



Das Titelfoto von Klaus Sannemann visualisiert eine Entwicklung des Bremer Fraunhofer-Instituts für Angewandte Materialforschung (IFAM): Aufgeschäumt bei Temperaturen von 700° C wird Metall so leicht, daß es im Wasser schwimmt (s. auch S. 27/28).

Thomas Kretschmer · Jürgen Kohlhoff (Hrsg.)

Neue Werkstoffe

Überblick und Trends

Springer-Verlag

Berlin Heidelberg New York

London Paris Tokyo

Hong Kong Barcelona Budapest

Dr. rer. nat. Thomas Kretschmer
Dipl.-Phys. Jürgen Kohlhoff
Fraunhofer-Institut
für Naturwissenschaftlich-Technische
Trendanalysen (INT)
Appelsgarten 2
53881 Euskirchen

ISBN-13:978-3-642-93564-0 e-ISBN-13:978-3-642-93563-3
DOI: 10.1007/978-3-642-93563-3

CIP-Eintrag beantragt

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1995
Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1995

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

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Satz: Reproduktionsfertige Vorlage der Herausgeber
Einbandgestaltung: H. Struve & Partner, Heidelberg
SPIN: 10482945 60/3020 - 5 4 3 2 1 0 - Gedruckt auf säurefreiem Papier

Vorwort

Die Fähigkeiten im Umgang mit Werkstoffen gehören seit jeher zu den wesentlichen Merkmalen für die technologische Leistungsfähigkeit einer Volkswirtschaft. Darüber hinaus sind Werkstoffe auf mannigfaltige Weise mit der Arbeitswelt und den Lebensbedingungen der Menschen verknüpft. Praktisch alle nationalen und internationalen technologischen Zukunftsanalysen weisen diesem hochinnovativen Gebiet eine Schlüsselrolle im Spektrum der Technologien für das 21. Jahrhundert zu.

Zur umfassenden Analyse dieses Themenkomplexes hat der Ausschuß für Forschung, Technologie und Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestages im November 1992 das Büro für Technikfolgen-Abschätzung (TAB) beauftragt, ein TA-Projekt zum Thema "Neue Werkstoffe" durchzuführen. Die mehrteilige Untersuchung hat das Ziel, die wissenschaftlich-technischen, ökonomischen, ökologischen, juristischen, gesellschaftlichen sowie struktur- und forschungspolitischen Implikationen von Neuen Werkstoffen aufzuzeigen.

Im Rahmen dieses Projektes erhielt das Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen (INT) Anfang 1993 vom TAB den Auftrag, eine möglichst umfassende Darstellung der wichtigsten wissenschaftlich-technologischen Entwicklungslinien und -trends im Werkstoffbereich zu geben. Diese Studie wurde Anfang 1994 abgeschlossen und zusammen mit den anderen Teilgutachten des Projektes und dem Endbericht des TAB Mitte 1994 durch den Forschungsausschuß abgenommen.

Die Herausgeber halten wir es für sinnvoll, das vom INT angefertigte Gutachten, welches eine wertfreie Beschreibung der zukünftigen technologischen Möglichkeiten im Werkstoffbereich gibt, einer größeren Öffentlichkeit zugänglich zu machen. Aus dieser Absicht heraus ist das vorliegende Buch entstanden. Es besteht aus vier Teilen, die jeweils unterschiedliche Blickwinkel widerspiegeln, unter denen man die wissenschaftlich-technologischen Zukunftsaspekte des Werkstoffbereichs diskutieren kann.

Der einleitende Teil behandelt übergeordnete definitorische und technologische Aspekte des Themas. Insbesondere werden die unterschiedlichen Möglichkeiten

zur Kategorisierung von Werkstoffen diskutiert. Ferner wird die Vielzahl von Beziehungen zwischen Neuen Werkstoffen und den zukunftsreichsten Wissenschafts- und Hochtechnologiebereichen aufgezeigt.

Trotz aller neuartigen Ansätze wird der Materialbereich auch zukünftig entscheidend durch die evolutionären Fortschritte in den konventionellen Werkstoffklassen geprägt. Daher bildet der zweite Teil mit der Darstellung dieser Entwicklungslinien einen Schwerpunkt des Buchs. Hier werden zunächst die etablierten Werkstoffklassen der Metalle, Polymere, Keramiken und Gläser behandelt. Obwohl die Verbundwerkstoffe und Halbleitermaterialien noch relativ jung sind, werden sie aus dem Blickwinkel dieser Untersuchung ebenfalls zu den konventionellen Werkstoffen gezählt.

Der dritte Teil befaßt sich mit einer Reihe von besonders relevanten Entwicklungen, die sich weitgehend unabhängig von den konventionellen Werkstoffklassen vollziehen. Sie befinden sich derzeit noch größtenteils im Forschungsstadium. Hierzu zählen insbesondere die Konzepte der Nanokristallinen Werkstoffe und der sog. Intelligenten Strukturen und Materialien (Smart Materials).

Die in den ersten Teilen der Untersuchung dargestellten technologischen Entwicklungslinien orientieren sich an den einsatzrelevanten Eigenschaften von Werkstoffen. Ein wichtiger übergeordneter Trend in diesem Technologiefeld ist jedoch die zunehmend ganzheitliche Betrachtungsweise. Dieser integrale Ansatz bezieht möglichst alle Aspekte eines Werkstofflebens ein, das von Design und Entwicklung über Fertigung, Bearbeitung, Prüfung, Qualitätssicherung und Nutzung bis zu Recycling und Entsorgung reicht. Der abschließende Teil beschreibt eine Reihe zukunftsreicher Technologien aus diesen verschiedenen Materialzyklus-Phasen.

Die Breite des Untersuchungsfeldes machte es erforderlich, die Studie von Beginn an in verschiedene Arbeitspakete aufzuspalten und so eine parallele Bearbeitung zu ermöglichen. Zu einigen Fragestellungen wurden durch das INT in den letzten Jahren bereits vertiefte Einzeluntersuchungen durchgeführt, die aktualisiert und ergänzt werden mußten. Hinzu kommt eine Reihe von Themen, die weitgehend neu zu behandeln waren. Zu einigen Problembereichen wurden Einzelexpertisen durch externe Fachleute (weitgehend aus der Fraunhofer-Gesellschaft) angefertigt. Darüber hinaus konnten die meisten der durch das INT selbst bearbeiteten Themenbereiche von externen Fachleuten überprüft und abgesichert werden. Die Herausgeber danken allen diesen Beteiligten für die engagierte und konstruktive Mitwirkung, ohne die eine Untersuchung dieses umfangreichen Themas unmöglich gewesen wäre.

Trotz dieser Unterstützung war die Studie unter den gegebenen Bedingungen nur zu realisieren, weil das INT auf einer Reihe von Arbeiten aufbauen konnte, die im

Rahmen der Prognosetätigkeit des Instituts für das Bundesministerium der Verteidigung angefertigt wurden. Wir danken dem BMVg für die Genehmigung zur Verwendung solcher Ergebnisse für dieses Projekt des Deutschen Bundestages.

Weiterhin bedanken wir uns bei dem Ausschuß für Forschung, Technologie und Technikfolgenabschätzung und insbesondere Herrn Dr. M. Socher vom TAB für die Unterstützung und die gute Zusammenarbeit bei der Erstellung des Gutachtens sowie dem Deutschen Bundestag für die Genehmigung zur Veröffentlichung.

Unser besonderer Dank gilt den für Recherchen und Textverarbeitung verantwortlichen INT-Mitarbeiterinnen Siegrid Hecht-Veenhuis und Klara Engels sowie Herrn Siegfried Weniger für die wertvolle Unterstützung bei der Erstellung der Druckvorlage.

Euskirchen, September 1994

Thomas Kretschmer
Jürgen Kohlhoff

Inhaltsverzeichnis

1	Neue Werkstoffe - Übergeordnete Aspekte	1
1.1	Definitionen und Kategorisierungen	1
1.2	Wissenschaftlich-technologische Schlüsselstellung von Neuen Werkstoffen	4
	1.2.1 Wissenschaftliches Umfeld	5
	1.2.2 Technologisches Umfeld	9
2	Neue Entwicklungen in konventionellen Werkstoffklassen	17
2.1	Metalle	17
	2.1.1 Übergeordnete Aspekte	17
	2.1.2 Spezifische Fertigungsverfahren	19
	2.1.3 Strukturmetalle	23
	2.1.4 Funktionsmetalle	34
2.2	Polymere	37
	2.2.1 Übergeordnete Aspekte	38
	2.2.2 Spezifische Fertigungsverfahren	41
	2.2.3 Strukturpolymere	42
	2.2.4 Funktionspolymere	45
2.3	Keramiken	50
	2.3.1 Übergeordnete Aspekte	50
	2.3.2 Spezifische Fertigungsverfahren	53
	2.3.3 Strukturkeramiken	56
	2.3.4 Funktionskeramiken	60
2.4	Gläser	67
	2.4.1 Übergeordnete Aspekte	68
	2.4.2 Spezifische Fertigungsverfahren	69
	2.4.3 Massengläser	70
	2.4.4 Spezialgläser	71
2.5	Verbundwerkstoffe	74
	2.5.1 Übergeordnete Aspekte	75
	2.5.2 Fasern	78
	2.5.3 Polymer-Matrix	81
	2.5.4 Metall-Matrix	87

2.5.5	Keramik-Matrix/Kohlenstoff-Matrix	89
2.5.6	Neue Strukturkonzepte	91
2.5.7	Schichtverbundwerkstoffe	92
2.6	Halbleitermaterialien	93
2.6.1	Übergeordnete Aspekte	94
2.6.2	Silizium	95
2.6.3	Galliumarsenid	98
2.6.4	Sonstige Verbindungshalbleiter	100
2.6.5	Siliziumkarbid	103
2.6.6	Diamant	105
3	Neue innovative Werkstoffkonzepte	107
3.1	Gradientenwerkstoffe	107
3.2	Intelligente Werkstoffe und Strukturen	110
3.2.1	Übergeordnete Aspekte	111
3.2.2	Technologische Basiskomponenten	113
3.2.3	Anwendungspotential	118
3.3	Natürliche und Biomimetische Werkstoffe	120
3.4	Nanokristalline Werkstoffe	125
3.4.1	Charakterisierung und Eigenschaften	125
3.4.2	Spezifische Fertigungsverfahren	129
3.4.3	Verarbeitung	134
3.4.4	Anwendungspotentiale	136
3.5	Flüssigkristalline Werkstoffe	140
3.6	Molekulare sphärische Strukturen	143
4	Neue Entwicklungen bei Werkstofftechnologien	149
4.1	Werkstoffdesign und -entwicklung	149
4.2	Werkstofffertigung und -bearbeitung	154
4.2.1	Übergeordnete Aspekte	154
4.2.2	Oberflächentechnik/Beschichtungsverfahren	159
4.2.3	Lasergestützte Materialbearbeitung	167
4.2.4	Fügeverfahren	171
4.2.5	Trenn- und Zerspanungsverfahren	177
4.2.6	Weltraumforschung/-fertigung	181
4.3	Werkstoffprüfung und Qualitätssicherung	184
4.3.1	Übergeordnete Aspekte	184
4.3.2	Bruchmechanische Werkstoffprüfung und Schadensdiagnostik	187
4.3.3	Zerstörungsfreie Prüfung und Qualitätssicherung	189
4.4	Werkstoffrecycling und Entsorgung	194
4.4.1	Übergeordnete Aspekte	195
4.4.2	Recycling von Metallen	199
4.4.3	Kunststoff-Recycling	200

4.4.4 Recycling von Verbundwerkstoffen.....	205
4.4.5 Abfallaufbereitung und Endlagerung	207
4.4.6 Potentiale Neuer Werkstoffe aus ökologischer Sicht	208
Literaturverzeichnis	211
Sachverzeichnis	229

Mitarbeiterverzeichnis

Jürgen Kohlhoff

(Autor von Kap. 2.1, 2.2, 2.3, 2.5, 3.1, 3.5, 3.6, 4.1, 4.2, 4.3 und Gesamtreaktion)

Dr. Thomas Kretschmer

(Autor von Kap. 1.1, 1.2, 3.2, 3.3, Gesamtreaktion und Projektleitung)

Dr. Henner Wessel

(Autor von Kap. 2.6)

Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen (INT)
Appelsgarten 2, 53881 Euskirchen

Dr. Klaus Sebastian

(Autor von Kap. 2.4)

Dieter Sporn

(Autor von Kap. 3.4, Mitprüfung von Kap. 2.3 und 2.5)

Fraunhofer-Institut für Silicatforschung (ISC)
Neunerplatz 2, 97082 Würzburg

Prof. Dr. Winfried Morgner

(Autor von Kap. 4.3)

Fa. NSQ Hauk GmbH
Hohelooogstraße 16, 67065 Ludwigshafen

Dr. Adam Geißler

Dr. Karl-Friedrich Ziegahn

(Autoren von Kap. 4.4)

Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie (ICT)
Joseph-von-Fraunhofer-Straße 7, 76327 Pfinztal (Berghausen)

Joachim Bischoff

(Mitprüfung von Kap. 2.5)

Dr. Georg Krüger

(Mitprüfung von Kap. 2.2)

Fraunhofer-Institut für Angewandte Materialforschung (IFAM)
Neuer Steindamm 2, 28719 Bremen

Dr. Roland Diehl

(Mitprüfung von Kap. 2.6)

Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik (IAF)
Tullastraße 72, 79108 Freiburg

Dr. Mathias Herrmann

Dr. Andreas Krell

Claus Richter

Dr. Andreas Schönecker

Dr. Christian Schubert

(Mitprüfung von Kap. 2.3)

Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Sinterwerkstoffe (IKTS)
Winterbergstraße 28, 01277 Dresden

Prof. Dr. Heinz Zimmermann

(Mitprüfung von Kap. 2.2)

Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung (IAP)
Kantstraße 55, 14513 Teltow