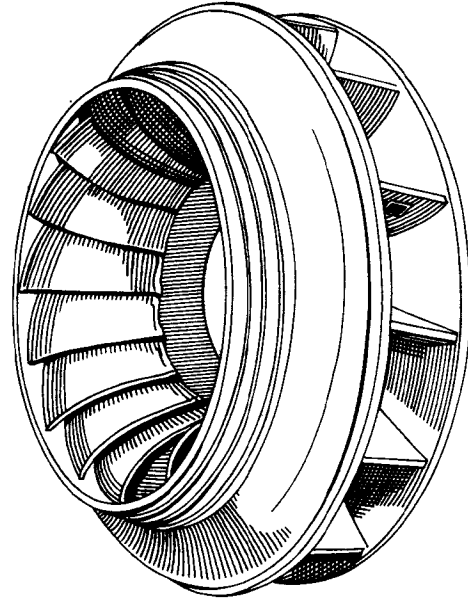
In jüngster Zeit werden in immer stärkerem Umfang Überzüge aus Kunststoffen zum Schutz des Metalls eingesetzt. Schon den Meistern des Altertums ist bekannt gewesen, daß ein metallischer Gegenstand um so beständiger gegenüber der Korrosion ist, je sauberer und glatter seine Oberfläche hergestellt worden ist. Die Korrosion beginnt immer an den Erhebungen oder Vertiefungen eines Werkstücks; sie ist abhängig von der Rauigkeit der Metalloberfläche.

In vielen Fällen verläuft der Zerstörungsprozeß nur längs der Korngrenzen. Diese Form nennt sich interkristalline Korrosion. Sie ist deshalb so gefährlich, weil

äußerlich das Ausmaß der Schädigung nicht erkennbar ist und das Teil unerwartet zu Bruch gehen kann. Mechanische Spannungen in einem metallischen Teil verstärken und beschleunigen dessen Korrosion.

Man kann die Metalloberflächen nicht nur durch wasser- und luftundurchlässige Überzüge schützen, sondern auch mit Hilfe von Stoffen, die die chemischen Reaktionen verlangsamen, die zur Korrosion führen. Diese Stoffe heißen Inhibitoren (vom Lateinischen »inhibire« – bremsen, aufhalten).

Wird Salzsäure in einen gewöhnlichen Tankwagen der Eisenbahn gefüllt, so frißt sie sich bald durch und läuft aus. 1943 legte jedoch ein ganz gewöhnlicher Tankwagen, gefüllt mit Salzsäure, den langen Weg von Moskau bis in die ferne baschkirische Stadt Ischimbai zurück. Die Säure kam dort wohlbehalten und ohne Verluste an, da ihr ein Inhibitor mit der Bezeichnung Unikol zugesetzt worden war. Als Inhibitor wirkt auch das Kaliumchromat (K_2CrO_4). Als stärkste Bremse für den Rostprozeß beim Eisen erweist sich das Technetium. Das Technetiumoxid (TcO_4) kann das Rosten bis zu Temperaturen von 250°C aufhalten.



Francis-Turbinenlaufrad aus nichtrostendem Chromstahlguß

Schon 1870 sagte Mendelejew die Existenz dieses Elements voraus und reservierte dafür das Kästchen mit der Nummer 43 im Periodensystem. Die sorgfältigste Suche vieler Wissenschaftler blieb jedoch ohne Erfolg, das Technetium wurde auf der Erde nicht beobachtet. Da es radioaktiv ist, ist es infolge seiner geringen Halbwertszeit seit langem restlos zerfallen. Erst 1937 wurde es von den Physikern künstlich erzeugt. Als Kind der Technik erhielt es auch den entsprechenden Namen. Das wichtigste Einsatzgebiet dieses Metalls ist der Kampf gegen die Korrosion des Eisens.

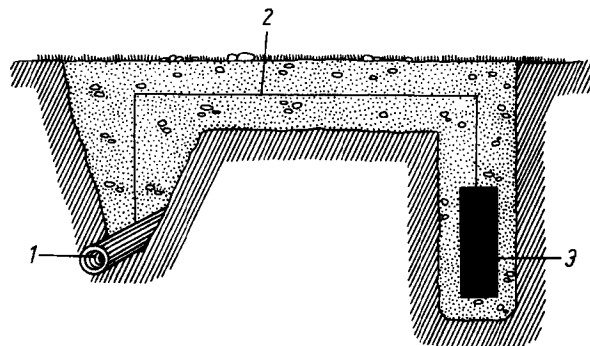
Für den Korrosionsschutz steht bereits eine Vielzahl unterschiedlichster Inhibitoren zur Verfügung.

Sehr originell ist auch ein weiteres Verfahren im Kampf gegen die Korrosion – der Schutz durch eine Opfer- (Hilfs-, Schutz-) Anode. Erinnern wir uns an das galvanische Element, dessen Zinkplatte allmählich aufgebraucht wurde. Wird eine weitere Platte, bestehend aus einem noch aktiveren Metall, z. B. Magnesium, in die Elektrolytlösung getaucht und mit der Zinkplatte verbunden, dann wird nicht mehr das Zink, sondern das Magnesium aufgelöst. Die Atome des Zinks und des Magnesiums treten in einen Konkurrenzkampf, den die weniger aktiven Zinkatome einfach nicht bestehen können. Demzufolge wird der Wasserstoff der Säure durch das Magnesium und nicht durch das Zink ersetzt. Die Zinkplatte bleibt völlig unversehrt, solange Magnesium vorhanden ist. Dieser Vorgang ist mit jedem beliebigen Metallpaar nachvollziehbar. Zerstört wird nur ein Metall, das aktivere der beiden.

So werden beispielsweise die stählernen Rümpfe der Schiffe, die Gerüste der Erdölanlagen im Meer bei Baku, die Gas- und Erdölleitungen und vieles andere durch Zinkplatten geschützt. Der Mensch wirft der Korrosion ein aktiveres Metall »zum Fraß« vor, und solange es nicht vollständig aufgelöst ist, befindet sich die stählerne Anlage außer Gefahr.

Aus dem gleichen Grunde verrosteten zerschrammte verzinkte Eimer, Dächer u. a. kaum, solange auf ihnen Zink vorhanden ist. Ein Nickelüberzug dagegen schützt das Eisen nur bis zum ersten Kratzer. Hier ist alles umgekehrt: Nickel ist chemisch weniger aktiv als Eisen und beginnt erst dann zu oxydieren, wenn das Eisen vollständig verrostet ist.

Keine wichtige Rohrleitung (sei es für Wasser, Erdöl oder Gas) wird ohne elektrochemischen Korrosions-



Kathodischer Korrosionsschutz mit Opferanode
1 Rohrleitung, 2 Bleidraht, 3 Opferanode aus Magnesium

schutz in Betrieb genommen, da ohne ihn die Rohrleitungen einfach unrentabel wären. Ihr breiter Einsatz wurde erst dann ökonomisch zweckmäßig, als die technischen Grundlagen des elektrochemischen Schutzes von Stahl erarbeitet worden waren.

Die neuen Zweige der Technik stellen besondere Forderungen an den Korrosionswiderstand der Metalle. Nehmen wir z. B. die Kerntechnik. Obwohl die Temperatur in der Arbeitszone eines Kernreaktors viel niedriger ist als in der Brennkammer einer Rakete, verläuft dort die Korrosion unter dem Einfluß der gewaltigen durchdringenden Strahlung viel schneller.

Der Kampf gegen das Rosten, der einst das Hauptfeld im Kampf gegen die Korrosion war, ist heute an die zweite Stelle getreten. Für die Technik des kosmischen Zeitalters ist die *Spannungsrißkorrosion* zum Hauptfeind der metallischen Werkstoffe geworden. An dieser »Krankheit« leiden sowohl die nichtrostenden Stähle als auch die Legierungen auf der Basis von Aluminium, Kupfer oder Magnesium. Es gibt noch viele andere Leiden der metallischen Werkstoffe. Jedes muß man auf eine besondere Weise behandeln. So gibt es auch eine Hochtemperaturkorrosion, die beim Einsatz von Metallen bei hohen Temperaturen in aggressiven Gasen (Schwefeldioxid, Sauerstoff u. a.) auftritt.

Unlängst wurde eine ganz neue Gefahr entdeckt: die mikrobiologische Korrosion der Metalle. Es hat sich herausgestellt, daß es Mikroorganismen gibt, die in der Lage sind, Metalle »anzunagen«. Besonders gefährlich sind Schimmelpilze, deren Sporen überall anzutreffen sind. Äußerst stark ist diese Form der Korrosion in Län-

dem mit feuchtem und warmem Klima (diese Länder umfassen etwa 47 % der Fläche aller Kontinente) anzutreffen. Die Mikroorganismen können sowohl Flugzeuge als auch Sender und Empfänger sowie elektrische Geräte außer Betrieb setzen.

Nach einer Mitteilung japanischer Wissenschaftler siedeln sich solche Mikroorganismen sogar in den Wärmetauschern von Kernreaktoren an. Sie vermehren sich an den Wänden der Rohre und stören die Kühlung des Reaktors.

Wie Sie sehen, leiden nicht nur der Mensch, sondern auch die Metalle unter den Mikroben, die mit verschiedenen giftigen Chemikalien bekämpft werden müssen. Doch jede Medaille hat ihre zwei Seiten. Einige Wissenschaftler nehmen an, daß es in Zukunft gelingen wird, die Mikroorganismen für die Herstellung von Verbindungen zwischen Metallen, metallischen Überzügen und zur Ausheilung von Fehlern in metallischen Gegenständen und Konstruktionen auszunutzen.

Weshalb brachte die Seeschlacht vom 27. bis 29. Mai 1905 bei den Tsushima-Inseln im Japanischen Meer das Ende des russisch-japanischen Krieges? Als Verstärkung der russischen Kräfte war die russische Ostseeflotte von Kronstadt aus in das fernöstliche Kampfgebiet beordert worden, wo sie nach sechsmonatiger Fahrt eintraf – allerdings verspätet! Sie wurde von den Japanern vernichtend geschlagen. Als eine der Ursachen für die verspätete Ankunft wurde später das Bewachsen der

Schiffsböden mit Muscheln und Wasserpflanzen erkannt.

Insbesondere bei Fahrten in warmen Gewässern erreicht der »Bartwuchs« bis zu einem halben Meter Dicke in nur einem Jahr. Die Schiffsgeschwindigkeit wird dadurch erheblich verringert. Der Energieverbrauch nimmt zu.

Das Bewachsen der stählernen Unterwasserteile von Schiffen ist auch heute noch ein aktuelles Problem. Von Zeit zu Zeit müssen solche »bewachsenen« Schiffe ins Dock gebracht und »rasiert« werden, d. h., man muß die Muscheln entfernen. Das ist schwierig und aufwendig. Man arbeitet deshalb an der Entwicklung bewuchshemmender Mittel. Das sind z. B. sogenannte Antifouling-Anstrichstoffe, die Verbindungen enthalten, welche als Gifte für Mikroorganismen und Pflanzen wirken. Bestandteile solcher Stoffe sind Kupfer-, Arsen- oder Quecksilberverbindungen. Aber auch einige Metalle, wie zum Beispiel Titan, werden von den Muscheln nicht bewachsen. Diese Eigenschaft neben dem hohen Korrosionswiderstand gegenüber Meerwasser macht das Titan interessant als Werkstoff für die Schiffe der Zukunft.

Zur Erforschung der Korrosion und der Entwicklung des Korrosionsschutzes wurde und wird von den Wissenschaftlern viel geleistet. Chemiker und Werkstofffachleute überlegen bereits, wie sie die Metalle in der Atmosphäre der Venus und anderer Planeten vor Korrosion schützen können ...

An Stelle eines Schlußwortes

Wege zur Qualitätsverbesserung (Die Zukunft der Wissenschaft von den Metallen)

Ein charakteristischer Zug der gesamten modernen Technik ist die Intensivierung der Produktionsprozesse. Diese hängt nicht unwesentlich von der Qualität der Werkstoffe ab, aus denen die Maschinen und Geräte hergestellt werden, von ihrer Festigkeit bei hohen Temperaturen und Drücken. So kam z. B. zu Beginn dieses Jahrhunderts bei einem Flugzeugmotor ein Gewicht von mehr als 340 kg auf eine Leistung von 1000 W. Heute sind es 1,4 kg je 1000 W, d. h. nur noch ein Zweihundert-fünfzigstel.

Eine charakteristische Besonderheit der gegenwärtigen Epoche in der wissenschaftlich-technischen Entwicklung im Vergleich mit den vorangegangenen Epochen ist der Umstand, daß wissenschaftliche Entdeckungen den Weg der Technik festlegen und ihre Entwicklung bestimmen. Entdeckungen in der Wissenschaft können in unserer Zeit neue Industriezweige hervorbringen. So entstanden z. B. die Kerntechnik, die Produktion von elektronischen Rechenmaschinen, die Halbleiterelektronik, die Lasertechnik usw.

Die Wissenschaft von den Metallen lief bis in die jüngste Zeit der technischen Praxis hinterher: Neue metallische Werkstoffe wurden in der Regel zuerst im Laboratorium hergestellt, und danach begann die Untersuchung ihrer Eigenschaften. Bis heute wurden über 10000 Legierungen geschaffen. Die meisten davon wurden jedoch auf empirischem Wege gefunden.

Im Zeitraum von 1875 bis 1950 wurden von der Gesamtzahl der Kombination von Elementen nur etwa 25 % der Zweistoff-, 0,25 % der Dreistoff-, 0,0015 % der Vierstoff- und 0,00001 % der Fünfstoffsysteme untersucht.

Wie gewaltig mag die Zahl der Legierungen mit außerordentlichen Eigenschaften sein, die die Menschheit noch nicht nutzt, einfach deshalb, weil sie bisher nicht im Laboratorium untersucht worden sind! Doch hier sei darauf hingewiesen, daß für eine allseitige experimentelle Untersuchung aller möglichen Kombinationen der bekannten Elemente mehr Metall benötigt wird, als die Masse der Erdkugel ausmacht! Außerdem wäre dazu unendlich viel Zeit erforderlich, und die Untersuchungen wären äußerst teuer. Wo findet sich da ein Ausweg?

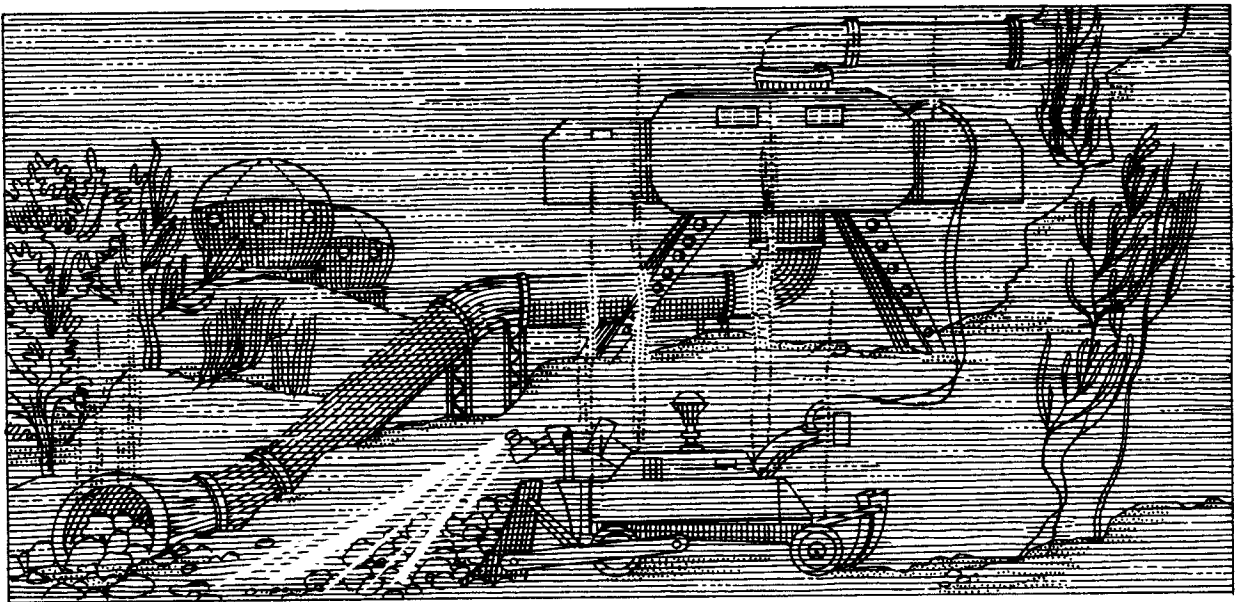
Die neuen Legierungen müssen berechnet werden

Die Astronomen entdecken »mit der Feder« neue Planeten, berechnen mit einer Genauigkeit von Bruchteilen einer Sekunde die Zeit des Eintretens von Sonnen- und Mondfinsternissen, die in nächster Zukunft erfolgen werden, aber auch solche, die vor Jahrhunderten aufgetreten sind oder sich erst in Hunderten oder Tausenden von Jahren ereignen werden.

Die Erbauer von Tunneln berechnen mit absoluter Genauigkeit Ort und Zeit des Zusammentreffens der aufeinander zu arbeitenden Bautrupps unter der Erde ...

Um zu lernen, wie die Eigenschaften einer noch nicht hergestellten Legierung vorausberechnet werden müssen, und um Werkstoffe mit vorgegebenen Eigenschaften zu schaffen, ist es erforderlich, einen Weg zur Berechnung der Verteilung und der Wechselwirkung der Elektronen im Kristall einer Legierung zu finden und die Bindungskräfte zwischen den Atomen zu messen.

Vor unseren Augen vollzieht sich in immer stärkerem Maße der Übergang der Metallkunde aus der beschreibenden Entwicklungsstufe zu einer neuen Etappe, in der



Erzgewinnung aus dem Meeresboden

es möglich ist, die Eigenschaften von noch nicht hergestellten Legierungen zu berechnen.

Die primäre Aufgabe besteht also in der Schaffung einer Theorie von den Legierungen, die es erlaubt, Werkstoffe mit vorgegebenen Eigenschaften zu erzeugen.

Bekanntlich sagte Mendelejew – als er das Periodensystem der Elemente schuf – die Existenz einiger neuer, bis dahin nicht bekannter Elemente voraus und kennzeichnete sogar ihre Eigenschaften. Als im Jahre 1875 der französische Chemiker Lecoq de Boisbaudran das von Mendelejew vorausgesagte Gallium entdeckte, bestimmte er dessen Dichte zu $4,7\text{g/cm}^3$. Die 1871 von Mendelejew veröffentlichten Berechnungen besagten jedoch, daß die Dichte dieses Elements etwa bei 6g/cm^3 liegen müßte. Im Vertrauen auf die Richtigkeit des von ihm gefundenen periodischen Gesetzes schrieb Mendelejew – obwohl er das neue Element noch niemals gesehen hatte – einen Brief an den französischen Kollegen mit dem Hinweis, daß ihm ein Fehler unterlaufen sein müsse. Eine sorgfältige Kontrolle bestätigte dann auch, daß die Dichte des Galliums tatsächlich nahe bei 6g/cm^3 lag, sie beträgt $5,94\text{g/cm}^3$.

Die moderne Quantentheorie der Metalle erlaubt es, alle wichtigen Kennwerte einer beliebigen, noch nicht hergestellten Legierung zu berechnen. Doch leider ist das bis jetzt nur eine prinzipielle Möglichkeit. Bisher gelang es im besten Falle, nur ungefähre qualitative Hinweise auf die Eigenschaften zu geben und einfachste Fälle zu berechnen.

Im Baikow-Institut für Metallurgie der Akademie der Wissenschaften der UdSSR wurde mit Hilfe der modernen Rechentechnik die elektrische Leitfähigkeit bei 0°C für alle möglichen Legierungen von Niob mit Molybdän, Molybdän mit Tantal, Tantal mit Wolfram, Wolfram mit Molybdän, und Wolfram mit Niob bei beliebigen Anteilen der Komponenten berechnet.

Jetzt wurde es dank der Erfolge der Festkörperphysik und Chemie sowie durch die Anwendung der Rechentechnik möglich, die Eigenschaften noch nicht hergestellter Legierungen und metallischer (und überhaupt anorganischer) Verbindungen vorauszusagen. Im Baikow-Institut für Metallurgie haben Sawitzkij, Gribula und Dervingtal eine Prognose für eine Vielzahl von Zweistoffverbindungen vorgenommen, die die Zahl der bisher auf

experimentellem Wege gewonnenen um ein mehrfaches übersteigt. Unter den vorausgesagten Legierungen können viele Werkstoffe mit besonderen physikalischen Eigenschaften sein, von denen sich einige als einzigartig herausstellen könnten. Viele der mit Hilfe der Rechentechnik vorausgesagten Verbindungen wurden schon im Laboratorium erzeugt. Die Experimente hatten im vollen Umfange bestätigt, daß in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle die Prognose sich als richtig erwies. Einige der theoretisch vorausgesagten und dann experimentell erzeugten Stoffe fanden schon Eingang in die wissenschaftliche Forschung und nehmen jetzt ihren Weg in die Volkswirtschaft.

1974 wurden nach dem im Baikow-Institut entwickelten Verfahren Verbindungen vom Typ CaCu_5 vorausgesagt (zu diesem Typ gehört die bekannte Verbindung SmCo_5 mit Rekordwerten bezüglich des Magnetismus). Die Prognose ergab eine große Reserve an noch nicht synthetisierten metallischen Stoffen dieses Typs: Die Rechentechnik sagt über 1100 Verbindungen ähnlicher Art voraus, während auf experimentellem Wege bisher etwa 100 bekannt geworden sind.

Außerdem sind etwa 800 Verbindungen mit einer Kristallstruktur vorausgesagt worden, wie sie für Supraleiter charakteristisch ist, die den supraleitenden Zustand auch bei relativ hohen Temperaturen beibehalten können. Bisher wurden nur etwa 100 der vorausgesagten Verbindungen experimentell untersucht und die Temperatur für den Übergang in den supraleitenden Zustand bestimmt. Die vorläufige Berechnung eröffnet eine Reserve von einigen hundert Verbindungen, unter denen sich Supraleiter mit guten Kennwerten befinden können.

In jüngster Zeit wurde eine Prognose für mehr als 4000 Verbindungen vom CsCl-Typ erhalten. Zu diesem Typ gehören alle Verbindungen, die den Form-Gedächtnis-Effekt (siehe folgender Abschnitt) aufweisen. Auf der Grundlage solcher Prognosen mit Hilfe der Rechentechnik kann man annehmen, daß schon in den nächsten Jahren die Anzahl der neu synthetisierten anorganischen Verbindungen sich auf ein mehrfaches der bisher bekannten erhöht. Sicher werden sich unter den neu synthetisierenden Verbindungen auch Stoffe mit besonderen physikalischen und chemischen, zum Teil einzigartigen Eigenschaften befinden, die sowohl für die Volkswirtschaft als auch besonders für die moderne Technik äußerst notwendig sind.

Das alles ist erst der Anfang des langen und schwierigen Wegs in der neuen Etappe der Metallkunde.

Neue Legierungen, neue metallische Verbindungen – das sind neue Werkstoffe, manchmal mit ganz neuen, äußerst wertvollen Eigenschaften. Erinnert sei hier nur an die Supraleiter, an die Permanentmagnete mit Rekordwerten, an die Legierungen, die »sich an ihre ursprüngliche Form erinnern können« usw.

Als Hauptaufgabe der Metallkunde der letzten Jahrzehnte des 20. Jahrhunderts steht also die theoretische Berechnung von Legierungen mit vorgegebenen Eigenschaften für beliebige Betriebsbedingungen, die auf Grund der Daten der Quantenphysik, der Kybernetik, der physikalischen Chemie der Metalle sowie der bisher gesammelten experimentellen Gesetzmäßigkeiten verwirklicht werden kann. Solch eine Aufgabenstellung ist heute völlig real, weil die moderne Mathematik, Physik, Chemie und Metallkunde bis zu diesem Stand »gereift« sind.

Worauf beruht die moderne Technik?

Die zweite Hauptaufgabe besteht darin, noch unbekannt Eigenschaften metallischer Werkstoffe zu entdecken, die zu völlig neuen Zweigen der Technik führen könnten. So hat z. B. die Entdeckung der Kernspaltung des Urans-235 den Grundstein für die Kerntechnik gelegt.

Untersuchungen an einer Nickel-Titan-Legierung haben gezeigt, daß sie in der Lage ist, sich an die Form und die genauen Maße des Gegenstandes »zu erinnern«, der aus ihr hergestellt wurde. Sicher ist dem Leser bekannt, was ein Niet ist – das ist ein metallischer Stab, der an beiden Enden zu einem Kopf geformt wird. Im Werk werden Rohlinge hergestellt, die nur an einem Ende den Kopf tragen. Um zwei Metallbleche durch einen Niet zu verbinden, setzt man diesen Rohling in die dafür vorgesehene Öffnung und formt dann den Kopf auf der anderen Seite. Doch wie soll man verfahren, wenn dieses zweite Ende nicht erreichbar ist? Solche Situationen treten z. B. bei der Verbindung einer Flugzeugfläche mit dem Rumpf auf. Die Konstrukteure und Technologen haben »raffinierte« Niete erfunden, die nach dem Einsetzen am Bestimmungsort explodieren. Durch die Kraft dieser Mikroexplosion wird ihr zweites Ende aufgestaucht.

Mit der erwähnten Legierung aus Nickel und Titan läßt sich das vereinfachen. Wenn man den Rohling aus dieser Legierung an beiden Enden mit einem Kopf versieht und danach den einen wieder ausrichtet, so »erinnert« sich das Metall daran. Der Nietrohling wird an die Stelle der späteren Verbindung gebracht und das ausgerichtete Ende erwärmt. Das Metall »erinnert« sich sogleich, daß da schon mal ein Nietkopf war, und nimmt diese Form wieder an. Der Niet verbindet beide Bleche zuverlässig.

Aus Nickel-Titan-Legierungen werden bereits Antennen für künstliche Erdsatelliten hergestellt. Während des Starts sind diese zusammengelegt, um möglichst wenig Platz einzunehmen. Im Kosmos werden sie durch die Strahlen der Sonne erwärmt und nehmen die komplizierte Form an, die ihnen noch auf der Erde vorgegeben worden ist. Es existiert ein Vorschlag für ein kosmisches Radioteleskop, dessen Antennen, die aus einer derartigen Legierung bestehen, nach der Ausbreitung im Kosmos einen Durchmesser von etwa 2 km haben werden.

Der Form-Gedächtnis-Effekt wird nicht nur bei Nickel-Titan-Verbindungen angetroffen, sondern auch bei Nickel-Kobalt-Titan, Gold-Kadmium, Kupfer-Mangan-Aluminium, Kupfer-Nickel-Aluminium und anderen Legierungen. Mit Hilfe dieser erstaunlichen Legierungen könnte es gelingen, sogar einen künstlichen Muskel zu schaffen und damit den Motor eines vollständig neuen Typs zu verwirklichen.

Vom Baikow-Institut für Metallurgie der Akademie der Wissenschaften der UdSSR und anderen Instituten werden metallische Membrankatalysatoren geschaffen, die auf einer Palladiumlegierung, z. B. mit Ruthenium, beruhen. Ihr Einsatz erhöht nicht nur die Ausbeute an Benzol aus Zyklohexan von 11 auf 91 %, sondern eröffnet einen Weg zur Schaffung völlig neuer technologischer Prozesse. So kann der Wasserstoff, der bei der Herstellung von Monomeren für synthetischen Kautschuk anfällt, durch die Katalysatormembran abgeführt und für die Hydrierung verwendet werden. Damit ergibt sich die Perspektive, daß in einem Reaktor gleich zwei technologische Prozesse bei günstigem gegenseitigem Einfluß untergebracht werden können: Die eine Reaktion liefert den Rohstoff für die andere, und dabei beschleunigen sich beide Reaktionen gegenseitig.

Vom Charkower Institut für Probleme des Maschinenbaus der Akademie der Wissenschaften der Ukraini-

schen SSR wurde gemeinsam mit dem Baikow-Institut ein PKW »Shiguli« für Untersuchungszwecke umgerüstet, der mit Wasserstoffzusatz zu Benzin arbeitet, wobei der Wasserstoff in einem »Akkumulator« aus einer Nickel-Lanthan-Verbindung gespeichert wird.

Bei der Verwendung von Wasserstoff als Energiequelle tritt das Problem seiner Lagerung und des Transports auf. Es stellte sich heraus, daß einige Metallverbindungen in der Lage sind, große Mengen Wasserstoff zu speichern, indem sie ihn, wie ein Schwamm das Wasser, aufsaugen und bei Temperaturveränderungen wieder abgeben. Das Ganze ist dank der Bildung von Metallhydriden möglich. Diese Art der Wasserstoffaufbewahrung ist ohne Explosionsgefahr!

Außerdem beträgt die Masse der metallischen Verbindungen nur etwa ein Zehntel der Masse für eine Gasflasche oder einen Behälter mit flüssigem Wasserstoff. Der Übergang auf Wasserstoff als Brennstoff für Autos würde das Abgasproblem lösen, denn es fiele nur Wasserdampf an.

Viele andere Stoffe, so auch eine Eisen-Titan-Verbindung, besitzen gleich der Nickel-Lanthan-Verbindung derartige Fähigkeiten.

Letzten Endes bieten die verschiedenen physikalischen Eigenschaften der Modifikationen ein und desselben polymorphen Metalls (elektrischer Widerstand, thermische Ausdehnung, magnetische Eigenschaften, Thermoemission, Supraleitfähigkeit usw.) die Möglichkeit, Legierungen mit vorgegebenen physikalischen Eigenschaften auf der Basis verschiedener Phasen von polymorphen Metallen zu schaffen.

Dem Wesen nach ist die gesamte moderne Technik auf neu erkannten Eigenschaften von Stoffen aufgebaut. Diese neuen Erkenntnisse rufen weitere Fragen in der Wissenschaft hervor – in der Physik, der Chemie, der Metallkunde, der physikalischen Chemie der Metalle und in der Metallphysik. Wie bei einer Kettenreaktion führt das unvermeidlich zu einer Lawine neuer Entdeckungen und Erfindungen, die in noch stärkerem Maße das Schicksal zukünftiger Generationen beeinflussen werden. Das ist die Dialektik der Entwicklung der Wissenschaft!

Um die Wahrscheinlichkeit der Entdeckung neuer bemerkenswerter Eigenschaften zu erhöhen, müssen – reinste Stoffe, Hilfsmaterialien und Arbeitsmethoden eingesetzt werden

- wesentlich der Kreis der untersuchten Eigenschaften erweitert werden; gegenwärtig werden etwa zehn Eigenschaften (mechanische, elektrische, magnetische, thermische usw.) berücksichtigt, erforderlich ist jedoch die Ermittlung von etwa 100 Eigenschaften
- extreme Bedingungen bei der Herstellung und Behandlung von Metallen und Legierungen beachtet werden, wie z. B. höchste und tiefste Temperaturen, höchste Drücke, kosmisches Vakuum, verschiedene Arten von Strahlung, Teilchen mit höchsten Energien, starke elektrische, magnetische oder Ultraschallfelder, Schwerelosigkeit u. a.

Unter solchen Bedingungen kann man neue Erscheinungen und Eigenschaften der Stoffe beobachten, die sich bei den üblichen Bedingungen der Beobachtung entziehen oder überhaupt nicht auftreten. Als Beispiel sei nur an die Entdeckung der Supraleitfähigkeit bei Temperaturen in Nähe des absoluten Nullpunktes oder die Umwandlung des Graphits in Diamant bei außerordentlich hohen Drücken und hoher Temperatur erinnert.

Die Stoffe sind sehr empfindlich gegenüber äußeren Einwirkungen, unter deren Einfluß sie ihre innere Struktur, die Elektronenanordnung und damit folglich ihre chemischen und physikalischen Eigenschaften ändern. Der Einfluß einer Reihe der genannten Faktoren auf den Aufbau und die Eigenschaften metallischer Stoffe ist bis jetzt noch nicht untersucht worden.

Wie bekannt ist, besteht unter gewöhnlichen Bedingungen ein Metall im wesentlichen aus »Löchern«, wenn man unter den Löchern die verhältnismäßig großen Abstände zwischen den Elektronen und Ionen versteht. Es gibt also fast unbegrenzte Möglichkeiten zur Verdichtung der Stoffe durch einen allseitig aufgebrachten Druck, der bis zum Aufbrechen der Elektronenschalen und zur Annäherung der Atomkerne aneinander gesteigert werden muß. Im All existieren superdichte Stoffe z. B. in den *weißen Zwergen*, den *Neutronensternen*, den sogenannten *schwarzen Löchern*.

Hohe Drücke führen zu einer Metallisierung der Stoffe und fördern die Umwandlung eines Isolators in einen Halbleiter, bei noch höheren Drücken sogar in ein Metall oder Supraleiter. Folgendes Beispiel soll den Einfluß hoher Drücke auf die Eigenschaften der Stoffe verdeutlichen: Bei normalem Atmosphärendruck schmilzt Eis bei 0°C; doch das sogenannte Eis-VII, das sich bei hohen Drücken bildet, schmilzt erst bei 442°C.

Unter hohem Druck werden auch solche Stoffe supraleitend, die unter Normalbedingungen diese Eigenschaft nicht aufweisen. Die Supraleitfähigkeit tritt bei hohen Drücken nicht nur bei Metallen der ersten Gruppe des Periodensystems, sondern auch bei Nichtmetallen auf, z. B. bei Phosphor, Antimon, Arsen, und vielen halbleitenden Verbindungen.

In den metallischen Zustand gehen Selen bei einem Druck von etwa 12500 MPa, Germanium bei 12000, Silizium bei 16000, Jod bei 22000 und Schwefel bei 40000 MPa über. Durch schlagartiges Zusammenpressen mit 900000 MPa verdoppelt sich die Dichte von Eisen, Nickel und Kupfer, bei Zinn und Blei steigt sie auf das 2^{1/2}fache. Der Theorie zufolge müßte bei einem Druck in der Größenordnung von 200000 MPa sogar Wasserstoff in den metallischen Zustand übergehen. Berechnungen ergeben, daß metallischer Wasserstoff supraleitend sein müßte. Die wichtigste Schlußfolgerung besteht darin, daß dieser supraleitende Zustand auch noch im Temperaturbereich von –200°C bis etwa 700°C beständig sein müßte, d. h. nicht nur bei Raumtemperatur, sondern vor allem auch bei wesentlich höheren Temperaturen. Wird es jedoch gelingen, den metallischen Zustand des Wasserstoffs auch nach Aufhebung des gewaltigen Druckes zu erhalten? Es ist bekannt, daß sich künstliche Diamanten, die aus Graphit unter hohem Druck und hoher Temperatur hergestellt werden, von selbst nicht in Graphit zurückverwandeln, wenn der hohe Druck aufgehoben wird. Doch wie wird sich der metallische Wasserstoff verhalten? Im Institut für Physik der hohen Drücke der AdW der UdSSR wurde unter der Leitung des Akademiemitgliedes Werschschagin erstmals in der Welt metallischer Wasserstoff erhalten. Gegenwärtig laufen intensive Untersuchungen dieses unlängst noch als Phantasieprodukt erscheinenden Stoffs.

Bei zwei Dritteln der Elemente des Periodensystems sind die inneren Elektronenschalen nicht vollständig besetzt. Theoretische Berechnungen zeigen, daß bei außergewöhnlichen Drücken ein Übergang der äußeren Elektronen auf die inneren nicht aufgefüllten Schalen möglich ist. Als Bestätigung dafür mögen die bisher erhaltenen dichteren Zäsiümmodifikationen dienen, die den gleichen Kristallgittertyp besitzen wie die gewöhnlichen Modifikationen, doch einen geringeren Abstand zwischen den Atomen aufweisen.

Auf diesem Wege werden möglicherweise Werkstoffe zu erhalten sein, die die bisher existierenden in einem solchen Maße übertreffen wie der künstliche Diamant in seiner Härte die Holzkohle.

Drücke, bei denen die Elektronenschalen nicht wieder umkehrbar umgebaut und die Atome »zusammengepreßt« werden, sind schon im Laboratorium erzeugt worden.

Im Innern eines Metalls, das nach traditionellen Verfahren erhalten wurde, sind immer Defekte vorhanden: Mikrorisse, Poren usw. Unter der Wirkung des Druckes verschwinden sie. Die Qualität des Metalls verbessert sich dabei so stark, daß es schwer ist, ein entsprechendes Metall nach irgendwelchen anderen Verfahren zu erzeugen. So wird z. B. Molybdän unter hohem Druck doppelt so fest, 10mal plastischer, und seine Schlagzähigkeit wächst auf das 15- bis 20fache!

Auf der Anwendung hoher Drücke beruht auch eine der neuen, progressiven Methoden zur Verformung, das sogenannte hydrostatische Strangpressen. Unter äußerst hohem Druck fließen sogar die sprödesten und härtesten Metalle wie Flüssigkeiten. Wenn man die Werkstoffe durch Matrizen mit dem gewünschten Öffnungsprofil preßt, kann man Erzeugnisse beliebiger Form herstellen. Unter hohem Druck werden sogar die in ihrer Sprödigkeit an Keramik erinnernden intermetallischen Verbindungen plastisch. Ihre Festigkeit steigt dabei um das 10fache.

Der Druck beseitigt nicht nur Risse und Poren, sondern fördert auch die Bildung einer Feinstruktur im Metall, die dem Werkstoff neue Eigenschaften gibt; deshalb wird das Molybdän nach einer Bearbeitung unter hohen Drücken 2- bis 3mal fester und etwa 10mal plastischer.

Wenn man ein geschmolzenes Metall sehr schnell abkühlt, gelingt es den Atomen nicht mehr, sich »ordentlich« als Kristallgitter anzuordnen. Es ergeben sich amorphe, oder, wie man sie manchmal auch nennt, glasartige Metalle oder metallische Gläser. Die Stoffe vereinen in sich viele Vorzüge von Metall und Glas. Sie besitzen eine große Härte und eine sehr hohe Festigkeit, die die der Stähle um ein vielfaches übertrifft; außerdem sind sie sehr korrosionsbeständig. So widersteht eine glasartige Legierung, die aus Eisen, Nickel, Chrom, Bor und Phosphor erzeugt worden ist, den stärksten Säuren, obwohl sie keine Edelmetalle enthält. Das liegt vor allem daran, daß bei üblichen metallischen Werkstoffen die

Korrosion an den Korngrenzen beginnt und auch dort fortschreitet. Die amorphen Metalle haben keine Körner und damit auch keine Korngrenzen. Daher rührt ihr erstaunlicher Korrosionswiderstand.

Die amorphen Metalle finden bereits Verwendung als Magnetfilme in der Elektronik. Ihre Anwendung in den Tonköpfen der Magnetongeräte wird sicherlich deren Qualität wesentlich erhöhen. Erzeugnisse aus amorphen Metallen sind relativ billig und erfordern keine besonders reinen Ausgangsstoffe. Von Bedeutung ist, daß ihre Herstellung direkt, ohne die zahllosen Zwischenstadien der traditionellen Metallurgie erfolgt. Aus amorphen Metallen werden die Erzeugnisse ohne solche Prozesse, wie Walzen, Schmieden, Pressen usw., hergestellt. Folie oder Draht aus amorphen Metallen erzeugt man mit einer Geschwindigkeit von einigen hundert Metern in der Sekunde! Darum sind amorphe Metalle nicht nur billiger als Titan, sondern auch als nichtrostender Stahl.

Bis jetzt beherrscht man allerdings nur die Produktion dünner Folien aus amorphem Material in der Dicke von etwa 0,1 mm. Wenn es gelingt, mit dieser Folie das Innere einer Apparatur auszukleiden, die sehr aggressive Medien verarbeitet, dann kann der ökonomische Vorteil aus der Verlängerung der Lebensdauer der Apparatur sehr groß sein. Die derzeitige Aufgabe besteht darin, bei amorphen Metallen eine ausreichende Gleichmäßigkeit der Eigenschaften über die ganze Länge des Produktes zu erreichen, da ein ungleichmäßiges Material nicht einsetzbar ist.

Metallurgie im Kosmos

Vom Standpunkt eines Metallkundlers ist der Kosmos ein von der Natur geschaffenes, gigantisches Laboratorium mit extremen Bedingungen. Im Kosmos gibt es Magnetfelder von außerordentlicher, auf der Erde bisher unerreichter, Stärke. In diesen Feldern strecken sich die Atome längs des Magnetfeldes zu dünnen Nadeln, und die Stoffe werden stark verdichtet. Wegen der längsgestreckten Atome bildet sich ein Kristall mit sehr hoher Bindungsenergie und außerordentlich hoher Schmelztemperatur.

Im Kosmos herrscht das natürliche kosmische Vakuum (Entgasung von Metallen), gibt es die kostenlose Sonnenenergie (Sonnenöfen), die kosmische Kälte,

d. h. Temperaturen, die nahe dem absoluten Nullpunkt liegen (supraleitende Geräte), und die Schwerelosigkeit (Lenkung der Erstarrung und der Kristallzüchtung). Die Schwerelosigkeit ermöglicht die Mischung von geschmolzenen Metallen, die sich auf der Erde immer wieder in zwei Schichten trennen, die Herstellung eines leichten und festen »Schaumes« aus Stahl usw. Die sowjetischen Kosmonauten haben im Kosmos schon geschweißt und Experimente zur Kristallisation verschiedener Stoffe sowie eine Reihe anderer technologischer Operationen vorgenommen.

Es ist durchaus möglich, daß in relativ naher Zukunft sehr teure, chemisch aktive seltene Metalle und Halbleiter im Kosmos erschmolzen und weiterverarbeitet werden.

Die zukünftigen Chemiker, Metallurgen und Metallkundler müssen darauf vorbereitet sein, die Rohstoffe des Mondes, der Asteroiden und anderer Planeten zu verarbeiten. Die Analyse der vom Mond erhaltenen Bodenproben hat gezeigt, daß dort der relative Anteil an Thorium, Titan, Zirkon und Yttrium viel höher ist als auf der Erdoberfläche. Einige Wissenschaftler nehmen sogar an, daß auf den Asteroiden relativ stabile Isotope der Elemente mit den Ordnungszahlen von 112 bis 126 gefunden werden können.

Die Metallurgie im Kosmos – das ist durchaus keine Phantasie mehr, sondern eine reale wissenschaftliche und technisch-ökonomische Aufgabe der nahen Zukunft.

Metalle und Umwelt

In der Erdkruste kommen die Metalle in der Mehrzahl der Fälle in Verbindung mit anderen Elementen vor. Der Mensch löst sie aus diesen Verbindungen, reinigt sie und »verstreut« sie dann im Verlauf der Nutzung wieder in der Umwelt. Dadurch erfolgt, ob wir das wollen oder nicht, auch eine Aufnahme der Metalle durch den menschlichen Organismus. So enthielten die Knochen der Urmenschen etwa 2 mg Blei, die eines Bewohners einer modernen Stadt etwa das 100fache, weil das Bleitetraäthyl dem Autobenzin als Antiklopfmittel zugesetzt wird (wodurch sich Leistung und Wirkungsgrad des Motors erhöhen).

Wissenschaftler vermuten, daß der hohe Prozentsatz

von Erkrankungen an multipler Sklerose durch den erhöhten Bleigehalt hervorgerufen wird. Einige Historiker erklären den Zusammenbruch des römischen Imperiums durch eine schleichende Bleivergiftung seiner Elite. Tatsächlich waren die Wasserleitungsrohre in den Häusern aller bekannten und reichen Römer aus Blei. Blei wurde auch für die Überzüge der inneren Oberflächen des Bronzegeschirrs verwendet, um den Kupfergeschmack zu beseitigen, der als plebejisch galt. In den Skeletten der Vertreter der herrschenden Klasse des alten Roms konnte tatsächlich ein hoher Bleigehalt nachgewiesen werden. Daß Wasserleitungsrohre aus Blei zur Erkrankung derjenigen führen können, die dieses Wasser verwenden, zeigte augenfällig die »Bleiepidemie« 1930 in Leipzig. Im 20. Jahrhundert wurde die Geschichte ziemlich schnell aufgeklärt. Doch im alten Rom verlief die allmähliche Vergiftung der Elite über mehrere Generationen. Die Gesundheit verschlechterte sich, es verringerten sich Energie, Arbeitsfähigkeit, Unternehmungslust und Hartnäckigkeit. Natürlich wird das nicht allein den Zusammenbruch des römischen Imperiums bewirkt haben, doch konnte dadurch der Untergang mit großer Wahrscheinlichkeit beschleunigt werden. Die römische Wasserleitung möge uns als Warnung dienen. Führt doch jeder Liter Autobenzin der Atmosphäre 200 bis 400 mg Blei zu. Gegenwärtig gibt es auf der gesamten Welt etwa 250 Millionen Autos, die jährlich 250 000 t Blei in die Atmosphäre blasen!

Amerikanische Angaben sprechen davon, daß die Luft der Städte 20mal mehr Blei enthält als Landluft und etwa 2000mal mehr als die Luft über den Ozeanen.

Alarmierend ist folgendes Beispiel: Vögel, die Regenwürmer am Rande von Autostraßen aufpicken, gehen an Vergiftungen durch Blei zugrunde, das sich in den Würmern angereichert hat.

In 19 Staaten der USA, deren Bevölkerung etwa 100 Millionen Menschen umfaßt, wurde Quecksilber in gesundheitsgefährdenden Mengen beobachtet. In einigen Gebieten nicht nur der USA, sondern auch im benachbarten Kanada wurde das Angeln von Hechten und Barschen verboten, weil diese Fische in ihren Körpern Quecksilber anreichern. Der Genuß der vergifteten Fische hat tragische Folgen. So begann 1953 in dem japanischen Städtchen Minamata eine Epidemie einer schrecklichen, unbekannteren Krankheit. Bei den Kranken traten Seh- und Hörstörungen auf, die Koordinierung der

Bewegungen war nicht mehr möglich, die Muskeln zuckten und verkrampften sich, das Sprechvermögen ging verloren, es traten psychische Depressionen auf. In einigen Fällen traten völlige Blindheit, Lähmung, Bewußtlosigkeit und zuletzt der Tod ein. Es starben etwa 50 Menschen. Die Untersuchungen ergaben, daß die Krankheit durch Vergiftung mit Quecksilber hervorgerufen worden war. Die Werke des Chemiekonzerns »Tiso« hatten quecksilberhaltige industrielle Abfallstoffe ins Meer geleitet. Der in der Nähe des Ufers gefangene Fisch enthielt bis zu 50 mg Quecksilber je Kilogramm Fisch. Der Verzehr dieses vergifteten Fisches rief diese schreckliche Epidemie hervor.

Quecksilbervergiftungen sind auch deshalb so heimtückisch, weil schon die ungeborenen Kinder vergiftet werden können. Sie wachsen sehr langsam und bleiben gewöhnlich in der verstandesmäßigen Entwicklung zurück.

In der ganzen Welt werden gegenwärtig acht- bis neuntausend Tonnen metallisches Quecksilber im Jahr erzeugt. Über die Hälfte dieser Menge geht in der gleichen Zeit verloren und belastet die Umwelt. Etwa die gleiche Menge gelangt bei der Verbrennung von Kohle, beim Erschmelzen von Metallen sowie bei der Zementherstellung in die Atmosphäre. Obwohl es paradox erscheint, so sind es durchaus nicht die metallurgischen Prozesse, sondern die Verbrennung der verschiedenen Heizmaterialien, über die die Menschheit diese Metalle in die Umwelt streut.

In der Asche von Kohle, Erdöl und Brennschiefer ist eine hohe Konzentration vieler Metalle enthalten. So sind bis zu 10 kg Strontium, Vanadium, Zink, Germanium in jeder Tonne Kohlasche enthalten. In der Erdöl- asche finden sich maximal 65 % Vanadium, man kann sie als Vanadinerz nutzen; es ist weiterhin ein hoher Gehalt an Molybdän und Nickel feststellbar. Die Torfasche enthält viel Uran, Kobalt, Kupfer, Nickel, Zink, Vanadium und Blei. In der ganzen Welt wurden bis zum heutigen Tag mindestens 135 Milliarden Tonnen Kohle und 40 Milliarden Tonnen Erdöl verbrannt. Auf diese Weise hat die Menschheit mit der Asche viele Millionen Tonnen verschiedener Metalle in die Umwelt gestreut.

Kadmium ist in Mineraldüngern, z. B. im Superphosphat, in Fungiziden (Präparate gegen Pilzbefall), in Farben, in Kunststoffen (bei deren Verbrennung, z. B. als Müll, gelangt das Metall in die Atmosphäre) enthalten.

Ein zu hoher Kadmiumgehalt im Blut des Menschen führt zu einer außergewöhnlichen Sprödigkeit der Knochen (bereits ein zu tiefer Atemzug kann zum Bruch einer Rippe führen), zur Erhöhung des Blutdruckes (und damit zu Schlaganfällen) und zu vielen Formen des Krebses.

Die Metallurgie hat auch ihren Anteil an der Vergiftung der Umwelt. In den *Gichtgasen* und im Gichtstaub sind Eisen, Blei, Kalzium, Magnesium, Mangan, Quecksilber, Kupfer und Arsen enthalten. Auf jede Tonne *Schwarzkupfer* entfallen über zwei Tonnen Staub, der neben Kupfer und Eisenoxid auch 4 % Arsen, Quecksilber, Zink und Blei enthält.

Die Schwarz- und Buntmetallurgie tragen leider auch aktiv zur Umweltverschmutzung bei. Sinteranlagen, Hoch- und Siemens-Martin-Öfen, Konverter – sie alle geben reichlich Schwefeldioxid und andere die Natur vergiftende Stoffe ab.

Folgender Ausspruch sollte nachdenklich stimmen: »Entweder sorgen die Menschen dafür, daß es weniger Rauch auf der Erde gibt, oder der Rauch sorgt dafür, daß es auf der Erde weniger Menschen gibt!«

Bei der Eisenerzeugung unter Umgehung des Hochofens, die schon in einigen Werken durchgeführt wird, ist die Umweltbelastung wesentlich geringer. Das ist nur eine der vielen Möglichkeiten, nur einer der vielen Wege zur Gesundung unserer Umwelt.

Die Lage ist ernst. Gegenwärtig ist die Bilanz der Elemente in der gesamten Biosphäre, die sich im Verlauf vieler Millionen Jahre herausgebildet hat, gestört, wobei diese Störung allein im letzten Jahrhundert erfolgte. Viele Wissenschaftler sprechen von einem sich immer mehr verstärkenden Metalldruck auf die Biosphäre. Die Verschmutzung des Wassers beschleunigt sich immer mehr.

In Rotterdam gibt es Läden, die mit einer originellen Importware, mit Flaschen einfachen Flußwassers, handeln. Dieses Wasser stammt zwar aus Norwegen, aber aus Flüssen, die die moderne Industrie noch nicht vergiftet hat.

Der Rhein dagegen, der etwa 20 Millionen Menschen mit Trinkwasser versorgt, trägt jährlich 24 Millionen Tonnen Industrieabfälle in den Ozean. Sein Wasser enthält nicht nur hohe Anteile an Titan, Chrom, Kobalt, Nickel, Kupfer, Zink und Molybdän, sondern auch Arsen, Blei und Quecksilber. So betrug 1968 der jährliche Mittelwert für Arsen im Wasser bei Duisburg $3,5 \mu\text{g/l}$ ($1 \mu\text{g} = 10^{-6}\text{g}$),

die höchstzulässige Arsenkonzentration in Trinkwasser beträgt $5\mu\text{g/l}$. Es ist daher nicht erstaunlich, daß der Rhein heute als »Gosse« und sogar als »Nachttopf des industriellen Europas« bezeichnet wird.

In Industriegebieten, in denen sich der Metallgehalt im Boden merklich erhöht hat, fällt deutlich der Ertrag vieler landwirtschaftlicher Kulturen (bei Weizen, Hafer und Gerste um 20 bis 30 %, bei Rüben bis zu 35 %, bei Bohnen bis zu 40 % und bei Kartoffeln bis zu 47 %). Auf der anderen Seite kann die kluge Verwendung von Abraum der Erzgruben auch die Erträge erhöhen. So hat z. B. in Tadshikistan eine solche zusätzliche Düngung der Saat merklich den Ertrag an Baumwolle erhöht.

Etwa die Hälfte der industriellen Umweltverschmutzungen der gesamten Welt entfällt auf die USA.

Die Verschmutzung der Weltmeere hat begonnen und nimmt ständig zu. So übersteigt die Quecksilberkonzentration im Golfstrom den zulässigen Wert zeitweilig um das 4fache. Doch die Atmosphäre der Erde ist nicht unendlich, und die Weltmeere sind nicht grundlos!

Gibt es einen Ausweg aus dieser schon akut gewordenen ökologischen Krise?

Die Futurologen nehmen an, daß im Jahre 2100 weniger als 1 % der dann von der Menschheit erzeugten Energie durch die Verbrennung von Steinkohle erzeugt wird.

In allen Industriezweigen – darunter auch der Metallurgie – wird die sogenannte abfalllose Technologie Einzug halten, bei der die Abfallstoffe nicht mehr die Umwelt belasten, sondern als Rohstoffe für immer neue Produktionszweige dienen werden. Die abfalllose Technologie wird heute schon zur Gewinnung von knappen Metallen aus Asche herangezogen.

Asche ist ein vorzüglicher Rohstoff: Man muß sie nicht abbauen, zerkleinern und über weite Strecken transportieren, wie das oft beim Erz der Fall ist.

Auf der Grundlage des Kohlevorkommens von Ekibastus (Kasachstan) wird bekanntlich ein einmaliger Komplex von Wärmekraftwerken mit einer Gesamtleistung von 20000 MW geschaffen. Viele Wissenschaftler und Projektanten haben schon Pläne aufgestellt, wie die zu erwartenden Berge an Kohleasche genutzt werden können. Aus einem Teil der Asche will man jährlich 3 bis 3,5 Millionen Tonnen Aluminium herstellen. Der Rest der Asche dient zur Herstellung von Zement, Isolierstoffen und anderen Baustoffen; er kann auch als Rohstoff zur Herstellung wertvoller chemischer Produkte dienen.

So wird also die Sorge um die Umwelt gleichzeitig einen großen, rein ökonomischen Vorteil bringen.

In der Sowjetunion schenkt man den Fragen des Umweltschutzes außerordentliche Aufmerksamkeit. Es wurde ein besonderes Gesetz zum Schutz der natürlichen Umwelt angenommen.

Für Saporoshe ist ein Projekt für ein komplexes Versuchs- und Demonstrationskombinat einer abfallfreien Produktion entwickelt worden. Hier werden sich die industriellen Abfälle in Sekundärrohstoffe, Baustoffe und Düngemittel verwandeln. Die Abwässer werden nach einer Reinigung immer wieder dem Betrieb zugeführt.

Häufig gehen bei der Verarbeitung komplexer Erze wertvolle und kostbare Komponenten verloren: Vanadium bei der Verarbeitung von titanhaltigen magnetischen Erzen, Seltenerdmetalle bei der Verarbeitung von Apatit (gelangen auf die Halde), von Monazit, Loparit und einigen anderen Erzen und Konzentraten; ja sogar ein bedeutender Teil an Edelmetallen geht bei der Verarbeitung von Nickel- und Platinrohstoffen verloren. Diese Beispiele ließen sich noch fortsetzen.

Metall, das aus Schrott erschmolzen worden ist, löst nicht nur das Abfallproblem, insbesondere das des Zivilisationsmülls, sondern es kann auch billiger sein als das aus Erz hergestellte. Jede auf diese Weise gewonnene Tonne Stahl spart bis zu drei Viertel der Elektroenergie ein, die sonst bei der Herstellung des Stahls aus Erz verbraucht wird. Die Konzentration der in die Atmosphäre abgegebenen Stoffe, die die Umwelt belasten, verringert sich um 90 kg und die Verunreinigung der Luft um 86 %. Es werden ungefähr 25 t Brauchwasser weniger benötigt, und der Gehalt an Stoffen, die in die Kanalisation und danach in die Flüsse gelangen, sinkt um 76 %. Die Produktionsabfälle vermindern sich um 2,7 t. Und das alles kann man bei der Herstellung jeder Tonne Stahl aus Schrott erreichen.

Natürlich muß man auch berücksichtigen, daß durch den Schrott Begleit- oder Spurenelemente in den Stahl gelangen, die das Werkstoffverhalten negativ beeinflussen können. Es kommt darauf an, durch entsprechende Schrottsortierung den Einsatz so zu lenken, daß kein Schaden bei der Bearbeitung und Nutzung von Stahl entsteht.

Ein bekannter amerikanischer Wissenschaftler schreibt: »... die heutige Rohstofflage bewirkt eine gewaltige Umkehrung. Alle Abfälle sowie der Schrott, die

wir heute als Sekundärrohstoffe bezeichnen, werden zu unseren wichtigsten Rohstoffquellen und die unberührten natürlichen Rohstoffquellen zu unseren Reserven.«

Die Direktive zur Entwicklung der Volkswirtschaft der UdSSR im vergangenen Fünfjahrplan forderte bereits: »Unter Ausnutzung der neuesten wissenschaftlich-technischen Möglichkeiten ist die Untersuchung der natürlichen Rohstoffquellen sowie die Kontrolle des Zustandes der Umwelt und der Quellen ihrer Verschmutzung zu realisieren.

Es sind neue effektive Verfahren und Systeme zum Aufschluß von Lagerstätten, progressive technologische Prozesse zur Gewinnung, Aufbereitung und Verarbeitung der Rohstoffe einzuführen, wobei die Ausbeute der Lagerstätten zu verbessern ist, die mineralischen Rohstoffe weitergehend und komplexer auszunutzen sind sowie die schädliche Einwirkung von Abfällen auf die Umwelt wesentlich zu verringern ist. Zu aktivieren sind die Entwicklung und Einführung von technologischen Verfahren, die eine Verringerung der Abfälle und deren maximale Ausnutzung garantieren. Dazu gehören auch die Systeme zur Ausnutzung des Wassers im geschlossenen Kreislauf.

Es ist eine spezielle Industrie zur Herstellung von Ausrüstungen, Geräten und Materialien zu schaffen, die in den Betrieben und Städten zum Aufbau und zu dem Betrieb von hocheffektiven Reinigungsanlagen notwendig sind.«

Auch für die nächste Zukunft werden diese Grundsätze volle Gültigkeit behalten.

Es versteht sich von selbst, daß ein besonderes Interesse an einer solchen Produktion besteht, bei der überhaupt keine Abfälle mehr auftreten. Und gerade von dieser Art ist die mikrobiologische Metallurgie: die Gewinnung von Metallen mit Hilfe von Mikroorganismen. Es werden schon halbtechnische Versuche zur mikrobiologischen Gewinnung von Kupfer, Mangan, Wismut, Blei, Antimon, Germanium, Gold und anderen Metallen durchgeführt.

Gold z. B. wird von einigen Bakterien und Schimmelpilzen bevorzugt.

Daß lebende Organismen in der Lage sind, in ihren Körpern Metalle anzureichern, ist schon lange bekannt. So »sammelt« die Lärche Niob; Mais und Schachtelhalm Gold; Rüben und Tabak Lithium; der Knollenblätterpilz Selen. Die Mollusken konzentrieren in ihren Kör-

pern Kupfer, die Medusen Blei, Zink und Zinn. Es gibt lebende Organismen, die Vanadium, Strontium, Nickel, Uran, Molybdän und andere Metalle anreichern.

In den USA werden z. B. auf diese Weise etwa 10% des gesamten Kupfers gewonnen. Das mit Hilfe der Mikroorganismen gewonnene Kupfer ist billiger als das mit den herkömmlichen Verfahren produzierte.

In Japan werden schon besonders Aszidien (Seescheiden) gezüchtet, die dem Meereswasser Vanadium entziehen. Das lebende »Erz« wird gesammelt, verbrannt und aus der Asche das Vanadium gewonnen.

Doch das ist erst der Anfang. Die Mikrobiologen und Genetiker müssen erst noch neue Arten von Mikroorganismen mit größerer Produktivität züchten. Hier sei daran erinnert, daß das Penizillin erst dann zu einer allgemein einsetzbaren Arznei wurde, nachdem die Produktivität des Schimmelpilzes, der es abscheidet, auf mehr als das 100fache erhöht worden war.

Durch eine zielgerichtete Selektion hat man z. B. schon Mikroorganismen gezüchtet, die in der Lage sind, die Goldkonzentration in einer Lösung auf 35 mg/l zu erhöhen.

Auch an dem Problem einer Verringerung der Lärmbelastung, die durch die moderne Zivilisation hervorgerufen wird, arbeiten die Wissenschaftler. So haben z. B. japanische Metallurgen einen Stahl mit Zusätzen von Chrom und Aluminium geschaffen, der 100mal stärker als nichtrostender Stahl Vibrationen dämpft. Der »leise Stahl« eröffnet die Möglichkeit, geräuscharme Drehmaschinen, Lokomotiven, alle möglichen Deckel und Ventile, Zylinderköpfe und vieles andere herzustellen.

Für uns und unsere Enkel

Es ist kein Geheimnis, daß die Vorkommen an Silber, Kupfer, Nickel und vielen anderen Metallen zur Neige gehen.

Die zukünftigen Chemiker, Metallurgen, Metallkundler, Technologen und Konstrukteure müssen zur Nutzung neuer Rohstoffe bereit sein, die vom Grunde der Ozeane, aus dem Erdmantel, von Asteroiden, dem Mond und den Planeten stammen.

Der Kontinentalschelf (der flache, unter dem Meer liegende Rand der Kontinente bis zu einer Tiefe von 200 m) wird in der nächsten Zeit Unterwasserbergwerke beherr-

bergen. Mehr als 10 Länder gewinnen bereits aus Meereslagerstätten Zinn-, Titan- und Zirkonrohstoffe, Eisenerz, Vanadium, Gold, Phosphorite und Erdöl.

Wahrscheinlich beginnt in den nächsten Jahren die Gewinnung von Eisen-Mangan-Knollen vom Meeresboden und dem Schelf mit Hilfe von Schiffen, die mit Spezialbaggern ausgerüstet sind.

Die UdSSR verfügt über etwa ein Drittel des Schelfes der Erde. Es wurden Lagerstätten von Ilmenit, Rutil, Zirkon in der Ostsee, dem Schwarzen Meer und dem Japanischen Meer gefunden, Zinnerze in der Laptev-See und vor der ostsibirischen Küste, Titan-Magnetit-Sande bei den Kurilen, Eisenerze im Schwarzen und Asowschen Meer. Eine versuchsweise Gewinnung zeigt, daß die Kosten der Rohstoffe, die vom Meeresboden gewonnen worden sind, niedriger liegen als beim »trockenen« Abbau (kein Abtragen von Deckschichten, keine Halden usw.).

Das Meerwasser ist ein »flüssiges Erz«, in ihm sind je Liter enthalten: 10,5g Natrium, 1,3g Magnesium, 0,46g Kalzium, 0,38g Kalium usw. Jeder Kubikkilometer Meerwasser enthält 165 kg Uran. Im Wasser aller Ozeane und Meere unseres Planeten sind über 10 Milliarden Tonnen Gold gelöst, Magnesium noch viel mehr – 600000000000000 (60 Milliarden) t!

Aus Meerwasser werden schon Magnesium und Uran gewonnen. Etwa 20% der Weltproduktion an Magnesium stammen aus den Meeren. Großbritannien deckt mit dem »Magnesium aus dem Meer« etwa 80% seines Bedarfs an diesem Metall.

Mikroorganismen werden in immer breiterem Umfang bei der Gewinnung von Kupfer und Gold, Vanadium und Uran, Thorium und anderen Metallen eingesetzt. Die mikroskopischen »Metallurgen« sind in der Lage, Kupfer aus längst stillgelegten Erzgruben zu gewinnen, in denen bis zu 20% des Erzes verblieben sind. Die Mikroorganismen helfen auch bei der Verarbeitung der Halden, die vielerorts zu ganzen Bergen angewachsen sind.

Nein, eine »Metallkrise« droht der Menschheit nicht! Die Metalle reichen nicht nur für uns, sondern auch für unsere Enkel. Doch gleichzeitig sollten wir nicht vergessen, daß sich unser Planet gleich einer Jacht auf den uferlosen Weiten des Ozeans befindet. An Bord gibt es nur einen begrenzten Vorrat an Trinkwasser, Speisen und anderem Lebensnotwendigen. Dieser Vorrat kann während der Reise nirgends und aus keiner Quelle ergänzt werden. Darum müssen wir uns ständig daran erinnern, daß alles, was wir von der Erde erhalten, sinnvoll, wirtschaftlich und sparsam verwendet und danach auf jeden Fall wieder zurückgegeben wird.

Bildquellenverzeichnis

Bild »Spezielle Antenne zum Empfang von Signalen der Interkosmos- und Wettersatelliten« auf der Seite 6 aus *Autorenkollektiv*: Raketen, Satelliten, Raumstationen. Leipzig: Fachbuchverlag 1979

Bild auf der Seite 89 aus *Beckert, M.*: Welt der Metalle. Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1977

Bilder auf der Seite 51 aus *Bolling, S.*: Meyers Taschenlexikon; Schiffbau, Schifffahrt. Leipzig: VEB Bibliographisches Institut 1973

Bilder auf den Seiten 8, 34, 38, 86 aus *Bucher, C. J.*: Buchers illustrierte Geschichte der Erfindungen. Luzern, Frankfurt/M.: Verlag C. J. Bucher 1975

Bild auf der Seite 87 aus *Für Dich* (1981) 25

Bild auf der Seite 42 aus *Henselmann, I. u. H.*: Das große Buch

vom Bauen. Berlin: Der Kinderbuchverlag

Bild auf der Seite 53 aus *Highland, H. J.*: Planeten und Raumfahrt, Bd. 16. Hamburg: Tesloff Verlag 1969

Bilder auf den Seiten 27, 57, 58 aus *Lindner, H.*: Kraftquell Kernenergie. Leipzig, Jena, Berlin: Urania Verlag 1975

Bild auf der Seite 63 aus *Mielke, H.*: Rund um die Raumfahrt. Berlin: Der Kinderbuchverlag 1979

Bilder auf den Seiten 39, 50 aus *Patzelt*: Triumph des Rades. Berlin: VEB Verlag Technik 1979

Bilder auf den Seiten 40, 49, 80 aus *Rezac, K.*: Rund um die großen Erfindungen. Berlin: Der Kinderbuchverlag 1979

Bild auf der Seite 12 aus *Wille, H.*: Stählerne Welt. Leipzig, Jena, Berlin: Urania Verlag 1971

Begriffserläuterungen

amorph

Als amorph bezeichnet man eine solche Werkstoffstruktur, bei der die Stoffbausteine, auf größere Entfernung gesehen, in ungeordneter Verteilung vorliegen, etwa so wie im Zustand einer unterkühlten Schmelze (Flüssigkeit) oder auch im Glaszustand.

Dendriten

Dendriten sind tannenbaumartig verzweigte Kristalle, die beim Erstarren vieler Metallschmelzen (darunter aller Eisenlegierungen) gebildet werden.

desoxydierende Wirkung

Man versteht darunter eine spezielle Wirkung verschiedener Elemente, die in der Entfernung von Sauerstoff in chemisch gebundener Form aus Metallschmelzen besteht. Die Sauerstoffentfernung ist notwendig, um die geforderten Gebrauchseigenschaften des Metalls gewährleisten zu können. Zur Desoxydation sind besonders solche Elemente geeignet, die bei hoher Temperatur eine starke Neigung zur chemischen Verbindungsbildung mit Sauerstoff aufweisen, wie z. B. Kalzium, Aluminium, Silizium und Mangan. Die Desoxydation folgt in der Regel einer vorangegangenen, bewußt durchgeführten Oxydation der in der Metallschmelze vorhandenen unerwünschten Begleitelemente, die jedoch mit einer ungewollten Sauerstoffaufnahme der gesamten Schmelze verbunden ist.

Diffusion

Die Diffusion ist ein durch thermische Fluktuation (Wärmebewegung) bedingter Platzwechsel von Atomen, Ionen oder Molekülen, dessen Häufigkeit mit steigender Temperatur zunimmt. Die Diffusion führt zu einem Vermischen bzw. zu einem Hineinwandern von Teilchen eines Stoffes in einen anderen, der mit dem ersten in unmittelbarer Berührung steht.

Einkristall

Der Einkristall ist ein Festkörper, der nur aus einem einzigen Kristall besteht. In der Industrie besitzen Einkristalle hauptsächlich als Halbleiterkristalle eine Bedeutung. In bezug auf ihre Eigenschaften sind sie anisotrop (d. h., ihre Eigenschaften sind abhängig von der Beanspruchungsrichtung des Einkristalls).

Elastizitätsmodul

Unter dem Elastizitätsmodul versteht man das Verhältnis von einachsiger mechanischer Spannung zur zugehörigen elastischen Dehnung eines Probestabs im statischen Zugversuch (Zerreiβversuch). Der Elastizitätsmodul ist ein Kennwert für die Steifigkeit des Werkstoffs in einer Konstruktion. Er beträgt für normalen Baustahl unabhängig von der chemischen Zusammensetzung des Stahls etwa 210000 N/mm^2 bei Raumtemperatur.

Elektrolyt

Ein Elektrolyt ist ein Stoff, der in wäßriger Lösung oder im schmelzflüssigen Zustand mehr oder weniger vollständig Ionen bildet und durch Ionentransport den elektrischen Strom leitet.

Elektronenstruktur

Unter der Elektronenstruktur versteht man die Anordnung der elektrisch negativen Elektronen um den Atomkern herum entsprechend ihrem Energieniveau. Sie ist von entscheidender Bedeutung für die Eigenschaften der Stoffe.

Elementarteilchenbeschleuniger

Der Elementarteilchenbeschleuniger ist eine Einrichtung zur Beschleunigung elektrisch geladener Elementarteilchen (Elektronen, Protonen, Ionen); → Synchrophasotron.

Energieerhaltungssatz

Der Energieerhaltungssatz nach Mayer, Joule und v. Helmholtz besagt, daß in einem abgeschlossenen System die gesamte Energie konstant und in einem nicht abgeschlossenen System der Energiezuwachs gleich der Energieabnahme der Umgebung ist. Bei jedem Vorgang können nur ganz bestimmte Energiemengen umgewandelt werden, ohne daß Energie verloren geht oder neu entsteht.

Erdalkalimetalle

Erdalkalimetalle sind die zweiwertigen chemischen Elemente der zweiten Hauptgruppe des Periodensystems der Elemente Kalzium, Strontium, Barium und Radium, im weiteren Sinne gehören auch Beryllium und Magnesium dazu.

Ferrit

Ferrit ist die metallographische Bezeichnung für eine der Modifikationen des Eisens. Er stellt einen wesentlichen Bestandteil des → Gefüges normaler Baustähle bei üblicher Umgebungstemperatur dar. Sein → Kristallgitter ist kubisch-raumzentriert.

Festigkeit der Metalle

Unter der Festigkeit versteht man im allgemeinen den Widerstand, den das Metall der mechanischen Trennung infolge von außen auf ihn einwirkenden mechanischen Kräften entgegensetzt. Je nach der Art der Kräfte und der Beanspruchungsbedingungen unterscheidet man verschiedene Festigkeitsarten: Zugfestigkeit, Druckfestigkeit, Scherfestigkeit, Biegefestigkeit, Dauerschwingfestigkeit, → Warmfestigkeit u. a.

Gammastrahlen

Gammastrahlen sind elektromagnetische Strahlen sehr kurzer Wellenlängen (10^{-10} bis 10^{-12} cm), die ihren Ursprung im Atomkern haben.

Gefüge

Der (meistens erst nach entsprechender Präparierung sichtbare) Aufbau kristalliner Stoffe, insbesondere metallischer Werkstoffe, wie Stähle und Nichteisenlegierungen, wird als Gefüge bezeichnet. Auf Grund der Feinheit der einzelnen Bestandteile des Gefüges erfordert die Gefügebeobachtung in der Regel technische Hilfsmittel wie Lichtmikroskope, Elektronenmikroskope und andere Geräte. Bei Metallegierungen läßt sich die Gefügeausbildung sehr stark variieren, z. B. durch Veränderung der chemischen Zusammensetzung der Legierung, durch pla-

stische Deformation oder durch thermische Behandlung. Im allgemeinen ist das Gefüge durch die Größe, Form, Art, Verteilung und den Volumenanteil der ungestörten Kristallbereiche gekennzeichnet.

Gichtgas

Das Hochofengas, das als Nebenprodukt bei dem Prozeß der Verhüttung von Eisenerz anfällt und an der Gicht (dem oberen Teil des Hochofens) mit einer Temperatur von 200 bis 400°C den Hochofen verläßt, wird als Gichtgas bezeichnet. Sein Heizwert ist relativ niedrig. Die Gaszusammensetzung kann recht unterschiedlich sein. Gichtgas besteht im allgemeinen aus 5 bis 20% Kohlendioxid, 25 bis 35% Kohlenmonoxid, 1 bis 4% Wasserstoff, maximal 2% Methan, Rest Stickstoff.

Halbwertszeit

Jene Zeitdauer, in der die Hälfte der ursprünglich vorhandenen radioaktiven Atomkerne eines Elements umgewandelt wird, bezeichnet man als Halbwertszeit. Sie ist abhängig von der Art des Elements bzw. Isotops. Der Bereich der bekannten Halbwertszeiten reicht von Bruchteilen einer Sekunde bis zu Milliarden von Jahren.

Härtbarkeit

Unter der Härbarkeit versteht man die Fähigkeit eines Stahls, durch eine bestimmte überkritische Abkühlung (meistens durch Abschrecken in Wasser oder Mineralöl) von Glühtemperatur durchgreifend eine hohe Härte anzunehmen, wobei in der Regel → Martensit entsteht.

hexagonal

→ Kristallgitter

Inertgas

Inertgas ist ein Gas bzw. eine Gasmischung, die mit anderen Stoffen (z. B. Metallen) nicht reagiert.

kaltzähe Stähle

Kaltzähe Stähle sind legierte Stähle mit sehr geringer Neigung zum spröden Bruch, die bei Temperaturen unterhalb von -40°C hauptsächlich zur Herstellung von Anlagen für die Lagerung, den Transport und die Verarbeitung verflüssigter Gase verwendet werden können bzw. auch für den Einsatz unter extremen klimatischen Kältebedingungen in Frage kommen.

Kernfusion

Unter Kernfusion versteht man die Vereinigung sehr leichter Atomkerne (z. B. von Wasserstoff) zu einem schwereren unter Energiegewinn. Dabei muß die thermische Energie (Temperaturbewegung) der Kerne so groß sein, daß die gegenseitige elektrische Beeinflussung der Protonen überwunden wird. Hierfür sind Temperaturen von vielen Millionen Grad erforderlich. Derartige Vorgänge sind die Energiequelle der Fixsterne (auch der Sonne). Von Bedeutung sind Überlegungen zur regelbaren Führung von Fusionsprozessen zur zukünftigen Energiegewinnung auf der Erde.

Königswasser

Königswasser ist ein Säuregemisch, das aus drei Teilen konzentrierter Salzsäure und einem Teil konzentrierter Salpetersäure besteht. Infolge seines Gehaltes an freiem Chlor und Nitrosylchlorid NOCl löst es das Gold, den »König der Metalle«, und Platin auf.

»Kon-Tiki«

Das Balsaholzfloß mit dem Namen »Kon-Tiki« benutzte der durch seine Unternehmungen weltberühmt gewordene Zoologe, Geograph und Ethnologe Thor Heyerdahl, der am 6.10.1914 in der südnorwegischen Hafenstadt Larvik geboren wurde, für seine aufsehenerregende Fahrt quer durch den Pazifik. Dieses Floß ist nach einem indianischen Sonnengott benannt worden. Mit dem Floß »Kon-Tiki« erreichte Heyerdahl 1947 von Peru aus nach etwa 8000 km Fahrt die Tuamotu-Inseln im Pazifik und bewies damit erstmals, daß das Befahren der Weltmeere mit primitiven, der althistorischen Bauweise entsprechend nachgestellten Fahrzeugen möglich ist.

Kriechfestigkeit

Unter Kriechfestigkeit versteht man den Widerstand eines Werkstoffs gegen zeitabhängige Dehnungsvorgänge (Kriechen) bei konstanter Belastung.

Kristallgitter

Als Kristallgitter bezeichnet man die in einem idealen Kristall in allen drei Raumrichtungen periodisch regelmäßige Anordnung der Schwerpunkte der Kristallbausteine (Atome, Ionen, Moleküle) eines Festkörpers (Kristalls). Jeder Baustein ist von benachbarten Bausteinen gleicher Art in gleicher symmetrischer Weise umgeben. Eine solche Anordnung ist auch für den realen Kristall typisch, sie ist jedoch durch Kristallbaufehler gestört.

Das kleinstmögliche Parallelepiped (geometrischer Körper, dessen gegenüberliegende Flächen paarweise parallel sind; »Paralleflächner«, z. B. Würfel), das man durch die Schwerpunkte der Bausteine (Gitterpunkte, Knotenpunkte) legen kann, bezeichnet man als Elementarzelle. Das Kristallgitter (oder auch Raumgitter) wird durch eine vielzählige Wiederholung der Elementarzelle in allen Raumrichtungen gebildet. Alle Arten vorkommender Elementarzellen lassen sich entsprechend ihrer Symmetrie in 7 Kristallsystemen unterbringen (triklin, monoklin, rhombisch, hexagonal, rhomboedrisch, tetragonal, kubisch). Bei den Metallen sind das hexagonale und das kubische System am häufigsten.

Die kubische Elementarzelle kann man sich als Würfel vorstellen, bei dem die 8 Ecken mit je einem Metallatom besetzt sind (kubisch-primitives Gitter). Ausgehend vom kubisch-primitiven Gitter kommt man zum kubisch-raumzentrierten Gitter, wenn zusätzlich noch die Raummittle mit einem Atom belegt wird. Die kubisch-raumzentrierte Modifikation des Eisens bezeichnet man als Ferrit. Kubisch-flächenzentriert nennt man ein kubisches Kristallgitter, wenn außer den 8 Eckatomen noch 6 Seitenflächenatome vorhanden sind, die die (gedachten) Schnittpunkte der Seitenflächendiagonalen besetzen. Die kubisch-flächenzentrierte Modifikation des Eisens bezeichnet man als Austenit, Eisenlegierungen mit einem solchen Grundgittertyp als austenitische Stähle.

kubisch-flächenzentriert

→ Kristallgitter

kubisch-raumzentriert

→ Kristallgitter

Laserkristalle

Laserkristalle sind meistens künstlich hergestellte Kristalle (z. B. künstliche Rubine), die zur Aussendung von Laserstrahlung (kohärente, monochromatische intensive Strahlung) angeregt werden können.

Ledeburit

Ledeburit ist die metallographische Bezeichnung für einen eutektischen Gefügebestandteil, aus dem eine reine Eisen-Kohlenstofflegierung mit 4,3% Kohlenstoff nach gleichgewichtsmäßiger (d. h. unendlich langsamer) Abkühlung von der Schmelztemperatur besteht. Sie erstarrt im Unterschied zu anderen Eisenlegierungen nicht in einem Temperaturintervall, sondern wie reine Metalle bei einer bestimmten Erstarrungstemperatur (eutektische Temperatur, 1147°C). »Eutektisch« ist

abgeleitet von Eutektikum. (Charakteristisches Gemenge aus zwei oder mehreren Stoffen, die im schmelzflüssigen Zustand vollständig mischbar sind, im festen Zustand jedoch nicht. Sie erstarren bei gleicher Temperatur und kristallisieren nebeneinander aus.) Ledeburit kommt als Gefügebestandteil auch bei anderen Eisenlegierungen vor, wie z.B. bei ledeburitischen Chromstählen.

Lunker

Der Lunker ist ein Hohlraum unregelmäßiger Form, der im Inneren des gegossenen Stahlblocks bzw. Gußstücks während der Erstarrung des Metalls infolge einer Volumenkontraktion entsteht. Entstehungsort ist stets derjenige Bereich der Schmelze, der zuletzt erstarrt.

Mach

Die Machzahl M ist das nach dem Physiker Mach benannte Verhältnis der Geschwindigkeit eines Körpers zur Schallgeschwindigkeit in einem bestimmten Medium. Sie dient zur Charakterisierung des Strömungszustands und zur Angabe der Geschwindigkeit (insbesondere der Überschallgeschwindigkeit) von Flugkörpern. $M > 1$ bedeutet, daß die Geschwindigkeit größer als die Schallgeschwindigkeit (340 m/s in Luft) ist.

Magnetron

Das Magnetron bzw. die Magnetfeldröhre ist eine Elektronenröhre für die Erzeugung elektromagnetischer Schwingungen mit Wellenlängen von einigen Zentimetern bis zu Dezimetern. Magnetrons werden hauptsächlich in der Radartechnik als Senderöhren verwendet.

Martensit

Martensit ist die metallographische Bezeichnung für einen metastabilen Gefügebestandteil gehärteter Stähle. Die Härte des Martensits ist vom Kohlenstoffgehalt des Stahls abhängig. Martensit zeichnet sich (außer bei Stählen mit sehr niedrigem Kohlenstoffgehalt) durch besonders hohe Härte bzw. Festigkeit aus. Die Struktur des Martensits ist nicht einheitlich, meistens jedoch plattenförmig. Sie wird von vielen Faktoren beeinflusst, hauptsächlich aber von der chemischen Zusammensetzung des Stahls. Martensit bildet sich üblicherweise beim schnellen Abkühlen (Abschrecken) des Stahls von hoher Temperatur; → Härbarkeit.

Masseln

Masseln sind massive, blockförmige, oft mit Einkerbungen (als

Zwei- oder Mehrteiler) versehene Barren aus Roh-, Hütten- oder Umschmelzlegierungen (z. B. Roheisen oder Hüttenaluminium) in gut transportierbarer und stapelbarer Form, die zum Wiedereinschmelzen vorgesehen sind.

Metallographie

Metallographie ist die Sammelbezeichnung für alle metallmikroskopischen Untersuchungsmethoden an Metallen und metallischen Werkstoffen. Sie beinhaltet die Herstellung von ebenen Schlißflächen durch Schleifen und Polieren, das Anätzen mit chemischen Reagenzien und die Untersuchung des Gefügebauaus an diesen speziell präparierten Schlißflächen mit Hilfe der Mikroskopie.

Neutronensterne

Neutronensterne sind eine Gruppe von Himmelskörpern, die eine Masse besitzen, die größenordnungsmäßig der der Sonne entspricht.

Da ihre Durchmesser nur etwa 20 km betragen, haben sie eine Dichte von 10^9 Tonnen je Kubikzentimeter.

Ihre effektive Oberflächentemperatur beträgt etwa eine Million Grad Celsius.

Das Strahlungsmaximum liegt im Bereich der Röntgenstrahlung. Solche Objekte können deshalb nur von Stellen außerhalb der Erdatmosphäre aus beobachtet werden.

Phasenumwandlung

Unter Phasenumwandlung versteht man die bei der Erwärmung oder Abkühlung einer Legierung oder eines nichtmetallischen Stoffes ablaufende Umbildung von einer instabil gewordenen Phase in eine andere, den jeweils stabileren Zustand repräsentierende Phase, wobei man als Phase die homogenen Teile eines heterogenen Systems (Gefüge) ansieht, die sich in ihren Charakteristika, wie chemische Zusammensetzung und Kristallaufbau, entsprechen. Wie zum Beispiel das Schmelzen und Erstarren eines Metalls bei charakteristischen Punkten (Temperaturen) erfolgt (Schmelz- bzw. Erstarrungspunkt), gibt es auch Umwandlungspunkte bei Phasenumwandlungen im festen Zustand, deren Temperaturlage von der chemischen Zusammensetzung, der Aufheiz- bzw. Abkühlungsgeschwindigkeit und anderen Faktoren abhängig ist. Bei sehr langsamer Aufheizung bzw. Abkühlung markieren sie sich als Halte- oder Knickpunkte in der Aufheiz- bzw. Abkühlungskurve.

Die Kenntnis über die Lage der Umwandlungspunkte von Metalllegierungen ist von großer Bedeutung für die gezielte Einstellung gewünschter Werkstoffeigenschaften durch Wärmebehandlung.

Profilieren

Profilieren ist ein Biegeverfahren für Bleche zur Herstellung langer Profilstränge. Ein ebener Blechstreifen wird durch entsprechend angeordnete Profilwalzen geführt und dabei stetig fortschreitend über die Walzenrollen quer zur Längsachse des Streifens kalt gebogen.

Röntgenstrukturanalyse

Die Röntgenstrukturanalyse ist ein Verfahren zur Aufklärung von Strukturen bzw. zur Bestimmung von Atomanordnungen in kristallinen Festkörpern (wie z. B. Metallen) unter Verwendung der Röntgenstrahlung.

Samurai-Schwerter

Samurai-Schwerter sind Schwerter, deren Klingen durch Zusammenschweißen einer sehr großen Anzahl einzelner Lagen von hartem und weichem Stahl hergestellt wurden. Nach dem sorgfältigen Anschleifen der gehärteten Klinge zeigt sich eine ähnliche Maserung der Oberfläche (Damaststruktur) wie beim Damaszener Stahl.

Schutzgasatmosphäre

Eine Schutzgasatmosphäre bilden Gase oder Gasgemische, die beim Glühen von Metallen entweder keine Oxidschicht auf der Metalloberfläche entstehen lassen oder vorhandene Oxidschichten beseitigen. Als technische Schutzgase sind in Gebrauch: Argon, Stickstoff, Wasserstoff, Gemische von Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Kohlenwasserstoff und Wasserstoff in wechselnden Gehalten.

schwarze Löcher

Schwarze Löcher sind eine Konsequenz aus der Einsteinschen Gravitationstheorie, da sie sich als mögliche Lösung der Einsteinschen Gleichungen ergeben (Schwarzschild-Lösung). Sie sind ein grundlegendes Problem der theoretischen Physik, aber keine mit astronomischen Mitteln zu suchenden Himmelskörper. Die Entstehung und das Innere der schwarzen Löcher lassen sich nicht beobachten. Die Astronomie muß sich damit begnügen, tatsächlich gefundene Objekte als schwarzes Loch zu verdächtigen. Die Bezeichnung »schwarze Löcher« folgt aus der Gravitationstheorie, die den Einfluß des Gravitationsfeldes auf die Bewegung sowohl makroskopischer Körper als auch elementarer Teilchen (einschließlich der Photonen) beschreibt. Dieser Einfluß ist abhängig von der Stärke des Gravitationsfeldes und demzufolge von der Masse, die dieses Gravitationsfeld erzeugt. Bei sehr großer

Masse wird das Gravitationsfeld so stark, daß das Ablösen von Teilchen von der Oberfläche des Körpers – auch das Ablösen von Lichtquanten – nicht mehr möglich ist. Das Ausbleiben jeglicher Strahlung von der Oberfläche hat zur Bezeichnung »schwarzes Loch« geführt. Das Volumen einer derartigen Massenanhäufung läßt sich berechnen. Den Radius, den ein Körper durch Zusammenschrumpfen (»Gravitationskollaps«) erreichen muß, um ein schwarzes Loch zu sein, bezeichnet man als Gravitationsradius. Er beträgt für die Sonne 3 Kilometer.

Schwarzkupfer

Schwarzkupfer ist ein durch Oxide dunkel gefärbtes Rohkupfer, das durch Verblasen von sogenanntem Kupferstein (schmelzmetallurgisch hergestelltes kupferreiches Zwischenprodukt, das außer Kupfer überwiegend Eisen und Schwefel enthält) im Konverter (metallurgisches Reaktionsgefäß) erzeugt wird.

Seltenerdmetalle

Die chemischen Elemente mit den Ordnungszahlen 21 (Skandium), 39 (Yttrium), 57 (Lanthan) und 58 bis 71 werden als Seltenerdmetalle bezeichnet. Mit Ausnahme der Elemente Skandium und Yttrium handelt es sich um Schwermetalle mit einer Dichte von größer als 5 g/cm^3 , die im allgemeinen weich, gut wärmeleitend und an Luft leicht oxydierbar sind.

Sintern

Sintern ist das Zusammenfritten von pulverförmigen bis körnigen Stoffen bei höheren Temperaturen durch oberflächliches Aufschmelzen des Sintergutes.

Spannungsrißkorrosion

Unter Spannungsrißkorrosion versteht man eine von der Oberfläche ausgehende Zerstörung metallischer Werkstoffe durch chemische und elektrochemische Reaktionen unter gleichzeitiger Mitwirkung mechanischer Spannungen. Es handelt sich um eine besonders gefährdete Korrosionsart, weil sie in der Regel anders als der flächenmäßige Angriff vor der endgültigen Zerstörung von außen nur schwer erkennbar ist. Die Zerstörung erfolgt durch verformungslosen Bruch mit interkristallinem (entlang den Korngrenzen) oder transkristallinem Bruchverlauf (durch die Körner hindurch).

Stahlguß

Stahlguß ist Stahl, der in Formen vergossen, erstarrt ist und ohne plastische Verformung sowohl seine endgültige äußere Form als auch seine Gebrauchseigenschaften erhält.

Supraleitfähigkeit

Supraleitfähigkeit ist die bei vielen Metallen (z. B. Hafnium, Kadmium, Zink, Rhenium, Aluminium, Titan, Thallium, Indium, Zinn, Quecksilber, Vanadium, Blei) zu beobachtende Erscheinung, daß ihre Fähigkeit, den elektrischen Strom zu leiten, bei extrem tiefer Temperatur (Sprungtemperatur in der Nähe des absoluten Nullpunktes) sprunghaft zunimmt.

Synchrophasotron

Das Synchrophasotron (auch Protonensynchrotron) ist eine Anlage zur Beschleunigung von Protonen auf ein hohes Energieniveau.

thermische Neutronen

Thermische Neutronen sind Elementarteilchen mit der Massenzahl 1 ohne elektrische Ladung, deren Geschwindigkeit bei 25°C etwa 2220 m/s beträgt.

Tiefziehen

Unter dem Tiefziehen versteht man ein Kaltumformungsverfahren für Blech, bei dem ein Stempel ein Blechteil (Blechrolle) in einen Ziehring (Matrize) zieht. Das Blechformteil wird dabei durch einen Niederhalter auf die Matrize gedrückt, um ein faltenfreies plastisches Materialfließen im Flanschbereich der Blechrolle zur Bildung von Hohlkörpern zu gewährleisten.

Transurane

Transurane sind Elemente mit einer Ordnungszahl größer als 92, d. h. Elemente, die im Periodensystem der Elemente hinter dem Uran stehen.

Versetzungsdichte

Unter der Versetzungsdichte versteht man die Konzentration von Versetzungen im Kristall. Eine Versetzung ist einer der möglichen Kristallbaufehler im kristallinen Stoff (→ Kristallgitter). Versetzungen erleichtern das plastische Fließen des Materials bei der Verformung und rufen elastische Verspannungen bzw. eine Verfestigung metallischer Werkstoffe hervor. Die Versetzungsdichte beträgt im gegossenen bzw. geglühten Metall etwa 10^6 bis 10^8 und im kaltverformten Metall 10^{10} bis 10^{12} Versetzungen je Quadratzentimeter. Besonders niedrige Werte der Versetzungsdichte benötigt man bei Germanium und Silizium zur Herstellung von Halbleitern.

Wärmebehandlung

Unter dem Begriff Wärmebehandlung faßt man alle Verfahren oder Kombinationen mehrerer Verfahren zusammen, bei denen ein Werkstück im festen Zustand Temperaturveränderungen unterworfen wird, wobei das das Werkstück umgebende Medium auch Änderungen der chemischen Zusammensetzung von der Oberfläche aus herbeiführen kann. Die Wärmebehandlung beinhaltet in der Regel die Erwärmung des Metalls auf eine bestimmte höhere Temperatur, das Halten bei dieser Temperatur und die nachfolgende Abkühlung mit dem Ziel, einen erwünschten Gefügestand und damit entsprechende Eigenschaften einzustellen. Wichtige Wärmebehandlungen sind das Glühen, Härten, Anlassen, Einsatzhärten und Nitrieren.

Warmfestigkeit

Warmfestigkeit ist die Festigkeit, die der Werkstoff bei höherer Temperatur (bei Stählen, den sogenannten warmfesten Stählen, bis etwa 600°C) aufweisen muß, um die Funktionsfähigkeit der daraus hergestellten Teile (z. B. Werkzeuge für die Warmarbeit) bei allseitiger Erwärmung zu gewährleisten.

weiße Zwerge

Weiße Zwerge sind Sterne mit relativ kleinem Durchmesser. Trotz ihrer hohen effektiven Oberflächentemperatur sind sie nur von geringer Helligkeit. Weiß werden sie auf Grund der Farbe der zuerst beobachteten Sterne dieser Art genannt. Ihre Masse liegt in der Größenordnung der Sonnenmasse, ihr Radius entspricht etwa dem Erdradius, ihre mittlere Dichte ist mit 100 kg/cm^3 sehr groß. Bei solchen Dichten ist die Materie durch einen den irdischen Verhältnissen völlig verschiedenen Zustand gekennzeichnet. Schätzungsweise sind 1 bis 10% der Sterne in der Sonnenumgebung weiße Zwerge.

Zementit

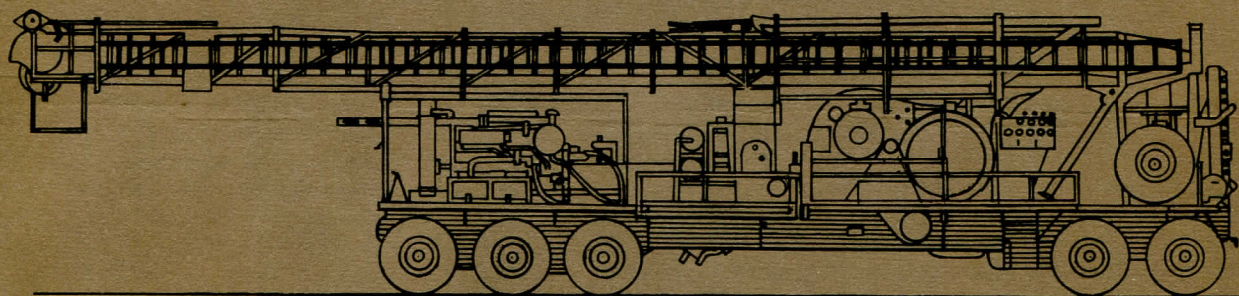
Zementit ist die metallographische Bezeichnung für die chemische Verbindung Fe_3C (Eisenkarbid), an deren Bildung drei Eisenatome und ein Kohlenstoffatom beteiligt sind. Zementit ist ein wesentlicher Gefügebestandteil von Eisen-Kohlenstofflegierungen bzw. von unlegierten Stählen, hauptsächlich im geglühten Zustand. Er ist in solchen Gefügebestandteilen wie → Ledeburit bei Raumtemperatur und Perlit als Phase anzutreffen. Menge, Ausbildungsform und Anordnung des Zementits im Gefüge beeinflussen Festigkeit, Härte und Zähigkeit der Stähle.

Zonenschmelzen

Zonenschmelzen ist ein Verfahren zur Hochreinigung von Me-

tallen und anderen Stoffen sowie zur definierten Verteilung von Fremdstoffen (Zonenlegieren). Beim Zonenschmelzen zur Hochreinigung nutzt man den Effekt aus, daß die Konzentration des zu entfernenden Elements im festen Metall kleiner als in seiner Schmelze ist. Wird eine schmale Zone eines verun-

reinigten Ausgangsmaterials in Stabform aufgeschmolzen und die Schmelzzone durch Bewegung der Heizeinrichtung langsam zum Stabende bewegt, so wird ein Großteil der Verunreinigungen in der Schmelzzone mitgeschleppt, am Stabende ist dann ein Abtrennen möglich. Das Metall wird somit gereinigt.



Mobilkran

Element	1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s	4p	4d	4f	5s	5p	5d	5f	5g
1. H	1														
2. He	2														
3. Li	2	1													
4. Be	2	2													
5. B	2	2	1												
6. C	2	2	2												
7. N	2	2	3												
8. O	2	2	4												
9. F	2	2	5												
10. Ne	2	2	6												
11. Na	2	2	6	1											
12. Mg	2	2	6	2											
13. Al	2	2	6	2	1										
14. Si	2	2	6	2	2										
15. P	2	2	6	2	3										
16. S	2	2	6	2	4										
17. Cl	2	2	6	2	5										
18. Ar	2	2	6	2	6										
19. K	2	2	6	2	6		1								
20. Ca	2	2	6	2	6		2								
21. Sc	2	2	6	2	6	1	2								
22. Ti	2	2	6	2	6	2	2								
23. V	2	2	6	2	6	3	2								
24. Cr	2	2	6	2	6	5	1								
25. Mn	2	2	6	2	6	5	2								
26. Fe	2	2	6	2	6	6	2								
27. Co	2	2	6	2	6	7	2								
28. Ni	2	2	6	2	6	8	2								
29. Cu	2	2	6	2	6	10	1								
30. Zn	2	2	6	2	6	10	2								
31. Ga	2	2	6	2	6	10	2	1							
32. Ge	2	2	6	2	6	10	2	2							
33. As	2	2	6	2	6	10	2	3							
34. Se	2	2	6	2	6	10	2	4							
35. Br	2	2	6	2	6	10	2	5							
36. Kr	2	2	6	2	6	10	2	6							
37. Rb	2	2	6	2	6	10	2	6			1				
38. Sr	2	2	6	2	6	10	2	6			2				
39. Y	2	2	6	2	6	10	2	6	1		2				
40. Zr	2	2	6	2	6	10	2	6	2		2				
41. Nb	2	2	6	2	6	10	2	6	4		1				
42. Mo	2	2	6	2	6	10	2	6	5		1				
43. Tc	2	2	6	2	6	10	2	6	6		1				
44. Ru	2	2	6	2	6	10	2	6	7		1				
45. Rh	2	2	6	2	6	10	2	6	8		1				
46. Pd	2	2	6	2	6	10	2	6	10						
47. Ag	2	2	6	2	6	10	2	6	10		1				
48. Cd	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2				
49. In	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	1			
50. Sn	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	2			
51. Sb	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	3			
52. Te	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	4			
53. J	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	5			
54. Xe	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	6			

Element		1	2	3	4s	4p	4d	4f	5s	5p	5d	5f	5g	6s	6p	6d	6f	6g	6h	7s
55.	Cs	2	8	18	2	6	10		2	6				1						
56.	Ba	2	8	18	2	6	10		2	6				2						
57.	La	2	8	18	2	6	10		2	6	1			2						
58.	Ce	2	8	18	2	2	10	2	2	6				2						
59.	Pr	2	8	18	2	6	10	3	2	6				2						
60.	Nd	2	8	18	2	6	10	4	2	6				2						
61.	Pm	2	8	18	2	6	10	5	2	6				2						
62.	Sm	2	8	18	2	6	10	6	2	6				2						
63.	Eu	2	8	18	2	6	10	7	2	6				2						
64.	Gd	2	8	18	2	6	10	7	2	6	1			2						
65.	Tb	2	8	18	2	6	10	9	2	6				2						
66.	Dy	2	8	18	2	6	10	10	2	6				2						
67.	Ho	2	8	18	2	6	10	11	2	6				2						
68.	Er	2	8	18	2	6	10	12	2	6				2						
69.	Tm	2	8	18	2	6	10	13	2	6				2						
70.	Yb	2	8	18	2	6	10	14	2	6				2						
71.	Lu	2	8	18	2	6	10	14	2	6	1			2						
72.	Hf	2	8	18	2	6	10	14	2	6	2			2						
73.	Ta	2	8	18	2	6	10	14	2	6	3			2						
74.	W	2	8	18	2	6	10	14	2	6	4			2						
75.	Re	2	8	18	2	6	10	14	2	6	5			2						
76.	Os	2	8	18	2	6	10	14	2	6	6			2						
77.	Ir	2	8	18	2	6	10	14	2	6	7			2						
78.	Pt	2	8	18	2	6	10	14	2	6	9			1						
79.	Au	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10			1						
80.	Hg	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10			2						
81.	Tl	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10			2	1					
82.	Pb	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10			2	2					
83.	Bi	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10			2	3					
84.	Po	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10			2	4					
85.	At	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10			2	5					
86.	Rn	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10			2	6					
87.	Fr	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10			2	6					1
88.	Ra	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10			2	6					2
89.	Ac	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10			2	6	1				2
90.	Th	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10			2	6	2				2
91.	Pa	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10	2		2	6	1				2
92.	U	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10	3		2	6	1				2
93.	Np	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10	5		2	6					2
94.	Pu	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10	6		2	6					2
95.	Am	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10	7		2	6					2
96.	Cm	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10	7		2	6	1				2
97.	Bk	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10	8		2	6	1				2
98.	Cf	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10	10		2	6					2
99.	Es	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10	11		2	6					2
100.	Fm	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10	12		2	6					2
101.	Md	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10	13		2	6					2
102.	(No)	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10	14		2	6					2
103.	Lw	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10	14		2	6	1				2
104.	Ku	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10	14		2	6	2				2

Elektronenkonfiguration für den Grundzustand der freien Atome

VEB DEUTSCHER VERLAG
FÜR GRUNDSTOFFINDUSTRIE · LEIPZIG