



TECHNIK IM FOKUS

DATEN FAKTEN HINTERGRÜNDE

Marc-Denis Weitze
Christina Berger

Werkstoffe

Unsichtbar, aber unverzichtbar



Springer Vieweg

Technik im Fokus

Technik im Fokus

Photovoltaik – Wie Sonne zu Strom wird

Wesselak, Viktor; Voswinckel, Sebastian, ISBN 978-3-642-24296-0

Komplexität – Warum die Bahn nie pünktlich ist

Dittes, Frank-Michael, ISBN 978-3-642-23976-2

Kernenergie – Eine Technik für die Zukunft?

Neles, Julia Mareike; Pistner, Christoph (Hrsg.), ISBN 978-3-642-24328-8

Energie – Die Zukunft wird erneuerbar

Schabbach, Thomas; Wesselak, Viktor, ISBN 978-3-642-24346-2

Weitere Bände zur Reihe finden Sie unter

<http://www.springer.com/series/8887>

Marc-Denis Weitze · Christina Berger

Werkstoffe

Unsichtbar, aber unverzichtbar

 Springer Vieweg

Marc-Denis Weitze
acatech Geschäftsstelle
München, Deutschland

Christina Berger
TU Darmstadt
Darmstadt, Deutschland

ISSN 2194-0770
ISBN 978-3-642-29540-9
DOI 10.1007/978-3-642-29541-6

ISSN 2194-0789 (electronic)
ISBN 978-3-642-29541-6 (eBook)

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

Springer Vieweg

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013

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

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE.

Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
www.springer-vieweg.de

Vorwort

In ihrem Positionspapier „Materialwissenschaft und Werkstofftechnik in Deutschland“ setzt sich acatech, die Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, für eine stärkere öffentliche Wahrnehmung und „Sichtbarkeit“ der Werkstoffe in Deutschland ein, die ihrer tatsächlichen Bedeutung angemessen ist. „Design, Marke und Funktionalität stehen in der Kundenwahrnehmung häufig im Vordergrund. Meist wird dabei verkannt, dass gerade die Werkstoffe oder Werkstofftechnologien das Produktdesign wesentlich prägen und dem Produkt seine spezifischen und einzigartigen Eigenschaften verleihen.“¹

„Unsichtbar, aber unverzichtbar“ lautete daher das Motto eines Journalistenworkshops der Akademie zum Thema Werkstoffe im Jahr 2009 im Deutschen Museum in München und eines Side Events im Rahmen der MSE-Tagung im Jahr 2010 in Darmstadt. Diese Veranstaltungen boten ausreichend Motivation und auch Anschauungsmaterial, um zu dem vermeintlich spröden Thema „Werkstoffe“ diesen allgemein verständlichen Überblick zusammen zu tragen.

In diesem Buch betrachten wir, was Werkstoffe sind, welche Vielfalt an Werkstoffen existiert, wie Werkstoffe zu ihren Eigenschaften kommen, wie Werkstoffeigenschaften maßgeschneidert werden können und welche Entwicklungspotenziale bestehen. Ausgangspunkt sind dabei die Bedarfsfelder „Energie“, „Information und Kommunikation“ sowie „Mobilität“, zu denen exemplarische Beiträge der Materialwissenschaft und Werkstofftechnik vorgestellt werden. Dabei werden insbesondere

¹ acatech: Materialwissenschaft und Werkstofftechnik in Deutschland (acatech BEZIEHT POSITION – Nr. 3), Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2008, S. 17.

neuere Entwicklungen in den Blick genommen, ohne traditionelle Werkstoffe zu übersehen. Umrahmt werden die Bedarfsfelder von „Strukturen und Eigenschaften“ und „Qualitätssicherung“ – womit dieses Buch die Kette vom Atom zum Produkt abbildet.

Dieses Buch kann und will keinen Anspruch auf enzyklopädische Vollständigkeit erheben. Vielmehr stellt es Werkstoffe anhand von Beispielen vor, möchte Interesse wecken und die Aufmerksamkeit schärfen, wo und wie Werkstoffe unser Leben durchdringen.

Unser Dank für wertvolle Kommentierungen von Textentwürfen geht insbesondere an Frank O. R. Fischer, Hermann W. Grünling, Manfred Hennecke, Hartwig Höcker, Helmut A. Schaeffer, Christoph Uhlhaas und Albrecht Winnacker. Anton Erhard, Bernd Isecke, Karl-Heinz Mayer, Harald Zenner und Eike Lehmann haben darüber hinaus mit Textergänzungen beigetragen. Christian Busch und Ralf Fellenberg vom VDI Technologiezentrum danken wir für ihre Hilfe bei der Bildrecherche.

Christina Berger, Sprecherin acatech Themennetzwerk „Materialwissenschaft und Werkstofftechnik“

Marc-Denis Weitze, Wissenschaftlicher Referent, acatech Geschäftsstelle

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
	1.1 Was sind Werkstoffe?	4
	1.2 Materialwissenschaft und Werkstofftechnik	4
	Literatur	7
2	Strukturen und Eigenschaften	9
	2.1 Vom Atom zum Werkstoff	9
	2.1.1 Die atomaren Bausteine der Materialien und ihre Bindungen	9
	2.1.2 Struktur über viele Größenordnungen	16
	2.1.3 Die Oberfläche	28
	2.2 Stoffklassen	29
	2.2.1 Metalle	30
	2.2.2 Keramik und Glas	34
	2.2.3 Kunststoffe	38
	2.2.4 Werkstoffe der belebten Natur	44
	2.3 Eigenschaften	50
	2.3.1 Mechanische Eigenschaften	50
	2.3.2 Wie Bauteile anhand von Werkstoffeigenschaften ausgelegt werden .	55
	2.3.3 Beständigkeit gegen Korrosion und Verschleiß .	57
	2.3.4 Thermische Eigenschaften	60
	2.3.5 Elektrische, magnetische und optische Eigenschaften	61

2.3.6	Verarbeitungseigenschaften	63
2.3.7	Wie Kombinationen von Eigenschaften ausgewählt werden	64
	Literatur	65
3	Werkstoffe für Energie	67
3.1	Energie umwandeln	68
3.1.1	Hochtemperatur-Werkstoffe	68
3.1.2	Brennstoffzellen	73
3.1.3	Windenergie	73
3.1.4	Photovoltaik	77
3.2	Energie sparen	80
3.2.1	Dämmstoffe	80
3.2.2	Transport: Stromleitungen	82
3.2.3	Lampen	85
3.2.4	Katalysatoren	86
3.3	Energie speichern	86
3.3.1	Batterien	86
3.3.2	Wasserstoff-Speicher	91
3.3.3	Latentwärmespeicher	93
	Literatur	94
4	Werkstoffe für Information und Kommunikation	95
4.1	Elektronik	95
4.1.1	Silizium-Halbleiter	96
4.1.2	Jenseits Silizium	99
4.1.3	Organische Elektronik	100
4.1.4	Nanoelektronik	103
4.1.5	Metalle: Kupfer vs. Aluminium	104
4.1.6	Lichtleiter	106
4.2	Speicher	109
4.2.1	Papier	109
4.2.2	Magnetspeicher: Bänder und Festplatten	109
4.2.3	CD und DVD	112
4.3	Displays	114
4.3.1	Flüssigkristall-Anzeigen (Liquid Crystal Display, LCD)	114

4.3.2	Leuchtdioden (Light Emitting Diode, LED) . . .	115
4.3.3	Elektrochrome Displays	117
	Literatur	118
5	Werkstoffe für Mobilität	119
5.1	Schuhe	119
5.2	Automobil	120
5.2.1	Stahl im Auto: immer fester, immer leichter . . .	121
5.2.2	Kunststoffe im Auto	124
5.2.3	Weitere Werkstoffe	127
5.3	Flugzeug	130
5.3.1	Metall-Leichtbau	130
5.3.2	Carbon-faserverstärkten Kunststoff (CFK) . . .	132
5.3.3	Kleben statt Schweißen	133
	Literatur	135
6	Qualitätssicherung – und was trotzdem passieren kann .	137
6.1	Wie Qualität entsteht	137
6.1.1	Qualitätssicherung und Akkreditierung	138
6.1.2	Qualitätsprüfung bei der Fertigung	139
6.1.3	Wie Qualität geprüft wird: Das Beispiel zerstörungsfreie Prüfung	140
6.2	Aus Schaden wird man klug	143
6.2.1	Wodurch werden Schäden verursacht?	144
6.2.2	Beispiele zur Schadensanalyse	145
6.2.3	Wie kann man Schäden vermeiden?	156
6.3	Betriebsbeanspruchungen können Eigenschaften ändern	157
6.3.1	Altern, Kriechen, Ermüdung	157
6.3.2	Verschleiß an Oberflächen	160
6.3.3	Einfluss der Umgebung	162
6.3.4	Erhalt der Funktionsfähigkeit	169
	Literatur	170
7	Werkstoffe in der Gesellschaft	171
7.1	Chancen und Herausforderungen	171
7.1.1	Werkstoffe sind keine Wunderstoffe	172

7.1.2	Entsorgung	173
7.2	Informationsquellen	175
7.2.1	Weiterführende Literatur	178
	Literatur	180
Sachverzeichnis		183

Zement ist einer der meistverwendeten Stoffe der Welt: Über eine Milliarde Tonnen davon werden jährlich produziert. Die Ausgangsmaterialien Kalkstein und Ton findet man überall. Für die Zementherstellung braucht man sehr viel Energie: Kalkstein muss gebrochen und gemahlen werden, er wird mit Ton vermischt und bei 1450 Grad Celsius gesintert und schließlich staubfein gemahlen. Das Gemisch aus Kalzium-, Silizium-, Aluminium- und Eisenoxiden als wesentlichen Bestandteilen wirkt als Bindemittel, das nach Zugabe von Sand und Anrühren mit Wasser durch chemische Reaktionen abbindet und steinhart wird. Schon heute wird die Zementherstellung für fünf Prozent des weltweiten Kohlendioxid-Ausstoßes verantwortlich gemacht: Die Hälfte des Kohlendioxid wird durch chemische Umwandlung aus dem Kalk freigesetzt. Die andere Hälfte ist dem Energieaufwand geschuldet, vor allem beim Brennen. Daneben werden u. a. Stickoxide und Schwefeloxid ausgestoßen. Und der weltweite Zementbedarf steigt weiter. Fast die Hälfte produziert und verbaut derzeit China. Zement ist mithin ein Beispiel für ein Material, das seit Jahrhunderten verwendet wird, allein mengenmäßig immer weiter an Bedeutung gewinnt – jedoch auch Herausforderungen aufwirft.

Zement wiederum wird zum größten Teil zur Herstellung von Beton gebraucht, dem meistbenutzten Baustoff der Welt. Neben dessen konstruktiven Eigenschaften, insbesondere der hohen Druckfestigkeit, sind die leichte Verarbeitbarkeit und die vielfältigen Gestaltungsmöglichkeiten ein großer Pluspunkt: Beton wird als wässrige Aufschlämmung aus Zement und einem Zuschlagstoff – meist Kies – als Flüssigkeit in die ge-



Abb. 1.1 Beim Bau des Deutschen Museums zu Beginn des 20. Jahrhunderts kam der damals neue Baustoff Stahlbeton zum Einsatz. (Bildrechte: Deutsches Museum)

wünschte Form gegossen und bindet innerhalb von Stunden ab. Zement ist im Beton also das Bindemittel, das die Gesteinskörnungen zusammen hält.

Im 19. Jahrhundert wurden Beton und Stahl, die beiden neuen Baustoffe des industriellen Zeitalters, miteinander verbunden: Zunächst ging

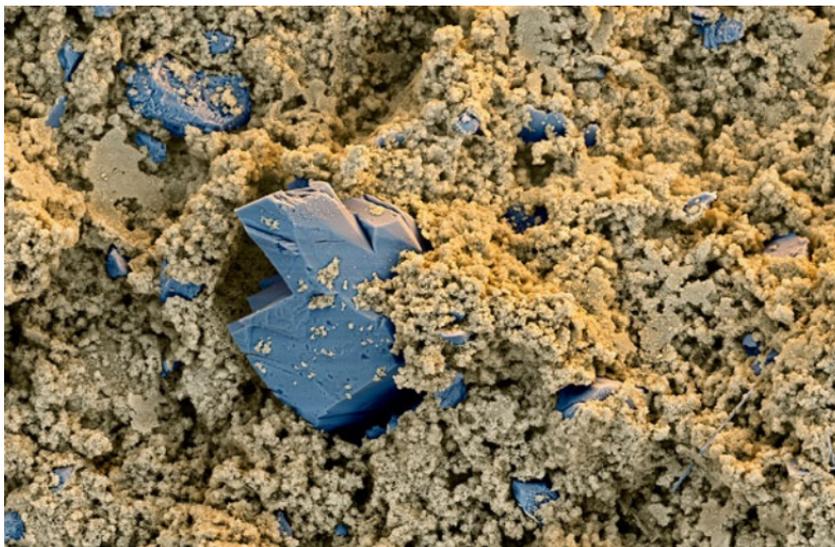


Abb. 1.2 Nanoskalige Kristallkeime lassen Beton schneller härten. Vergrößerung 960:1 (bei 12 cm Bildbreite). (Bildrechte: BASF)

es darum, mit Drahtgeflechten die Formgebung von Betonbauteilen zu erleichtern. Erst später hat man erkannt, dass die Verbindung von Beton und Stahl aus konstruktiver Sicht geradezu ideal ist: Stahl gibt dem Beton neben der guten Druckfestigkeit eine konstruktiv nutzbare Zugfestigkeit. Dank Stahlbeton können seit Beginn des 20. Jahrhunderts immer höhere und größere Bauwerke entstehen (Abb. 1.1).

Auch wenn Zement und Beton heute denkbar weit verbreitet sind, wird noch weiter an Verbesserungen gearbeitet: Um das Abbinden von Beton, das durchschnittlich rund zwölf Stunden dauert, zu beschleunigen, fügt man Kalzium-Silikat in Form nanoskaliger Kristallisationskeime hinzu (1 Nanometer = 1 Millionstel Millimeter). An diese Keime lagern sich beim Abbinden weitere Moleküle aus dem Zement an – die wachsenden Kristalle verdichten und verhaken sich zum kompakten Zementstein (Abb. 1.2) – der Prozess braucht nur noch die Hälfte der Zeit.

1.1 Was sind Werkstoffe?

Werkstoffe sind Materialien, aus denen sich technisch relevante Bauteile herstellen lassen. Ihre Eigenschaften sind dabei von der chemischen Zusammensetzung, dem mikroskopischen Aufbau, dem Herstellungsprozess, der konstruktiven Gestaltung des Werkstoffs und von der Betriebsbeanspruchung des jeweiligen Bauteils abhängig.

► Werkstoffe sind die Brücke vom Stoff zum Ding.

Werkstoffe bezeichnet man als *Konstruktions-* bzw. *Strukturwerkstoffe*, wenn vor allem ihre Eigenschaften wie Festigkeit, Verformbarkeit und Zähigkeit, aber auch Beständigkeit etwa gegen Korrosion im Vordergrund stehen. Werden elektrische, thermische, magnetische oder optische Eigenschaften gebraucht, spricht man von *Funktionswerkstoffen*.

„Zwei Drittel aller Technologie getriebenen Innovationen sind von Werkstoffaspekten abhängig. Insgesamt stehen mehr als 70 Prozent des Bruttosozialproduktes in westlichen Technologieländern direkt oder indirekt im Zusammenhang mit der Entwicklung neuer Materialien. In Deutschland erzielt der Bereich jährlich einen Umsatz von fast einer Billion Euro und beschäftigt rund 5 Millionen Menschen.“ [1] Tatsächlich wird die Entwicklung neuer Materialien international als Schlüsseltechnologie für viele industrielle Bereiche eingestuft und bereits seit vielen Jahren zu Recht als ein Schlüssel zu mehr Ressourceneffizienz und Umweltschutz gesehen [2].

Der Werkstoffkreislauf (Abb. 1.3) verdeutlicht die Etappen vom Material zum Produkt. In allen Etappen sind die ökologischen, ökonomischen und sozialen Faktoren zu berücksichtigen, die schließlich die Gesamtkosten des Produkts und seine Nachhaltigkeit bestimmen.

1.2 Materialwissenschaft und Werkstofftechnik

Die ersten Werkstoffe wie Holz, Ton oder Stein fand man noch in der Natur vor. Doch viele der heute gebräuchlichen Werkstoffe müssen in vielen Prozessschritten hergestellt werden. Jahrhundertlang wurde praktisch-handwerkliches Erfahrungswissen angesammelt, etwa zur Verhüttung

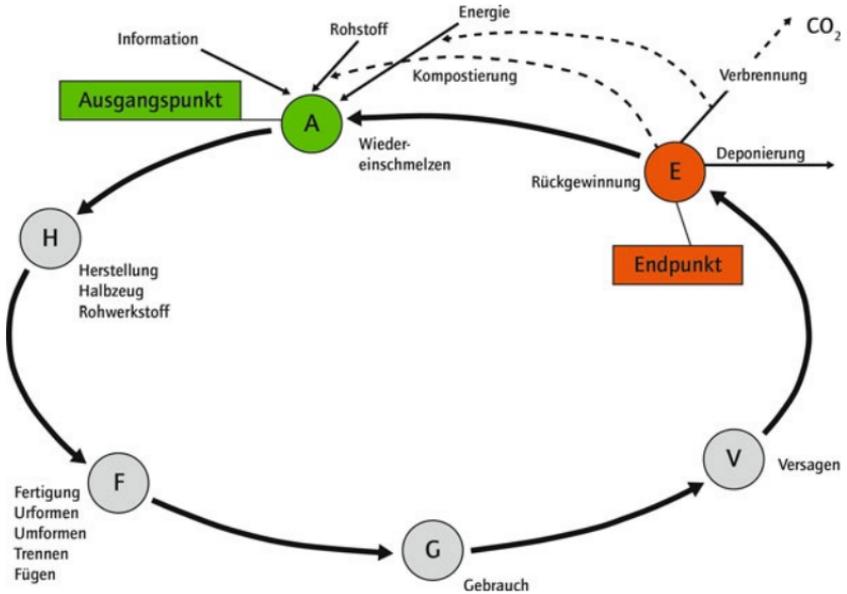


Abb. 1.3 Der Werkstoffkreislauf (Bildrechte: acatech/TU Darmstadt)

von Eisenerzen oder zur Glasfertigung. Im 17. und 18. Jahrhundert setzte die aus heutiger Sicht „wissenschaftliche“ Beschäftigung mit der Materie ein: Die mikroskopische Struktur wurde mit der Festigkeit von Materialien in Beziehung gesetzt, Werkstoffe wie Stahl und Glas wurden hinsichtlich ihrer Eigenschaften optimiert. In diesen systematisierten Formen der Material- bzw. Werkstoffforschung erkennt man jedoch rückblickend „weit voneinander getrennte, hoch spezialisierte Untersuchungsbereiche, praktiziert von völlig verschiedenen Trägergruppen wie ‚Maschinenkünstlern‘ und ‚Mühlenärzten‘, Künstler-Ingenieuren, Bergassessoren oder ‚gentleman scientists‘.“ [3] Prüf- und Messverfahren wie Mikroskopie, elektrische Widerstandsmessungen, chemische Spektralanalyse oder Röntgenbeugung, die ihren Ausgangspunkt jeweils im 19. Jahrhundert genommen hatten, gelten als wichtiger Beitrag der Physik zur Materialwissenschaft, die ansonsten eher von Chemie und Technik bestimmt war und ist.

Erst in der Mitte des 20. Jahrhunderts begann die Herausbildung einer Bezeichnung „Materials Science and Engineering“ bzw. – mit einigen

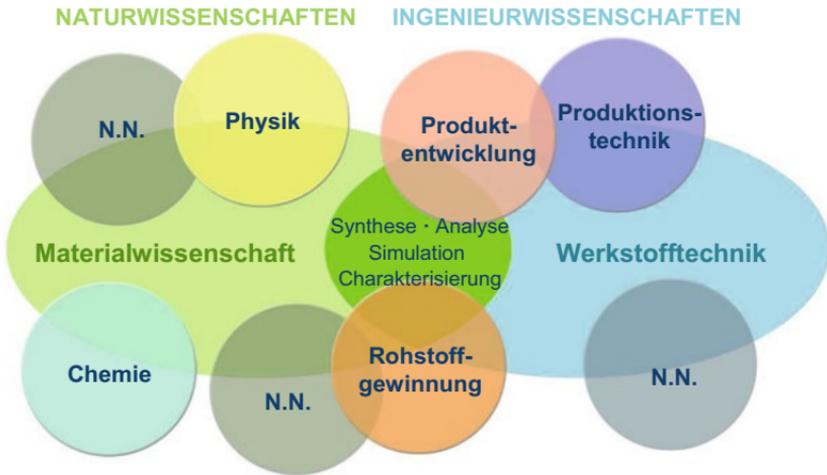


Abb. 1.4 Materialwissenschaft und Werkstofftechnik – und die beteiligten Disziplinen (Bildrechte: acatech)

Jahren Verzögerung in Europa und Deutschland – „Materialwissenschaft und Werkstofftechnik“. Zu beachten ist hier die jeweilige Verwendung des Singulars, der sich im Laufe der Zeit durchsetzte und die Entwicklung von einem Sammelsurium an Aktivitäten hin zu einer geeinigten, „kohärent gewordenen Disziplin“ [3] verdeutlichte (Abb. 1.4): „Mit dieser Namensgebung wird die Untrennbarkeit zweier Gebiete betont, deren Entwicklung in der Vergangenheit oft parallel verlief: die Materialwissenschaft, im Sinne des naturwissenschaftlich geprägten Studiums der Materialherstellung, der Materialstruktur und der Materialeigenschaften, und die Werkstofftechnik, d. h. die ingenieurwissenschaftlich orientierte Entwicklung von Werkstoffen sowie von Verarbeitungsverfahren aufbauend auf Erkenntnissen der Materialwissenschaft. Darüber hinaus treten im Sinne einer horizontalen Integration erstmals die Forschungsaktivitäten der verschiedenen Werkstoffe und Werkstoffklassen in Deutschland unter einer einheitlichen Bezeichnung auf.“ [4]

Materialwissenschaft und Werkstofftechnik ist denkbar vielfältig: Neben den „neuen“ Materialien und Werkstoffen ist hier auch die „ungeheure ‚Kärnerarbeit‘ der Werkstoffe im unspektakulären täglichen Umfeld“ [5] zu würdigen. Dazu gehört, dass neben Neuentwicklungen,

die mit Schlagwörtern wie „Nano“ oder „Intelligente Materialien“ zum Schillern gebracht werden, häufig die scheinbar unspektakulären, schrittweisen Verbesserungen zu wenig sichtbar sind.

► **Die Kette vom Material zum Produkt** „Wenn Chemie, physikalische Chemie und Physik sich mit Werkstoffen befassen, stehen das Studium der Synthese, der Mikrostruktur und der physikalischen Eigenschaften im Vordergrund. Diese Richtung wird häufig als [...], ‚Materialwissenschaft‘ bezeichnet. Die Werkstofftechnik, die auf den Ergebnissen [...] aufbaut und zum Produkt führen soll, entwickelt neue Werkstoffe für den Einsatz im Produkt sowie Fertigungstechniken, Formgebungs- und Fügeverfahren. Beide Gebiete, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, die sich bis heute oft ohne Verbindung nebeneinanderher entwickeln, lassen sich nicht trennen, wenn es auf optimale Eigenschaften des Werkstoffs für die Fertigung und das Produkt ankommt. Eine Lücke in der Kette vom Material bis zum Produkt muss sich stark verzögernd auf die Entwicklung und den Einsatz neuer Materialien auswirken“ [6].

Literatur

- [1] 10-Punkteprogramm zu Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 2010, <http://www.bmbf.de/press/2925.php>
- [2] Stärkung der universitären Materialforschung in NRW. Hrsg. Ministerium für Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen (1997)
- [3] K. Hentschel: Von der Werkstoffforschung zur Materials Science, N.T.M. 19 (2011), 5–40, hier S. 23.
- [4] acatech: Materialwissenschaft und Werkstofftechnik in Deutschland (acatech BEZIEHT POSITION – Nr. 3), Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2008, S. 9.
- [5] F.R. Heiker: „Wer sie nicht kannte, die Elemente ...“, in: H. Höcker (Hg.): Werkstoffe als Motor für Innovationen (acatech DISKUTIERT), Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2008, S. 13–19, hier S. 14.
- [6] H. Höcker: Einführung, in: H. Höcker (Hg.): Werkstoffe als Motor für Innovationen (acatech DISKUTIERT), Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2008, S. 9–12, hier S. 9.

Zusammenfassung

Die Vielfalt an Stoffklassen und Eigenschaften der Werkstoffe ergibt sich aus ihrem strukturellen Aufbau. Einer von mehreren Bestimmungsfaktoren ist die chemische Zusammensetzung. Daneben bestimmen beispielsweise auch der Gefügebau oder Gefügebesonderheiten wie z. B. Porenstrukturen die Eigenschaften und damit mögliche Anwendungen. Schließlich beeinflusst auch noch der Prozess der Herstellung der Werkstoffe und Bauteile deren Eigenschaften.

2.1 Vom Atom zum Werkstoff

2.1.1 Die atomaren Bausteine der Materialien und ihre Bindungen

Die gesamte Materie, also alles, was Raum beansprucht und Masse besitzt, besteht aus winzigen Teilchen, den Atomen. Das Größenverhältnis zwischen einem Tennisball und einem Atom ist etwa so wie dasjenige zwischen der Erde und dem Tennisball. Jedes Atom besteht aus einem positiv geladenen Kern und negativ geladenen Elektronen, die diesen

umgeben. Bei der Zusammenlagerung der Atome zu Molekülen und der Moleküle zu größeren Verbänden, die dann als Materialien spezifische Eigenschaften aufweisen können, spielen die Elektronen eine große Rolle.

Es gibt mehr als einhundert Atomsorten. Sie sind die Grundbausteine der Elemente. Die Anzahl an Protonen (der positiv geladenen Partikeln im Atomkern) bestimmt, um welches Element es sich handelt: Wasserstoff mit einem Proton, Kohlenstoff mit zwölf, Eisen mit 26, Quecksilber mit 80 Protonen. 94 Elemente kommen in der Natur vor, weitere 20 wurden künstlich erzeugt. Die Elemente sind im Periodensystem (Abb. 2.1) derart nach der Anzahl der Protonen angeordnet, dass in den Spalten Elemente mit ähnlichen Eigenschaften stehen. Links und in der Mitte stehen die Metalle, im rechten oberen Bereich die Nichtmetalle, dazwischen die sogenannten Halbmetalle.

Die Atome befinden sich in ständiger Bewegung. Im festen *Aggregatzustand* schwingen sie um ihre Ausgangslage, bei höherer Temperatur nehmen diese Bewegungen so stark zu, dass die Atome ihren angestammten Platz verlassen und durcheinander schwimmen können – der Stoff wird flüssig. Die Schmelztemperatur hängt von der Bindungsart ab (siehe unten): Wasser schmilzt bei 0 Grad Celsius, Wolfram als das höchstschmelzende Metall bei 3410 Grad.

Erhöht man die Temperatur noch weiter, wird die Geschwindigkeit der Teilchen noch weiter erhöht. Sie bleiben dann nicht mehr aneinander kleben, sondern fliegen unabhängig voneinander durch den Raum, bis sie mit anderen Teilchen kollidieren und wie Billardkugeln voneinander abprallen. Dies ist der gasförmige Aggregatzustand (Abb. 2.2). Für jedes Material gibt es spezifische Temperaturen für die Existenz bestimmter Aggregatzustände. Das Zustandsdiagramm beschreibt dies am Beispiel von Wasser. Es ist der äußere Druck in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt und die Linien stellen die Phasengrenzen der verschiedenen Aggregatzustände dar. Im Tripelpunkt befinden sich alle drei Phasen im Gleichgewicht. Es wird deutlich, wie sich durch Druckerhöhung der Bereich des gasförmigen Wassers – dem Wasserdampf – erweitern lässt.

Atome kommen in der Regel nicht isoliert vor. Zwei oder mehr Atome können sich zu Molekülen zusammenlagern und werden dann durch sogenannte *kovalente Bindungen* zusammen gehalten; Bindeglieder zwischen jeweils zwei Atome sind dann gemeinsame Elektronenpaare. Die